



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Alexandra Almeida Fernandes

Reutilização de resíduos de construção e
demolição para o desenvolvimento de produtos
iminentemente mais sustentáveis

Fevereiro de 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Alexandra Almeida Fernandes

**Reutilização de resíduos de construção e
demolição para o desenvolvimento de produtos
iminentemente mais sustentáveis**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Doutor Vítor Manuel Couto Fernandes Cunha

Doutora Elisabete Rodrigues Teixeira

Fevereiro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contatar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-SemDerivações

CC BY-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Agradecimentos

Com todo o esforço envolvido na realização desta tese, não podia deixar de agradecer àqueles que me ajudaram com todo o seu apoio, dedicação e paciência para que eu conseguisse realizar com sucesso todo este trabalho.

Começando pela parte mais importante, quero agradecer aos meus pais por me terem proporcionado todas as condições ao estudo e conforto para a realização do mesmo. Por me terem dado tanto apoio nas alturas mais difíceis ao longo destes 5 anos de curso de mestrado integrado. Por meterem acalmado em tempos de maior desassossego e dado força para nunca desistir. Para sempre grata aos meus queridos pais.

Agradecer ao Doutor Vítor Cunha por todo o empenho e dedicação ao meu trabalho, por toda a atenção dada, por todas as indicações, partilha de ideias e aconselhamento do melhor caminho a seguir.

Agradecer à Doutora Elisabete Rodrigues por me ter conseguido ajudar a qualquer hora do dia, estar sempre pronta para me ajudar e tirar todas as minhas dúvidas, até aquelas que às vezes pareciam um bicho de sete cabeças e afinal não eram nada mais, nada menos, que umas “*simples contas de merceiro*”, como a professora dizia. Obrigada por me ajudar em todos estes altos e baixos da qual foi feita esta caminhada para a realização da minha tese de mestrado.

Queria igualmente agradecer à empresa dst – Domingos da Silva Teixeira S.A. pela bolsa de estudo atribuída, bem como pelo fornecimento dos materiais para a execução desta dissertação.

Por último, agradecer a todos os técnicos de laboratório do Laboratório de Estruturas e do Laboratório de Materiais de Construção que sempre se prontificaram a ajudar-me, proporcionaram-me as melhores condições e os melhores equipamentos para conseguir realizar toda a minha campanha experimental com sucesso. Um especial ao obrigado ao Sr. Gonçalves e ao Eng. Carlos.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A sustentabilidade da construção bem como a economia circular de materiais são temas que estão a ganhar relevo ao longo dos últimos anos. Cada vez mais as atividades de reconstrução, requalificação e reabilitação estão presentes no quotidiano. Nas diferentes atividades são geradas toneladas de resíduos, sendo o seu principal destino, os aterros sanitários. A deposição em aterro contribuiu para o aumento da poluição atmosférica, para o aumento das emissões de gases nocivos à saúde e para a contaminação dos solos e mares. Estando cientes desta realidade, surge a necessidade de criar materiais sustentáveis, em que a sua matéria-prima podem ser, por exemplo, resíduos de construção e demolição de obras de engenharia civil.

No trabalho desenvolvido foi estudada a possibilidade da utilização de resíduos de serrim e gesso cartonado, resultantes do setor da construção, para a criação de um produto com propriedades térmicas, com vista à sua aplicação em edifícios. Foram estudadas várias composições diferentes, variando a quantidade de resíduos de serrim e gesso, avaliando-se as suas propriedades em termos de resistências mecânicas (compressão e flexão), bem como propriedades térmicas. Foi feita uma análise de ciclo de vida às composições desenvolvidas, com o objetivo de avaliar o impacto ambiental do produto e fazer uma comparação com os valores dos impactos ambientais obtidos para produtos de isolamento térmicos tradicionais.

Palavras-Chave:

Resíduo; Serrim; Gesso; Resistência; Térmica; LCA

Abstract

Over the past years, the sustainability of construction, as well as the circular economy regarding materials are topics that are gaining prominence. More and more reconstruction, requalification and rehabilitation activities are present in everyday life. In the different commercial / industrial activities tons of waste are generated, being its main destination, landfills. Landfilling has contributed to the increase of atmospheric pollution, to the increase of gases emissions, which are harmful to health and to the contamination of the soil and seas. Being aware of this reality, the need to create sustainable materials arises, in which its raw material can be, for example, construction and demolition waste from civil engineering works.

In this work, it was studied the possibility of using sawdust and plasterboard waste, resulting from the construction sector, to create a product with thermal properties, with a view to its application in buildings. Several different compositions were studied, varying the amount of sawdust and gypsum waste, and their properties in terms of mechanical strengths (compressive and flexural) as well as thermal properties were evaluated. A life cycle analysis was performed on the compositions developed, in order to evaluate the environmental impact of the product and make a comparison with the environmental impact values obtained for traditional thermal insulation products.

Keywords:

Waste; Sawdust; Gypsum; Strength; Thermal; LCA

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE QUADROS.....	12
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. ENQUADRAMENTO	14
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2. Resíduos de Construção e Demolição.....	17
2.1. Histórico da valorização dos RCD	17
2.2. Definição e classificação dos RCD	18
2.2.1. Classificação segundo a origem, o tipo de material e o destino final.....	18
2.3. Produção e tipologia de RCD.....	19
2.3.1. Produção de RCD	19
2.3.2. Tipologia dos resíduos.....	20
2.4. Métodos de demolição	22
2.5. Toxicidade dos resíduos	24
2.5.1. Tintas, Vernizes e Materiais para Preservação de Madeiras.....	24
2.5.2. Materiais Plásticos e Colas Sintéticas	25
2.5.3. Materiais contendo amianto	26
2.6. RCD que podem ser reaproveitados, reciclados e/ou reutilizados	27
2.7. Enquadramento legal e normativo da gestão e valorização de RCD	29
2.7.1. Na Europa	29
2.7.2. Em Portugal.....	31
2.8. Aplicação de RCD	36
2.8.1. Gestão de RCD	37
2.8.1.1. Estados Unidos da América	37
2.8.1.2. União Europeia	38
2.8.2. Valorização e aplicação de RCD.....	38

2.8.2.1.	Blocos para construção.....	39
2.8.2.2.	Pavimentos rodoviários, obras rodoviárias e sistemas de drenagem.....	39
2.8.2.3.	Betão	41
2.8.2.4.	Design mobiliário	42
2.9.	Desenvolvimento de produtos com base em resíduos de gesso e serrim	42
2.9.1.	Gesso	42
2.9.2.	Serrim	43
2.10.	Análise do ciclo de vida	45
3.	Materiais e Métodos.....	47
3.1.	Materiais usados para a preparação das misturas	47
3.1.1.	Serrim	47
3.1.1.1.	Distribuição granulométrica do serrim	49
3.1.1.2.	Densidade do serrim.....	50
3.1.1.3.	Análise Termogravimétrica - TGA.....	51
3.1.2.	Água.....	52
3.1.3.	Gesso	53
3.1.3.1.	Distribuição granulométrica do gesso	55
3.1.3.2.	Densidade do gesso.....	56
3.1.3.3.	Análise Termogravimétrica - TGA.....	57
3.1.4.	Superplastificante	58
3.2.	Métodos	59
3.2.1.	Estudo preliminar.....	59
3.2.2.	Compósitos de serrim e resíduos de gesso cartonado.....	60
3.2.2.1.	Trabalhabilidade	62
3.2.2.2.	Ensaio mecânicos	63
3.2.2.2.1.	Resistência à flexão.....	63
3.2.2.2.2.	Resistência à compressão	65
3.2.2.3	Resistência térmica.....	66
3.3.	Procedimentos de ensaio	69
3.3.1.	Preparação dos compósitos	70

3.3.2.	Massa volúmica dos provetes de gesso e serrim.....	71
4.	Resultados experimentais.....	73
4.1.	Análise dos resultados da campanha preliminar	73
4.1.1.	Resistência à compressão.....	73
4.2.	Análise de resultados fase 1.....	74
4.2.1.	Ensaio no estado fresco- ensaio de espalhamento.....	75
4.2.2.	Ensaio no estado endurecido	76
4.2.2.1.	Resistência à flexão	76
4.2.2.2.	Resistência à compressão.....	78
4.3.	Análise de resultados fase 2.....	81
4.3.1.	Ensaio no estado fresco- ensaio de espalhamento.....	81
4.3.2.	Ensaio no estado endurecido.....	82
4.3.2.1.	Resistência à flexão	82
4.3.2.2.	Resistência à compressão.....	82
4.3.3.	Resistência térmica.....	84
5.	Análise de ciclo de vida - Metodologia e Resultados	88
5.1.	Alcance e objetivos	88
5.2.	Unidade funcional e fronteiras do sistema	89
5.3.	Análise de inventário.....	90
5.4.	Avaliação de impacto	91
5.4.1.	Normalização.....	92
5.4.2.	Agregação e avaliação global.....	92
5.5.	Resultados.....	93
6.	Conclusões.....	107
	Referências	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Quantidade de resíduos de construção e demolição produzidos na cidade de Dhaka	21
Figura 2 Composição de RCD em vários países.....	22
Figura 3 Principais países produtores de amianto- crisólito em 2008 [23]	27
Figura 4 Tijolo de plástico	39
Figura 5 - Pavês com agregados reciclados	40
Figura 6 Aplicação de RCD em obras rodoviárias	41
Figura 7 Mobiliário urbano com agregados reciclados	42
Figura 8 Serrim fornecido pela empresa DST	48
Figura 9 Peneiros utilizados para a distribuição granulométrica e agitador de peneiros utilizado	48
Figura 10 Serrim distribuído por diferentes tamanhos	48
Figura 11 Distribuição granulométrica do serrim do ensaio preliminar	49
Figura 12 Distribuição granulométrica do serrim da fase 1	50
Figura 13 Picnómetro com serrim e água destilada	51
Figura 14 TGA (1º gráfico) e DTA (2º gráfico) de uma amostra de serrim.....	52
Figura 15 Placa de gesso partida em frações mais pequenas	54
Figura 16 Equipamento de Los Angeles e o gesso com esferas, no interior do equipamento	54
Figura 17 Gesso após os 5 ciclos.....	54
Figura 18 Gesso moído.....	55
Figura 19 Gesso que passou no peneiro de 4 mm	55
Figura 20 Material retido no peneiro de 4 mm	55
Figura 21 Distribuição granulométrica do gesso fase 1	56
Figura 22 Picnómetro com gesso e água destilada	57
Figura 23 TGA (1º gráfico) e DTA (2º gráfico) de uma amostra de gesso.....	58
Figura 24 Colocação da mistura no interior do molde e extração do mesmo	62
Figura 25 Medição do espalhamento da mistura	63
Figura 26 Ensaio à flexão.....	64
Figura 27 Rotura do provete	64
Figura 28 Equipamento utilizado para ensaio à compressão.....	65
Figura 29 Ensaio de compressão realizado	66
Figura 30 Câmara fria (à esquerda) e câmara quente (à direita). No meio está situada a divisória para colocar o provete a ser ensaiado.	68
Figura 31 Anel de montagem do equipamento de ensaio de transmissão térmica.....	68

Figura 32 Dispositivos de ventilação na parede posterior da câmara fria.....	69
Figura 33 Termopar (à esquerda) e fluxímetro (à direita) colocado no provete.....	69
Figura 34 Misturadora utilizada.....	71
Figura 35 Total de moldes para cada dimensão e quantidade de serrim	71
Figura 36 Provetes desmoldados	71
Figura 37 Resistência à compressão da fase preliminar	74
Figura 38 Molde após as 15 batidas da mesa de espalhamento	76
Figura 39 Resistência à flexão.....	77
Figura 40 Resistência à compressão fase 1	79
Figura 41 Resistência à compressão obtida nos provetes ensaiados inicialmente à flexão	80
Figura 42 Resistência à compressão Fase 2.....	83
Figura 43 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: XPS	86
Figura 44 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: S10_GM90.....	86
Figura 45 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: S20_GM80.....	87
Figura 46 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: S10_G90	87
Figura 47 Estrutura da metodologia de MARS-SC para cada indicador de sustentabilidade ambiental [108].....	89
Figura 48 Processos considerados na análise ambiental para as diferentes composições dos provetes de serrim e gesso	89
Figura 49 – Processos considerados para a contabilização dos impactos ambientais. Exemplo de valores adotados na mistura S10_G90 (foto dos processos retirada diretamente do software SimaPro).....	94
Figura 50 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_G90.	95
Figura 51 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,75.	97
Figura 52 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,6.....	99

Figura 53 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_GM90.....	100
Figura 54 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S20_GM80.....	102

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 Tipo de resíduos produzidos em cada fase de uma obra de engenharia civil	19
Quadro 2 Procedimentos de escolha para o melhor método de demolição.....	23
Quadro 3 Tipos de demolição	23
Quadro 4 Agentes cancerígenos em tintas	25
Quadro 5 Identificação dos resíduos por etapas da obra e possível reaproveitamento	28
Quadro 6 (Continuação) Identificação dos resíduos por etapas da obra e possível reaproveitamento	29
Quadro 7 LER- Transcrição da norma europeia para a portuguesa.....	34
Quadro 8 Aplicações do gesso cartonado.....	43
Quadro 9 Aplicações do serrim	45
Quadro 10 Densidade do serrim	51
Quadro 11 Densidade do gesso	57
Quadro 12 Características técnicas do superplastificante utilizado.....	59
Quadro 13 Composição das misturas dos ensaios preliminares.....	60
Quadro 14 Composição utilizadas para a fase 1	61
Quadro 15 Composições utilizadas para a Fase 2	61
Quadro 16 Composições para o ensaio da resistência térmica	62
Quadro 17 Densidade dos provetes compósitos	72
Quadro 18 Resistência à compressão da fase preliminar.....	73
Quadro 19 Resultados do ensaio de espalhamento fase 1	75
Quadro 20 Resistência à flexão.....	77
Quadro 21 Resistência à compressão fase 1	78
Quadro 22 Resistência à compressão obtida nos provetes ensaiados inicialmente à flexão	80
Quadro 23 Resultados do ensaio de espalhamento fase 2.....	82
Quadro 24 Resultados da resistência à flexão da mistura intermedia	82
Quadro 25 Resistência à compressão fase 2.....	83

Quadro 26 Resumo dos valores de transmissão, resistência e condutividade térmica para os blocos compósitos	85
Quadro 27 Composições da fase 2 para ACV	88
Quadro 28 Resultados do inventário do material e dos inputs para o transporte para cada compósito (valores por 0,03 m ³ de compósito produzido)	91
Quadro 29 Indicadores, unidades e métodos de quantificação	92
Quadro 30 Peso de cada indicador ambiental [112]	93
Quadro 31 Impacto ambiental de cada matéria prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S10_G90	96
Quadro 32 Impacto ambiental de cada matéria prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,75	97
Quadro 33 Impacto ambiental de cada matéria-prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,6	99
Quadro 34 Impacto ambiental de cada matéria-prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S10_GM90	101
Quadro 35 Impacto ambiental de cada matéria-prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S20_GM80	103
Quadro 36 Valores obtidos para as diferentes categorias de impacto ambiental	103
Quadro 37 Valores normalizados para as categorias de impacto ambiental estudadas	104
Quadro 38 Valores normalizados que descrevem o perfil de sustentabilidade	105

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A sustentabilidade e a economia circular são conceitos cada vez mais importantes na sociedade atual. Estes conceitos estratégicos assentam na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, garantindo qualidade técnica nos produtos/serviços e um equilíbrio económico. Ao contrário, da economia linear, que assenta no conceito de fim-de-vida, a economia circular assenta na criação de novos fluxos de reutilização, restauração e renovação num processo integrado.

É sabido que, o setor da construção é responsável pela produção de uma grande quantidade de resíduos, sendo este um problema muito importante, quando se fala no desenvolvimento sustentável deste setor. Assim, e com vista ao desenvolvimento sustentável na atual construção, a reciclagem dos resíduos de construção, gerados nas fases de construção e demolição torna-se uma atividade fundamental. É por isso necessário, equacionar todo um processo de reaproveitamento para, no fim, obter um material que possa ser aplicado de novo na construção civil. Apoiando-se estes benefícios de índole ambiental na economia circular dos materiais e no objetivo fundamental, de reciclagem, reaproveitamento e reutilização dos materiais de construção e demolição, RCD [1].

Os resíduos gerados em maiores quantidades no setor da construção são o betão, a alvenaria, o aço e os plásticos [2]. Aquando, da demolição dos edifícios de construção são geradas toneladas de resíduos que, até há bem pouco tempo, tinham como destino final os aterros [1]. Desta forma, é clara a necessidade de estudar meios de reciclagem, reaproveitamento e reutilização desses materiais gerados pela desconstrução massiva. Numa primeira fase, o processo de triagem e classificação dos resíduos é fundamental, visto que permite separar, identificar e classificar os mesmos, segundo a LER - *Lista Europeia de Resíduos*, facilitando o processo de quantificação e estudo das propriedades dos mesmos. Devem ser classificados de acordo com a sua origem: i) Resíduos de construção; ii) Resíduos de reparação; iii) Resíduos de demolição; de acordo com o tipo de material; iv) Resíduos inertes; v) Resíduos não perigosos, de acordo com o destino final que lhes foi conferido; vi) Resíduos reutilizáveis; vii) Resíduos recicláveis; viii) Resíduos não recicláveis [5].

Os materiais estudados com vista ao desenvolvimento de uma solução iminentemente mais sustentável, que potencialmente providenciem isolamento térmico e boas propriedades mecânicas foram desenvolvidos com base em resíduos de serrim e o gesso cartonado, provenientes de empresas do grupo DST- Domingos da Silva Teixeira. A seleção dos referidos resíduos teve em conta a disponibilidade e quantidades geradas dos mesmos. Estes dois materiais são resíduos que são gerados na indústria da construção, em situações como, através da realização de mobiliário e limpeza do mesmo, enquanto o

gesso cartonado resulta da aplicação em paredes divisórias e gera sempre resíduo em grandes quantidades. Por este motivo, neste trabalho vai ser estudado o desenvolvimento de um produto sustentável para através da utilização destes resíduos como matéria-prima, com vista à criação de materiais com propriedades de isolamento térmico que possam vir a ser usados na construção civil.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um material compósito a partir dos resíduos de construção e demolição. É esperado um produto com propriedades térmicas e com resistências quer à compressão quer à flexão adequadas, com capacidade para ser aplicado em sistemas não estruturais, como por exemplo painéis divisórios ou acústicos.

Em particular, pretende-se avaliar o comportamento de dois resíduos de construção e demolição, o gesso cartonado e o serrim, com vista a formar um material mais sustentável, dando valor à economia circular dos materiais. Assim, foram estabelecidos objetivos específicos para este trabalho: i) estudar o comportamento do serrim com a introdução do gesso, fazendo variar o tempo de cura, a quantidade e dimensão do serrim, utilizando o superplastificante para melhorar a trabalhabilidade das misturas; ii) avaliação da trabalhabilidade das misturas; e iii) avaliação das propriedades mecânicas e térmicas dos novos materiais; iv) análise do ciclo de vida dos materiais desenvolvidos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em sete capítulos. Inicia-se por um capítulo introdutório onde é feito um enquadramento temático do tema em estudo, apresentado os objetivos a concretizar com a realização da dissertação e estrutura da mesma.

No capítulo 2 é apresentada a revisão do estado da arte sobre o tópico em estudo, por forma a ter um maior conhecimento de todo o ciclo de vida dos RCD, desde a sua produção (tipos, composição, quantidades) até à deposição final. Sendo igualmente apresentado, a toxicidade de cada resíduo e quais destes podem ser reaproveitados e/ou reciclados. Seguindo-se, a apresentação do enquadramento legal e normativo ao nível Europeu e Nacional, e de possíveis aplicações no quotidiano. Por último, foi feito e apresentado um estudo de dois materiais, o gesso e o serrim para o desenvolvimento de produtos com base nestes resíduos, uma vez que vão ser estes dois materiais a serem utilizados.

No capítulo 3 são apresentados todos os materiais utilizados e suas composições, os métodos e procedimentos utilizados na campanha experimental, quer ao nível da caracterização dos materiais e composição das misturas realizadas, quer ao nível da caracterização dos compósitos produzidos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados e sua análise. Seguindo-se o capítulo 5 onde é feita a análise do ciclo de vida do gesso e do serrim, em termos da avaliação dos impactos ambientais.

Por último, nos capítulos 6 e 7 são apresentadas as conclusões do trabalho e as referências bibliográficas que fundamentaram este estudo.

2. Resíduos de Construção e Demolição

O presente capítulo tem por objetivo realçar e discutir a problemática relativa à gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD). A gestão dos resíduos tem ganho destaque no caminho para um desenvolvimento e progresso sustentável, de acordo com o conceito de economia circular. Neste capítulo vai ser apresentada a situação atual na produção de resíduos de construção e demolição, seguindo-se a definição e classificação dos mesmos, sua dimensão, bem como os métodos de demolição e a toxicidade destes materiais, tendo em conta o enquadramento legal quer ao nível Europeu, quer ao nível nacional. Posteriormente, irão ser discutidas algumas das suas potenciais aplicações de reciclagem e/ou reutilização na indústria da construção civil.

2.1. Histórico da valorização dos RCD

A reciclagem de RCD tem início na Antiguidade [3], no entanto a sua grande produção e pouca utilização, hoje em dia, torna estes materiais um problema para a sustentabilidade do setor da construção civil. Alguns autores [1] afirmam que, a indústria da construção é capaz de gerar 20 a 30% de todos os resíduos depositados em aterros australianos. Outros afirmam, que dos resíduos depositados num típico aterro no Reino Unido, mais de 50%, podem ser resíduos de construção. Sabe-se também que, 26% da quantidade total de resíduos produzidos nos Países Baixos são resíduos de construção. Já nos EUA, 29% dos resíduos sólidos compreendem RCD. Outros estudos mostram que os resíduos de construção constituem 19% do total de resíduos depositados em aterros na Alemanha, assim como 13 a 15% do total de resíduos depositados em aterros em Helsínquia na Finlândia [1].

O conceito de desenvolvimento sustentável derivou da consolidação gradual dentro do quadro legislativo da União Europeia, na qual a construção e a habitação são consideradas as mais suscetíveis de cumprir os objetivos estabelecidos porque a geração de resíduos deste sector é desproporcionadamente elevada. A maior parte dos países pertencentes à União Europeia procura recursos que provêm de projetos de construção. O maior fluxo de resíduos provém de construções intensivas, representando 82,7% de todos os resíduos produzidos por atividades económicas [4], e 48% do total de resíduos na Europa dos 15, UE-15. Uma vez que a taxa de construção e reabilitação na União Europeia, UE, vai aumentar progressivamente, um dos maiores desafios enfrentados pela recente Diretiva da UE sobre resíduos é tornar a população numa *"sociedade de reciclagem"* [5] .

2.2. Definição e classificação dos RCD

A palavra “resíduo”, pelo “*The Waste Framework Directive 2008/98/EC*”, define-se como qualquer que seja a substância ou objeto em que o titular descarta ou tem intenção de reutilizar [6]. No que diz respeito aos RCD, os resíduos resultam como o próprio nome indica da construção, reabilitação e demolição de edifícios, pontes, estradas, entre outras estruturas e infraestruturas. Os materiais característicos destas obras de engenharia são: asfalto, madeira, metal, gesso cartonado, solo, plásticos resultantes da embalagem dos materiais, assim como papel [2]. Compreendem também, solos e rochas que resultam dos movimentos de terras, desde que estes não contenham substâncias perigosas. Sabe-se que os RCD apresentam características específicas, uma vez que derivam de diferentes soluções, apresentam diferentes constituintes quantidades de material. A sua composição é variada, pois depende dos materiais e das técnicas de construção/inação aplicadas, que são função da época a que pertencem. Constitui tudo o que é usado na indústria da construção, por exemplo: em betão; paredes; telhas e vinil. De acordo com a CDRA - *Construction and Demolition Recycling Association*, os detritos gerados em 2015, foram mais de 583 milhões de toneladas [7].

2.2.1. Classificação segundo a origem, o tipo de material e o destino final

Os resíduos de construção e demolição podem ser classificados de variadas formas, no entanto, para efeitos legais devem ser classificados em concordância com a lista Europeia de Resíduos (LER) [5]. Esta lista foi criada para homogeneizar e facilitar a identificação dos distintos resíduos. Nesta lista, os RCD pertencem ao Capítulo 17, e são classificados pelo código 170000, em que os últimos 4 dígitos variam de acordo com o tipo de RCD em questão [5].

Os resíduos, de acordo com a sua origem, podem ser classificados como [5]: i) Resíduos de construção – resíduos que provêm de obras novas de construção de edifícios e infraestruturas; ii) Resíduos de reparação – resíduos consequentes de obras de remodelação e reparação de edifícios e infraestruturas; iii) Resíduos de demolição – resíduos que provêm de obras de demolição de edifícios ou infraestruturas. Por sua vez, de acordo com o tipo de material que os constitui, os resíduos podem ser classificados como [5]: i) Resíduos inertes – terras, argamassas, tijolos, telhas, alvenaria, etc.; ii) Resíduos não perigosos – embalagens diversas, plásticos, madeiras, metais, vidros, etc.; iii) Resíduos perigosos – óleos usados, latas de tintas e solventes, amianto, entre outros. Por fim, os resíduos também podem ser classificados de acordo com o destino final que lhes conferido, designadamente podem ser classificados como [5]: i) Resíduos reutilizáveis – resíduos que podem ser reutilizados diretamente no local da obra ou noutras; ii) Resíduos recicláveis – resíduos que podem ser reciclados; iii) Resíduos não

recicláveis – resíduos que, devido às características ou por se encontrarem contaminados, não podem ser reciclados.

2.3. Produção e tipologia de RCD

O processo de caracterização dos RCD é uma etapa importante, porque permite identificar e quantificar os resíduos de forma a otimizar o planeamento qualitativamente e quantitativamente na redução, reutilização, reciclagem até ao seu destino final [8].

2.3.1. Produção de RCD

O primeiro passo, na caracterização dos RCD, consiste na determinação da função inicial do material até chegar a resíduo. No Quadro 1 apresentam-se os resíduos produzidos durante várias fases da obra, assim como a proveniência [8].

Quadro 1 Tipo de resíduos produzidos em cada fase de uma obra de engenharia civil

Fases de obra	Tipos de resíduos possivelmente gerados
Limpeza do terreno	Solos
	Rochas, vegetação, Galhos
Montagem do canteiro	Blocos cerâmicos, betão (Areia; Brita)
	Madeiras
Fundações	Solos
	Rochas
Superestrutura	Betão (Areia; Brita)
	Madeira
	Sucata de ferro, formas plásticas
Alvenaria	Blocos cerâmicos, blocos de concreto, argamassa
	Papel, plástico
Instalações hidro sanitárias	Blocos cerâmicos
	Pvc
Instalações elétricas	Blocos cerâmicos
	Condutas, mangueira, fio de cobre
Reboco interno/externo	Argamassa

Quadro 1 (Continuação) Tipo de resíduos produzidos em cada fase de uma obra de engenharia civil

Revestimentos	Pisos e azulejos cerâmicos
	Piso laminado de madeira, papel, papelão, plástico
Forro de gesso	Placas de gesso cartonado
Pinturas	Tintas, seladoras, vernizes, texturas
Coberturas	Madeiras

2.3.2. Tipologia dos resíduos

Nos resíduos resultantes de obras de engenharia civil, quer de construção quer de demolição, encontram-se um misto de materiais, por exemplo: betão, revestimentos e outros elementos de utilização reduzida [9].

A U.S. Environmental Protection Agency [10] e outros autores, expõem que em média 85% dos resíduos de construção e demolição são constituídos por betão, alvenaria e cerâmica, podendo conter também outros materiais como por exemplo madeira e gesso, sendo considerados como materiais heterogêneos que dependem da sua origem. A maioria dos resíduos provêm de materiais escavados, quando excluída esta fração. Se, num conjunto de resíduos de construção e demolição, os materiais escavados forem excluídos, então cerca de 300 milhões de toneladas de RCD foram gerados em estaleiros europeus [11].

Mália et al. [12] afirma que a composição dos RCD varia largamente consoante a tipologia de obra, por exemplo, na construção rodoviária são geradas grandes quantidades de materiais escavados, pelo que se não for possível proporcionar-lhes outro uso, resultarão em resíduos. Por outro lado, as demolições de estruturas de construção originarão resíduos cerâmicos, alvenarias madeiras, entre outros. A heterogeneidade da construção, tanto em materiais como técnicas construtivas, não permite a padronização de níveis de consumo fiáveis em materiais de construção ou até mesmo nas taxas de produção de resíduos per capita, por trabalho ou por área de piso.

Na Figura 1 apresenta-se a quantidade de resíduos de construção e demolição produzidos na cidade de Dhaka, bem como a sua composição e contribuição [13].

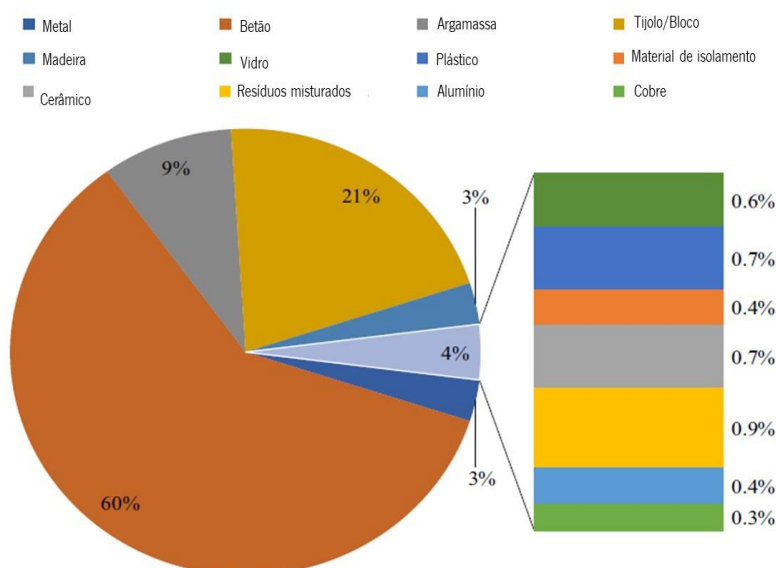


Figura 1 Quantidade de resíduos de construção e demolição produzidos na cidade de Dhaka

Na Figura 2 é feita uma análise comparativa entre o Bangladesh e outros países desenvolvidos, observa-se que 3% dos RCD é composto por metais. Por outro lado, na China abrange cerca de 7%, já nos EUA apresenta um rácio inferior a 1%. Maioritariamente, os edifícios contemporâneos no Bangladesh são em betão armado e por isso utilizam principalmente aço. Aquando da demolição deste tipo de edifícios originam grandes quantidades de inertes como betão, argamassa, tijolo e blocos, contribuindo em cerca de 70-85% do peso total no Kuwait [13], na Noruega [14] e nos EUA [2]. Por outro lado, os resíduos cerâmicos são considerados como desperdício inerte e a percentagem destes para Espanha, Portugal e China será, respetivamente, 91%, 96% e 87% [12]. Estas variações de percentagem refletem a diversidade de materiais de construção e estruturas utilizadas nos diferentes países. 21ochrane t al. [2] indicam, para os EUA, que a quantidade de betão ascende os 79,6%, cerca de 4 vezes mais à quantidade madeira, sendo que esta ronda os 20,4%. É visível na Figura 2, que em comparação com outros países, a maior fração de cerâmica é observada em Espanha. Sendo este fenómeno explicado pelo facto, os materiais tradicionais como a cerâmica serem muito utilizados aquando da construção de edifícios neste país [15]. A Noruega tem um clima frio, uma vez que, é situada no Norte da Europa, e tem uma ampla variedade de florestas, resultado disso, é a quantidade de madeira utilizada para a construção de habitações [16].

