



MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO E ACÚSTICO DE ESPAÇOS INTERIORES

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

Ana do Bem d'Eça Peixinho

Leiria, setembro 2024



MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO E ACÚSTICO DE ESPAÇOS INTERIORES

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

Ana do Bem d'Eça Peixinho

Dissertação realizada sob a orientação do Doutor Florindo José Mendes Gaspar, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e do Doutor Fábio Jorge Pereira Simões, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro 2024

Originalidade e Direitos de Autor

A presente Dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Resumo

A gestão dos resíduos agroindustriais representa uma preocupação global, envolvendo desafios ambientais e sociais. Este estudo tem como principal objetivo o desenvolvimento de materiais derivados de subprodutos agroindustriais. Foram utilizados resíduos como a serradura de madeira, juntamente com pó de pedra da indústria local, na produção de materiais compósitos para o setor da construção civil e do fabrico aditivo, com foco na promoção de uma economia circular.

Para a produção das placas de isolamento térmico foram utilizadas aparas de madeira (MC) e silicato de sódio (SS) como aglomerante, com proporções de MC/SS entre 0.8 e 1.14. O foco principal é avaliar as propriedades térmicas das placas, especialmente a condutibilidade térmica, juntamente com a sua massa volúmica e resistência mecânica à flexão. A análise da condutibilidade térmica revelou que os valores das placas, entre 0.060 e 0.072 W/m.K., atendem aos critérios para serem considerados eficazes.

No âmbito do fabrico aditivo, foram testadas diversas formulações com base em partículas de madeira, silicato de sódio e carbonato de cálcio para a fabricação de painéis decorativos para interiores. Foi determinado o limite mínimo de aglomerante e analisada a influência da granulometria e da massa das partículas de madeira, assim como o efeito do carbonato de cálcio como *filler*.

As formulações com um rácio FM/SS de 0,08 e rácio CC/SS entre 0,16 e 0,24 apresentaram sucesso na extrudabilidade, sendo possível obter uma peça com um espalhamento que ronda os 0,4 e 4,1 % e uma resistência mecânica entre 1,8 e os 3,0 MPa. Nos ensaios realizados com serradura não foi possível obter casos de estudo dado que nenhuma da pasta apresentou um comportamento e extrusão uniforme ao longo das camadas.

Palavras-chave: “economia circular”, “fabrico aditivo”, “construção sustentável”, “resíduos agroindustriais”, “resíduos de pedra”.

Abstract

The management of agro-industrial waste is a global concern, involving environmental and social challenges. The main aim of this study is to develop new materials from agro-industrial by-products. Waste such as wood sawdust was used, along with stone dust from the local industry, to produce composite materials for the construction and additive manufacturing sectors, while promoting a circular economy.

To produce thermal insulation boards, wood shavings (MC) and sodium silicate (SS) were used, with MC/SS ratios between 0.8 and 1.14. The main objective is to evaluate the boards' thermal properties, especially thermal conductivity, along with their density and mechanical resistance to bending. The analysis of the thermal conductivity revealed that the values of the boards, between 0.060 and 0.072 W/m.K., meet the criteria to be considered effective.

In the field of additive manufacturing, various formulations based on wood particles, sodium silicate and calcium carbonate were tested for the manufacture of decorative panels for interiors. The minimum binder limit was determined, and the influence of the particle size and mass of the wood particles was analyzed, as well as the effect of calcium carbonate as a *filler*.

The formulations with an FM/SS ratio of 0.08 and a CC/SS ratio of between 0.16 and 0.24 showed successful extrudability, making it possible to obtain a piece with a spread between 0.4 and 4.1 % and a mechanical strength between 1.8 and 3.0 MPa. In the tests carried out with sawdust, it was not possible to obtain case studies since none of the formulations showed uniform behavior and extrusion throughout the layers.

Keywords: “circular economy”, “additive manufacturing”, “sustainable construction”, “agro-industrial waste”, “stone waste”.

Lista de Figuras

Figura 1 - Relação entre a densidade e a condutibilidade térmica de resíduos agroindustriais (Cetiner & Shea, 2018).....	8
Figura 2 - Mapa de distribuição da Espécie Poplar Nigra (Caudullo <i>et al.</i> , 2017).....	9
Figura 3 - Granulometria de resíduos de madeira: A) Cascas e folhas iniciais, B) Folha de Madeira, C) Aparas de Madeira.....	9
Figura 4 - Distribuição da espécie Pinus pinaster (UTAD, n.d.-a).....	10
Figura 5 - Amostra de aparas de madeira, antes da secagem; Amostra de aparas de madeira, após a secagem;.....	15
Figura 6 - Curva Granulométrica das amostras de aparas de madeira.....	16
Figura 7 - Amostra de Silicato de Sódio.....	17
Figura 8 - Molde de Alumínio fechado e respetivas dimensões gerais, em mm.....	18
Figura 9 - Vista explodida do molde e da tampa e respetivas linhas de montagem.....	19
Figura 10 - Colocação da formulação no molde de alumínio.....	19
Figura 11 - Placa F10 finalizada.....	20
Figura 12 - Equipamento LM.PLUS 305.....	20
Figura 13 - Parâmetros de Ensaio Condutibilidade Térmica.....	21
Figura 14 - Serra Circular utilizada e provetes obtidos.....	22
Figura 15 - Proвете no equipamento para ensaio de resistência à flexão.....	23
Figura 16 - Amostra de fibras de madeira de pinho provenientes da Empresa Finsa.....	23
Figura 17 - Imagens obtidas no equipamento SEM: fibras de madeira de pinho; A1: 50x :B1:20x	24
Figura 18 - Imagens obtidas no equipamento SEM e respetivas medições: fibras de madeira de pinho; C1: 500x :D1:250x.....	24
Figura 19 - Amostra de serradura de pinho