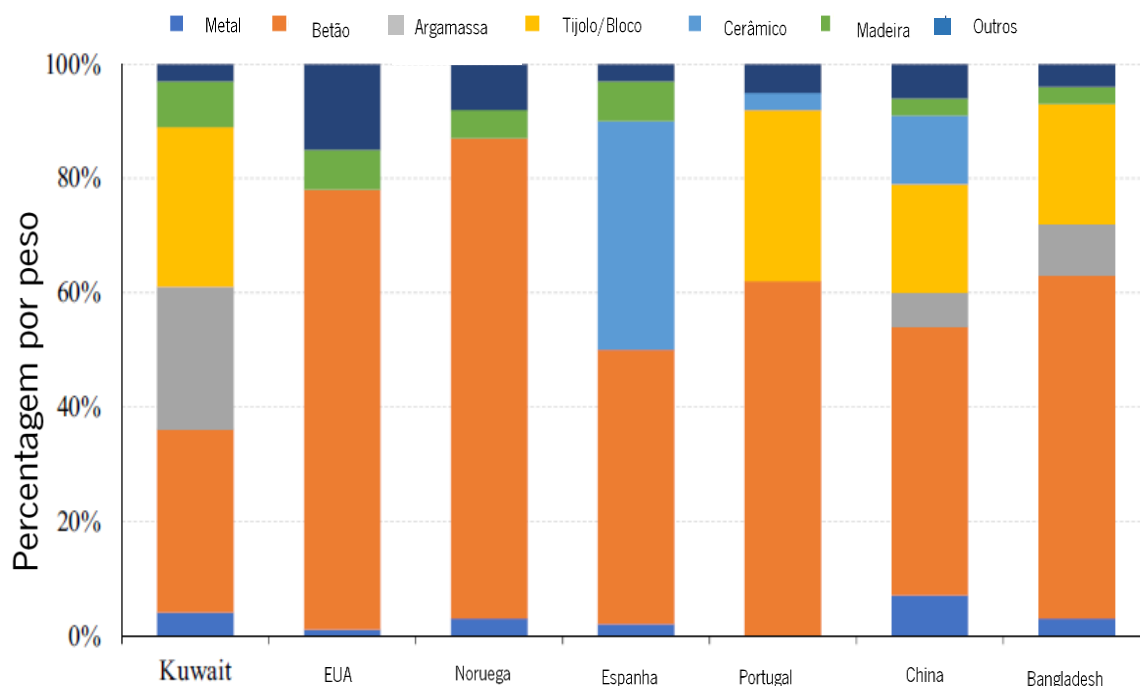


Figura 2 Composição de RCD em vários países

2.4. Métodos de demolição

A desconstrução ou demolição de um edifício, consiste no desmantelamento de forma cuidada destes, por forma a possibilitar a recuperação de materiais e elementos da construção, dando ênfase à questão da reutilização e reciclagem dos materiais. O conceito de demolição surge devido à evolução do crescimento da demolição de edifícios e da preocupação com o meio ambiente. De maneira que, a demolição permitiu enfatizar o processo de valorização e reutilização dos materiais e elementos da construção, de outra forma seriam depositados e tratados como resíduos em locais, por vezes não permitidos a depósito destes [17]. As alternativas para demolição de uma edificação são várias, como é possível observar no Quadro 2. O processo de escolha do método que melhor se adequa deve ser analisado e valorizado segundo um conjunto de fatores, tais como condicionalismos locais, tipo de obra, volume a demolir, prazo de execução, segurança e preservação do ambiente, conforme apresentado no Quadro 2 [18].

Quadro 2 Procedimentos de escolha para o melhor método de demolição

<i>Condicionalismos locais</i>	espaço disponível, edificações confinantes, acessibilidades, localização da obra e legislação vigente
<i>Tipo de obra</i>	estrutura da edificação, materiais utilizados na sua construção, zonas a demolir, morfologia e altura da edificação e necessidade de utilização de contenções periféricas
<i>Volume a demolir</i>	fator determinante para definição do equipamento a utilizar
<i>Prazo de execução</i>	
<i>Segurança</i>	avaliação dos riscos de acidente associados à natureza dos trabalhos de demolição
<i>Preservação do ambiente</i>	

Após a análise dos fatores acima apresentados, pode ser designado qual o método de demolição mais viável (Quadro 3) [18].

Quadro 3 Tipos de demolição

<i>Tipos de demolição</i>	com ferramentas manuais
	com martelos hidráulicos e pneumáticos acoplados a escavadoras
	com tesouras, pinças e esmagadoras hidráulicas acopladas a escavadoras
	com ariete de impacto
	por tração ou empuxe
	por fratura provocada por equipamento mecânico ou cimento expansivo
	por corte e perfuração mecânicos
	com corte a água (hidro demolição)
	com utilização de lança térmica
	por explosão controlada

2.5. Toxicidade dos resíduos

No início da história das construções, contruíam-se as estruturas, que serviam de base para habitação, com materiais naturais recolhidos diretamente da natureza. Com a evolução tecnológica das técnicas construtivas e dos materiais de construção, as estruturas contemporâneas são feitas utilizando um combinado de materiais produzidos através de múltiplas matérias-primas, os quais possibilitam a realização de grandes obras de engenharia. Para obras de grande dimensão, com características e propriedades especializadas, é evidente a necessidade da utilização de materiais que englobem elevadas quantidades de produtos químicos e metais pesados. Estes compósitos podem provocar infimos problemas de saúde, desde problemas cardíacos, digestivos, a distúrbios do sistema nervoso, podendo até mesmo provocar cancro dos pulmões [19].

Assim, é necessário avaliar as características de perigosidade dos resíduos (H1-H141), segundo os termos da Portaria nº 209/2004 de 3 de março, assim como o valor da concentração das substâncias perigosas [19]. Conforme o que se encontra definido no Decreto-Lei Nº 183/2009 de 10 de agosto, os resíduos são depositados em aterro conforme o disposto que institui o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro. Este prevê três tipos de aterros distintos: um para resíduos inertes, outro para resíduos não perigosos e um terceiro para resíduos perigosos. A aceitação dos resíduos em cada um dos tipos de aterro referenciados, dependente da verificação de limites em termos do ensaio de lixiviação [19].

O conceito toxicidade abrange diversos tipos de materiais tais como: tintas, vernizes e materiais para preservação de madeiras; materiais plásticos e colas sintéticas; materiais com substâncias radioativas e materiais contendo amianto [19].

2.5.1. Tintas, Vernizes e Materiais para Preservação de Madeiras

As tintas e vernizes, bem como materiais para preservação de madeiras, encontram-se em exposição direta e diária, decorrente da presença no interior das habitações de materiais com algum grau de toxicidade [19]. Para além da libertação de compostos orgânicos voláteis (COV), sendo estes prejudiciais para a saúde e o meio ambiente, as tintas e vernizes podem conter ainda metais pesados com alto poder cancerígeno. No Quadro 4 é possível observar exemplos desses metais bem como a sua origem [19].

Quadro 4 Agentes cancerígenos em tintas

Agentes cancerígenos	Fonte
Crômio	Primários, Tintas
Cádmio	Pigmentos
Benzeno	Solventes
Cloreto de metileno	Decapantes
Estireno	Solventes orgânicos
Níquel	Pigmentos
Chumbo	Primários, secantes, pigmentos

2.5.2. Materiais Plásticos e Colas Sintéticas

Os derivados de petróleo, como por exemplo os materiais plásticos, representam atualmente uma fração substancial dos materiais utilizados pela construção. É de conhecimento geral, que estes são obtidos através de uma reação química de polimerização de monómeros, formando longas cadeias que dão origem ao produto final, o plástico. [9].

Segundo o congresso brasileiro de educação em engenharia [20], existem 3 categorias de plásticos: os termoplásticos, os termofixos e os termoendurecíveis. Os termoplásticos necessitam de calor para serem deformados, no entanto não carecem de temperaturas elevadas, pois podem causar degradação ou até mesmo decomposição. Em teoria, podem sofrer aquecimento e arrefecimento várias vezes, e ainda assim moldados de novo, tendo como vantagem a conservação das suas propriedades. Os mais conhecidos são o policloreto de vinilo, o polietileno, o polipropileno e o poliestireno [20].

Os termofixos, inicialmente são moldados com a forma que se pretende no final e depois são endurecidos. Aquando da sua criação, é adicionado um composto que forma uma massa estável, sendo que não pode ser amolecida de novo, pelo que se pode degradar ou decompor. Têm como características, a rigidez, a fragilidade e os silicones. Os mais conhecidos são a baquelite (fenol formaldeído), a ureia formaldeído, o dracon (poliéster), a resina alquídica, a resina epóxi e as melaminas [20].

Por último, os elastômeros são polímeros que podem ser solicitados com elevadas deformações sem que se deformem permanentemente, isto é, podendo assim recuperar a sua forma inicial sem que se verifiquem deformações plásticas. Os elastômeros mais utilizados são o neoprene (policloropreno), o butyl (isobutileno-isopreno) o teflon e o viton (politetrafluoretileno) o tiokol (polissulfeto) o SBR (estireno-butadieno), o adiprene (poliuretanopolisiloxano) e o hypalon (polietileno clorossulfanado) [20].

Segundo Peltonen et al. [20] e Tsai [21], as colas sintéticas são produtos utilizados na construção para diversas finalidades, desde a colagem de lamelados de madeira, à colagem de materiais impermeabilizantes, ou até mesmo à reabilitação de estruturas de betão. Podem ter na sua composição

epóxi, melamina-urea-formaldeído, fenol ou solventes orgânicos. As colas à base de epóxi são materiais tóxicos e os trabalhadores expostos diretamente a estes podem sofrer de eczemas e dermatites, no pior dos casos pode originar cancro [20], [21].

Zhang et al. [22] afirma que os produtos que constituem a melamina-ureia-formaldeído são igualmente tóxicos. As colas à base de solventes orgânicos, segundo Heuser et al. [23], apresentam um perigo elevado [22], [23].

2.5.3. Materiais contendo amianto

“Asbestos” é outra designação para as fibras de amianto, que deriva de um termo grego para um material incombustível. Fundindo esta propriedade com a elevada resistência à tração, facilidade para ser tecida e baixo custo (entre outras), proporcionou o uso vulgar destas fibras na indústria da construção. Para além das propriedades já apresentadas ainda se pode aliar um ótimo isolante térmico e antifogo. É utilizado principalmente na produção de painéis de fibrocimento. O amianto contém fibras minerais com um comprimento de 5 μm e diâmetro inferior a 3 μm , e pertencem ao grupo da Serpentina (crisólito) ou do grupo das Anfíbolos (actinolite, grunerite (amosite), antofilite, aracidolite e tremolite). Na Figura 3, é visível que o amianto- crisólito continua a ser explorado em muitos países. Embora a Europa tenha aprovado o regulamento que visa a proibição da exploração, devido às propriedades cancerígenas [24].

Foi a partir da década de 60, e depois do aparecimento de várias doenças de profissionais, que vários estudos concluíram a relação entre estas patologias e a exposição direta ao amianto. Apenas na década de 80 e com a definição dos riscos para a saúde dos trabalhadores expostos diretamente ao amianto, através do acordo da Diretiva 83/477/CEE, teve-se em consideração de forma mais assertiva a perigosidade do amianto [24].

Este material, devido à sua perigosidade, foi sujeito a investigações por parte da comunidade científica, que permitiram concluir que todas as fibras de amianto eram potencialmente cancerígenas. Provocam lesões do tecido pulmonar, cancros do pulmão, do foro gastro intestinal dos rins e da laringe. Devido a este facto, foi criada uma diretiva, a Diretiva 2003/18/EC, que proibiu a extração das fibras de amianto e a sua utilização [24].

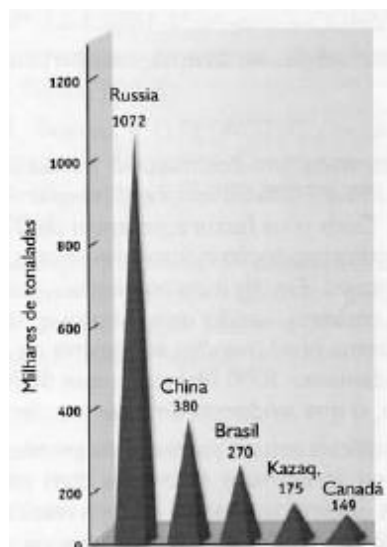


Figura 3 Principais países produtores de amianto- crisólito em 2008 [23]

2.6. RCD que podem ser reaproveitados, reciclados e/ou reutilizados

O aumento progressivo do consumo de recursos naturais, resultado da produção de RCD, bem como o desenvolvimento de técnicas construtivas e de materiais da construção, leva a preocupações de carácter ambiental e económica. Produto disso, é evidente a necessidade de idealizar soluções para promover a eficiência ecológica na construção, proporcionar a reutilização dos RCD, dando a este ponto uma especial importância [25]. No passado, o aproveitamento dos resíduos regia-se por critérios de carácter qualitativo, como por exemplo: textura, forma, granulometria, cor, capacidade de aglutinar; sem tomar em consideração qualquer investigação que pudesse fornecer dados sobre características, não obtendo factos que explicassem o seu comportamento ao longo do tempo.

Os resíduos de construção e demolição produzidos nas várias etapas da construção devem ser reconhecidos de maneira vantajosa proporcionando a sua reciclagem e reutilização em processos construtivos e minimização da sua produção [9]. No Quadro 5 apresenta-se uma possíveis soluções para a reutilização dos RCD em obra [8].

Quadro 5 Identificação dos resíduos por etapas da obra e possível reaproveitamento

FASES DA OBRA	TIPOS DE RESÍDUOS POSSIVELMENTE GERADOS	POSSÍVEL REUTILIZAÇÃO NO CANTEIRO	POSSÍVEL REUTILIZAÇÃO FORA DO CANTEIRO
Limpeza do terreno	Solos	Reaterros	Aterros
	Rochas, vegetação, galhos	-	-
Montagem do canteiro	Bolcos cerâmicos de concreto (areia, brita)	Base de piso, enchimentos	Fabricação de agregados
	Madeiras	Formas/Escoras/ Travamentos (gravatas)	Lenha
Fundações	Solos	Reaterros	Aterros
	Rochas	Jardinagem, muros de arrimo	-
Superestrutura	Concreto (areia, brita)	Base de piso, enchimentos	Fabricação de agregados
	Madeira	Cercas, portões	Lenha
	Sucata de ferro, formas plásticas	Reforço para contra pisos	Reciclagem
Alvenaria	Blocos cerâmicos, Blocos de concreto, argamassa	Base de piso, enchimentos, argamassas	Fabricação de agregados
	Papel, plástico	-	Reciclagem

Quadro 6 (Continuação) Identificação dos resíduos por etapas da obra e possível reaproveitamento

Instalações elétricas	Blocos cerâmicos	Base de piso, enchimentos	Fabricação de agregados
	Papel, plástico	-	Reciclagem
Instalações hidro sanitárias	Blocos cerâmicos	Base de piso, enchimentos	Fabricação de agregados
	PVC; PPR	-	Reciclagem
Reboco interno/externo	Argamassa	Argamassa	Fabricação de agregados
Revestimentos	Pisos e azulejos cerâmicos	-	Fabricação de agregados
	Piso laminado de madeira, papel, papelão, plástico	-	Reciclagem
Forro de gesso	Placas de gesso cartonado	Readequação em áreas comuns	-

2.7. Enquadramento legal e normativo da gestão e valorização de RCD

No ano de 2002, o Japão foi dos primeiros países a implementar a política regulamentar dos resíduos de construção e demolição. Não recorrendo à taxação de aterros, as empresas de demolição são obrigadas não só a separar as diferentes composições, como por exemplo o betão, madeira, asfalto, entre outros, assim como foram também obrigadas a depositar esses materiais nas indústrias de reciclagem [17]. Com o objetivo de consensualizar o tema da reutilização de resíduos entre os vários países, têm sido organizados vários encontros e congressos. Foram desenvolvidas normalizações para a utilização de agregados reciclados, bem como de outros materiais, suscetíveis de serem reciclados e reutilizados [26].

2.7.1. Na Europa

Tendo sempre como objetivo principal a proteção do ambiente dos diversos impactes negativos, foram implementadas várias diretivas europeias. Estas tentam gerir os problemas gerados pelas diversas atividades e indústrias.

Na década de 70, na Europa, as bases para a gestão dos resíduos foram estabelecidas pela Diretiva n.º 75/442/CEE, de 15 de julho, pela antiga CEE - Comunidade Económica Europeia.

Posteriormente, foi elaborada a Diretiva n.º 78/319/CEE, de 20 de março. O propósito destas diretivas era aproximar os Estados Membros, no que concerne a eliminação de resíduos perigosos e tóxicos [26].

Continuamente, o máximo grau de proteção ambiental foi estabelecido pelos Planos de Gestão dos Resíduos, sendo estes executados pelas respetivas autoridades competentes. São designados pelos Estados membros através da permuta das Diretivas n.º 91/156/CEE, de 18 de março, e 91/689/CEE, de 12 de dezembro para o direito dos mesmos. Posto isto, são evidentes as várias categorias de resíduos e respetivos procedimentos de eliminação, aclarando medidas com o objetivo de melhorar a gestão de resíduos perigosos e as condições de eliminação [26].

Em seguida é aprovado o CER- Catálogo Europeu de Resíduos, pela Diretiva n.º 94/3/CE, de 20 de dezembro, e a Lista de Resíduos Perigosos pela Diretiva n.º 94/904/CE, de 22 de dezembro. Posteriormente, anulam-se pela implementação da Diretiva n.º 2000/532/CE, de 3 de maio, e alteradas pelas Diretivas n.º 2001/118/CE, de 16 de janeiro, 2001/119/CE, de 22 de janeiro, e 2001/573/CE, de 23 de julho, traz associado a nova Lista Europeia de Resíduos (LER) e as singularidades do perigo ligado aos resíduos. Os processos de eliminação e de valorização dos resíduos, são classificados segundo a Diretiva n.º 96/350/CE, da Comissão, de 24 de maio, oriunda dos anexos da Diretiva n.º 75/442/CEE, de 15 de julho [26].

Posteriormente, é compilada a regulamentação da comunidade sobre os resíduos através da Decisão n.º 2006/12/CE, de 5 de abril. Promove o desenvolvimento do direito e da ciência conseguida. Com isto, é notável um equilíbrio, que permite criar um grupo de princípios e vetores no que concerne à gestão de resíduos, muito importante. A reavaliação da Decisão n.º 2006/12/CE, de 5 de abril, deu origem à Diretiva n.º 2008/98/CE, de 19 de novembro. Nestas diretivas estão expostos de forma clara os objetivos que a reutilização e a reciclagem oferecem, quando determinam que o valor base em peso é de 70%, até 2020, em termos de reutilização, reciclagem e valorização de RCD não perigosos [26].

Por último, convém salientar, que as Diretivas 75/439/CEE, 91/689/CEE e 2006/12/CE, são anuladas pela Decisão n.º 2008/98/CE, de 19 de novembro. Esta tem como objetivo promover a eliminação da relação que existe entre o crescimento e a produção de resíduos. Os princípios para o tratamento de resíduos são, desta forma, estabelecidos, diminuindo os impactes negativos na gestão e produção de resíduos. Sempre com a finalidade de proteção do meio ambiente e da saúde humana. Esta decisão afirma que os estados-membros precisam de estabelecer medidas para o tratamento dos resíduos produzidos, conforme as prioridades organizadas da seguinte forma [26]: 1. Prevenção; 2. Preparação para a reutilização; 3. Reciclagem; 4. Outros tipos de valorização, por exemplo energética; e 5. Eliminação.

2.7.2. Em Portugal

Pela primeira vez em Portugal, e de forma legal, o Decreto-Lei n.º 488/85, de 25 de novembro, define a gestão de resíduos, instituindo a quantificação dos resíduos como parte fundamental para o plano de diminuição da produção de resíduos. Esta lei resulta da transposição da Diretiva n.º 75/442/CEE, de 15 de julho, para a norma portuguesa [27].

Com a norma promoveu-se, através de tratamentos tecnológicos de reciclagem, eliminação, proveito energético e proteção ambiental. Foi prevista assim, a primeira lista de constituintes tóxicos ou perigosos, em anexo do referido Decreto-Lei. Copulativamente a outras diretivas, atualmente verifica-se uma maior preocupação e consciência ambiental em Portugal. Assim sendo, criou-se um ponto de partida para a elaboração da gestão de resíduos. Todas as leis e regras a obedecer, culmina na Lei de Bases do Ambiente- Lei n.º 11/87, de 7 de abril [27]. Passados 10 anos, é anulado o Decreto-Lei n.º 488/85, de 25 de novembro, pelo Decreto-Lei n.º 310/95, de 20 de novembro, transpõe as Diretivas n.º 91/156/CEE, de 18 de março e 91/689/CEE, de 12 de dezembro. Esta alteração teve como objetivo adaptar e explicitar de forma mais clara a legislação existente, de acordo com as condições ambientais no momento e revisando o quadro normativo em vigor, de maneira a alcançar o desenvolvimento sustentável [27].

Após algum tempo, o Decreto-Lei n.º 310/95, de 20 de novembro, é substituído pelo Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de setembro. Esta substituição, teve como principal objetivo aperfeiçoar a legislação anterior, nomeadamente, em situações como autorização antecipada das intervenções de gestão de resíduos e esclarecer o licenciamento das atividades que envolviam operações semelhantes [27]. Entretanto, o Regime do Transporte de Resíduos em Território Nacional é instituído pela Portaria n.º 335/97, de 16 de maio, na qual circunscreve a norma do transporte de resíduos e esclarecem os modelos das Guias de Acompanhamento de Resíduos, GAR. No ano de 1997 é aceite o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), onde os RCD são considerados como um dos nove fluxos de resíduos que constituem os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Depois, em 2007, o Plano Estratégico para os RSU para o período de 2007 -2016 (PERSU II), é aceite pela Portaria n.º 187/2007, de 12 de fevereiro. Com o objetivo de definir as bases para a gestão de RSU, de acordo com o quadro legal e comunitário, retificando algumas debilidades indicadas no PERSU [27].

Seguidamente, o Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais (PESGRI), é aprovado pelo Decreto-Lei n.º 516/99, de 2 de dezembro. Onde são definidos os princípios estratégicos para a gestão de resíduos, ajustados a partir da Estratégia Comunitária de Gestão de Resíduos, sendo esta adotada pela Resolução do Conselho de Ministros da União Europeia, 24 de fevereiro de 1997 [27].

Os RCD no PESGRI definem-se como resíduos industriais, elaborando um plano com as metas essenciais na gestão deste tipo de resíduos. O PESGRI tem como linha orientadora a hierarquização dos princípios da gestão de resíduos, isto é, a prevenção, reciclagem, valorização e a deposição como o seu destino final. Assim, foca-se a responsabilidade que cada utilizador têm no ciclo de vida de um material e na sua gestão, no entanto é o fabricante do produto que tem maior importância [27]. A meta mais importante para este plano é a redução da quantidade e perigosidade dos resíduos industriais, obtida a partir da prevenção. Passado algum tempo, sai a sugestão do Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais – PNAPRI. Vem a ser um instrumento para planeamento da Administração Pública e de todos os ativos económicos, com a finalidade de diminuir a perigosidade e quantidade dos resíduos industriais, através de restrições, medidas e tecnologias de prevenção ligadas a processos industriais [27]. Continuamente, o Decreto-Lei n.º 3/2004, de 03 de janeiro, é divulgado e esclarece o regime jurídico do licenciamento da instalação e da exploração dos centros de recuperação integrados, valorização e eliminação de resíduos perigosos (CIRVER) [27].

Depois, a LER- Lista Europeia de Resíduos é transcrita pela Portaria n.º 209/2004, de 3 de março, apresenta os processos de eliminação e de valorização mais simples [27]. A norma portuguesa estabelece, através de um código de seis dígitos, a nova lista de resíduos. A norma separa os diferentes tipos de resíduos em 20 tipos de resíduos. Os dois primeiros dígitos do código dizem respeito ao número do capítulo. Mais precisamente no capítulo 17, constam o grupo dos “Resíduos de construção e demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados)” , como é possível ver na Quadro 6. No entanto, certos resíduos que podem também ser encontrados em obra, estão presentes noutros capítulos da norma [27]. É importante realçar que, seja qual for o tipo de resíduo, podem estar presentes outros tipos de resíduos, como é o caso de mobílias, equipamentos de combate a incêndios, etc., tem de ser registados na auditoria de resíduos que é feita [27][28].

Passado algum tempo o Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de setembro é anulado pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro. Este novo estabelece o novo regime jurídico no que concerne a gestão de resíduos. Transpõe para a legislação portuguesa a Diretiva n.º 2006/12/CE, de 5 de abril, e pela primeira vez no direito português, clarifica a definição de resíduo de construção e demolição. A nova diretiva tinha como objetivo instituir os princípios para a gestão de resíduos, promover a incorporação de novos instrumentos no quadro legal nacional e apresentar novos conceitos económicos e financeiros para a gestão de resíduos, como exemplo: o mercado organizado de resíduos de modo a ter uma procura e oferta de materiais de forma segura, rápida e eficaz [27].

No Regime Geral da Gestão de Resíduos (RGGR), que foi criado a partir do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, surge o Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos - SIRER, previsto pelo Decreto-Lei e regulamentado pela Portaria n.º 1408/2006, de 18 de dezembro. Nesse

mesmo ano, são divulgadas especificações técnicas pelo LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Por exemplo, o guia de utilização para agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos: E 471 – 2006; a guia de reciclagem para misturas betuminosas a quente em central: E 472 – 2006; o guia de utilização para agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos: E 473 – 2006; e o guia de utilização para RCD em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte: E 474 – 2006 [27][29].

No ano seguinte, foi estabelecido o RJUE - Regime Jurídico da Urbanização e Edificação, através da Regra n.º 60/2007, de 4 de setembro, mencionando o Regime da Gestão de Resíduos de Construção e Demolição - RGRCD, por pota a extensão de artigos desta lei [27]. Seguidamente, pelo Decreto-Lei n.º 18/2008, de 18 de janeiro é criado o novo Código dos Contractos Públicos- CCP. Expõe com frequência, na gestão de resíduos, a relevância do PPGRCD- Plano de Prevenção e Gestão de Resíduos de Construção e Demolição, em vários capítulos deste mesmo decreto. O Regime de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição, que envolve a reutilização e prevenção, e operações como a recolha, o transporte, o armazenamento, a triagem, o tratamento, a valorização e a eliminação de RCD é instituído pelo Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de março. Revela muita importância para a determinação de regras metódicas, associadas às condutas de gestão de resíduos de construção e demolição, de acordo com o artigo, já referenciado, 20.º do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro. Assegura a aplicação de estratégias de gestão de RCD, referente à reciclagem, reutilização e redução de resíduos [27].

No ano de 2008, são feitos ajustes à Portaria n.º 335/97, de 16 de maio, aquando da homologação dos modelos das GARCD- Guias de Acompanhamento dos RCD através da Portaria n.º 417/2008, de 11 de junho. Veio especificar as Guias a utilizar no transporte de RCD [27]. O regime de constituição, gestão e funcionamento do mercado organizado de resíduos, é, posteriormente, instituído pelo Decreto-Lei n.º 210/2009, de 3 de setembro. Resulta num decreto que tenta colmatar as carências da normalização, associadas ao acompanhamento e inspeção das atuações das entidades gestoras dos mercados de resíduos, tentando estabelecer uma via de ligação entre plataformas eletrónicas dos mercados organizados e a plataforma SIRAPA - Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente, fazendo evoluir o Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos, SIRER [27]. Num momento posterior, a Portaria n.º 228/2010, de 22 de abril, dá a conhecer o logótipo do Mercado Organizado de Resíduos - MOR, que será utilizado por entidades gestoras das plataformas de negociação [27].

No ano de 2011, o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, muda o regime geral da gestão de resíduos e ultrapassa a Diretiva n.º 2008/98/CE, de 19 de novembro. A nova lei tem como objetivo tornar claro conceitos como: definições de resíduo; prevenção; reutilização; preparação para a reutilização; tratamento e reciclagem; e a diversidade entre conceitos de valorização e eliminação de

resíduos, tendo por base a diferença notável em termos de impacto ambiental, tendo também em linha de conta a posição hierárquica dos resíduos, como elemento fundamental da política de ambiente [27]. Esta decisão veio alterar os Decretos-Lei nº 178/2006, de 5 de setembro, e o nº 46/2008, de 12 de março [27]. O Quadro 7 apresenta as classificações estabelecidas dos resíduos e respetivos códigos.

Quadro 7 LER- Transcrição da norma europeia para a portuguesa

Código	Descrição
17	Resíduos de construção e demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados):
17 01	Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos
17 01 01	Betão.
17 01 02	Tijolos.
17 01 03	Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.
17 01 06 (*)	Misturas ou frações separadas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos contendo substâncias perigosas
17 01 07	Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos não abrangidas em 17 01 06.
17 02	Madeira, vidro e plástico:
17 02 01	Madeira.
17 02 02	Vidro.
17 02 03	Plástico.
17 02 04 (*)	Vidro, plástico e madeira contendo ou contaminados com substâncias perigosas.
17 03	Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão:
17 03 01 (*)	Misturas betuminosas contendo alcatrão.

Quadro 8 (Continuação) LER- Transcrição da norma europeia para a portuguesa

17 03 02	Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01.
17 03 03 (*)	Alcatrão e produtos de alcatrão.
17 04	Metais (incluindo ligas):
17 04 01	Cobre, bronze e latão.
17 04 02	Alumínio
17 04 03	Chumbo.
17 04 04	Zinco.
17 04 05	Ferro e aço.
17 04 06	Estanho.
17 04 07	Mistura de metais.
17 04 09 (*)	Resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas.
17 04 10 (*)	Cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas.
17 04 11	Cabos não abrangidos em 17 04 10.
17 05	Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem:
17 05 03 (*)	Solos e rochas contendo substâncias perigosas.
17 05 04	Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03.
17 05 05 (*)	Lamas de dragagem contendo substâncias perigosas.
17 05 06	Lamas de dragagem não abrangidas em 17 05 05.
17 05 06	Lamas de dragagem não abrangidas em 17 05 05.
17 05 07 (*)	Balastros de linhas de caminho de ferro contendo substâncias perigosas.
17 05 08	Balastros de linhas de caminho de ferro não abrangidos em 17 05 07.
17 06	Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto:
17 06 01 (*)	Materiais de isolamento contendo amianto.
17 06 03 (*)	Outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas.
17 06 04	Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03.
17 06 05 (*)	Materiais de construção contendo amianto (ver nota 4).
17 08	Materiais de construção à base de gesso:
17 08 01 (*)	Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas.
17 08 02	Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01.

Quadro 8 (Continuação) LER- Transcrição da norma europeia para a portuguesa

Código	Descrição
17 06 04	Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03.
17 06 05 (*)	Materiais de construção contendo amianto (ver nota 4).
17 08	Materiais de construção à base de gesso:
17 08 01 (*)	Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas.
17 08 02	Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01.
17 09	Outros resíduos de construção e demolição:
17 09 01 (*)	Resíduos de construção e demolição contendo mercúrio.
17 09 02 (*)	17 09 02 (*) Resíduos de construção e demolição contendo PCB (por exemplo, vedantes com PCB, revestimentos de piso à base de resinas com PCB, envidraçados vedados contendo PCB, condensadores com PCB).
17 09 03 (*)	Outros resíduos de construção e demolição (incluindo misturas de resíduos) contendo substâncias perigosas.
17 09 04	Mistura de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03.

2.8. Aplicação de RCD

Sendo o ramo da construção uma das indústrias mais antigas, desde os princípios da humanidade, a construção feita à mão, criava uma grande quantidade de resíduos minerais como subproduto. Desde então, dentro da gama dos resíduos de construção, surgiu uma grande quantidade de detritos modernos de construção e demolição. Estes resíduos incluem materiais, tais como tijolos, betão, gesso, cerâmica, vidro, asfalto, azulejos, gesso, madeira, metais, diferentes tipos de plástico, como referido anteriormente. Os RCD estão a ser produzidos em massa e, muitas vezes, com quantidades significativas de diferentes poluentes orgânicos e inorgânicos (materiais oleosos, metais pesados, etc.) [30].

Os RCD constituem uma grande parte da produção total de resíduos sólidos no mundo, e a maior parte é usada em enchimentos de terras. Investigação realizada na incorporação de resíduos em betões,

indicia claramente a possibilidade de tratar e reutilizar adequadamente tais resíduos como agregados em novos betões, em aplicações de nível inferior [31], e nomeadamente aplicações a nível estrutural [32][33]. Mais precisamente no capítulo 2.8.2. vão ser dados a conhecer alguns desses exemplos de aplicação dos resíduos de construção e demolição.

2.8.1. Gestão de RCD

A gestão dos resíduos de construção e demolição é dirigida pelo regime geral de gestão dos resíduos, Decreto-Lei n.º 178/2006 [34], modificado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 [35], e pela especificidade do Decreto-Lei n.º 46/2008 [36]. O novo regime jurídico viabiliza à prevenção da produção e à perigosidade de RCD, assim como, a triagem destes de maneira a promover a reciclagem e outras técnicas de valorização, tanto na fase de projeto como em execução de obra, levando à diminuição significativa da deposição em aterro. É necessário certificar que para uma gestão apropriada dos RCD o projeto de execução de obras públicas é associado de um Plano de Prevenção e Gestão de Resíduos de Construção e Demolição, PPG. É de notar que, o Decreto-Lei n.º 73/2011 [35] afirma, sempre que tecnicamente viável, como obrigatório o uso de pelo menos 5% materiais reciclados na contratação de obras de construção e manutenção de infraestruturas no âmbito do Código dos Contratos Públicos, tendo em linha de conta a preservação dos recursos naturais e a promoção do valor dos resíduos. Consoante o instituído no Decreto-Lei n.º 46/2008 [36], e verificando-se a carência de normas portuguesas ou até mesmo as europeias referentes à utilização de resíduos, a utilização da fração mineral de RCD em obras fica dependente do cumprimento das condições estabelecidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) nas suas especificações: E 471 [37]; E 472 [38]; E 473 [39] e E 474 [40]. Estas referem-se à utilização de resíduos de construção e demolição como agregados grossos na fabrico de betão; mistura betuminosa recuperada em misturas betuminosas recicladas a quente; agregados para camadas não ligadas de camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários assim como material para aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte, respetivamente [41].

2.8.1.1. Estados Unidos da América

Dos 2,7 mil milhões de toneladas de agregados atualmente utilizados nos EUA, os pavimentos representam 10-15%, enquanto outros trabalhos de construção e manutenção rodoviárias consomem mais 20 a 30%, e a maior parte dos agregados, cerca de 60 a 70%, são usados em betão estrutural. Os agregados reciclados nos EUA são produzidos por produtores de agregados naturais, empreiteiros e centros de reciclagem de detritos de agregados naturais, que têm uma quota de 50%, 36% e 14%, respetivamente. São dados incentivos para transporte de resíduos de betão e agregados transformados

de instalações de produção para promover o uso de agregados reciclados, embora uma grande parte da produção seja utilizada apenas para preenchimento ou base de construção [42].

2.8.1.2. União Europeia

Anualmente, estima-se que a produção de resíduos de construção e demolição na União Europeia é de 450 milhões de toneladas, sendo estes os resíduos que apresentam um maior fluxo, para além dos resíduos agrícolas. Mesmo que o solo e outros resíduos fossem excluídos, estima-se que 180 milhões de toneladas de RCD são produzidos anualmente. Considerando uma população de aproximadamente 370 milhões, a produção anual de resíduos per capita é de 480 kg. Embora não existam dados claros sobre a reciclagem para cada país da UE, um estudo, no final dos anos 90, calculou que em média, apenas 28% de todos os RCD foram reciclados [31]. A maioria dos países, membros da UE, estabeleceu metodologias para a reciclagem de 50% a 90% da sua produção de RCD, com o objetivo de substituir os recursos naturais tais como madeira, aço e materiais de pedra. Tradicionalmente, os materiais reciclados são mais baratos do que os materiais naturais, e a reciclagem na Alemanha, Holanda e Dinamarca é menos dispendiosa do que eliminação do resíduo em si. O Reino Unido consumiu cerca de 330 milhões de toneladas de agregados em 1989, apenas 10% eram materiais reciclados. Somente para a Inglaterra, foi noticiado que em 2001, foram utilizadas 220 milhões toneladas de agregados, dos quais um quarto eram materiais reciclados [31].

Os resíduos de construção e demolição na Inglaterra e na Escócia compõem cerca de dois terços, sendo metade desse valor correspondente a agregados reciclados. Percebendo a importância dos RCD, o Departamento de Desenvolvimento Executivo da Escócia (SEDD) recolheu informações sobre o nível de utilização de agregados reciclados. Verificou-se que, o total estimado de quantidade de terras preenchidas por todos os locais era de sensivelmente 4173 kilo-toneladas, dos quais 44% eram resíduos mistos de construção e demolição, solo limpo (34%), solo contaminado (13%), e resíduos de construção e demolição contaminados e asfalto (9%). Destes, apenas 19% dos resíduos mistos de construção e demolição foram reutilizados e reciclados [31].

2.8.2. Valorização e aplicação de RCD

Os agregados de resíduos têm sido utilizados, com sucesso, como material de pavimento, nomeadamente como brita em camadas estruturais, assim como bases de pavimentos e sub-bases [43]–[46]. Uma vez que a composição do agregado pode variar significativamente dependendo dos seus materiais constituintes (por exemplo, betão de cimento, argamassa, cerâmica e pedras esmagadas), o processo de caracterização das propriedades físico-químicas e mecânicas deve ser realizado para aplicações dos pavimentos [47].

2.8.2.1. Blocos para construção

Criado por um engenheiro neozelandês, Peter Lewis, que faz parte da *startup* americana *ByFusion*, inventou o tijolo de plástico (Figura 4). Este veio apresentar uma alternativa sustentável ao tijolo tradicional, aproveitando os resíduos de plásticos dos oceanos de todo o planeta terra. Contudo, a criação deste tipo de material visava que o mesmo não voltasse a ser despejado de novo no meio ambiente. Daí a invenção do *REPLAST*, o qual é produzido a partir da aglomeração de restos plásticos em módulos de blocos, aparentando diversas formas e densidades, com base nas formas pretendidas para serem encaixados, não precisando assim de cola ou qualquer tipo de adesivos [48].



Figura 4- Tijolo de plástico

2.8.2.2. Pavimentos rodoviários, obras rodoviárias e sistemas de drenagem

Através da reciclagem dos resíduos de construção e demolição, pode-se obter tanto o agregado “miúdo” (areia reciclada) como o agregado “graúdo” (brita reciclada) para a fabricação de blocos de betão para pavimentos rodoviários [8] (Figura 5). Um estudo focou-se nesta aplicação, e avaliou a utilização de RCD como agregados, utilizando um traço de 1:2:3, cimento: areia reciclada: brita reciclada. Quando sujeitos a ensaios de compressão, os pavês atingiram uma resistência de compressão mínima de 14,5 MPa e máxima de 35 MPa. Mesmo assim, estes materiais podem ser aproveitados para o calçamento dos espaços e estacionamento com tráfego leve, sendo uma boa alternativa sustentável para minimizar a quantidade de RCD que é produzido na construção civil [8][49].



Figura 5 - Pavês com agregados reciclados

Diferentes autores têm utilizado agregados reciclados em múltiplas aplicações no âmbito da construção. Por exemplo, na Austrália, é costume misturar agregados reciclados de betão com pequenas quantidades de tijolos britados e solo, para a obtenção de um produto reciclado considerado adequado para uso em pavimentação [50].

Na Suécia agregados de betão reciclado são utilizados em diferentes camadas da estrutura de pavimentos, obtendo-se desenvolvimentos no módulo de resiliência segundo os diferentes períodos de cura, aumentando consecutivamente a sua resistência ao longo do tempo [51].

Segundo François & Jullien [52], o uso dos resíduos de construção e demolição em pavimentação depende das características de composição e das condições locais, que vão desde a: intensidade das cargas mecânicas incitadas pelo tráfego rodoviário, humidade, temperatura ambiente, reação a produtos que podem ser derramados sobre a superfície e penetram na estrutura.

Petkovic et al. [53] afirma que todas as estruturas envolvidas numa obra rodoviária podem ser realizadas com materiais recicláveis, juntando assim o revestimento, a base, a sub-base, o reforço de subleito, as drenagens sub - superficiais, para controlo do nível freático (Figura 6).

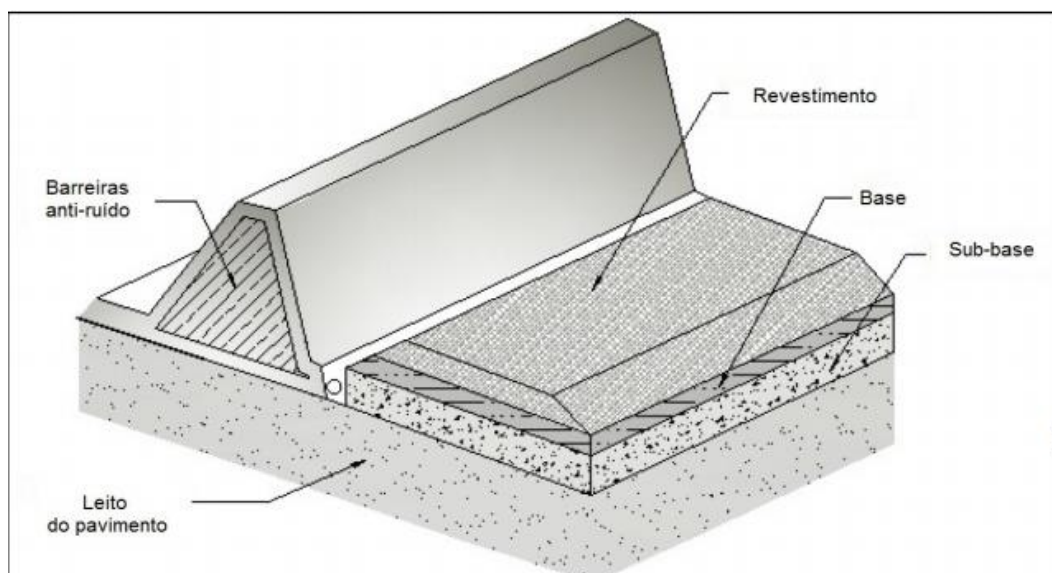


Figura 6 Aplicação de RCD em obras rodoviárias

2.8.2.3. Betão

O aproveitamento de agregados reciclados para a produção de betão é uma forma rentável de aproveitamento dos RCD, a qual tem vindo a ser meticolosamente estudada ao longo dos últimos anos. Uma vez que se apresenta como uma solução vantajosa ao nível económico e ambiental, a prática, já existente, revela inúmeras vantagens em se utilizar este tipo de betão do ponto de vista ambiental. No que diz respeito aos aspetos tecnológicos, não existem diferenças significativas comparativamente com o desenvolvimento de betões convencionais, deste modo verificam-se igualmente as vantagens do betão convencional, nomeadamente, mistura fácil dos agregados reciclados com a pasta, facilidade no transporte e aplicação, bem como facilidade na moldagem e procedimento de compactação.

Porém, existem algumas especificidades que o distinguem dos betões convencionais, nomeadamente, a elevada absorção de água por parte do agregado reciclado, desta forma aconselha-se que este se encontre o mais próximo possível de uma condição de superfície seca saturada [54]. Como esperado, o betão resultante da utilização de agregados reciclados apresenta características diferentes das do betão tradicional. Estas diferenças dependem muito do tipo e qualidade dos agregados que forem utilizados. O resultado desta associação pode ser betão não estrutural, betão estrutural com classes de resistência “normais” ou até mesmo betão de elevada resistência.

Limbachiya et al. [55] afirmam que foram encontradas porções da mistura de betão com agregados reciclados que, para uma certa classe de resistência, conferem a esses betões propriedades de durabilidade, resistência à infiltração e corrosão de cloretos, aos ciclos de gelo-degelo e à abrasão, semelhantes à mistura de betão de agregados naturais. Por outro lado, isto abre novas portas para o desenvolvimento de novos betões, por exemplo o betão que se produz com agregados mais grossos, que provém de elementos pré-fabricados, possa ser utilizado para betões de altas resistências, pois são

limpos e isentos de impurezas químicas prejudiciais ou outros tipos de contaminantes perigosos. Finalmente, as diferentes hipóteses de aplicação dos RCD, aliam-se a vantagens diretas como a parte económica, menor custo, e de forma indireta efeitos ambientais, permite eliminar a colocação de milhões de toneladas em aterros, bem como criar um círculo de economia e rentabilização, gerando bases para uma construção com desenvolvimento mais sustentável.

2.8.2.4. Design mobiliário

A construção de mobiliário urbano com agregados reciclados segue a mesma metodologia como a dos pavês, anteriormente explicado [8][56]. Este tipo de material tem como principais características: leveza e impermeabilidade; alta durabilidade; resistência à agentes químicos; baixa absorção de calor; alta resistência físico-mecânica; excelente isolante termo acústico; fácil corte e fixação; suportam cargas de até 125 kgf/m²; produto 100% reciclado que pode ser reciclado inúmeras vezes (Figura 7) [56].



Figura 7 Mobiliário urbano com agregados reciclados

2.9. Desenvolvimento de produtos com base em resíduos de gesso e serrim

O resíduo disponibilizado, por parte da empresa de construção DST Group, para o presente trabalho é o gesso e o serrim. Foi feita uma análise meditada com a empresa fornecedora relativamente aos resíduos e verificou-se que fora do âmbito de outros trabalhos de investigação em curso, o gesso e o serrim eram os resíduos de construção e demolição mais gerados e sem aplicação em novas soluções.

2.9.1. Gesso

O gesso é um dos materiais mais antigos, já utilizados no início da civilização humana [57]. É caracterizado pela sua facilidade de utilização, pelo baixo impacto ambiental que gera e pode ser reciclado, encaminhando assim para uma construção mais sustentável [57].

O ligante hidrófilo aéreo, gesso, obtém-se a partir da desidratação da pedra do gesso, o sulfato de cálcio di-hidratado. Após este processo é moído e combinado com água, ganha presa e endurece [57].

A pedra original tem como composição química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. É o material em maior quantidade no grupo dos sulfatos. Tem sensivelmente 21% de água na sua composição, $\frac{1}{4}$ dessa água ($\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) é fortemente combinada e $\frac{3}{4}$ do restante tem fracas ligações ($1 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) [57].

Na indústria da construção civil, as utilizações deste material geram quantidades de resíduos muito elevadas, particularmente quando este é utilizado sob a forma de gesso cartonado. Vários autores estimam que, para um conjunto de atividades da construção civil, quase 45% é desperdício deste material. Para o gesso cartonado estimam um volume de 9% durante o corte de chapas.

Para a reciclagem dos resíduos gerados tem de se proceder a uma moagem, com seguinte remoção de impurezas e calcinação a baixa temperatura. O maior inconveniente do processo é a remoção de impurezas [58].

O Quadro 8 mostra algumas aplicações do resíduo de gesso cartonado.

Quadro 8 Aplicações do gesso cartonado

Artigo	Aplicação Gesso cartonado
[59] [60]	Execução de revestimento projetado com argamassa de gesso; execução do revestimento de gesso com a utilização de seu resíduo
[59]	Gesso fundido empregado em pré-moldados para peças de decoração
[59][61]	Placas para forro; Ladrilhos de Teto de Gesso Reforçado com Lã e Fibra de Coco com Estabilidade Melhorada e Resistência Acústica e Térmica
[59]; [62]	blocos de gesso reforçados ou não com fibras; Blocos de gesso fibroso (resistentes ao fogo e não expostos a água)
[63][64]	Utilização de gesso na indústria do cimento
[65]	Compósito à base de resíduo de gesso e poliestireno expandido (EPS) para redução de níveis sonoros
[62][66]	Placas de gesso fibroso (resistência ao fogo e propriedades acústicas)
[67]	Efeitos da microestrutura no isolamento acústico das placas de gesso
[68][69][70]	Desempenho térmico de placas de gesso incorporadas com materiais de mudança de fase μmo encapsulados para regulação térmica
[71]	Compósitos à base de gesso com enchimento de grafite e avaliação de desempenho térmico

2.9.2. Serrim

A matéria-prima do serrim é a madeira. É constituída por um combinado de tecidos que formam as raízes de plantas lenhosas, o tronco e os ramos [72]. Sendo a madeira um pertence da natureza,

complexo e orgânico, que constitui o tronco, os ramos e as raízes da maior parte das árvores ou plantas lenhosas [73].

As propriedades da madeira variam consideravelmente de acordo com a espécie das árvores e em particular de características intrínsecas como, por exemplo, durabilidade, densidade, resistência elétrica, estabilidade, resistência ao impacto, propriedades acústicas, aspeto e trabalhabilidade [74].

A madeira é caracterizada por absorver e libertar facilmente água (higroscopicidade), tentando procurar o equilíbrio da humidade com o ambiente em que se encontra. Caracteriza-se também por deter propriedades físicas diferentes conforme a orientação espacial (ortotropia) [75] [72]. Na indústria da construção civil, a madeira encontra-se em produtos como: sistemas estruturais, habitualmente em sistemas estruturais de coberturas; em elementos para divisórias, como por exemplo painéis; em pavimentos, em parquet e tacos; em elementos de cofragem e suporte (escoras); em fundações (estacas); e em revestimentos. Anualmente são geradas grandes quantidades de resíduos de madeira, habitualmente utilizados em aquecimentos, em matérias-primas para aglomerados e contraplacados, na indústria agrícola, avícola, florestal e pecuária. Dado à elevada diversidade de resíduos gerados pela madeira, conduz a um número elevado de diferentes tipos de resíduo [76]. Findado o processo de serração das madeiras, os resíduos gerados em maior quantidade são as costaneiras, as cascas, as aparas (fitas ou turas), serrim e restos de madeira, respetivamente em termos percentuais, de 33, 23, 23, 14 e 7%, com base em dados do INETI [76]. A dimensão dos resíduos gerados permite, às empresas que os produzem, diminuir custos com o seu armazenamento, manuseamento, transporte, tratamento e deposição, e reaproveitar o valor que noutras circunstâncias seria dissipado [77]. O Quadro 9 mostra algumas aplicações do resíduo de serrim.

Quadro 9 Aplicações do serrim

Artigo	Aplicação Serrim
[78][79][80]	Compósito de serrim e plástico
[81][82]	Painéis acústicos: lâ de madeira de pinheiro, cimento e água
[81]	Aplicação de resíduos de madeiras em blocos para construção
[83]	Incorporação de Serrim em Argamassas Cimentícias
[84]	Utilização de serrim em camadas de coberturas ajardinadas
[85]; [86]	Material inovador de isolamento à base de biomassa de serradura para edifícios; Placas de serrim para isolamento térmico de edifícios
[87]	Placas de absorção acústica, compósito de casca de arroz
[88]	Desenvolvimento de materiais de construção Wood-Crete a partir de serrim e resíduos de papel (comportamento térmico)
[89]; [90]	Placas de serrim para indústria de construção e design de interiores; placas cimento-madeira(serrim) de baixa densidade para acabamento de paredes interiores
[91]	Compósito de serrim e espuma de poliuretano para absorção acústica.
[92]	Utilização de painéis estruturais, compósitos de madeira cimentada como cofragem permanente

2.10. Análise do ciclo de vida

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é um método utilizado para avaliar o peso e o impacto ambiental dos processos e produtos, bens e serviços, durante o seu ciclo de vida desde o início até ao seu fim [93][94][95]. A LCA tem sido utilizada no sector da construção desde 1990 e é uma ferramenta de avaliação de edifícios muito importante [96][97].

Klöpffer [98] afirma que a análise do ciclo de vida se tornou um veículo de avaliação fortemente utilizado devido à sua forma integrada para o trato de tópicos como: o enquadramento de dados; a avaliação do impacto; e a qualidade dos mesmos. A explicação da metodologia utilizada pelo ACV é baseada nas normas internacionais da série ISO 14040. Este consiste em quatro fases analíticas distintas: definição do objetivo e o âmbito; criação de um inventário; avaliação dos impactos e por ultimo a interpretação dos resultados [99].

A definição do objetivo e do âmbito envolve a definição do propósito, das metas e dos limites do sistema. O Inventário do Ciclo de vida - ICV, envolve a recolha de dados para cada processo unitário relativamente a todas as entradas e saídas relevantes de energia e fluxo de massa, bem como dados

sobre emissões para o ar, água e terra. Nest fase está incluído tanto o cálculo das quantidades de material, como o fluxo de energia de um sistema de construção. A etapa de avaliação do impacto do ciclo de vida (LCIA) tem como principal intenção avaliar a potencialidade dos impactos no meio ambiente e estimar os recursos utilizados no sistema modelado. Esta fase consiste em 3 elementos de carácter obrigatório: opção das categorias de impacto, atribuição dos resultados do inquérito do ciclo de vida (classificações) e indicadores de categoria dos modelos (caraterização). Consoante a classificação atribuída pelos resultados do ICM, é atribuído um valor de emissões, resíduos e recursos utilizados às categorias de impacto escolhidas, como pro exemplo: CO₂, CH₄ e CO. Os resultados que se obtém pelo ICM são agregados num resultado indicador, que é o resultado final da parte obrigatória de uma LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*). A normalização, o agrupamento, a ponderação e a análise dos dados LCIA são parâmetros opcionais. Quando é feita uma avaliação do impacto do ciclo de vida (LCIA), esta pode ser feita essencialmente por 2 métodos: métodos orientados para o problema- pontos médios; e métodos orientados para os danos- pontos finais. A análise dos pontos médios abrange os impactos ambientais associados às alterações climáticas, à acidificação, à eutrofização, a potencial geração de fotoquímica de ozono e toxicidade humana, sendo que os impactos podem ser avaliados utilizando o método de base CML (2001), EDIP 97& EDIP 2003 e IMPACT 2002+. A abordagem dos pontos finais classifica os fluxos em vários temas ambientais, moldando os danos que cada tema causa ao ser humano, ao ambiente natural e aos recursos. O Ecoindicator 99 e o IMPACT 2002+ são métodos utilizados no método orientado para os danos.

Por último, a fase final da ISO 14040 é a interpretação. Nesta fase são identificadas questões significativas, é feita uma avaliação para chegar às conclusões e formular recomendações. O relatório final é o último elemento para completar as fases da ACV de acordo com a norma ISO 14040 [109-111].

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo é explicado todo o trabalho prático realizado para o desenvolvimento de materiais, para o sector da construção com incorporação de resíduos. Os resíduos foram selecionados a partir de uma listagem fornecida pelo grupo Domingos da Silva Teixeira, DST. Sendo esta a empresa que forneceu os resíduos para o estudo experimental. Foram formuladas 6 misturas compósitas distinguidas pela quantidade de gesso, serrim e superplastificante utilizados. Após o seu período de cura, as propriedades físicas e mecânicas das misturas foram caracterizadas.

3.1. Materiais usados para a preparação das misturas

Toda a campanha experimental realizada, teve como material prático o serrim e o gesso. Estes dois materiais foram estudados de forma aprofundada com o objetivo de se conhecer qual o seu comportamento e quais as suas propriedades físicas e térmicas quando sujeitos a adversidades do exterior. Isso é conseguido através da caracterização física de cada um dos materiais, e um estudo preliminar com composições simples de serrim, água e superplastificante.

3.1.1. Serrim

O serrim utilizado na campanha experimental, como já foi mencionado, foi fornecido pela empresa DST- Domingos da Silva Teixeira, SA, e resulta de processos de serragem de madeira. É constituído por partículas de vários tamanhos, desde pó até aparas, caracteriza-se o resíduo como uma mistura relativamente heterogénea. Assim, foi determinada a distribuição granulométrica do serrim através do procedimento apresentado na Norma NP EN 933-1 [102]. O método usado para a peneiração foi o método do agitador de peneiros, isto é, a coluna de peneiros é colocada no agitador de peneiros e assim o serrim fica fracionado por diferentes dimensões.

A distribuição granulométrica teve início com a pesagem da amostra fornecida (Figura 8). A balança utilizada tinha uma precisão de $\pm 0,01$ g. Uma vez que, a amostra se encontrava seca, esta foi depositada diretamente na coluna de peneiros que se encontravam ordenados de forma decrescente, consoante o diâmetro de abertura, 16-0,063 mm (Figura 9), abaixo deste tamanho encontra-se um reservatório para recolher material com tamanhos inferiores. A coluna de peneiros foi agitada num agitador mecânico de peneiros durante um período de 15 minutos. Terminado o tempo de agitação, o material retido em cada peneiro foi pesado, começando pelo peneiro de maior abertura, mencionando os valores com R1-R9, e o material retido no fundo como *P* (Figura 10). As massas obtidas foram registadas no relatório de ensaio, permitindo o cálculo da massa retida em cada um dos peneiros como percentagem da massa seca original - *MI'*. Seguidamente, calculou-se a percentagem cumulativa de

massa seca original que atravessa cada peneiro até ao peneiro de 0,063 mm de diâmetro da malha - M_2 , excetuando este. Por fim, determinou-se a percentagem de finos (f) que passa pelo peneiro de 0,063 mm de acordo com a expressão:

$$f = \frac{(M1' - M2) + P}{M1'} * 100 \quad \text{Eq. 1}$$



Figura 8 Serrim fornecido pela empresa DST



Figura 9 Peneiros e máquina utilizados



Figura 10 Serrim distribuído por diferentes tamanhos

Uma vez que o serrim é um material que absorve facilmente água, foi determinada a sua humidade relativa. Previamente ao cálculo, pesou-se a amostra da cápsula + serrim. Foi colocada numa estufa a 105 ± 5 °C. Passados 30 min foi pesado de novo e obteve-se um valor de 26,68 g de massa do serrim e 1,26 g de massa de água. Uma vez que o serrim apresentava uma baixa humidade relativa, não houve necessidade de secar em estufa o serrim fornecido pela empresa. O próximo passo foi determinar a humidade relativa, Hr , através da equação 2. O valor obtido para a humidade relativa foi de 4,7%.

$$Hr = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{serrim}}} * 100\% \quad \text{Eq. 2}$$

3.1.1.1. Distribuição granulométrica do serrim

A Figura 11 representa a distribuição granulométrica do serrim, referente aos ensaios preliminares, onde é possível observar que o serrim apenas apresentava partículas de dimensão inferiores a 4 mm. A maior quantidade de partículas apresentava uma dimensão compreendida entre os peneiros de 1 mm e 0,125 mm. A massa retida entre estes peneiros representa 84,9% da massa total. A maior quantidade de partículas retidas foi observada para o peneiro de 0,5 mm, com 34% da massa total. A percentagem média de finos dos ensaios foi de 4%.

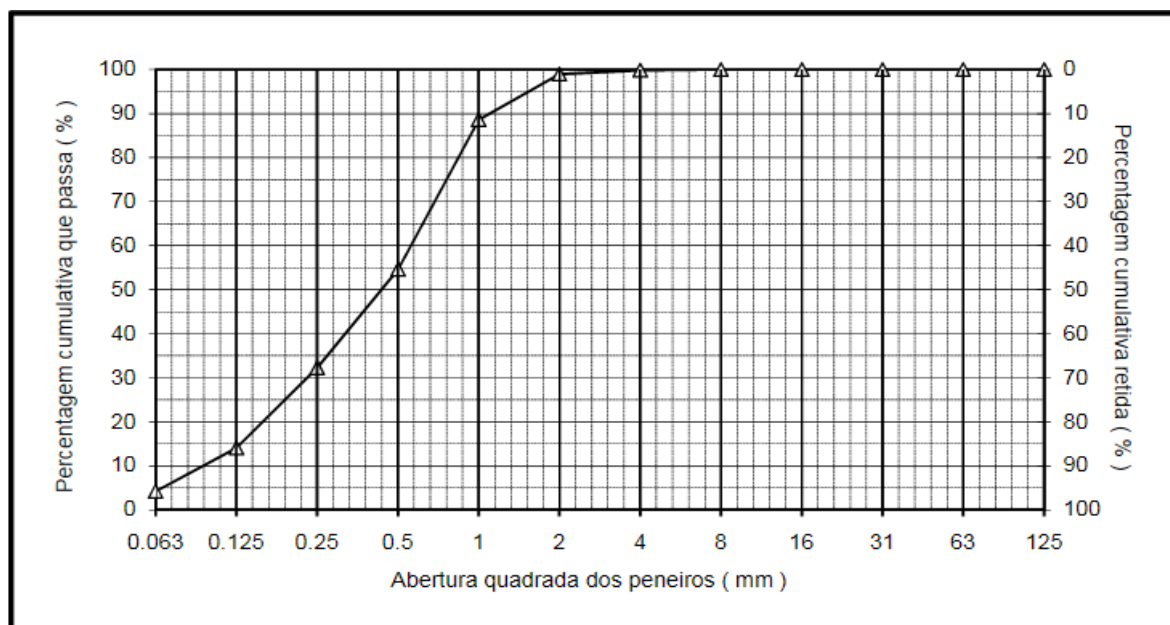


Figura 11 Distribuição granulométrica do serrim do ensaio preliminar

Na Figura 12 está representada a distribuição granulométrica do serrim, referente aos ensaios da fase 1, onde é possível observar que o serrim apenas apresentava partículas de dimensão inferiores a 8 mm. A maior quantidade de partículas apresentava dimensões entre os peneiros de 2 mm e 0,5

mm. A massa retida entre estes peneiros representa 78,7% da massa total. A maior quantidade de partículas retidas foi observada para o peneiro de 2 mm, com 26,4% da massa total. A percentagem média de finos dos ensaios foi de 1%.

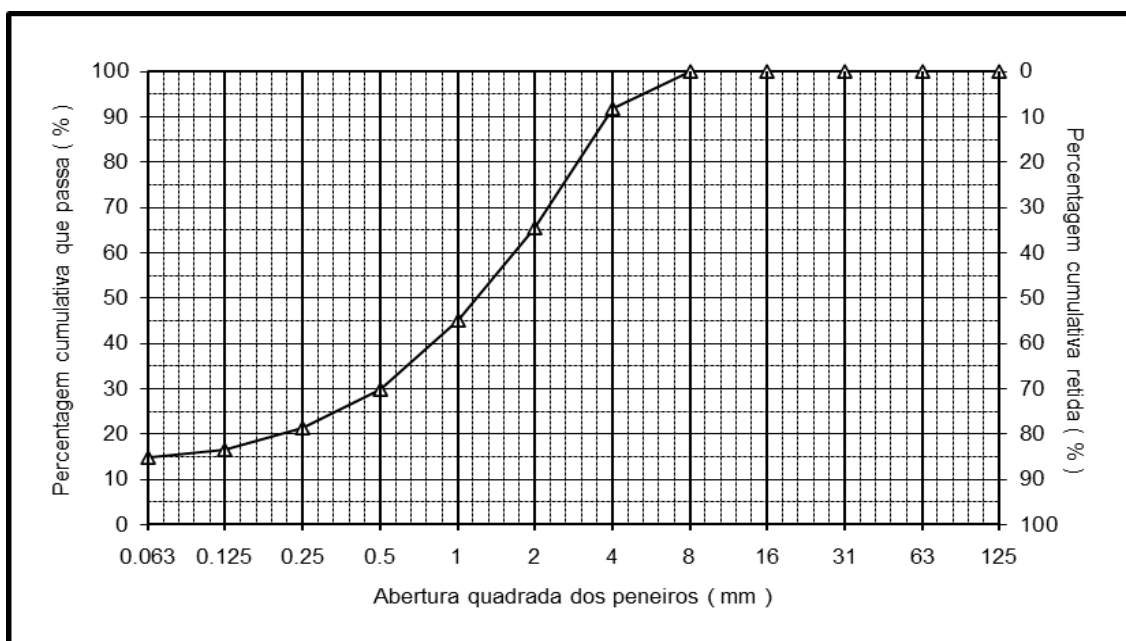


Figura 12 Distribuição granulométrica do serrim da fase 1

3.1.1.2. Densidade do serrim

A densidade do serrim foi determinada com recurso ao cálculo do volume de um picnómetro com água, segundo as normas EN 83/2017 e EN 1097-6. Foram utilizados 2 picnómetros com um volume de 100 ml (Figura 13). Foram utilizadas amostras de serrim com 15 g para o ensaio. Colocou-se o material dentro do picnómetro e adicionou-se água destilada até ao limite indicado no picnómetro. Deixou-se repousar por 12 horas. Posto isto, levou-se os picnómetros a ferver tirando todo o ar que existia no interior, após este processo deixou-se arrefecer até atingir a temperatura ambiente. Foram feitos todos os levantamentos das massas dos picnómetros com o material e a água destilada, a cada passo do ensaio realizado. No Quadro 10 apresentam os dados relativos à caracterização do serrim.

Quadro 10 Densidade do serrim

Propriedades	Provete	
	3	4
Massa do picnómetro + amostra seca (g)	124,92	113,25
Massa do picnómetro + amostra seca + água destilada (g)	363,31	351,59
Massa do picnómetro (g)	109,96	98,26
Massa do picnómetro + água destilada (g)	359,03	346,05
Temperatura da água (°C)	26	26
Fator K	0,998	0,998
Massa da amostra seca	14,96	14,99
Densidade das partículas (g/cm³)	1,40	1,58
Densidade das partículas (g/cm³) - valor médio	1,49	



Figura 13 Picnómetro com serrim e água destilada

3.1.1.3. Análise Termogravimétrica - TGA

A análise termogravimétrica é uma técnica de análise térmica de caracterização de materiais que permite medir as variações de massa de uma amostra de forma contínua, em função da temperatura ou do tempo (neste estudo em função da temperatura), com uma velocidade de aquecimento constante. O resultado do ensaio é registado em termogramas (curvas TGA, DTA e TG) que fornece informações sobre a decomposição térmica da amostra. [103][104].

Neste estudo foi realizado um ensaio de TGA a uma amostra de serrim ($m=18,163$ mg), utilizando o equipamento de análise térmica marca *SDT Q600 V20,9 Build 20*. Num intervalo de aquecimento entre os 20 °C e os 750 °C, com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, em atmosfera inerte de azoto (com uma taxa de 100 mL/min). Na Figura 14 é apresentada a curva obtida na análise termogravimétrica do serrim.

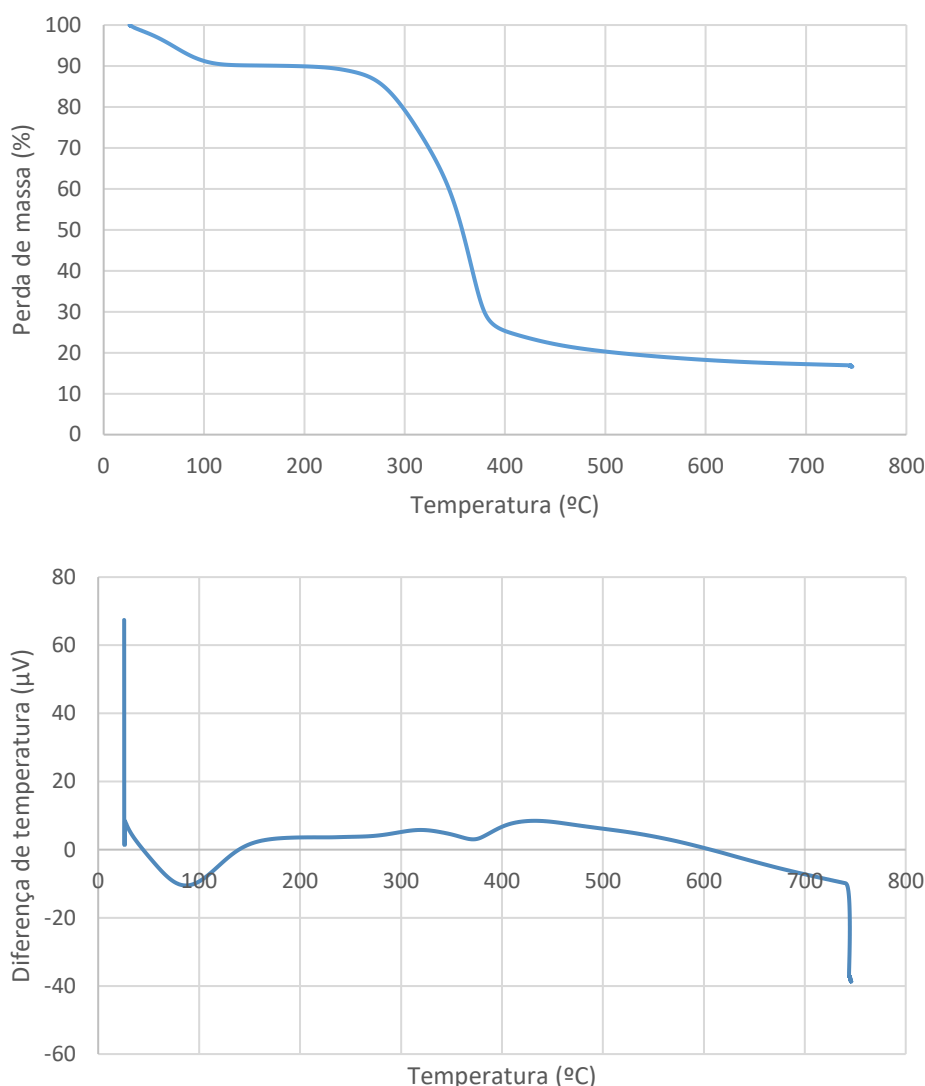


Figura 14 TGA (1º gráfico) e DTA (2º gráfico) de uma amostra de serrim

Pela análise do gráfico, verifica-se que há uma perda de massa inicial, sensivelmente 12%, entre os 25,7 °C até aos 100 °C. Isto deve-se à evaporação da água livre presente na amostra de serrim e da decomposição inicial da celulose e hemicelulose. A perda de peso, bastante acentuada, entre os 200 e os 410 °C, cerca de 68% de massa de serrim, deve-se aos principais componentes da madeira, nomeadamente celulose, hemicelulose e lenhina [103][104].

3.1.2. Água

A água utilizada em todos os processos experimentais da dissertação foi água potável da rede de abastecimento municipal da cidade de Guimarães.

3.1.3. Gesso

O gesso utilizado na campanha experimental, tal como o serrim, provém da cadeia de resíduos gerados pela empresa DST - Domingos da Silva Teixeira, SA, e resulta de processos de corte e de aplicação do gesso cartonado nas diversas obras de construção da empresa. O gesso recebido provinha de restos de placas de gesso cartonado, sendo constituído por partículas de vários tamanhos, visivelmente com dimensões superiores a 4 mm. Sendo que, para a preparação dos compósitos era necessário gesso em pó, foi necessário proceder a um pré-processamento antes da sua utilização.

Este processamento preliminar do gesso iniciou-se com a fragmentação manual da placa de gesso numa dimensão o mais reduzida possível, como ilustrado na Figura 15. De seguida, o gesso foi triturado no equipamento de Los Angeles, no interior do equipamento é colocado o gesso juntamente com 10 esferas metálicas, exibido na Figura 16. A moagem foi feita através de ciclos de trituração, de 15 minutos de operação e outros 15 minutos para o arrefecimento do equipamento, sendo realizados 5 ciclos consecutivos, obtendo o pó final apresentado na Figura 17, seguidamente, fez-se uma análise de distribuição granulométrica (Figura 18). A última fase do pré-tratamento consistiu na separação das frações grossas do gesso (peneiro de 4 mm), Figura 19. O principal objetivo era separar e retirar frações de maiores dimensões, retirar porções de cartão que existissem e até mesmo partes de gesso que não tivessem sido moidas, como mostra a Figura 20.



Figura 15 Placa de gesso partida em frações mais pequenas



Figura 16 Equipamento de Los Angeles e o gesso com esferas, no interior do equipamento



Figura 17 Gesso após os 5 ciclos



Figura 18 Gesso moído

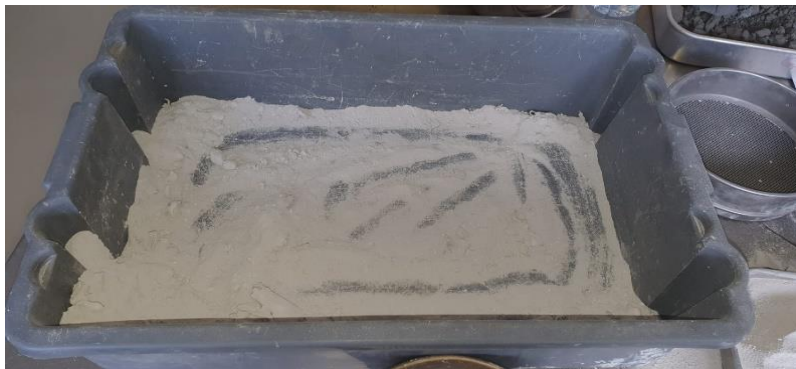


Figura 19 Gesso que passou no peneiro de 4 mm

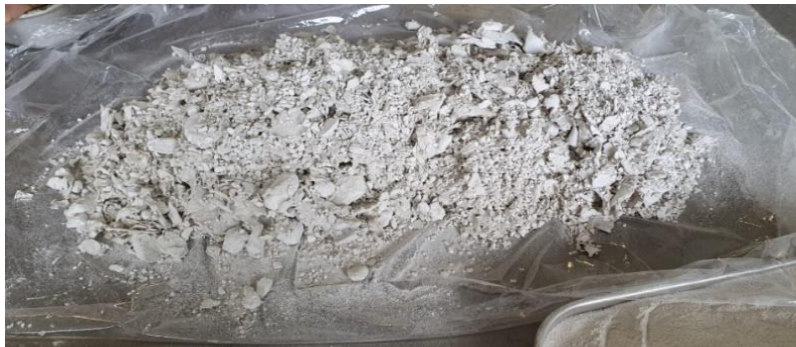


Figura 20 Material retido no peneiro de 4 mm

3.1.3.1. Distribuição granulométrica do gesso

Na Figura 21 está representada a distribuição granulométrica do gesso, referente aos ensaios da fase 1, onde é possível observar que, o gesso apenas é constituído por partículas de dimensão inferiores a 2 mm. A maior quantidade de partículas apresentava dimensões entre os peneiros de 0,25 mm e 0,063 mm. A massa retida entre estes peneiros representava 72,4% da massa total. A maior

quantidade de partículas retidas foi observada no peneiro de 0,125 mm, com 33,9% da massa total. A percentagem média de finos foi de 4%.

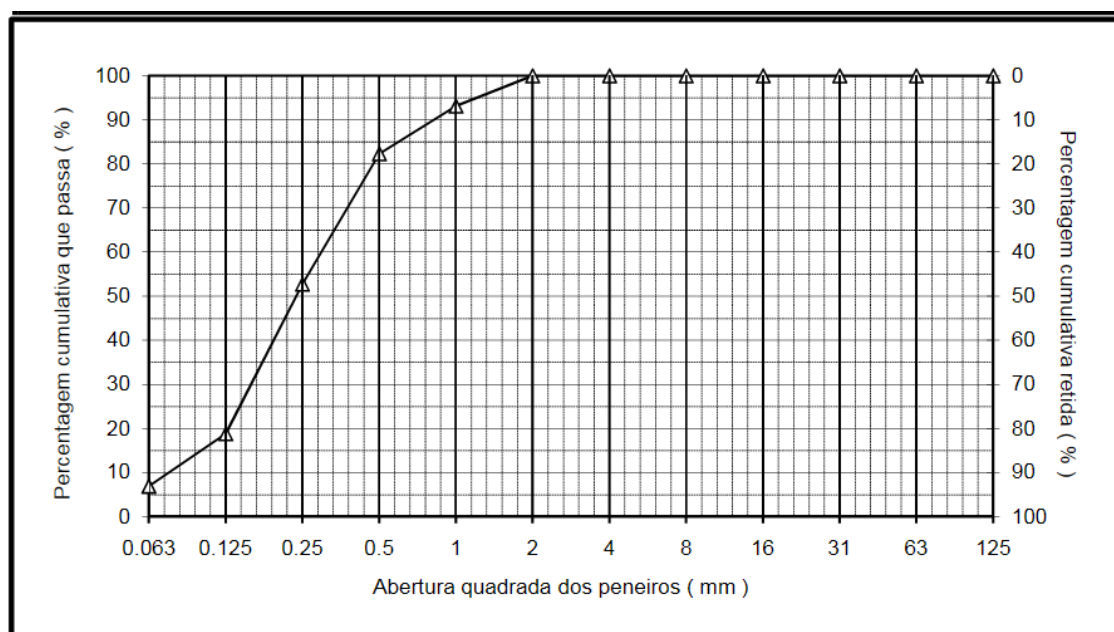


Figura 21 Distribuição granulométrica do gesso fase 1

3.1.3.2. Densidade do gesso

A densidade do gesso foi determinada de forma igual ao procedimento de ensaio utilizado para o serrim, segundo as normas EN 83/2017 e EN 1097-6.

Foram utilizados 2 picnômetros com um volume de 250 ml, onde foram utilizados 30 g de gesso. Colocou-se o material dentro do picnômetro e adicionou-se água destilada até ao limite indicado no picnômetro, como é possível ver na Figura 22. Deixou-se repousar por 12 horas. Posto isto, levou-se os picnômetros a ferver tirando todo o ar que existia no interior, após esta fase, deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente. Foram feitas pesagens das massas dos picnômetros com o material e a água destilada, a cada passo do ensaio realizado.

No Quadro 10 são apresentados os valores obtidos das massas dos picnômetros e as densidades obtidas.

Quadro 11 Densidade do gesso

Propriedades	Provete	
	1	2
Massa do picnómetro + amostra seca (g)	86,85	76,22
Massa do picnómetro + amostra seca + água destilada (g)	176,13	165,68
Massa do picnómetro (g)	63,7	53,26
Massa do picnómetro + água destilada (g)	163,23	152,93
Temperatura da água (°C)	26	26
Fator K	0,998	0,998
Massa da amostra seca	23,15	22,96
Densidade das partículas (g/cm³)	2,25	2,24
Densidade das partículas (g/cm³) - valor médio	2,25	

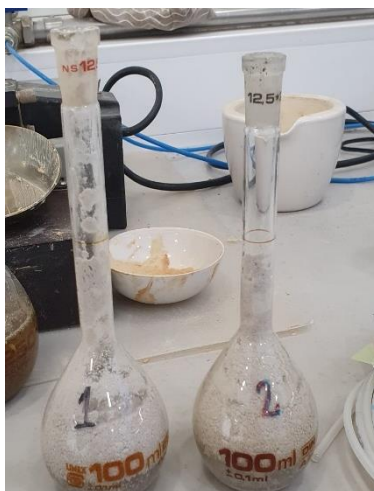


Figura 22 Picnómetro com gesso e água destilada

3.1.3.3. Análise Termogravimétrica - TGA

A análise termogravimétrica foi feita a uma amostra de gesso cartonado ($m=31,123$ mg), utilizando o equipamento de análise térmica marca *SDT Q600 V20,9 Build 20*. Num intervalo de aquecimento entre os 20 °C e os 1200 °C, com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, em atmosfera inerte de azoto (com uma taxa de 100 mL/min). Na Figura 23 apresenta-se os resultados da análise térmica do resíduo de gesso cartonado.

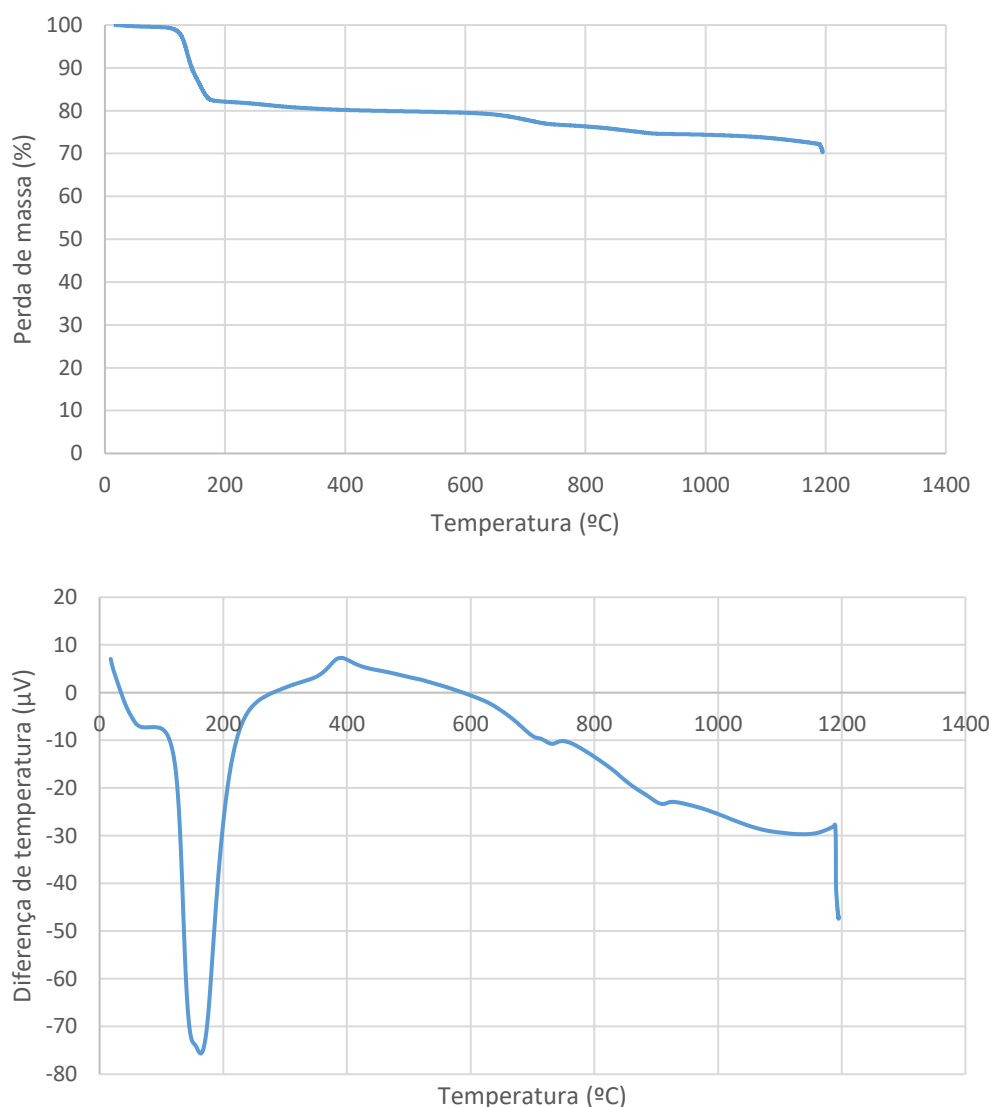


Figura 23 TGA (1º gráfico) e DTA (2º gráfico) de uma amostra de gesso

Pela análise da figura, verifica-se que no processo de aquecimento da amostra de resíduo de gesso cartonado a curva de DTA apresenta um pico exotérmico entre 100 °C até aos 190 °C, correspondendo a uma perda de massa de 17,3%. Este pico deve-se a desidratação da água livre, sabendo-se esta grande quantidade de água está associada à estequiometria do sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

3.1.4. Superplastificante

Para as misturas, o superplastificante (SP) utilizado foi o MasterGlenium Sky 617, fabricado por BASF. O superplastificante foi utilizado para que os compósitos apresentassem uma boa trabalhabilidade no estado fresco, com percentagens entre 1 a 3% da massa de sólidos juntamente com a água. Esta substância é utilizada para reduzir o teor em água, sem que altere a trabalhabilidade da pasta.

Na ficha técnica do produto é recomendado uma dosagem de 1,5 kg por 100 kg de aglutinante. Pelo que, é possível usar doses mais baixas ou mais altas, de 1 a 1,7 kg por 100 kg de aglutinante, em situações específicas, onde tenham sido feitos estudos, previamente, com base na razão Água/Resíduos, no tipo gesso, e na distribuição granulométrica do serrim. No Quadro 12 são apresentadas as características técnicas do MasterGlenium Sky 617 fornecidas pelo produtor.

Quadro 12 Características técnicas do superplastificante utilizado

Propriedades	Caraterísticas
Função principal	Superplastificante / Redutor de água
Marcação CE	De acordo com EN 934-2 como T11.1, T11.2
Aspetto	Castanho
Densidade relativa	$1.041 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
pH	5.3 ± 1
Teor em iões cloreto	<0.1%

3.2. Métodos

Para conseguir obter um produto iminente mais sustentável, isto é, desenvolvimento de produtos constituídos por serrim e gesso com boas propriedades físicas e térmicas, tornou-se necessário definir diferentes composições para os compósitos. As misturas iniciais serviram de referência para o estudo, apresentadas na Quadro 13, de maneira a encontrar a melhor composição de mistura com o serrim, que permitisse obter a melhor resistência mecânica e térmica e melhor durabilidade. Para isto, é fundamental estudar a influências das diferentes composições de serrim e do gesso, fazendo variar a quantidade de água e variar o tamanho do serrim, permitindo assim estudar o seu comportamento nos respetivos ensaios e o melhor desempenho no geral.

3.2.1. Estudo preliminar

Numa fase inicial foram realizados ensaios de compressão em provetes cúbicos, com dimensões de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. O ensaio à compressão foi realizado segundo a norma EN 1015-11:1999 [105]. Ao longo de toda a campanha que concerne os ensaios preliminares, foram produzidas 6 misturas com diferentes composições. Como referido anteriormente, as misturas tinham diferentes composições e dimensões de serrim e com um valor diferente de Água/Resíduos. O serrim utilizado para a fase preliminar era um serrim essencialmente em pó, isto é, um material constituído por partículas de dimensão maioritariamente de $0,125\text{--}0,5 \text{ }\mu\text{m}$. Tendo em linha de conta todas as características do serrim, tais como: facilidade de absorção de água; efeito mola quando sujeito a compressão; o serrim com estas

dimensões tem dificuldade de agregação; sendo o serrim um derivado da madeira pode ser um bom aliado para o isolamento térmico, bem como para o isolamento acústico. O objetivo nesta fase era analisar o comportamento do serrim quando utilizado com diferentes dimensões, conjugando com diferentes razões de Água/Resíduos, analisar a trabalhabilidade da mistura sem usar qualquer tipo de superplastificante e detectar qualquer tipo de incompatibilidade entre os materiais utilizados. Para isso foram efetuados ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Os provetes foram sujeitos a uma cura em câmara húmida. É denotar que, na fase preliminar, não foi feito nenhum ensaio no estado fresco. Uma vez que as pastas obtidas não permitiram essa medição. As composições estudadas estão apresentadas no Quadro 13.

Quadro 13 Composição das misturas dos ensaios preliminares

Mistura	Referência	Serrim	Água	Água/Resíduos
		kg/m³		
1	Serrim (200) - tal e qual	855,30	426,00	0,5
2	Serrim (200) 500µm	373,29	749,47	2,0
3	Serrim (200) 500µm	855,28	425,99	0,5
4	Serrim (200) 250µm	704,13	527,43	0,75
5	Serrim (200) 250µm	855,28	425,99	0,5

3.2.2. Compósitos de serrim e resíduos de gesso cartonado

Tendo por base os valores de resistência à compressão, obtidos nos ensaios preliminares, foi criado um compósito de resíduos de serrim e gesso cartonado, com o principal foco de aumentar os valores de resistência à compressão e encontrar um produto que tivesse boas características físicas e mecânicas, que consiste em toda a campanha experimental fase 1. As composições estudadas na fase 1 estão apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14 Composição utilizadas para a fase 1

Mistura	Serrim	Gesso	Água	Água/Resíduos	SP
	kg/m³				
S100_G	689,52	-	516,47	0,7	20,8
S70_G30	510,95	220,19	547,65	0,7	11,6
S50_G50	373,14	373,14	561,16	0,8	22,6
S30_G70	232,29	539,02	577,74	0,7	26,8
S10_G90	101,40	908,72	503,11	0,5	25,0
S10_G90_A/Resíduos.0,75	81,71	732,23	609,67	0,75	10,1

Com base nos resultados dos ensaios de compressão realizados com estas misturas, dispensou-se a mistura 2. Posto isto, foi testada também a trabalhabilidade e a resistência à flexão dos compósitos. Para cada uma misturas foram realizados provetes prismáticos, com dimensões 4x4x16 cm³, que foram testados à flexão e, posteriormente, à compressão. Optou-se por fazer ensaio de flexão aos 28 dias. Para uma fase posterior, a fase experimental 2, com os resultados da resistência à compressão dos 7 dias, foram eleitas 3 misturas que apresentaram os mais valores de resistência. Posto isto, foi feita uma otimização da mistura para melhorar ainda mais os valores da resistência. A otimização da mistura foi conseguida através da ativação do gesso, isto é, o gesso foi colocado numa mufla a 200 °C num período de 2 horas e arrefecido até uma temperatura de 40 °C. Foi utilizada a designação GM para gesso da mufla. Assim sendo, as composições para a mistura otimizada, e que correspondem à fase 2 da campanha experimental estão apresentadas no Quadro 15.

Quadro 15 Composições utilizadas para a Fase 2

Mistura	Serrim	Gesso	Água	Água/Resíduos	SP
	kg/m³				
S10_G90	101,40	908,72	503,11	0,5	25,0
S10_G90_A/Resíduos.0,75	81,71	732,23	609,67	0,75	10,1
S10_G90_A/Resíduos.0,6	92,07	825,06	548,86	0,6	22,7
S10_GM90	96,35	974,66	478,06	0,5	24,1
S20_GM80	198,25	789,17	491,80	0,5	24,4

O ensaio de transferência térmica foi realizado em moldes de 15x15x10 cm³. As composições estudadas foram as seguintes, Quadro 16.

Quadro 16 Composições para o ensaio da resistência térmica

Mistura	Serrim	Gesso	Água	Água/Resíduos	SP
	kg/m ³				
S10_G90	101,68	911,21	504,49	0,5	25,07
S10_GM90	101,68	911,24	504,51	0,5	25,03
S20_GM80	198,75	791,16	493,04	0,5	24,46

3.2.2.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade de cada mistura foi avaliada através do ensaio de espalhamento, pelo que o procedimento adotado está descrito na norma EN 1015-3/1999 [106]. O ensaio foi realizado em estado fresco após a realização da mistura.

O ensaio de espalhamento é feito com recurso a uma mesa de espalhamento, um molde metálico com forma troncocónica e um pilão. Coloca-se a mistura até meio do cone e dá-se 20 pancadas com o pilão, de seguida enche-se o resto do molde e compacta-se com mais 20 pancadas. Na Figura 24 está ilustrado o procedimento de ensaio.

Seguidamente, retira-se o molde e são dadas 15 batidas à mesa de espalhamento. Mede-se o diâmetro da mistura que foi espalhada, esta no molde compreendia uma largura de 100 mm, Figura 25. Pretendia-se que o diâmetro estivesse compreendido entre 150 ± 10 mm.



(a)



(b)

Figura 24 Colocação da mistura no interior do molde e extração do mesmo



Figura 25 Medição do espalhamento da mistura

3.2.2.2. Ensaios mecânicos

Como referido anteriormente, as misturas foram colocadas em moldes metálicos durante 24 horas à temperatura ambiente, sensivelmente a 23 °C, cobertos com película aderente para evitar a evaporação fugaz. Após as 24 horas foram desmoldadas e colocadas numa cura em câmara climática, com condições de temperatura e humidade controlada. Para determinar a resistência à compressão e flexão, os provetes foram endurecidos com diferentes tempos de cura (7, 14, 28 dias). A cura influencia os provetes, na medida em que, lhes oferece uma maior resistência, estabiliza o volume e melhora a durabilidade. Os dados recolhidos da resistência são dados pela média de três amostras para cada mistura a cada 7, 14 e 28 dias.

3.2.2.2.1. Resistência à flexão

Os provetes ensaiados à flexão apresentam dimensões de 4x4x16 cm³. O ensaio à flexão foi realizado segundo a norma EN 1015-11: 1999 [105]. Com base nas dimensões dos provetes foi utilizado o equipamento LLOYD LR50K plus, o mesmo equipamento utilizado no ensaio à compressão. Todos os provetes foram medidos e pesados antes do início do ensaio. O provete foi colocado nos apoios do equipamento, aplicando uma carga continua de 0,005 mm/s até à rotura do provete. **NaErro! A origem da referência não foi encontrada.** e Figura 27 Rotura do provete está representado o ensaio realizado. É de notar, que face rugosa do provete ficou virada para a parte lateral do equipamento e a face lisa ficou voltada para o equipamento. A carga máxima que levou à rotura do provete, permitiu calcular a resistência à tração por flexão, através da equação 3.

$$R_t = 1.5 \times \frac{F \times L}{b \times h^2}$$

Eq. 3

Onde:

R_t - Resistência à flexão (N/mm^2)

F - Força aplicada que levou à rotura do provete (N)

L - Distância entre apoios na qual é colocado o provete (100 mm)

$b = h$ - Comprimento e altura, respetivamente, do provete (40 mm)

O processo de ensaio é realizado para todos os provetes. E por último, as metades dos provetes obtidas no ensaio foram ensaiadas à compressão.



Figura 26 Ensaio à flexão



Figura 27 Rotura do provete

3.2.2.2. Resistência à compressão

Para o ensaio à compressão foram utilizados provetes cúbicos de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ numa fase inicial para ter uma sensibilidade dos valores das resistências que se poderia obter. Posteriormente foram ensaiados as metades dos provetes prismáticos utilizados para o ensaio à flexão. Com base nas dimensões dos provetes foi utilizado o esquema de ensaio apresentado na Figura 28, utilizando o equipamento LLOYD LR50K plus. O ensaio à compressão foi realizado segundo a norma EN 1015-11: 1999 [105]. Antes do ensaio todos os provetes foram medidos e pesados, numa balança com uma precisão de $\pm 0,01 \text{ g}$. Os provetes foram colocados no equipamento de ensaio e deu-se início, aplicando uma carga continua até à rotura do provete. Na Figura 29 apresentasse o ensaio realizado. É de notar que, o provete ficou com a face superior voltada para a frente, isto é, a face superior que inicialmente estava nos moldes, na prensa estava voltada para a frente, e não na posição inicial. Registou-se a carga máxima que levou à rotura do provete e com isso calculou-se a resistência à compressão, através da divisão entre a carga máxima (N) pela área da superfície do provete (mm^2). O resultado do ensaio é dado pela média de três provetes ensaiados.



Figura 28 Equipamento utilizado para ensaio à compressão



Figura 29 Ensaio de compressão realizado

3.2.2.3 Resistência térmica

O ensaio de avaliação da resistência térmica permite a caracterização das propriedades térmicas das amostras em estudo. Este estudo foi realizado na *Hot Box*, existente no Laboratórios de Construções do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Figura 30). A *Hot Box* é composta por duas câmaras, uma fria e uma quente, com cerca de 1 m³ de volume interno, correspondendo às dimensões externas de 2,0 m x 1,4 m x 1,6 m. As duas câmaras ligam-se por meio de um arco central onde são colocados os provetes de amostragem, Figura 31. A envolvente da *Hot Box* é composta por poliestireno expandido extrudido (XPS) (espessura de 20 cm; $U = 0,21 \text{ W/ (m}^2\text{.K)}$), para reduzir as trocas térmicas com o meio exterior.

A câmara fria, possui duas aberturas de ventilação na parede, Figura 32, que permitem a entrada do ar frio na câmara e a saída de ar quente. A ventilação é necessária para uniformizar o fluxo de calor que passa a amostra. Na câmara quente, existe um sistema de aquecimento que é verificado por um controlador de temperatura, e mantém a temperatura definida. A temperatura nas câmaras foi medida por quatro termopares, dois em cada câmara - um no meio da câmara, e o outro perto da amostra, Fig. 30, 31. Foi instalado um sensor de fluxo de calor no centro da amostra, Fig.33. Preliminarmente, foram efetuadas medições de calibração para avaliar as perdas e as transferências de calor de uma parede com uma transmissão térmica conhecida. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C1155 (ASTM C1155). A resistência térmica de cada um dos provetes é conseguida medindo o fluxo de calor e a temperatura superficial, usando fluxímetros (Hukseflux, o modelo HFP01SC *self-calibrating heat flux sensor*) e termopares (tipo T em cobre/constantan). Os dados foram registados com um data logger e gravados num computador. Todos os provetes foram isolados com silicone para que não houvesse passagem de calor entre as células.

A resistência térmica (Re) é obtida através da divisão da diferença de temperaturas (ΔTs) entre as duas faces do compósito e o fluxo de calor através do mesmo (Eq. 4):

$$\Delta Ts = T_2 - T_1$$

Sendo:

- ΔTs – diferença de temperaturas entre duas faces (°C);
- T_1 – temperatura do lado frio (°C);
- T_2 – temperatura do lado quente (°C);

$$Re = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta Ts}{\sum_{k=1}^m qk} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

- Re – resistência térmica (m².°C/W);
- m – número de valores de ΔT ;
- k – contador;
- qk – fluxo de calor (W/ m²);
- ΔTs – diferença de temperatura (°C).

Este cálculo é efetuado até CR_n , o fator de convergência, ser menor que 0,1 e a variância $Var(R)$ ser inferior a 10%. Isto acontece para períodos de 24 horas (n).

$$CR_n = \frac{R(t) - R(t - n)}{R(t)} \quad \begin{array}{l} n = 24 \text{ h} \\ CR_n < 0,10 \\ Var(R) < 10\% \end{array} \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo:

- CR_n – fator de convergência;
- R – resistência térmica (m².K/W);
- n – intervalo de tempo (h);
- t – tempo (h);
- Var – variância.

O valor da transmissão térmica U é obtido através da seguinte fórmula:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_j}{\sum_{j=1}^n \Delta T_j} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

- n é o número total de leitura efetuadas ao longo de um período de 24 h;
- φ é o fluxo de calor em W/ m²;
- ΔT é a temperatura em K, diferença de temperatura entre dois pontos diferentes da amostra.



Figura 30 Câmara fria (à esquerda) e câmara quente (à direita). No meio está situada a divisória para colocar o provete a ser ensaiado.



Figura 31 Anel de montagem do equipamento de ensaio de transmissão térmica.



Figura 32 Dispositivos de ventilação na parede posterior da câmara fria.



Figura 33 Termopar (à esquerda) e fluxímetro (à direita) colocado no provete

3.3. Procedimentos de ensaio

Os ensaios executados no âmbito desta dissertação foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Das seis composições estudadas durante a fase 1 (Quadro 14), e com base nos valores de resistência compressão, foram seleccionadas cinco dessas composições para reproduzir novamente (Quadro 15). Nesta nova fase da campanha experimental foram, também, produzidos provetes prismáticos e ensaiados à resistência à flexão. As misturas realizadas para o estudo da flexão foram a S50_G50, S30_G70, S10_G90 e S10_G90_ A/Resíduos 0,75, acrescentando a mistura de referência (S100_G). A mistura S70_G30 foi a que apresentou resultados menos favoráveis à compressão, assim sendo optou-se por não fazer.

3.3.1. Preparação dos compósitos

Para se obter um compósito de serrim e gesso iminentemente mais sustentável, com propriedades térmicas pretendidas e valores aceitáveis de resistências à compressão e à flexão, foi necessário proceder ao fabrico dos compósitos. Na preparação começou-se por pesar as quantidades de serrim e água pretendidas, numa balança com uma precisão de ± 1 g. Seguidamente, a mistura foi colocada no balde da misturadora de 1 L, denotar que misturadora funcionou no modo automático, por forma a homogeneizar a mistura, Figura 34. Passados 30 s, adicionou-se a quantidade de água necessária, de forma cuidadosa e lentamente para não haver perdas. Misturou-se durante mais 30 s assegurando-se que o serrim e a água estavam bem misturados. A misturadora parou aos 60 s, dando um intervalo de 30 s, para limpar as paredes do recipiente. Passado esse tempo voltou a funcionar durante mais 60 s. O mesmo procedimento foi utilizado em todas as misturas. Após efetuada a mistura, o passo que se segue é a moldagem dos provetes. Previamente à moldagem, foi feita uma lubrificação com óleo descofrante ao molde, com o intuito de facilitar o processo de descofragem e evitar que os provetes se colem aos moldes. Foram utilizados moldes cúbicos durante toda esta experiência com as dimensões 5x5x5 cm³. Para as cinco amassaduras foram utilizados cinco moldes, cada molde é constituído por nove provetes. À medida que os moldes eram cheios por camadas, através de uma espátula, era feita a compactação dos mesmos com recurso a um pilão, sendo esta feita com 10 pancadas por camada. Este processo foi feito dividido por 3 camadas. A última camada foi nivelada com recurso a uma espátula, é possível observar na Figura 35 o procedimento usado.

Por último, os moldes foram colocados numa câmara húmida, com uma humidade relativa de 80%, para a cura dos provetes. Estes foram desmoldados 24 horas depois, registando-se a data de amassadura e desmolde. Na Figura 36 é possível verificar os provetes desmoldados. Foram devidamente identificados para uma melhor organização e agilização dos ensaios. A cada 7, 14 e 28 dias, os provetes foram ensaiados à compressão, com o objetivo de se avaliar a resistência à compressão.



Figura 34 Misturadora utilizada



Figura 35 Total de moldes para cada dimensão e quantidade de serrim



Figura 36 Provete desmoldados

3.3.2. Massa volúmica dos provetes de gesso e serrim

A massa volúmica dos provetes compósitos foi determinada segundo uma equação matemática de fácil compreensão, a partir do quociente entre a massa e o volume do provete. Inicialmente, fez-se o levantamento das dimensões de cada um dos provetes, isto é, a medida de cada aresta dos cubos, após a medição, os provetes foram pesados e registada a sua. Foi calculada a densidade volúmica para cada um, e no fim, para obter um resultado final representativo, foi feita a média dos 3 provetes de cada mistura, foi utilizada a seguinte fórmula: $\rho = \frac{M}{V}$ (kg/m³). Alcançando assim o valor das densidades dos provetes para cada tipo de mistura (Quadro 20):

Quadro 17 Densidade dos provetes compósitos

		Mistura	Massa volúmica (kg/m³)
Provetes 50x50x50 mm³	Fase preliminar	Serrim (200) - tal e qual	378,30
		Serrim (200) 500µm	678,07
		Serrim (200) 500µm	342,94
		Serrim (200) 250µm	389,13
		Serrim (200) 250µm	315,66
		Serrim (200) - tal e qual	378,30
	Fase 1	S100_G	395,63
		S70_G30	537,49
		S50_G50	722,76
		S30_G70	1006,25
		S10_G90	1383,18
		S10_G90_A/ Resíduos.0,75	1006,72
	Fase 2	S10_G90	1277,60
		S10_G90_A/ Resíduos.0,75	1019,10
		S10_G90_A/ Resíduos.0,6	1439,73
		S10_GM90	1508,69
		S20_GM80	1037,49
Provetes 40x40x160 mm³	Fase 1	S100_G	377,80
		S50_G50	832,81
		S30_G70	1081,71
		S10_G90	980,13
		S10_G90_A/ Resíduos.0,75	1224,30
	Fase 2	S10_G90	956,42
		S10_G90_A/ Resíduos.0,75	1220,00
		S10_G90_A/ Resíduos.0,6	1005,12
		S10_GM90	600,59
		S20_GM80	529,34

4. Resultados experimentais

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos de toda a campanha experimental realizada, designadamente, no que concerne aos ensaios de estado fresco (espalhamento), no estado endurecido (compressão, flexão, e ensaio de resistência térmica).

4.1. Análise dos resultados da campanha preliminar

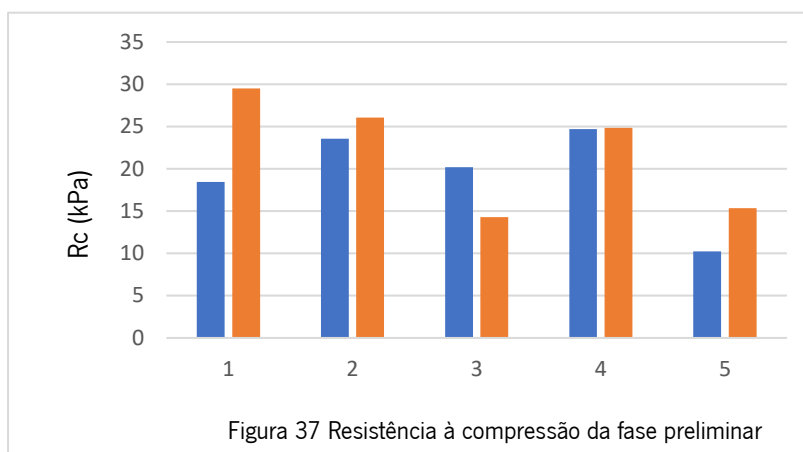
Este subcapítulo foca-se nos resultados da campanha experimental referente aos ensaios preliminares. Como referido no capítulo três, os ensaios preliminares apenas utilizaram provetes constituídos por serrim de diferentes tamanhos e composições, água e superplastificante, com o objetivo de se analisar o comportamento mecânico do serrim, bem como as suas características quando sujeito a condições de cura em câmara húmida.

4.1.1. Resistência à compressão

No Quadro 18 e na Figura 37 são apresentados os valores da resistência à compressão dos provetes sujeitos a cura em câmara climática, com condições de temperatura e humidade controlada, ensaiados aos 7 e 28 dias de cura. Os resultados que são apresentados consistem na média de 3 provetes de cada mistura e tempo de cura.

Quadro 18 Resistência à compressão da fase preliminar

Mistura	Rc 7 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	Rc 28 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)
1	18,44	1,39	29,52	9,68
2	23,55	7,87	26,07	18,44
3	20,18	3,90	14,31	2,17
4	24,70	3,78	24,85	5,00
5	10,23	0,30	15,36	6,46



Relativamente à resistência à compressão aos 7 dias, a mistura que oferece uma maior resistência é a mistura 4, com 24,70 kPa, seguindo-se a mistura 2 com 23,55 kPa, a mistura 3 com 20,18 kPa, e por último as misturas 1 e a 5, com valores de 18,44 e 10,23 kPa, respetivamente. Dependendo da granulometria do serrim e da razão de A/Resíduos, a resistência à compressão aos 7 dias diminuiu à medida que a A/Resíduos também diminuiu. A mistura 4, tal como o Quadro 13 indica, foi feita com um serrim de granulometria de 250 μm . e uma razão de água e ligante de 0,75, apresentando esta o maior valor aos 7 dias. Aumentando a granulometria do serrim para 500 μm e a razão A/Resíduos para 2, obtém-se assim a segunda mistura com o maior valor de resistência à compressão. É possível constatar que à medida que a granulometria do serrim aumenta e a razão de água ligante se reduz para 0.5, as misturas obtêm menores valores de compressão.

Aos 28 dias de cura dos provetes, a mistura que obteve a maior resistência à compressão foi a mistura 1, que concerne a mistura de referência, a mistura que foi feita com o serrim tal e qual como foi fornecido, sem qualquer tipo de diferença e separação granulométrica. Atingiu um valor de 29,52 kPa. Em seguida, a mistura 2, 4, 5 e 3 com valores de resistência de 26,07, 24,85, 15,36 e 14,31 kPa, respetivamente. É denotar que, com o passar do tempo de cura dos provetes, as misturas constituídas por serrim de todo o tipo de granulometria e de dimensões maiores, são os que oferecem melhores valores de resistência para os 28 dias. Com base na NP EN 998-1, a resistência de uma argamassa de alvenaria padrão enquadra-se na classe CS-IV ($\geq 6 \text{ N/mm}^2$), enquanto que as argamassas de alvenaria com incorporação de resíduo estão incluídas na classe CS-II (1,5 a 5,0 N/mm^2) / CS-III (3,5 a 7,5 N/mm^2).

4.2. Análise de resultados fase 1

Ao longo de toda a primeira fase, da campanha experimental, foram produzidos 6 compósitos com diferentes composições. Como referido anteriormente, as misturas tinham diferentes composições

de serrim, gesso, água e superplastificante, sendo este utilizado para melhorar a trabalhabilidade das misturas. O tipo de serrim utilizado foi o serrim com dimensões abaixo dos 4 mm, assemelhando-se mais a fitas do que propriamente serrim maioritariamente em pó. Tendo em linha de conta todas as características do serrim, o objetivo era analisar o comportamento do serrim juntamente com o gesso, analisar a trabalhabilidade da mistura e detetar qualquer tipo de incompatibilidade entre os materiais utilizados. Para isso foram efetuados ensaios de resistência à flexão e à compressão aos 7 dias, e ensaios no estado fresco, de determinação de consistência. Os provetes foram sujeitos a uma cura em câmara climática, com condições de temperatura e humidade controlada.

4.2.1. Ensaio no estado fresco- ensaio de espalhamento

Os resultados do ensaio de espalhamento são apresentados no Quadro 19. É possível verificar que todas as composições, exceto a S10_G90 e a S10_G90_A/Resíduos.0,75, são pastas com menor trabalhabilidade. Aquando da realização da mistura notou-se que esta estava um pouco seca. Estabeleceu-se um limite de superplastificante até 3% para as misturas, visto que uma quantidade superior a este valor poderia conduzir a um impacto na sustentabilidade, quer ao nível do impacto ambiental quer economicamente. Com isto, quer se dizer que, mesmo adicionando o superplastificante já não era possível aumentar mais a trabalhabilidade da mistura.

Quadro 19 Resultados do ensaio de espalhamento fase 1

Mistura	Espalhamento (mm)
S100_G	105
S70_G30	112
S50_G50	120
S30_G70	125
S10_G90	145
S10_G90_A/Resíduos.0,75	150

Aquando da realização do ensaio constatou-se que, após as 15 batidas da mesa de espalhamento a base da do molde pouco ou nada se mexeu, como é possível constatar pelos resultados obtidos e na Figura 38. Ter em linha de conta que a medição do espalhamento foi feita depois de realizado o ensaio de espalhamento.



Figura 38 Molde após as 15 batidas da mesa de espalhamento

A argamassa com maior trabalhabilidade, espalhamento na mesa, foi a pasta da mistura S10_G90_A/Resíduos.0,75. Isto deve-se ao facto de a mistura ter uma maior quantidade de água relativamente às outras composições, a qual melhora significativamente a trabalhabilidade pasta. Uma vez que há uma quantidade maior de gesso, relativamente ao serrim, e tendo em linha de conta a quantidade de água e superplastificante existente na mistura, era expectável que esta mistura fosse a que exibisse melhor trabalhabilidade e espalhamento.

As misturas S10_G90 e S10_G90_A/Resíduos.0,75, tem na sua composição a mesma quantidade serrim e gesso diferindo apenas a razão de A/Resíduos e a quantidade de superplastificante. A mistura S10_G90 tem uma razão de 0,5, enquanto que a mistura S10_G90_A/Resíduos.0,75 tem uma razão de 0,75, assim como a quantidade de SP decresce de 2,5% para 1,2%. Denotar que o rácio de SP apresentado foi obtido através da soma das quantidades de serrim e gesso. A mistura com mais água na sua composição revelou-se mais eficaz para a trabalhabilidade, e com valores de espalhamento melhores, sendo que a composição com uma percentagem de SP maior não se revela tão eficaz. Por outro lado, a mistura com razão de 0,5 necessita de mais superplastificante para permitir uma melhor trabalhabilidade. Facto é que, se se aumentar ao SP, a pasta torna-se menos amiga do ambiente, tendo por isso uma maior pegada ambiental.

4.2.2. Ensaio no estado endurecido

4.2.2.1. Resistência à flexão

Na Quadro 20 e na Figura 39 são apresentados os valores da resistência à tração em flexão dos provetes prismáticos sujeitos a cura em câmara climática, com condições de temperatura e humidade

controlada e ensaiados aos 28 dias de cura. Os resultados apresentados consistem na média de 3 provetes de cada mistura e tempo de cura.

Quadro 20 Resistência à flexão

Mistura	Rf 28 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)
S100_G	22,86	6,61
S50_G50	42,92	14,49
S30_G70	78,73	9,76
S10_G90	49,27	15,32
S10_G90_A/Resíduos.0,75	148,96	7,55

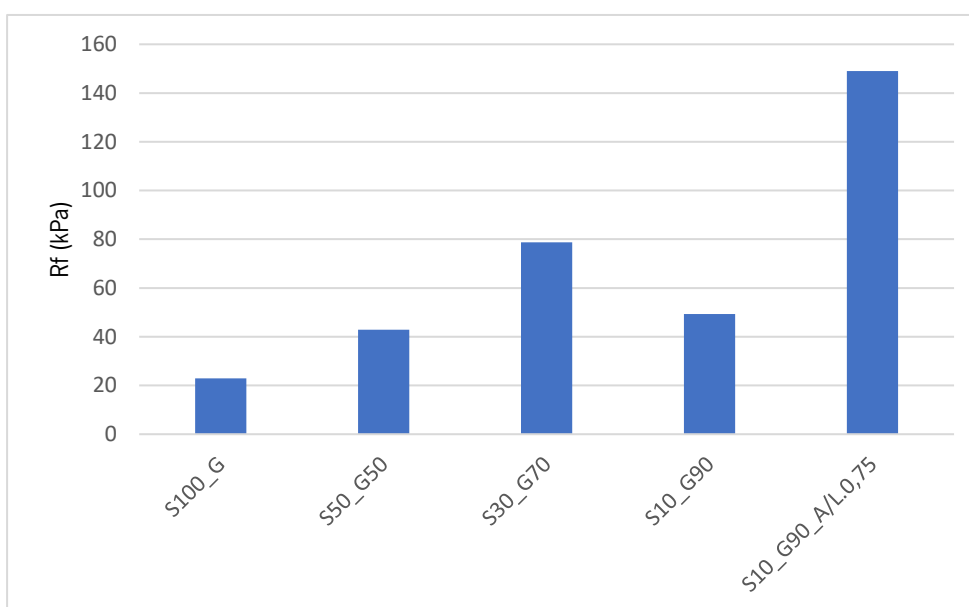


Figura 39 Resistência à flexão

Com base nos valores obtidos dos ensaios da resistência à flexão, apresentados na Quadro anterior, é notório que para os 28 dias o provete que obteve a melhor resistência à flexão foi o provete relativo à mistura S10_G90_ A/Resíduos .0,75, com uma resistência de 148,96 kPa. Seguindo os provetes das misturas S30_G70, S10_G90, S50_G50 e S100_G, com resultados de 78,73, 49,27, 42,92 e 22,86 KPa, respetivamente. Todas as composições que têm como ligante o gesso, que é o caso dos provetes em questão, endurecem por carbonatação [107][108].

Com o tempo de cura de 28 dias, os provetes prismáticos da mistura S10_G90_ A/Resíduos.0,75 obtiveram um melhor comportamento à flexão, podendo dever-se ao facto de estes serem os provetes com maior massa volúmica. Assim sendo a percentagem de poros é inferior à dos

outros provetes. Pode-se concluir que quanto maior a massa volúmica do provete, menor é a porosidade e maior a resistência à flexão.

4.2.2.2. Resistência à compressão

No Quadro 21 e na Figura 40 são apresentados os valores da resistência à compressão dos provetes sujeitos a cura em câmara climática, com condições de temperatura e humidade controlada, ensaiados aos 7, 14 e 28 dias de cura, para provetes cúbicos com aresta de 5 cm. Os resultados que são apresentados consistem na média de 3 provetes de cada mistura e tempo de cura, como foram apresentados os resultados da fase preliminar. O objetivo inicial era fazer o ensaio aos 7 e 28 dias, e com o maior valor da resistência à compressão da mistura, replicar a mesma para cubos de maiores dimensões para fazer o ensaio térmico. A mistura S10_G90_A/Resíduos.0,75 é a única que apresenta valores de compressão aos 14 dias porque no momento do ensaio aos 7 dias, os provetes ainda não tinham tempo de cura suficiente que permitisse a realização do ensaio aos 7 dias, por este motivo optou-se por fazer o ensaio aos 14 dias.

Quadro 21 Resistência à compressão fase 1

Mistura	Rc 7 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	Rc 14 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	Rc 28 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)
S100_G	11,82	2,73	-	-	4,84	0,53
S70_G30	18,72	2,23	-	-	15,11	1,83
S50_G50	26,27	4,02	-	-	11,39	2,54
S30_G70	33,89	7,22	-	-	18,48	2,07
S10_G90	45,42	7,49	-	-	68,87	9,60
S10_G90_ A/Resíduos.0,75	-	-	6,348	1,13	6,509	1,52

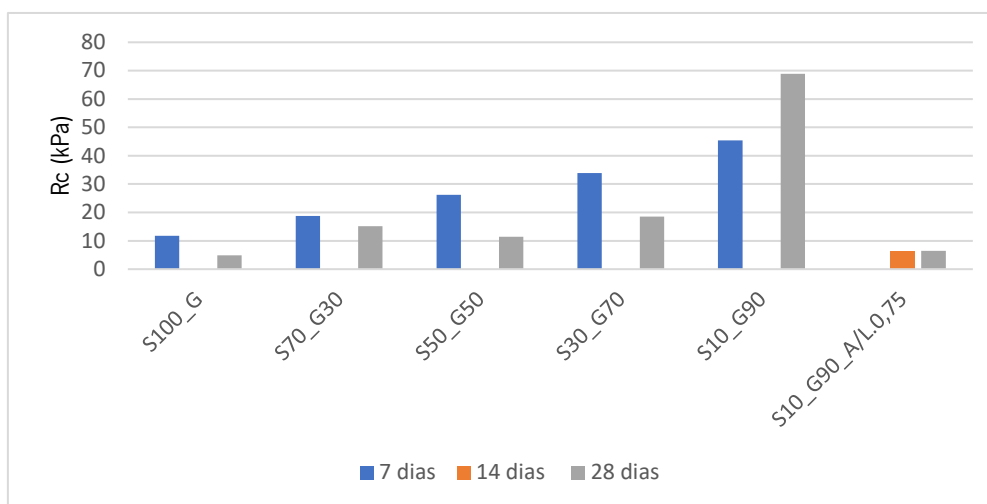


Figura 40 Resistência à compressão fase 1

Analisando o Quadro 20, a mistura que apresenta os melhores resultados para a resistência à compressão é a mistura S10_G90. Esta mistura obteve uma resistência à compressão aos 7 e 28 dias de 45,42 e 68,87 kPa, respetivamente. Era expectável que esta fosse a composição que obteria os melhores valores, desde o momento da sua produção, pela textura e fluidez do compósito, passando pelo ensaio de espalhamento que teve o valor ideal para a pasta, até à fase de compactação. Percebia-se bem que, quando ganhasse presa, ia ser a mistura mais rígida e por isso com os melhores valores de compressão. Posto isto, as misturas que se seguem com os melhores valores de resistência à compressão aos 7 dias são: S30_G70, S50_G50, S70_G30 e S100_G, com valores de 33,89, 26,27, 18,72 e 11,82 kPa, respetivamente. A mistura S10_G90_A/Resíduos .0,75 foi a mistura que apresentou os valores mais baixos da resistência à compressão quer aos 14 dias quer aos 28 dias porque o aumento da quantidade de água, conduz a uma tendência esperada de diminuição da resistência à compressão na argamassa. A incorporação de resíduo de madeira nas composições, conduz a uma redução significativa nas resistências mecânicas das argamassas, nomeadamente à compressão e à flexão [109]. Com a introdução do gesso e do superplastificante para formar o compósito, resultou num aumento significativo da trabalhabilidade e resistência à compressão das pastas.

Analisando os resultados para os 28 dias de tempo de cura, a maior resistência à compressão foi obtida para a mistura S10_G90, com um resultado de 68,87 kPa. A seguir vem as misturas S30_G70, S70_G30, S50_G50 e S100_G com 18,48, 15,11, 11,39 e por último 4,84 kPa, respetivamente.

Quanto às resistências à compressão obtidas pelos provetes ensaiados inicialmente à flexão, os resultados obtidos são apresentados no Quadro 22, ilustrados na Figura 41.

Quadro 22 Resistência à compressão obtida nos provetes ensaiados inicialmente à flexão

Mistura	Rf 28 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)
S100_G	20,73	5,60
S50_G50	194,44	36,68
S30_G70	332,28	20,00
S10_G90	381,25	15,89
S10_G90_A/Resíduos.0,75	1164,66	23,84

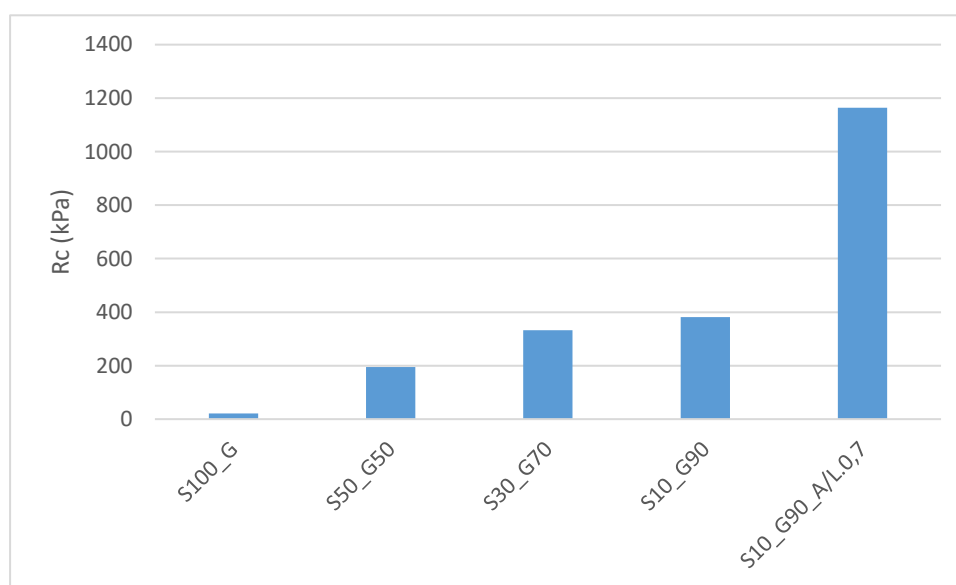


Figura 41 Resistência à compressão obtida nos provetes ensaiados inicialmente à flexão

Pela análise do Quadro 21, a mistura que apresenta os melhores resultados, de forma notória, para a resistência à compressão é a mistura S10_G90_A/Resíduos.0,75. Sendo que nos ensaios de compressão realizados aos provetes cúbicos, esta composição foi também a que apresentou a melhor resistência, era evidente que para este ensaio, apresenta-se o mesmo comportamento. Atingiu um valor de compressão de 602,36 kPa. Este valor, obtido nos provetes provenientes do ensaio de flexão, foi bastante elevado devido ao facto do provete, aquando da realização do ensaio apenas comprimiu, não teve uma rotura de provete. Os gráficos obtidos para estes provetes eram sempre crescentes, não tinham picos de rotura do provete. Assim, limitou-se o valor da força para cálculo à força máxima atingida. Seguiu-se para os cálculos com este valor. Em seguida, as misturas com os melhores valores de resistência à compressão são a mistura S10_G90, S30_G70, S50_G50 e S100_G com valores de 381,25, 348,39, 194,44 e 20,73 kPa, respetivamente. A mistura S100_G foi a mistura que obteve os resultados mais baixos, pois é a mistura de referência, como referido anteriormente. À primeira vista, a solução que parece ser a solução ótima é a S10_G90_A/Resíduos.0,75. No entanto, esta composição é a que

constitui a maior quantidade de água e superplastificante, o que quer dizer que, em termos de sustentabilidade torna-se pouco viável por ter uma razão de A/Resíduos tão elevada e uma quantidade de SP também elevada. Com isto, pode-se concluir que a adição de gesso ao serrim para formar um compósito, e uma razão de A/Resíduos de 0,5 é a composição ótima.

4.3. Análise de resultados fase 2

Com base nos resultados obtidos na campanha experimental anterior, partiu-se para a fase 2 do estudo prático. As misturas utilizadas desta vez já foram as misturas otimizadas da fase 1. As misturas replicadas foram a mistura S10_G90 e S10_G90_A/RESÍDUOS.0,75, a mistura S10_G90 com gesso da mufla, e por isso S10_GM90, o gesso utilizado foi ativado a 200°C na mufla, e uma mistura intermédia com a nomenclatura S20_GM80. Constituída por 20% de resíduo de serrim 80% de gesso cartonado ativado na mufla. As quantidades de cada material já foram apresentadas anteriormente no capítulo 3. Os ensaios realizados nesta fase foram: ensaio de espalhamento; ensaio de resistência à compressão e flexão e ensaio de transferência térmica.

4.3.1. Ensaios no estado fresco- ensaio de espalhamento

Os resultados do ensaio ao espalhamento apresentados em baixo são obtidos diretamente do ensaio.

Analisando o Quadro 23 é possível constatar que quase todas as composições apresentam resultados ao espalhamento dentro dos limites estabelecidos pela norma EN 1015-3 [107]. A mistura S20_GM80 foi a que apresentou um espalhamento inferior a 140cm, podendo dever-se ao facto da quantidade de água presente na mistura ser insuficiente para hidratar totalmente a pasta e esta apresentar um aspeto mais seco. O facto de o gesso utilizado estar a uma temperatura de 40°C apressa o processo de secagem da pasta, e por isso reduz muito rapidamente a fluidez e trabalhabilidade da pasta. Todas as outras composições apresentaram valores de espalhamento que respeitavam a norma. Assim sendo, foram utilizadas estas composições para a realização dos ensaios seguintes.

Quadro 23 Resultados do ensaio de espalhamento fase 2

Mistura	Espalhamento (mm)
S10_GM90	140
S10_G90	145
S10_G90_A/Resíduos.0,6	160
S10_G90_A/Resíduos.0,75	150,5
S20_GM80	115

4.3.2. Ensaio no estado endurecido.

4.3.2.1. Resistência à flexão

No Quadro 24 são apresentados os valores da resistência à flexão dos provetes prismáticos da mistura intermedia S20_GM80, ensaiados aos 28 dias de cura. Os resultados que são apresentados consistem na média de 3 provetes da mistura.

Quadro 24 Resultados da resistência à flexão da mistura intermedia

Mistura	Rf 28 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)
S20_GM80	143,24	12,27

O valor obtido na resistência à flexão, para a mistura intermédia S20_GM80 criada, é de 143,24 kPa. Era expectável que esta mistura intermedia, com uma composição de 20% de serrim e 90% de gesso cartonado, tivesse um valor de resistência à flexão próximo do valor obtido para a mistura S10_G90_ A/Resíduos .0,75. Ambas tem em comum a quantidade mais elevada de gesso quando comparadas com a composição das outras misturas. A mistura S20_GM80 apresenta uma razão A/Resíduos de 0,5, enquanto que a mistura S10_G90_ A/Resíduos .0,75 tem de 0.75.

4.3.2.2. Resistência à compressão

No Quadro 25 e Figura 42 são apresentados os valores da resistência à compressão dos provetes sujeitos a cura em câmara climática, com condições de temperatura e humidade controlada, ensaiados aos 7, 14 e 28 dias de cura, para provetes cúbicos com aresta de 5cm. Os resultados apresentados consistem na média de 3 provetes de cada mistura e tempo de cura, como foram apresentados os resultados das fases anteriores.

Quadro 25 Resistência à compressão fase 2

Mistura	Rc 7 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	Rc 14 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	Rc 28 dias (kPa)	Desvio Padrão (kPa)
S10_GM90	179,28	3,05	-	-	-	-
S10_G90	67,67	6,39	-	-	88,07	11,70
S10_G90_ A/Resíduos.0,6	-	-	-	-	227,37	4,19
S10_G90_ A/Resíduos .0,75	10,13	2,32	-	-	28,24	0,81
S20_GM80	62,86	3,57	72,18	2,34	87,33	9,52

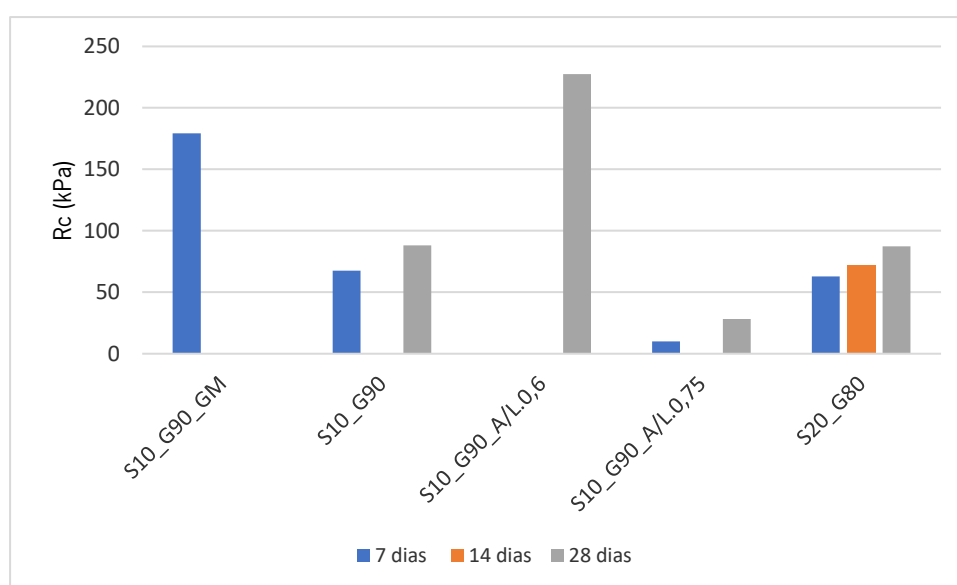


Figura 42 Resistência à compressão Fase 2

Pela análise do Quadro 24 é possível verificar que a mistura que apresenta os melhores resultados para a resistência à compressão aos 7 dias é a mistura S10_GM90. De referir que esta para esta composição só se fez o ensaio aos 7 dias porque, aquando da realização da mistura S10_G90 pensou-se numa forma possível de otimizar as resistências dos provetes. A forma possível foi a ativação do gesso na mufla. A quantidade colocada na mufla, e uma vez que era primeira vez que se estava a fazer este procedimento, não permitiu que fosse a suficiente para fazer misturas para provetes a serem ensaiados aos 28 dias. Sendo o processo de ativação do gesso um pouco moroso, porque é necessário deixa-lo a 200°C por 2 horas na mufla e depois deixar arrefecer até 40 °C, optou-se por fazer apenas aqueles provetes com o objetivo de ter uma noção do valor das resistências que se ia obter. Obteve uma resistência à compressão de 179,28 kPa. Era expectável que esta fosse a composição que ia obter melhores resultados, pois o gesso foi ativado a 200°C na mufla e utilizado a 40 °C para a fazer a pasta. O gesso (sulfato de cálcio di-hidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é a fase mais aquosa do sistema $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ e,

para além da anidrite II, é a fase mais estável em condições atmosféricas ambientais. Com o aumento da temperatura, o gesso começa a desidratar e a formar sulfatos de cálcio com menor teor de H_2O . O processo de desidratação prossegue por etapas e leva a fases de sulfato de cálcio metastáveis. A basanite (sulfato de cálcio hemihidratado, $CaSO_4^{0.5} H_2O$) forma-se com a perda de 1,5 mol H_2O por unidade de fórmula em relação ao gesso. O hemihidrato existe em diferentes formas morfológicas (α , β e β'). A modificação dos hemihidratos em β forma-se em condições ambientais de temperaturas que vão de 45 °C a 200 °C [109]. Em contraste com a modificação de α , a modificação de β é microcristalina com uma elevada área de superfície específica. O aquecimento adicional da basanite acima de temperaturas de 100 °C leva à anidrite solúvel (anidrite III, $CaSO_4$) [110]. Quando faz a cura na câmara climática ganha uma resistência, muito mais elevada que os provetes com gesso normal na sua composição. O mecanismo plausível para o aumento da resistência no gesso anidrita parece ter lugar através da produção de di-hidrato gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) através da formação de sais instáveis transitórios ($Na_2SO_4 \cdot Fe_2(SO_4)_3 \cdot Na_2FeSO_4 \cdot 3H_2O$ e $Na_2SO_4 \cdot CaSO_4$) durante a hidratação [111]. Posto isto, as misturas que se seguem com os melhores valores de resistência à compressão são a mistura S10_G90, S20_G80, S10_G90_A/Resíduos.0,75, com valores de 67,67, 62,86, 18,72 e 10,13 KPa, respetivamente. A mistura S10_G90_A/Resíduos.0,75 foi a mistura que apresentou os valores mais baixos da resistência quer para os 7 dias como para os 28 dias. Era previsível, uma vez que na fase 1 foi feita a mesma composição e também foi a que teve resultados mais baixos.

Para os 28 dias, a mistura com o melhor resultado da compressão foi a S10_G90_A/Resíduos.0,6, atingiu um valor de 227,37 kPa. Seguidamente, apresentaram-se as misturas com os melhores resultados a mistura S10_G90, S20_G80, S10_G90_A/Resíduos.0,75, com valores de 88,07, 87,33, 28,24 KPa, respetivamente. É de notar que a resistência para os 28 dias cresce de forma igual como a registada para os 7 dias.

4.3.3. Resistência térmica

Os valores referentes ao ensaio de resistência térmica encontram-se apresentados na Figura 43, 44, 45 e 46. Tendo em conta que o objetivo desta tese era a criação de um painel de isolamento com 0% de matérias-primas, ou seja, só com resíduos, a calibração do equipamento foi realizada com recurso ao uso de o bom material isolante, o XPS. Os dados da calibração foram também utilizados para a comparação com os provetes em estudo. Das medições de calibração efetuadas preliminarmente, feitas a uma amostra de referência com transmissão térmica conhecida (XPS com espessura de 20 cm), os resultados obtidos mostraram-se de acordo com os dados técnicos fornecidos pelo fabricante DANOSA

(U-valor de 0,18 W/m²K) e com uma condutividade térmica de 0.035 W/mK [112]. Segue um resumo dos valores obtidos para a transmissão, resistência e condutividade térmica das composições estudadas:

Quadro 26 Resumo dos valores de transmissão, resistência e condutividade térmica para os blocos compósitos

Mistura	U (W/m ² K)	R (m ² K /W)	K (W/mK)
S10_GM90	1,71	0,63	0,15
S20_GM80	1,22	0,83	0,24
S10_G90	1,69	0,59	0,33

Comparando os blocos compósitos desenvolvidos com um bloco compósito constituído por serrim e Ecovio® F Blend C2224, com uma densidade de 1.24–1.26 g/cm³, e que apresenta uma condutividade térmica 0.11 ± 0.003 [113], a composição que fica mais próximas deste valor é a mistura S10_GM90. Todos os blocos desenvolvidos apresentam valores de transmissão térmica – U, resistência e condutividade térmica bastante mais elevados quando comparado com um painel de isolamento térmico sustentável constituído por: um painel sanduiche de MDF- Painel de fibra de densidade média com tachas de madeira e no seu interior fibras de trigo, com uma espessura de 15 cm. Este apresenta um U de $0,307 \pm 0,004$ W/m²K, uma resistência térmica de $3,263 \pm 0,040$ (m²K) /W e uma condutividade térmica de $0,048 \pm 0,001$ W/mK [114].

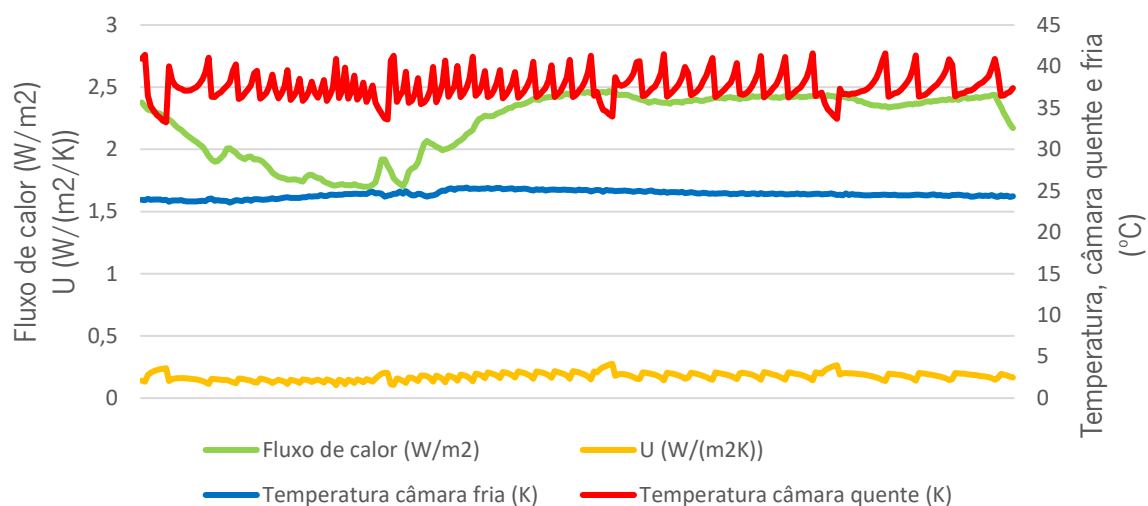


Figura 43 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: XPS

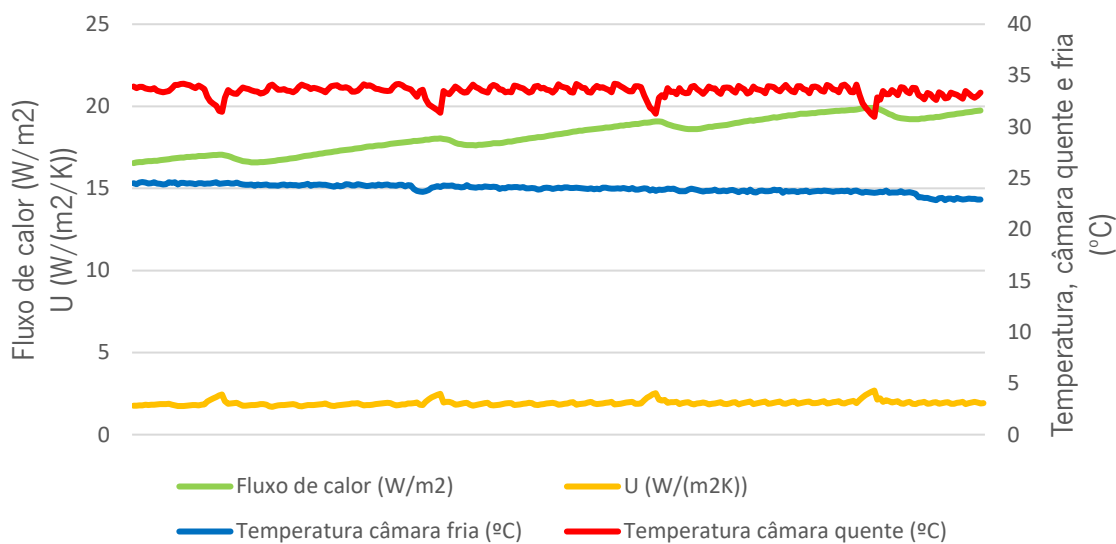


Figura 44 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: S10_GM90

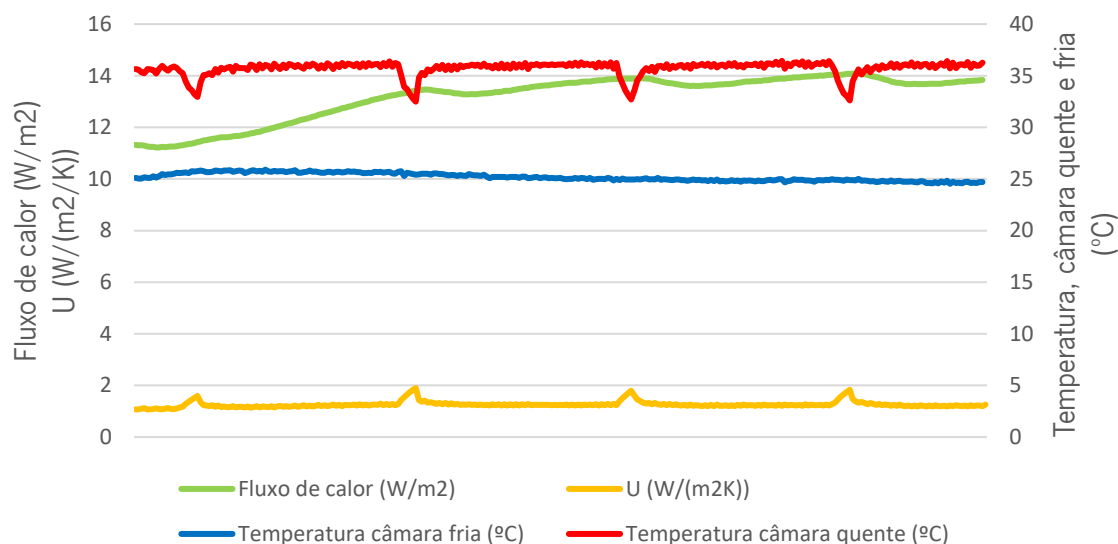


Figura 45 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: S20_GM80

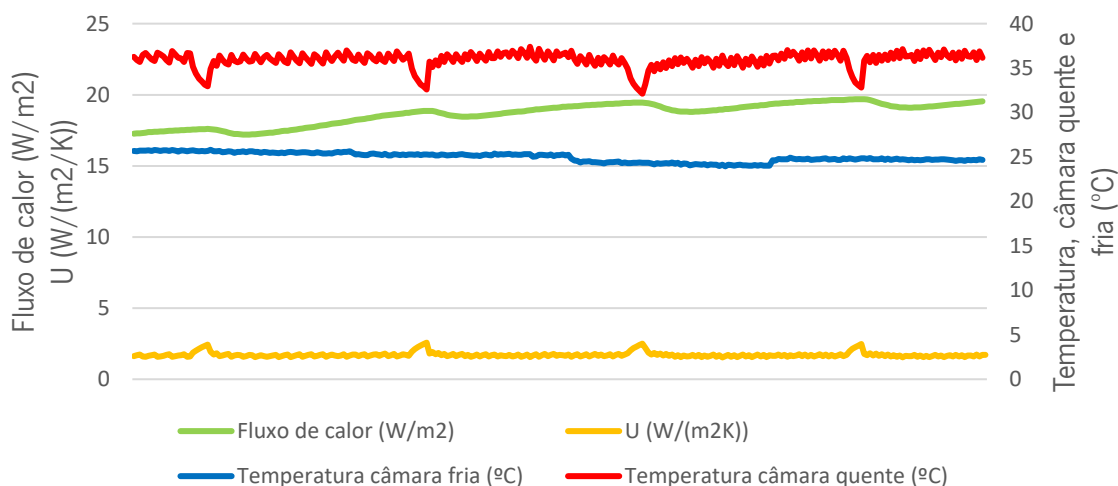


Figura 46 Medições do fluxo de calor, temperaturas superficiais e valor de U para o bloco da composição: S10_G90

Uma das possíveis aplicações deste bloco passaria por ser um isolante térmico de paredes no interior das edificações. Uma vez que é composto por serrim e gesso, quando utilizado em paredes exteriores para isolamento, a humidade a que estaria sujeito ia provocar a degradação do mesmo, e por isso não ia ter um bom desempenho térmico, função para a qual tinha sido escolhido.

5. Análise de ciclo de vida - Metodologia e Resultados

O objetivo da realização da análise de ciclo de vida é avaliação do impacto ambiental dos compósitos de resíduo de gesso e serrim, com a finalidade de isolamento térmico, e comparar com os impactos ambientais resultantes da produção de placas de XPS, para futuramente arranjar uma solução iminentemente mais sustentável. Assim sendo, neste capítulo vai ser explicada a metodologia do cálculo e análise do ciclo de vida (ACV) dos compósitos feitos para o ensaio de transferência térmica, realizados nesta dissertação de mestrado. Inicia-se o capítulo com a definição da metodologia a adotar, bem como os seus objetivos, definição da unidade funcional e limitação do sistema através de fronteiras. Seguidamente é apresentada a análise de inventário e quantificação dos indicadores de sustentabilidade. A avaliação de impacto passa pela definição dos indicadores de sustentabilidade, em seguida é feita a sua normalização compreendida entre valores de 0 e 1, em seguida é feita a agregação e avaliação global através de uma equação, em que esta calcula a agregação de cada indicador ambiental em termos de um indicador global, descrevendo o desempenho ambiental global. Em último, é realizada a análise de sensibilidade e apresentados e discutidos os seus resultados.

As composições estudadas foram as mesmas composições utilizadas para a fase 2, Quadro 27.

Quadro 27 Composições da fase 2 para ACV

Mistura	Serrim	Gesso	Água	A/Resíduos	SP
	kg/m³				
S10_G90	101,40	908,72	503,11	0,5	25,0
S10_G90_A/RESÍDUOS.0,75	81,71	732,23	609,67	0,75	10,1
S10_G90_A/RESÍDUOS.0,6	92,07	825,06	548,86	0,6	22,7
S10_GM90	96,35	974,66	478,06	0,5	24,1
S20_GM80	198,25	789,17	491,80	0,5	24,4

5.1. Alcance e objetivos

O objetivo principal deste estudo é avaliar o desempenho ambiental das várias formulações do compósito de serrim e gesso. O método utilizado neste estudo seguiu as fases de uma análise de ciclo de vida, ACV. A análise comparativa e a agregação de indicadores foram desenvolvidas utilizando a Metodologia de apoio à decisão multicritério para a Avaliação da Sustentabilidade Relativa das Tecnologias de Construção (MARS-SC) [115][116]. A metodologia MARS-SC baseia-se em três grupos de categorias de sustentabilidade: ambiental, funcional e económica [116]. Uma vez que este estudo visa

avaliar o desempenho ambiental de diferentes formulações de serrim e gesso, apenas vai ser considerada a categoria ambiental de MARS-SC.

A metodologia MARS-SC processa em cinco etapas (Figura 47): i) definição dos indicadores de sustentabilidade; ii) quantificação dos indicadores (incluindo o inventário do ciclo de vida); iii) normalização dos indicadores; iv) agregação dos indicadores; e v) cálculo da pontuação de sustentabilidade e avaliação global [115][116].

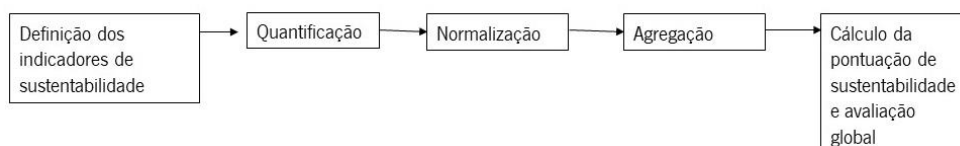


Figura 47 Estrutura da metodologia de MARS-SC para cada indicador de sustentabilidade ambiental [108]

5.2. Unidade funcional e fronteiras do sistema

Neste estudo, o objeto de análise é o serrim e o gesso. A metodologia MARS-SC permite avaliar todas as fases do ciclo de vida [115][116]. No entanto, as fronteiras deste trabalho marcam os impactos ambientais incorporados nas diferentes composições de cada material, bem como os impactos ambientais que resultam do transporte dos materiais para o laboratório de fabrico do compósito. A limitação do estudo à fase de "berço-à-porta" é justificada pelo facto de que, para as composições estudadas, a utilização e eliminação dos provetes resultará em impactos ambientais semelhantes à dos próprios resíduos *per se*. A unidade funcional considerada para a análise do ciclo de vida foi a dimensão de uma placa de XPS da empresa ChovA, Sistemas de Impermibilización y Aislamiento [112], com dimensões 1250 x 600 x 40 mm³, com um volume total de 0,03m³.

Na Figura 48 são mostrados, de forma simplificada, os processos incluídos para a ACV e os limites do estudo realizado, sendo que este foi apropriado de acordo com as misturas em envolvidas.

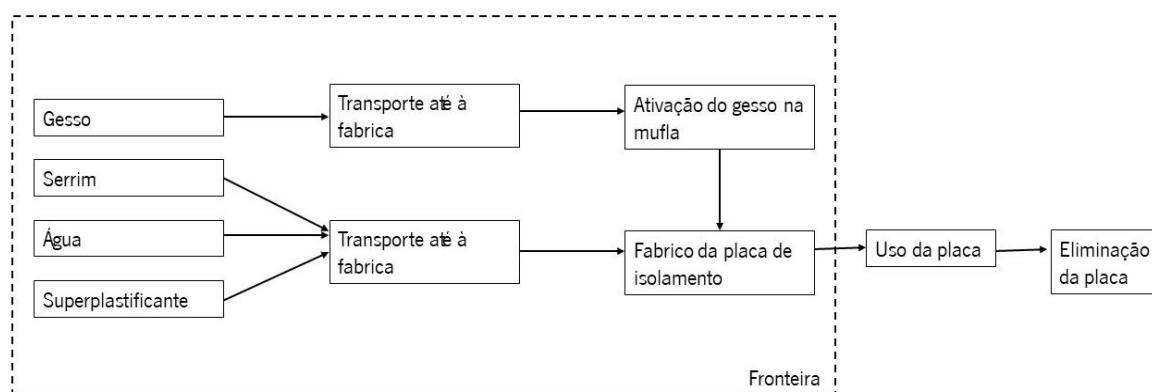


Figura 48 Processos considerados na análise ambiental para as diferentes composições dos provetes de serrim e gesso

5.3. Análise de inventário

Para quantificar os indicadores de sustentabilidade é necessário primeiro desenvolver a análise do inventário [116]. Este é utilizado para quantificar as entradas, como por exemplo, a energia, os materiais e os produtos químicos; assim como os resultados, por exemplo, emissões e resíduos do sistema de produtos [117]. Como referido anteriormente, a produção de matérias-primas, o transporte das mesmas, para o laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, e a produção do painel de isolamento térmico foi incluída no inventário. O Quadro 28 mostra o inventário dos materiais e do transporte considerado para cada formulação do compósito.

O software utilizado para a análise do ciclo de vida foi o SimaPro 9.2.0 Demo, este facilita o método de quantificação das categorias de impacto. Para o estudo, foi tido em linha de conta que a empresa DST forneceu os resíduos de gesso e serrim, como referido no capítulo 3. Posto isto, torna-se necessário quantificar as categorias de impacto, porque a declaração ambiental não compreendia todas as categorias necessárias para este estudo, limitando-se apenas às obrigatórias, declaradas pela legislação ambiental portuguesa. O inventário, apresentado na legislação, que foi utilizado no software SimaPro, permitiu avaliar os potenciais impactos ambientais dos materiais usados.

Relativamente a cada tipo de material foi necessário fazer a atribuição dos fluxos, partindo de cada material passando para o transporte do mesmo, seguido para a produção da placa de isolamento, até ao seu uso, e por último a sua eliminação.

A atribuição deve respeitar o principal objetivo dos processos estudados, atribuindo adequadamente a todos os produtos e funções relevantes. Como resultado, todos os fluxos de entradas e saídas, foram declaradas na presente dissertação e no software SimaPro.

No inventário relativo ao processo de transporte, o estudo teve em conta as distâncias entre o local de produção dos resíduos gerados e a venda de superplastificante, e o seu destino final, a empresa escolhida para fazer as placas Gyptec Ibérica – Gessos Técnicos, SA. Como referido anteriormente, a água necessária para as misturas, foi a disponibilizada pela rede de distribuição de água da empresa. Para o serrim, foi considerado como local de produção a carpintaria da empresa Domingos da Silva Teixeira, DST. Já para o gesso foi considerada uma obra de construção da mesma empresa situada em Cantanhede, Coimbra. Para o superplastificante foi considerado um distribuidor representante da marca MasterGlenium, localizado em Carnaxide. Os quilómetros considerados para a distância de transporte do gesso, serrim e superplastificante foi de 43,4 km, 198 km e 191 km, respetivamente.

O inventário relacionado com a produção da placa de isolamento térmico, foi quantificado tendo em conta a Declaração Ambiental de Produto (DAP) de uma fábrica específica de placas de isolamento

térmico de XPS [112]. Com base na DAP, foram considerados apenas os fluxos relacionados com a fase de mistura dos materiais.

Quadro 28 Resultados do inventário do material e dos inputs para o transporte para cada compósito (valores por 0,03 m³ de compósito produzido)

Material	S10_G90	S10_G90_A/Re siduos.0,75	S10_G90_A/Re siduos.0,6	S10_GM90	S20_GM80
	kg				
Serrim	3,04	2,45	2,76	2,89	5,95
Gesso	27,26	21,97	24,75	29,24	23,68
SP	0,75	0,30	0,68	0,72	0,73
Água	15,09	18,29	16,47	14,34	14,75
Transporte	t.km				
Serrim (198km)	0,60	0,49	0,55	0,57	1,18
Gesso (43,4Km)	1,18	0,95	1,07	1,27	1,03
SP (191 km)	0,14	0,06	0,13	0,14	0,14
Água (0 km)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

5.4. Avaliação de impacto

Agora, os dados do inventário do ciclo de vida foram convertidos para o potencial de impacto ambiental, utilizando o método da avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV).

No MARS-SC, a definição dos indicadores de sustentabilidade depende, principalmente do tipo de produto ou elemento do edifício analisado e dos objetivos de estudo. Neste método, a avaliação do desempenho ambiental fundamenta-se em 6 categorias de impacto ambiental identificados no Quadro 29, nomeadamente: i) Aquecimento global (GWP); ii) Diminuição da camada de ozono (ODP); iii) Acidificação dos solos e água (AP); iv) Eutrofização (EP); v) Criação fotoquímica de ozono (POCP); e vi) Esgotamento dos recursos abióticos - combustíveis fósseis (ADP_FF). Em comparação com a lista das categorias de impacto encontradas na norma EN15804:2012 [118], o MARS-SC não considera o esgotamento dos recursos abióticos uma categoria de impacto.

Quadro 29 Indicadores, unidades e métodos de quantificação

Indicadores ambientais	Unidades	Métodos de AICV
Aquecimento global (GWP 100)	[kg CO ₂ eq]	CML-IA baseline V3.06 / EU25
Diminuição da camada de ozono (ODP)	[kg CFC-11 eq]	CML-IA baseline V3.06 / EU25
Acidificação dos solos e água (AP)	[kg SO ₂ eq]	CML-IA baseline V3.06 / EU25
Potencial de Eutrofização (EP)	[kg PO ₄ eq]	CML-IA baseline V3.06 / EU25
Criação fotoquímica de ozono (POCP)	[kg C ₂ H ₄ eq]	CML-IA baseline V3.06 / EU25
Esgotamento dos recursos abióticos - combustíveis fósseis (ADP_FF)	[MJ eq]	CML-IA baseline V3.06 / EU25

5.4.1. Normalização

Para evitar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros dos diferentes indicadores e para minimizar a possibilidade de alguns dos parâmetros serem do tipo "*o mais alto é o melhor*" e outros "*o mais baixo é o melhor*", torna-se necessário normalizar os indicadores [116]. A normalização foi feita utilizando a equação Diaz-Balteiro [119] (Eq. 6).

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P^*_i - P_{*i}} \quad \forall i \quad \text{Eq. 6}$$

Na equação apresentada anteriormente, P_i é o valor do parâmetro i . P^*_i e P_{*i} representam o melhor e o pior valor do parâmetro de sustentabilidade i , respetivamente, entre os produtos analisados. A normalização converte os valores para escala compreendida entre 0 (pior valor) e 1 (melhor valor), transformando assim o valor de cada indicador adimensional [116].

5.4.2. Agregação e avaliação global

A Eq. 7 calcula a agregação de cada indicador ambiental em termos de um indicador global, descrevendo o desempenho ambiental global (ND_A).

$$ND_A = \sum_{i=1}^n w_i * \bar{P}_i \quad \text{Eq. 7}$$

O indicador global ND_A resulta da média ponderada de cada indicador normalizado $\bar{P}_i$, enquanto que w_i é a contribuição do i -ésimo indicador para o desempenho ambiental global, n é igual ao número de indicadores de impactos ambientais, que neste estudo foram considerados 6. A soma de todas as ponderações deve ser igual a 1 [116]. Para agregação, esta análise considera os pesos do Quadro 30, estabelecidos num estudo desenvolvido pelo Conselho Consultivo Científico (SAB) da Agência de Proteção Ambiental dos EUA [120]. Esta agregação deve-se ao facto de, em Portugal ou num contexto regional próximo, não existirem estudos específicos relativamente à importância respeitante de cada categoria de impacto ambiental na quantificação do desempenho ambiental global. De acordo com o MARS-SC, esta é a abordagem sugerida para o contexto português e uma das mais aceites pela comunidade científica internacional na matéria [115]. Uma vez aplicada esta metodologia, num contexto diferente, se existirem pesos específicos, estes devem ser utilizados na avaliação do desempenho ambiental global.

Os resultados são ilustrados num gráfico de "radar" ou diagrama Amoeba, igualmente conhecido como perfil sustentável. No diagrama, a cada raio corresponde um indicador de sustentabilidade analisado. Por isso, o número de raios é igual ao número de indicadores que são analisados. Em cada perfil sustentável, o desempenho global de um composto é monitorizado e comparado com a mistura de referência, que neste caso foi um painel de XPS [112].

Quadro 30 Peso de cada indicador ambiental [112]

Indicador	Peso (%)
GWP	38
ODP	12
AP	12
EP	12
POCP	14
ADP_FF	12

5.5. Resultados

Neste subcapítulo vão ser apresentados e analisados os resultados obtidos para o cálculo da análise do ciclo de vida para as composições estudadas. Na Figura 49 são apresentados os inputs para cada categoria de impacto e as respetivas quantidades de cada material. Os inputs que foram introduzidos no programa, organizados de cima para baixo, são: a quantidade de superplastificante

utilizado em kg; o transporte de serrim, gesso e superplastificante em tkm (tonelada x km); a eletricidade gasta na utilização da mufla em kWh; a eletricidade gasta pela misturadora na confeção das pastas em kWh; a quantidade de água em kg; e por último a quantidade de resíduo de serrim em m³. Denotar que, aquando da introdução dos inputs, considerou-se o gesso como uma placa de gesso por forma a mostrar que este material também entrava na composição, e por isso considerou-se uma placa com dimensões standard de 2500 x 1200 m². Sendo neste caso, o gesso cartonado um resíduo consequência da construção e demolição de edifícios, não tem valor económico. Assim sendo, na contabilização dos impactos ambientais não são considerados os impactos gerados na fase de extração de matérias-primas, nem na fase de produção do gesso cartonado, conforme definido pela metodologia MARS.

Entradas								
Entradas conhecidas da natureza (recursos)	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD+2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
(insira linha aqui)								
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)		Quantidade	Unidade	Distribuição	SD+2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Esters of versatic acid [RoW] production Cut-off, U		0,75	kg	Indefinido				SP
Transport, combination truck, diesel powered/US		0,6	tkm	Indefinido				Transp serrim
Transport, combination truck, diesel powered/US		1,18	tkm	Indefinido				Transp gesso
Transport, combination truck, diesel powered/US		0,14	tkm	Indefinido				Trans SP
Electricity, medium voltage [PT] market for Cut-off, U		0	kWh	Indefinido				mufla
Electricity, medium voltage [PT] market for Cut-off, U		6,68	kWh	Indefinido				misturadora
Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m2/RNA		0	m2	Indefinido				
Tap water [Europe without Switzerland] market for Cut-off, S		15,09	kg	Indefinido				
residual hardwood, wet [Europe without Switzerland] slab and siding, hardwood, wet, measu		0.00204	m3	Indefinido				

Figura 49 – Processos considerados para a contabilização dos impactos ambientais. Exemplo de valores adotados na mistura S10_G90 (foto dos processos retirada diretamente do software SimaPro)

Nas seguintes figuras são apresentados os resultados de cada uma das entradas, para o respetivo impacto ambiental para as composições estudadas. Cada categoria de impacto resulta do somatório de todos os impactos gerados das entradas inseridas no software SimaPro. Por exemplo, para a composição S10_G90, o esgotamento dos recursos abióticos de combustíveis fósseis (ADP_FF), é dado pela soma de todos os impactos da Quantidade de serrim, Quantidade de água, Superplastificante, Eletricidade consumida pela misturadora na confeção das pastas, Transporte de superplastificante, de gesso e água. Somando cada um destes impactos é obtido um valor final para a categoria de impacto ADF_FF. O mesmo acontece para as restantes categorias e composições.

Pela análise do gráfico (Figura 50), pode se verificar que os materiais mais poluentes da composição e por isso geram uma maior quantidade do esgotamento dos recursos abióticos de combustíveis fósseis (ADP_FF), são a eletricidade utilizada para a produção do painel e a matéria – prima, superplastificante (Quadro 30). Relativamente aos outros indicadores ambientais, estes não têm um impacto significativo na sustentabilidade.

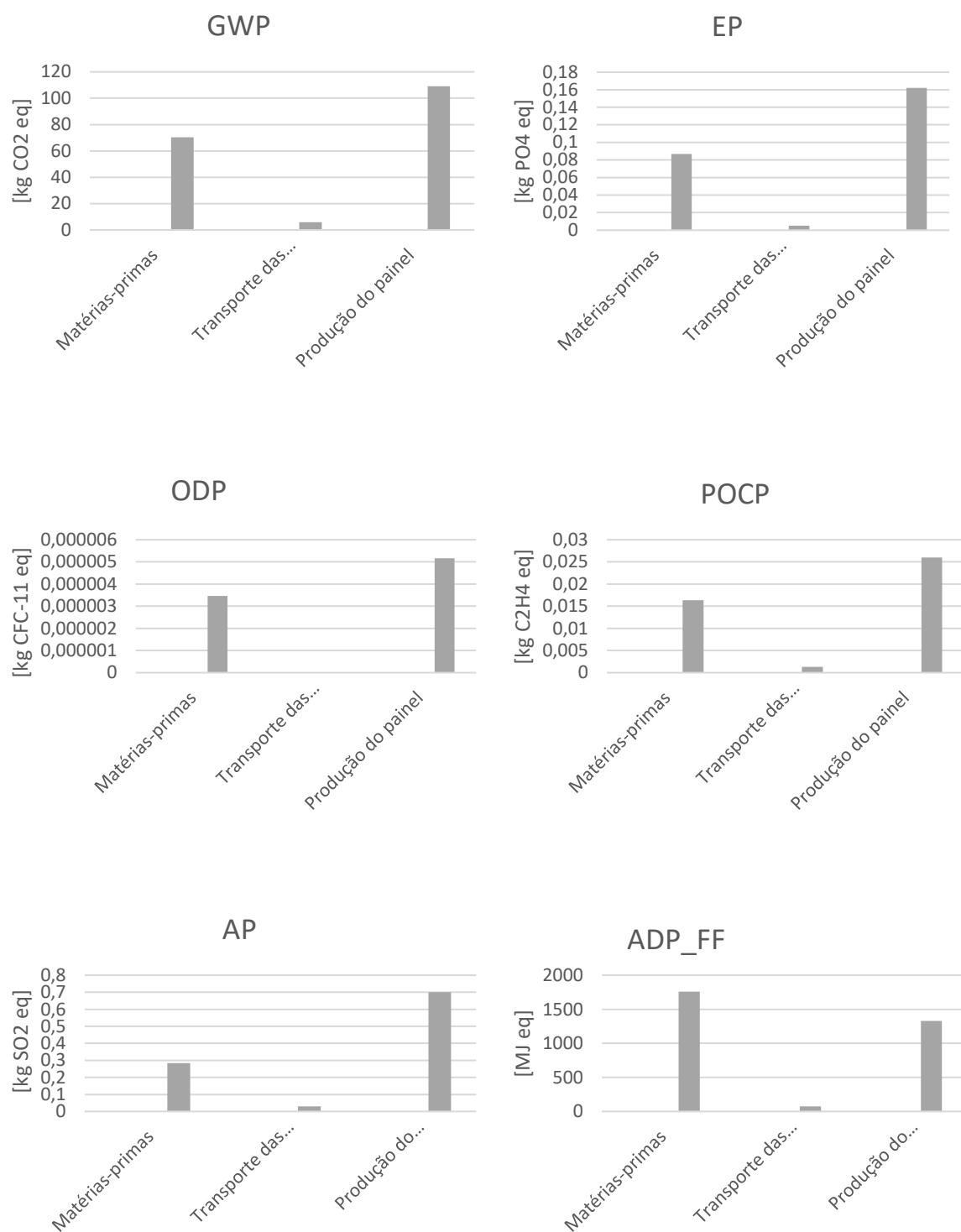


Figura 50 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_G90.

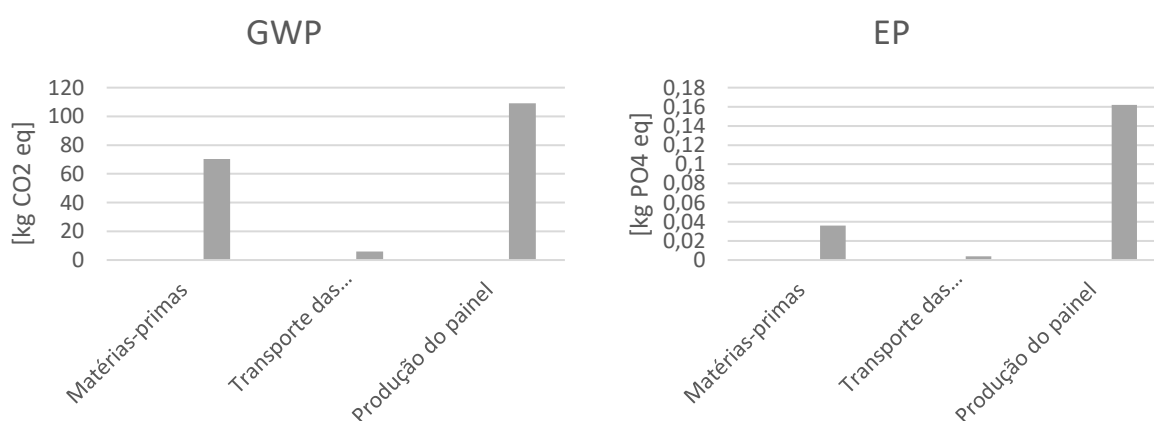
Quadro 31 Impacto ambiental de cada matéria prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S10_G90

Indicador	S10_G90							
	SP	Trans. de serrim	Trans. de gesso	Trans. de SP	Pré- tratamento do Gesso	Produção	Água	Serrim
GWP	6,91E+01	1,86E+00	3,66E+00	4,34E-01	0,00E+00	1,09E+02	1,69E-01	1,08E+00
ODP	3,28E-06	7,01E-11	1,38E-10	1,63E-11	0,00E+00	5,16E-06	1,04E-08	1,75E-07
AP	2,79E-01	9,14E-03	1,80E-02	2,13E-03	0,00E+00	7,00E-01	7,86E-04	4,69E-03
EP	8,45E-02	1,62E-03	3,18E-03	3,78E-04	0,00E+00	1,62E-01	4,58E-04	1,82E-03
POCP	1,55E-02	4,21E-04	8,28E-04	9,83E-05	0,00E+00	2,60E-02	4,81E-05	8,19E-04
ADP_FF	1,74E+03	2,38E+01	4,69E+01	5,56E+00	0,00E+00	1,33E+03	1,91E+00	1,55E+01

*SP- Superplastificante

Observando o gráfico (Figura 51), denota-se que a produção do painel e o superplastificante (

Quadro 32), são os dois fatores que influenciam de forma significativa a categoria de impacto ADP_FF, tal como ocorreu na mistura anterior. Isto deve-se ao facto de ter na sua composição uma grande quantidade de água e superplastificante.



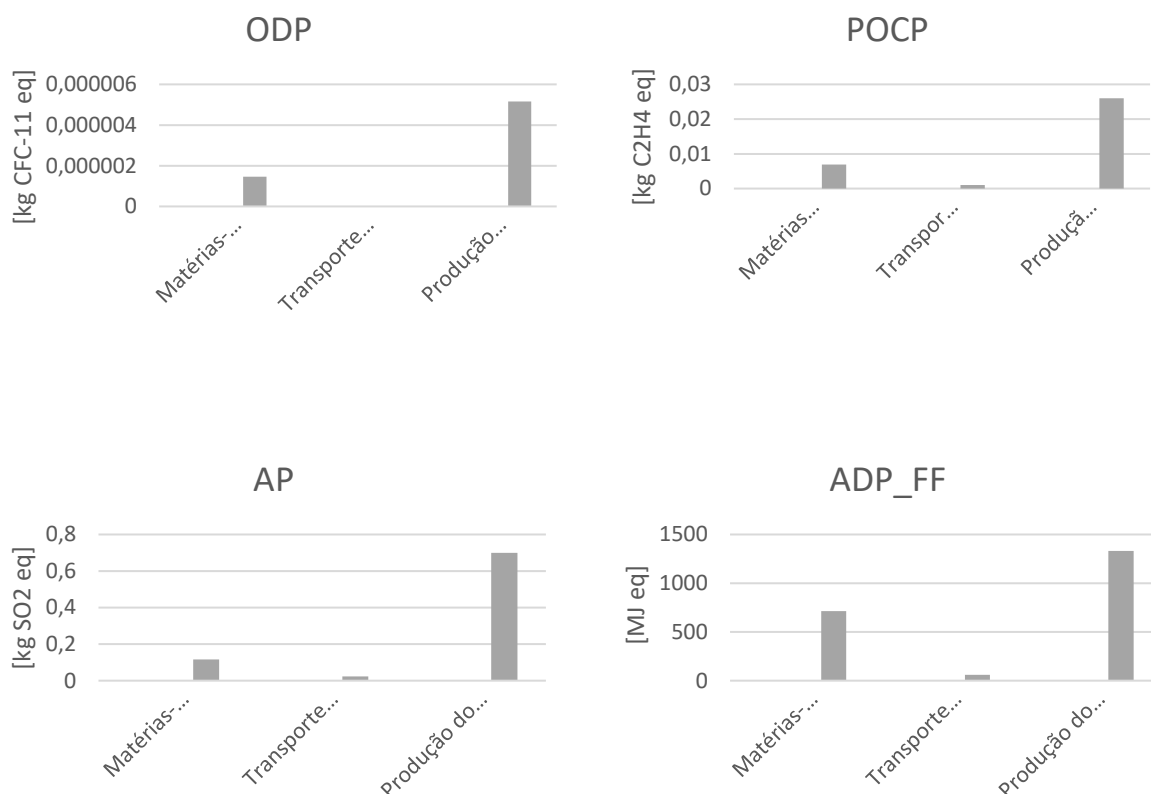


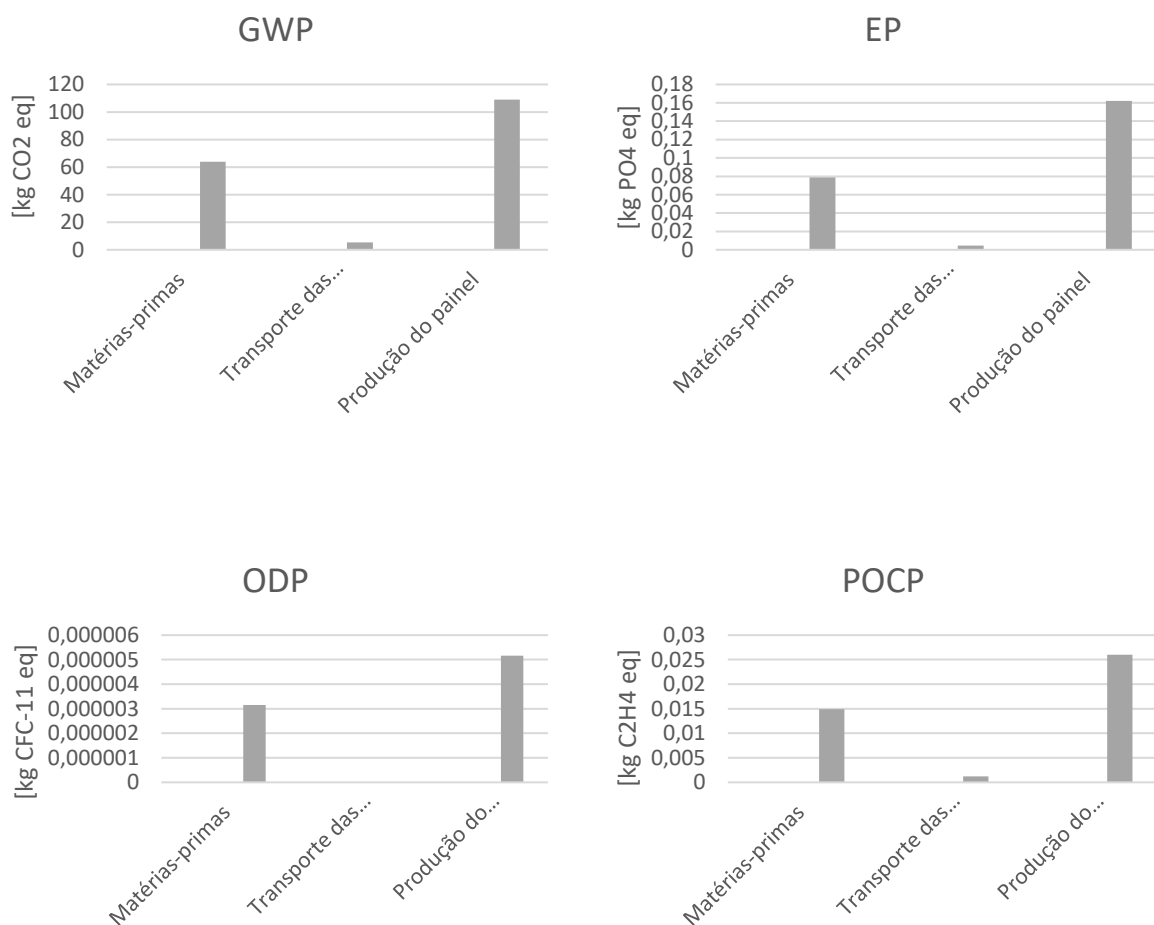
Figura 51 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,75.

Quadro 32 Impacto ambiental de cada matéria prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,75

Indicador	S10_G90_A/Resíduos.0,75							
	SP	Trans. de serrim	Trans. de gesso	Trans. de SP	Pré- tratamento do Gesso	Produção	Água	Serrim
GWP	2,76E+01	1,52E+00	2,94E+00	1,86E-01	0,00E+00	1,09E+02	2,04E-01	8,74E-01
ODP	1,31E-06	5,72E-11	1,11E-10	7,01E-12	0,00E+00	5,16E-06	1,26E-08	1,41E-07
AP	1,12E-01	7,46E-03	1,45E-02	9,14E-04	0,00E+00	7,00E-01	9,52E-04	3,79E-03
EP	3,38E-02	1,32E-03	2,56E-03	1,62E-04	0,00E+00	1,62E-01	5,55E-04	1,47E-03
POCP	6,22E-03	3,44E-04	6,67E-04	4,21E-05	0,00E+00	2,60E-02	5,83E-05	6,62E-04
ADP_FF	6,98E+02	1,95E+01	3,78E+01	2,38E+00	0,00E+00	1,33E+03	2,32E+00	1,25E+01

*SP- Superplastificante

Feita uma análise do gráfico (Figura 52), repara-se na tendência de haver um maior impacto para a produção do painel e superplastificante. Este fator influencia diretamente na quantidade de superplastificante. Sendo que, misturas com pouca água e por consequência pouca trabalhabilidade, precisam de uma quantidade de superplastificante maior. Uma composição com uma quantidade de água e superplastificante não é o desejável para uma mistura ótima.



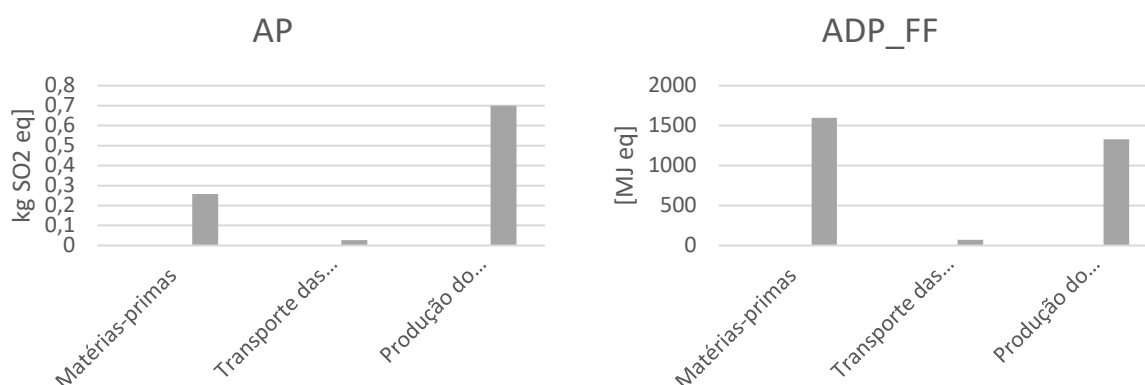


Figura 52 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,6

Quadro 33 Impacto ambiental de cada matéria-prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel paracada indicador, para a composição S10_G90_A/Resíduos.0,6

Indicador	S10_G90_A/RESÍDUOS.0,6							
	SP	Trans. de serrim	Trans. de gesso	Trans. de SP	Pré- tratamento do Gesso	Produção	Água	Serrim
GWP	6,27E+01	1,70E+00	3,32E+00	4,03E-01	0,00E+00	1,09E+02	1,84E-01	9,79E-01
ODP	2,98E-06	6,42E-11	1,25E-10	1,52E-11	0,00E+00	5,16E-06	1,13E-08	1,58E-07
AP	2,53E-01	8,38E-03	1,63E-02	1,98E-03	0,00E+00	7,00E-01	8,58E-04	4,25E-03
EP	7,66E-02	1,48E-03	2,89E-03	3,51E-04	0,00E+00	1,62E-01	5,00E-04	1,65E-03
POCP	1,41E-02	3,86E-04	7,51E-04	9,13E-05	0,00E+00	2,60E-02	5,25E-05	7,42E-04
ADP_FF	6,27E+01	1,70E+00	3,32E+00	4,03E-01	0,00E+00	1,09E+02	1,84E-01	9,79E-01

*SP- Superplastificante

Para as misturas que contém na sua composição o gesso ativado na mufla, são apresentados em baixo os gráficos, Figura 53 e Figura 54, referentes à composição S10_GM90 e S20_GM80, respetivamente. Para o cálculo de cada um dos impactos, os inputs feitos foram iguais aos impactos calculados anteriormente, apenas acrescentou-se a eletricidade consumida pela mufla aquando da ativação do gesso a 200 °C, por um período de 2 horas.

Pelo gráfico, da Figura 53, consegue-se perceber que os inputs que geram um maior impacto ambiental são a eletricidade consumida pela mufla, e a produção e a quantidade de superplastificante par a categoria de impacto ADP_FF, como seria de esperar. Uma outra categoria de impacto que se destaca no gráfico, mas em menor quantidade, é a do aquecimento global (GWP). O superplastificante usado e a produção do painel (eletricidade) são os fatores que mais contribuem para esta categoria. Isto deve-se

ao facto de o SP ser um produto pouco sustentável e altamente químico. E a energia consumida pela mufla faz com que, quando esta tiver em funcionamento liberte calor gerado pelo aquecimento desta, seja libertado para o meio ambiente e contribua de forma significativa para o meio ambiente (Quadro 34).

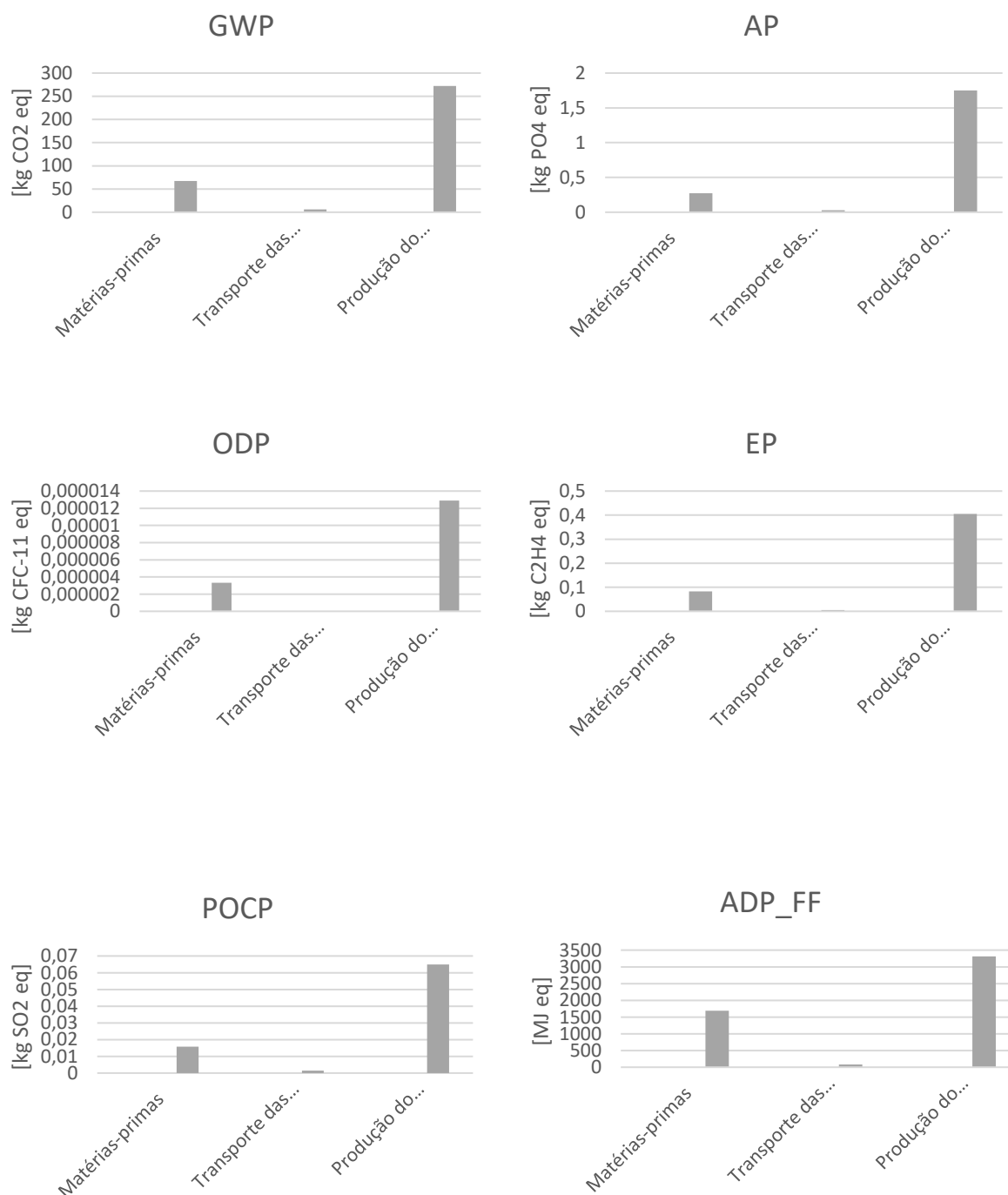


Figura 53 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S10_GM90

Quadro 34 Impacto ambiental de cada matéria-prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S10_GM90

Indicador	S10_GM90							
	SP	Trans. de serrim	Trans. de gesso	Trans. de SP	Pré- tratamento do Gesso	Produção	Água	Serrim
GWP	6,64E+01	1,77E+00	3,94E+00	4,34E-01	1,63E+02	1,09E+02	1,60E-01	1,03E+00
ODP	3,15E-06	6,66E-11	1,48E-10	1,63E-11	7,72E-06	5,16E-06	9,88E-09	1,66E-07
AP	2,68E-01	8,68E-03	1,93E-02	2,13E-03	1,05E+00	7,00E-01	7,47E-04	4,46E-03
EP	8,11E-02	1,54E-03	3,43E-03	3,78E-04	2,43E-01	1,62E-01	4,35E-04	1,73E-03
POCP	1,49E-02	4,00E-04	8,92E-04	9,83E-05	3,89E-02	2,60E-02	4,57E-05	7,78E-04
ADP_FF	1,67E+03	2,27E+01	5,05E+01	5,56E+00	1,98E+03	1,33E+03	1,82E+00	1,47E+01

*SP- Superplastificante

Observando os gráficos da Figura 54 e o Quadro 35 referente à composição S20_GM80, percebe-se que este é semelhante ao gráfico da composição S10_GM90. O que era expectável. Uma vez que este é também constituído por gesso ativado na mufla, e apenas com quantidades de materiais diferentes, percebia-se que daria gráficos semelhantes aos anteriores. Assim, a eletricidade consumida pela mufla, pela misturadora e a quantidade de superplastificante são os elementos que contribuem para o maior impacto da categoria ADP_FF. Também a categoria GWP se destaca. O superplastificante usado bem como a eletricidade utilizada pela mufla são dos aspetos que mais contribuem para o impacto desta categoria.

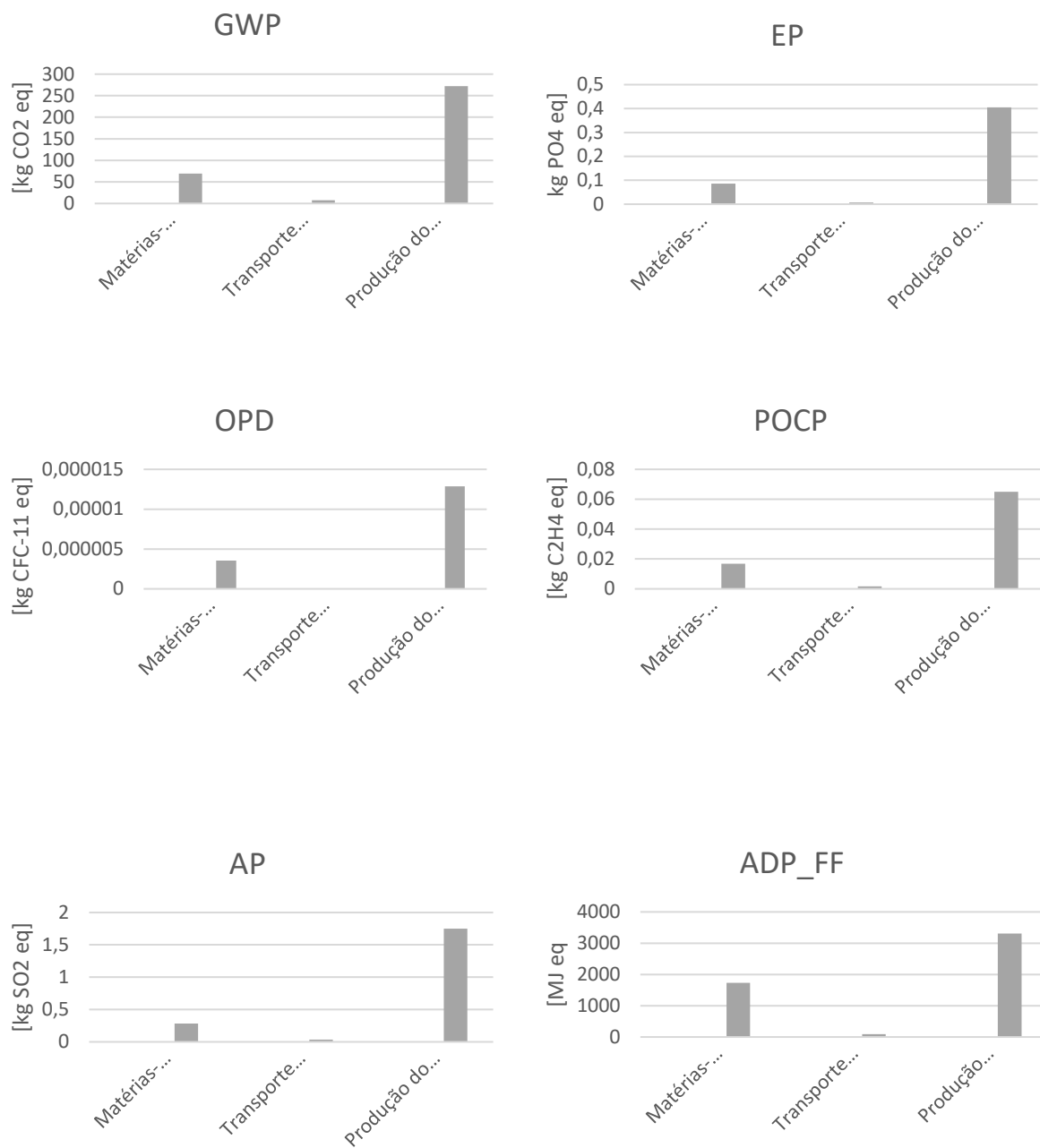


Figura 54 Quadro resumo dos impactos ambientais gerados pelas matérias – primas, transporte das mesmas e na produção do painel para a composição S20_GM80

Reutilização de RCDs para o desenvolvimento de produtos iminentemente mais sustentáveis

Quadro 35 Impacto ambiental de cada matéria-prima utilizada, do transporte dos materiais bem como da produção do painel para cada indicador, para a composição S20_GM80

Indicador	S20_GM80							
	SP	Trans. de serrim	Trans. de gesso	Trans. de SP	Pré-tratamento do Gesso	Produção	Água	Serrim
GWP	6,73E+01	3,66E+00	3,19E+00	4,34E-01	1,63E+02	1,09E+02	1,65E-01	2,11E+00
ODP	3,19E-06	1,38E-10	1,20E-10	1,63E-11	7,72E-06	5,16E-06	1,02E-08	3,42E-07
AP	2,72E-01	1,80E-02	1,57E-02	2,13E-03	1,05E+00	7,00E-01	7,68E-04	9,17E-03
EP	8,22E-02	3,18E-03	2,78E-03	3,78E-04	2,43E-01	1,62E-01	4,48E-04	3,56E-03
POCP	1,51E-02	8,28E-04	7,23E-04	9,83E-05	3,89E-02	2,60E-02	4,70E-05	1,60E-03
ADP_FF	1,70E+03	4,69E+01	4,09E+01	5,56E+00	1,98E+03	1,33E+03	1,87E+00	3,02E+01

*SP- Superplastificante

No Quadro 36 são apresentados os valores obtidos para cada uma das categorias de impacto referentes às diferentes composições, obtidas diretamente do software SimaPro.

Quadro 36 Valores obtidos para as diferentes categorias de impacto ambiental

Categoria de impacto	Unidades	S10_G90	S10_G90_A/Resíduos.0,75	S10_G90_A/Resíduos..0,6	S10_GM90	S20_GM80
GWP 100	[kg CO2 eq]	1,85E+02	1,42E+02	1,78E+02	3,45E+02	3,48E+02
ODP	[kg CFC-11 eq]	8,62E-06	6,62E-06	8,30E-06	1,62E-05	1,64E-05
AP	[kg SO2 eq]	1,01E+00	8,39E-01	9,85E-01	2,05E+00	2,07E+00
EP	[kg PO4 eq]	2,54E-01	2,02E-01	2,46E-01	4,94E-01	4,98E-01
POCP	[kg C2H4 eq]	4,38E-02	3,40E-02	4,21E-02	8,20E-02	8,33E-02

ADP_F	[MJ	3,16E+0	2,10E+03	2,99E+03	5,08E+0	5,13E+0
F	eq]	3			3	3

Analisando os resultados obtidos, é possível verificar que as composições constituídas por gesso ativado na mufla a 200°C, apresenta os valores mais elevados para todas as categorias de impacto ambiental, quando comparadas com as outras formulações, tendo sido observados valores mais elevados para o ADP_FF e GWP 100.

Os valores normalizados são obtidos para cada categoria de impacto e os resultados são apresentados na Quadro 37. Isto permite uma melhor análise e interpretação dos resultados, uma melhor perceção de qual das composições tem um melhor desempenho ambiental. Da análise constata-se que para o compósito S10_G90_A/Resíduos.0,75 foi o que obteve um melhor impacto ambiental no estudo realizado.

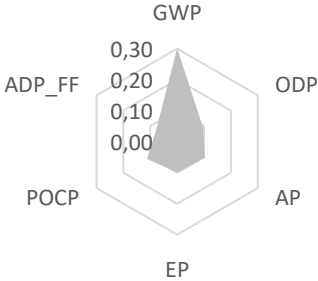
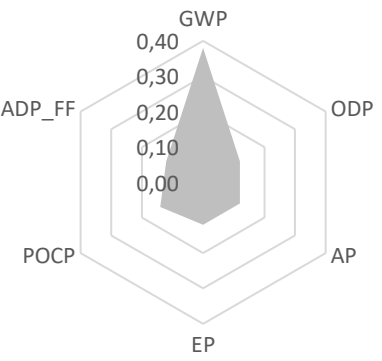
Quadro 37 Valores normalizados para as categorias de impacto ambiental estudadas

Categori a de impacto	S10_G9 0	S10_G90_A/RESÍDUOS. 0,75	S10_G90_A/RESÍDUOS. 0,6	S10_GM9 0	S20_GM8 0
GWP 100	0,30	0,38	0,31	0,01	0,00
ODP	0,10	0,12	0,10	0,00	0,00
AP	0,10	0,12	0,11	0,00	0,00
EP	0,10	0,12	0,10	0,00	0,00
POCP	0,11	0,14	0,12	0,00	0,00
ADP_FF	0,08	0,12	0,08	0,00	0,00
ND_A	0,79	1,00	0,82	0,02	0,00

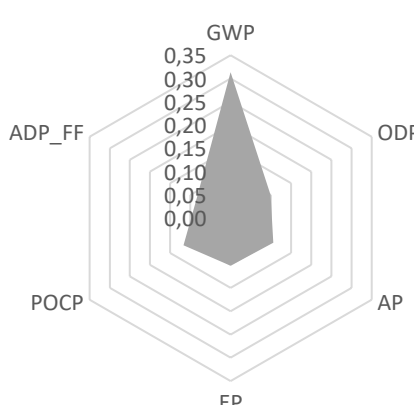
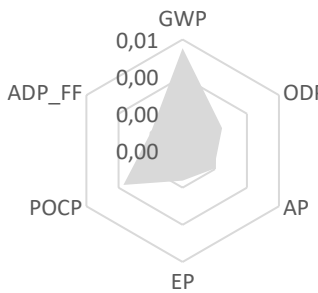
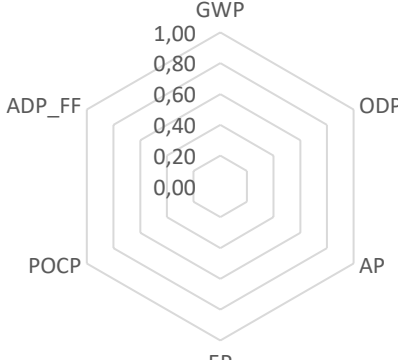
O Quadro 38 apresenta os perfis de sustentabilidade e os desempenhos ambientais globais para cada composição. Para cada perfil, a área sombreada simboliza o desempenho de cada compósito analisado. A escala de ND_A funciona da seguinte forma, quanto mais próximo de um, tiver o valor de cada composição, melhor é o desempenho ambiental global da mesma. Quanto mais próxima de zero, pior é o desempenho global da composição. Verifica-se que a composição S10_G90_A/Resíduos.0,75, apresenta o melhor desempenho ambiental, com um valor de 1,00. Por outro lado, a mistura com o pior impacto ambiental é S20_GM80, com um valor de 0.

Posto isto, os resultados permitem concluir que a utilização de resíduos de serrim e gesso cartonado, para formação de um compósito mais sustentável e com o objetivo final de aplicação na construção civil, e dando ênfase à questão do reaproveitamento e reutilização dos resíduos de construção e demolição, é uma boa opção sendo que é iminentemente mais sustentável, e impulsiona à economia circular dos materiais de construção. Fazendo uma analogia entre os valores de desempenho ambiental de uma placa de XPS e de uma placa de cada compósito, percebe-se que a placa com o material de XPS tem o valor ótimo para o impacto ambiental [112].

Quadro 38 Valores normalizados que descrevem o perfil de sustentabilidade

Mistura	Perfil de sustentabilidade	ND_A
S10_G90	S10_G90 	0,79
S10_G90_A/Resíduos.0,75 5	S10_G90_A/L.0,75 	1,00

Quadro 37 (Continuação) Valores normalizados que descrevem o perfil de sustentabilidade

Mistura	Perfil de sustentabilidade	ND_A
S10_G90_A/Resíduos.0,6	S10_G90_A/L.0,6 	0,82
S10_GM90	S10_GM90 	0,02
S20_GM80	S20_GM80 	0,00

6. Conclusões

As principais conclusões que se podem retirar das distintas fases deste trabalho, nomeadamente, da campanha experimental inerentes à caracterização mecânica do comportamento em tração em flexão e compressão, são que a incorporação de elevadas quantidades de serrim nas pastas conduziu a resistências mecânicas relativamente reduzidas, carecendo de uma melhor otimização das formulações e procedimentos de mistura. .

Quando o resíduo de gesso cartonado é adicionado, que compreende a fase um e dois da campanha experimental, há um aumento das resistências à tração em flexão. Na fase 1, as misturas que apresentam os melhores resultados para os ensaios de resistência mecânica foram as misturas S30_G70, S10_G90 e a S10_G90_A/Resíduos.0,75. Denotar que os provetes, ensaiados inicialmente à flexão e posteriormente, cada metade do provete ensaiado à compressão obtiveram resultados mais elevados que os provetes cúbicos, apenas ensaiados à compressão. Numa tentativa de melhorar o valor das resistências mecânicas, foi feita uma otimização das composições. Isto foi conseguido através da ativação do gesso cartonado na mufla. As misturas realizadas com este gesso “ativado” foram realizadas no âmbito de uma segunda fase da campanha experimental. As misturas que apresentaram os melhores resultados, tanto ao nível da resistência à tração em flexão como à compressão foram as composições S10_GM90, S10_G90 e a S20_GM80, as quais compreendiam as percentagens mais elevadas de gesso. Assim sendo, foi possível constatar que o serrim quando adicionado às misturas diminuiu a massa volúmica das mesmas, podendo potencialmente ser utilizado em argamassas leves ou até mesmo betonilhas de enchimento. No que concerne os ensaios no estado fresco, para ambas as fases, as composições S10_G90 e S10_G90_A/Resíduos.0,75 foram as que apresentaram os melhores valores para o ensaio de espalhamento. É possível concluir que quanto maior for a quantidade de água que constitui na mistura maior é a trabalhabilidade e por isso revela-se mais eficaz. Por outro lado, uma grande quantidade de superplastificante para as composições não se revela tão eficaz.

Na parte referente aos ensaios de resistência térmica, foram obtidos valores muito elevados para o valor de U, transferência térmica, resistência e condutividade térmica. Quando comparado com painéis de isolamento térmico sustentáveis a composição S10_GM90 foi a que apresentou um resultado de condutividade térmica mais elevado. Podendo dever-se ao facto de este apresentar uma massa volúmica maior, ter uma porosidade relativamente às outras composições bastante mais baixa e por isso apresenta propriedades térmicas melhores.

Relativamente à análise de ciclo de vida feita, conclui-se que a composição com o melhor impacto ambiental, e por isso mais amiga do ambiente, é composição S10_G90_A/Resíduos.0,75. Apresentou um desempenho ambiental global, ND_A , de 1,00. Por forma a otimizar as misturas e aumentar a

performance ambiental, o ND_A , uma possibilidade seria diminuir a quantidade de superplastificante nas composições e a energia consumida na produção do painel. Uma vez que o objetivo desta dissertação é criar um material iminentemente mais sustentável a partir de resíduos de construção e demolição, diminuir a quantidade destas duas componentes que não são nada naturais, ajudaria a aumentar a performance ambiental.

Referências

- [1] O. O. Faniran and G. Caban, “Minimizing waste on construction project sites,” *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 5, no. 2, pp. 182–188, 1998, doi: 10.1108/eb021073.
- [2] K. Cochran, T. Townsend, D. Reinhart, and H. Heck, “Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida, US,” *Waste Manag.*, vol. 27, no. 7, pp. 921–931, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.03.023.
- [3] V. M. John and V. Agopyan, *Reciclagem de resíduos da construção*. 2000.
- [4] EUROSTAT, *Environmental statistics and accounts in Europe 2010*. 2010.
- [5] C. Llatas, “A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 6, pp. 1261–1276, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.01.023.
- [6] S. Contract and O. N. Management, “eping Sickness,” *Lancet*, vol. 173the Tra, no. 4459, pp. 483–484, 1909, doi: 10.1016/S0140-6736(01)80522-5.
- [7] “Construction Materials Recycling Association, Chicago, Illinois,” *Construction Materials Recycling Association, 2015*. [Online]. Available: <https://www.cdrecycling.org/materials/>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [8] R. S. Lima and R. R. R. Lima, “Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil,” *Guia para Elabor. Proj. Gerenciamento Resíduos da Construção Civ.*, vol. 1, p. 60, 2009.
- [9] V. M. John, *Utilização de Resíduos na Construção Habitacional*, vol. 4. .
- [10] U. S. E. P. Agency, “CHARACTERIZATION OF BUILDING-RELATED CONSTRUCTION AND DEMOLITION DEBRIS IN THE UNITED STATES,” no. 68, 1998.
- [11] D. Styles, H. Schoenberger, and B. Zeschmar-lahl, “Resources , Conservation & Recycling Construction and demolition waste best management practice in Europe,” in *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 136, no. April, Elsevier, 2018, pp. 166–178.
- [12] M. Mália, J. De Brito, M. D. Pinheiro, and M. Bravo, “Construction and demolition waste indicators,” *Waste Manag. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 241–255, 2013, doi: 10.1177/0734242X12471707.
- [13] N. Kartam, N. Al-Mutairi, I. Al-Ghusain, and J. Al-Humoud, “Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait,” *Waste Manag.*, vol. 24, no. 10, pp. 1049–1059, 2004, doi: 10.1016/j.wasman.2004.06.003.
- [14] R. A. Bohne, H. Brattebø, and H. Bergsdal, “Projection of Construction and Demolition Waste in Norway,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 11, no. 3, pp. 27–39, 2007.
- [15] L. Zheng *et al.*, “Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in

- China,” in *Construction and Building Materials*, vol. 136, Elsevier Ltd, 2017, pp. 405–413.
- [16] G. Swensen, “Landscape and Urban Planning Integration of historic fabric in new urban development — A Norwegian case-study,” in *Landscape and Urban Planning*, vol. 107, no. 4, Elsevier B.V., 2012, pp. 380–388.
- [17] A. Couto, J. Couto, and J. Texeira, “Desconstrução – uma ferramenta para sustentabilidade da construção,” *6º Seminário Internacional NUTAU 2006 - Inovações tecnológicas e sustentabilidade*, 2006. .
- [18] J. De Brito, “Custos e Benefícios da Demolição Selectiva,” no. December, 2015.
- [19] F. P. Torgal, *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. .
- [20] N. Y. H. K. Ana Carolina A. C. de Lima, Gabrielle S. da Rocha, “A Utilização de Plásticos na Construção Civil,” in *Cobenge*, 2012, p. 10.
- [21] P. Taylor, “Human Health Risk on Environmental Exposure to Bisphenol-A : A Review,” no. February 2014, pp. 37–41, 2007, doi: 10.1080/10590500600936482.
- [22] L. Zhang, C. Steinmaus, D. A. Eastmond, X. K. Xin, and M. T. Smith, “Formaldehyde exposure and leukemia : A new meta-analysis and potential mechanisms,” *Mutat. Res.*, vol. 681, pp. 150–168, 2009, doi: 10.1016/j.mrrev.2008.07.002.
- [23] V. D. Heuser, V. M. De Andrade, J. Da Silva, and B. Erdtmann, “Comparison of genetic damage in brazilian footwear-workers exposed to solvent-based or water-based adhesive,” *Mutat. Res. - Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 583, no. 1, pp. 85–94, 2005, doi: 10.1016/j.mrgentox.2005.03.002.
- [24] “Toxicidade de materiais de construção .pdf.” .
- [25] J. Aguiar, A. Camões, R. Fangueiro, R. Eires, S. Cunha, and M. Kheradmand, “Materiais de Construção Sustentáveis,” in *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, 2014, vol. 1, pp. 1–828.
- [26] “EUR-LEX.” [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?qid=1521110941815&uri=CELEX%3A32014D0955#d1e258-44-1>. [Accessed: 22-Mar-2021].
- [27] “LER.” [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014D0955&from=PT>. [Accessed: 22-Mar-2021].
- [28] G. De Resíduos and D. Construção, “Orientações para auditorias aos resíduos antes de obras de demolição e renovação de edifícios,” 2018.
- [29] “Especificações LNEC.” [Online]. Available: <http://www.lnec.pt/pt/servicos/normalizacao-e-regulamentacao/especificacoes-lnec/especificacoes-lnec-em-vigor/>. [Accessed: 22-Mar-2021].

- [30] V. A. Mymrin *et al.*, “Construction material from construction and demolition debris and lime production wastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 207–213, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.054.
- [31] A. Rao, K. N. Jha, and S. Misra, “Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 50, pp. 71–81, 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.05.010.
- [32] A. M. Wagih, H. Z. El-Karmoty, M. Ebid, and S. H. Okba, “Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete,” *HBRC J.*, vol. 9, no. 3, pp. 193–200, 2013, doi: 10.1016/j.hbrcj.2013.08.007.
- [33] M. Malešev, V. Radonjanin, and S. Marinković, “Recycled concrete as aggregate for structural concrete production,” *Sustainability*, vol. 2, no. 5, pp. 1204–1225, 2010, doi: 10.3390/su2051204.
- [34] *Decreto-Lei n.º 178/2006 do Ministério do ambiente, do ordenamento do território e do desenvolvimento regional.*
- [35] *Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho do Ministério do ambiente e do ordenamento do território.*
- [36] “Decreto-Lei n.º 46/2008 de 12 de Março do Ministério do ambiente, do ordenamento do território e do desenvolvimento regional,” *Diário da República: I série*, N.º 51.
- [37] LNEC, “E. (2009). 471. (2009). ‘Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.’”
- [38] LNEC, “E. (2009). 472. (2009). ‘Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central.’”
- [39] LNEC, “E. (2009). 473. (2009). ‘Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos.’”
- [40] LNEC, “E. (2009). 474. (2009). ‘Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte.’”
- [41] LNEC Departamento de Materiais Núcleo de Betões, “Resíduos de Construção e Demolição, Atividade desenvolvida pelo LNEC,” 2012.
- [42] G. R. Robinson, W. D. Menzie, and H. Hyun, “Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 42, no. 3, pp. 275–294, 2004, doi: 10.1016/j.resconrec.2004.04.006.
- [43] F. Agrela, A. Barbudo, A. Ramírez, J. Ayuso, M. D. Carvajal, and J. R. Jiménez, “Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain,” in

- Resources, Conservation and Recycling*, vol. 58, Elsevier B.V., 2012, pp. 98–106.
- [44] J. R. Jiménez, J. Ayuso, F. Agrela, M. López, and A. P. Galvín, “Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads,” in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 58, Elsevier B.V., 2012, pp. 88–97.
- [45] R. Herrador, P. Pérez, L. Garach, and J. Ordóñez, “Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing,” *Journal of Transportation Engineering*, 2011. [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000320>. [Accessed: 23-Sep-2020].
- [46] J. Távira, J. R. Jiménez, J. Ayuso, M. J. Sierra, and E. F. Ledesma, “Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil,” in *Construction and Building Materials*, vol. 164, Elsevier Ltd, 2018, pp. 57–69.
- [47] I. A. Beja, R. Motta, and L. B. Bernucci, “Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil,” in *Construction and Building Materials*, vol. 258, Elsevier Ltd, 2020.
- [48] “Conos de plástico.” [Online]. Available: <https://engenharia360.com/replast-tijolo-ecologico-plastico/>. [Accessed: 27-Jan-2020].
- [49] E. Carlo and R. Paiva, “UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONCRETEIRA PARA A FABRICAÇÃO,” 2013.
- [50] P. M. Pereira and C. S. Vieira, “Resíduos de Construção e Demolição. Um estado de arte visando a sua valorização em Trabalhos Geotécnicos,” 2013.
- [51] M. Arm, “Self-cementing properties of crushed demolishing concrete in unbound layers results from triaxial tests and field tests,” *Waste Manag. Ser.*, vol. 1, no. C, pp. 579–587, 2000, doi: 10.1016/S0713-2743(00)80068-9.
- [52] D. François and A. Jullien, “A framework of analysis for field experiments with alternative materials in road construction,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 374–382, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.04.005.
- [53] G. Petkovic, C. J. Engelsens, A. O. Håøya, and G. Breedveld, “Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: Method for decision-making in Norway,” in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 42, no. 3, 2004, pp. 249–264.
- [54] T. C. Hansen, “Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985,” *Mater. Struct.*, vol. 19, no. 3, pp. 201–246, 1986, doi: 10.1007/BF02472036.
- [55] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, and R. K. Dhir, “Use of recycled concrete aggregate in high-

- strength concrete,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 33, no. 9, pp. 574–580, 2000, doi: 10.1007/bf02480538.
- [56] “materiais inovadores.” [Online]. Available: https://www.archdaily.com.br/br/793802/materiais-inovadores-para-construcoes-sustentaveis?ad_source=search&ad_medium=search_result_all. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [57] S. TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, “Construção sustentável: contributos do gesso para a sustentabilidade da construção,” Guimarães, pp. 44–47.
- [58] S. TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, *O Gesso na Construção Civil*. Guimarães: Tecminho, 2008.
- [59] F. C. Munhoz, “Utilização do gesso para fabricação de artefatos alternativos, no contexto de produção mais limpa,” 2008.
- [60] Y. V. P. Tavares, A. C. Lordsleem Júnior, I. B. T. A. Schmitz, and V. M. John, “Reaproveitamento do resíduo de gesso na execução de revestimento interno de vedação vertical,” 2010.
- [61] H. B. Sharma, S. Panigrahi, A. K. Sarmah, and B. K. Dubey, “Wool and Coir Fiber Reinforced Gypsum Ceiling Tiles with Enhanced Stability and Acoustic and Thermal Resistance,” *Sci. Total Environ.*, p. 135907, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102433.
- [62] M. Garg and N. Jain, “Waste gypsum from intermediate dye industries for production of building materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 9, pp. 1632–1637, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.029.
- [63] M. F. SILVA, “Emprego de gesso na construção civil: a sistematização da gestão de resíduos da pasta de gesso, gesso acartonado e placas de gesso,” 2013.
- [64] S. Hansen and P. Sadeghian, “Recycled gypsum powder from waste drywalls combined with fly ash for partial cement replacement in concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 274, p. 122785, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122785.
- [65] O. E. Avaliação, D. E. C. À. Base, E. Eps, and P. G. Gasparin, “OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE RESÍDUO DE GESSO E POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS),” 2020.
- [66] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana, and E. Hugi, “Experimental and numerical analysis of gypsum plasterboards in fire,” 2010.
- [67] Y. Elkhessaimi, N. Tessier-Doyen, and A. Smith, “Effects of microstructure on acoustical insulation of gypsum boards,” *J. Build. Eng.*, vol. 14, no. August, pp. 24–31, 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.09.011.
- [68] H. Zhang *et al.*, “Preparation and thermal performance of gypsum boards incorporated with microencapsulated phase change materials for thermal regulation,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 102, pp. 93–102, 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2012.03.020.

- [69] C. M. Lai, R. H. Chen, and C. Y. Lin, "Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM," *Energy Build.*, vol. 42, no. 8, pp. 1259–1266, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.018.
- [70] E. K. Asimakopoulou, D. I. Kolaitis, and M. A. Founti, "Fire safety aspects of PCM-enhanced gypsum plasterboards: An experimental and numerical investigation," *Fire Saf. J.*, vol. 72, pp. 50–58, 2015, doi: 10.1016/j.firesaf.2015.02.004.
- [71] M. del M. Barbero-Barrera, N. Flores-Medina, and V. Pérez-Villar, "Assessment of thermal performance of gypsum-based composites with revalorized graphite filler," *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 83–91, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.060.
- [72] A. de. Carvalho, *Madeiras Portuguesas: Estrutura anatómica. Propriedades. Utilizações*. Direção Geral das Florestas, Lisboa, 1996.
- [73] Michaelis, "Moderno, dicionário da Língua Portuguesa, madeira," 2009. [Online]. Available: <http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/index.php?lingua=portuguesportugues&%0Apa%0Alavra=madeira>. [Accessed: 15-Mar-2021].
- [74] F. F. Line, "Wood growth and structure," 2009. [Online]. Available: <http://www.farmforestline.com.au/index.html>. [Accessed: 04-Mar-2021].
- [75] N. d. Society of wood Science and Technology, "Properties of wood, Teaching Unit," *Number 2*. [Online]. Available: <http://www.swst.org/teach/teach2/properties2.pdf>. [Accessed: 04-Mar-2021].
- [76] INETI(Instituto Nacional De Engenharia e Tecnologia Industrial), "Guia técnico do Sector da Industria da madeira e do mobiliário," 2000. [Online]. Available: <https://pdftoword-converter.online/converted/a046f108/guia-tecnico-sector-da-industria-da-madeira-e-do-mobiliario-lisboa-novembro-2000-ficha-tecnica-coordenacao-eng-jose-miguel-figueiredo-tel-ext-2356/slw9koe5dpn5d5jfqpoeh5jvrkezbzas6kfrb9zpdf.pdf>. [Accessed: 04-Mar-2021].
- [77] AIMMP, "Introdução à prevenção de resíduos na Indústria de Madeira e Mobiliário, Leiria," 2007. [Online]. Available: <https://obserwood.aimmp.pt/estudos-e-publicacoes/>. [Accessed: 04-Mar-2021].
- [78] J. F. Horta, F. J. Simões, and A. Mateus, "Study of Wood-Plastic Composites with Reused High Density Polyethylene and Wood Sawdust," *Procedia Manuf.*, vol. 12, no. December 2016, pp. 221–229, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.08.026.
- [79] S. K. Najafi, E. Hamidinia, and M. Tajvidi, "Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 100, no. 5, pp. 3641–3645, 2006, doi: 10.1002/app.23159.
- [80] Y. Martinez Lopez, J. B. Paes, D. Gustave, F. G. Gonçalves, F. C. Méndez, and A. C. Theodoro

- Nantet, "Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products - A sustainable approach for cleaner production in Cuba," *J. Clean. Prod.*, vol. 244, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118723.
- [81] F. Monteiro, "Desperdícios De Madeira," 2016.
- [82] F. Berger, F. Gauvin, and H. J. H. Brouwers, "The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 119786, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119786.
- [83] M. M. Integrado and E. Civil, "Incorporação de Serrim em Argamassas Cimentícias," 2012.
- [84] V. De Resíduos, "Coberturas Ajardinadas . A Importância do Substrato Técnico : Contribuição para o seu Uso , com a Possibilidade de Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente," 2017.
- [85] S. Zou *et al.*, "Experimental research on an innovative sawdust biomass-based insulation material for buildings," *J. Clean. Prod.*, vol. 260, p. 121029, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121029.
- [86] F. Mathematics, N. Science, and B. Aceh, "Sawdust for Thermal Insulation Building," 2014.
- [87] C. W. Kang, S. W. Oh, T. B. Lee, W. Kang, and J. Matsumura, "Sound absorption capability and mechanical properties of a composite rice hull and sawdust board," *J. Wood Sci.*, vol. 58, no. 3, pp. 273–278, 2012, doi: 10.1007/s10086-011-1243-5.
- [88] E. P. Aigbomian and M. Fan, "Development of Wood-Crete building materials from sawdust and waste paper," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 361–366, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.018.
- [89] R. Mirski, D. Dukarska, A. Derkowski, R. Czarnecki, and D. Dziurka, "By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards," *J. Build. Eng.*, vol. 32, p. 101460, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101460.
- [90] P. Tittlein, A. Cloutier, and B. Bissonnette, "Design of a low-density wood-cement particleboard for interior wall finish," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 2, pp. 218–222, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.020.
- [91] A. E. Tiuc, O. Nemeş, H. Vermeşan, and A. C. Toma, "New sound absorbent composite materials based on sawdust and polyurethane foam," *Compos. Part B Eng.*, vol. 165, no. November 2018, pp. 120–130, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.103.
- [92] M. Li, M. Khelifa, A. Khennane, and M. El Ganaoui, "Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork," *Compos. Struct.*, vol. 209, no. October 2018, pp. 13–22, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.10.079.
- [93] M. S. G. Sonnemann, F. Castells, *Integrated life cycle and risk assessment for industrial*

- processes*, 1st ed., v. United States of America, 2003.
- [94] D. L. Greene, "Environmental impacts Impacts in a LIFE-CYCLE Perspective," *J. Transp. Geogr.*, vol. 5, no. 1, pp. 28–29, 1997, doi: 10.1016/S0966-6923(96)00048-8.
 - [95] N. Warburg, A. Braune, P. Eyerer, C. Herrmann, and N. Gallon, "Environmental indicators for ICT products - A practical approach based on four steps," *IEEE Int. Symp. Electron. Environ.*, pp. 226–230, 2005, doi: 10.1109/isee.2005.1437030.
 - [96] V. M. Taborianski and R. T. A. Prado, "Comparative evaluation of the contribution of residential water heating systems to the variation of greenhouse gases stock in the atmosphere," *Build. Environ.*, vol. 39, no. 6, pp. 645–652, 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2003.12.007.
 - [97] J. A. Fava, "Will the next 10 years be as productive in advancing life cycle approaches as the last 15 years?," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11, no. SPEC. ISS. 1, pp. 6–8, 2006, doi: 10.1065/lca2006.04.003.
 - [98] W. Klöpffer, "The role of SETAC in the development of LCA," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11, no. SPEC. ISS. 1, pp. 116–122, 2006, doi: 10.1065/lca2006.04.019.
 - [99] K. C. and H.-J. K. Matthias Finkbeiner, Atsushi Inaba, Reginald B.H. Tan, "The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044," *Astrophys. Space Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 453–470, 1977, doi: 10.1007/BF00648130.
 - [100] M. Erlandsson and M. Borg, "Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practice and development needs," *Build. Environ.*, vol. 38, no. 7, pp. 919–938, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(03)00031-3.
 - [101] O. Ortiz, F. Castells, and G. Sonnemann, "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 28–39, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.
 - [102] ATIC, "EN NP 933-1: 2000-Ensaio das propriedades geométricas dos agregados-Parte 1: Análise granulométrica Método de peneiração.," 2000.
 - [103] G. H. Doh, S. Y. Lee, I. A. Kang, and Y. T. Kong, "Thermal behavior of liquefied wood polymer composites (LWPC)," *Compos. Struct.*, vol. 68, no. 1, pp. 103–108, 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.03.004.
 - [104] K. G. Mansaray and A. E. Ghaly, "Thermal degradation of rice husks in nitrogen atmosphere," *Bioresour. Technol.*, vol. 65, no. 1–2, pp. 13–20, 1998, doi: 10.1016/S0960-8524(98)00031-5.
 - [105] European and Committee for Standardization, "En 1015-11: 1999- Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar," 1993.

- [106] EN 1015-3, “En 1015-3: 1999- Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table),” 1999.
- [107] J. Lanás and J. I. Álvarez, “Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1867–1876, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00210-2.
- [108] G. Cultrone, E. Sebastián, and M. O. Huertas, “Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 12, pp. 2278–2289, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.12.012.
- [109] D. A. Powell, “Transformation of the α - and β -forms of calcium sulfate hemihydrate to insoluble anhydrite,” p. 792, 1958.
- [110] S. Seufert, C. Hesse, F. Goetz-Neunhoeffler, and J. Neubauer, “Quantitative determination of anhydrite III from dehydrated gypsum by XRD,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 10, pp. 936–941, 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.06.018.
- [111] M. G. (Scientists) Manjit Singh, “ACTIVATION OF GYPSUM ANHYDRITE -SLAG MIXTURE,” *October*, vol. 25, no. 2, pp. 332–338, 1995.
- [112] DAPconstrucción, “Environmental Product Declaration-Plancha Media De Aislamiento Térmico De Espuma De Poliestireno Extruido (Xps),” 2019.
- [113] R. Muthuraj, C. Lacoste, P. Lacroix, and A. Bergeret, “Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers Elaboration and performances evaluation,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 135, no. December 2018, pp. 238–245, 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.053.
- [114] M. Pavelek, M. Prajer, and K. Trgala, “Static and dynamic thermal characterization of timber frame/wheat (*Triticum Aestivum*) chaffthermal insulation panel for sustainable building construction,” *Sustain.*, vol. 10, no. 7, 2018, doi: 10.3390/su10072363.
- [115] L. B. Ricardo Mateus, “Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção [Building Technologies for Sustainable Construction],” 2010.
- [116] R. Mateus, S. Neiva, L. Bragança, P. Mendonça, and M. Macieira, “Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls - Comparison with conventional technologies,” *Build. Environ.*, vol. 67, pp. 147–159, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.05.012.
- [117] X. Li, Y. Zhu, and Z. Zhang, “An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 3, pp. 766–775, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.010.

- [118] E. R. Teixeira, R. Mateus, A. F. Camões, L. Bragança, and F. G. Branco, “Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 2221–2230, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.124.
- [119] L. Díaz-Balteiro and C. Romero, “In search of a natural systems sustainability index,” *Ecol. Econ.*, vol. 49, no. 3, pp. 401–405, 2004, doi: 10.1016/j.ecolecon.2004.02.005.
- [120] EPA Science Advisory Board, “Toward Integrated Environmental Decision-making,” Washington, DC, United States, 2000.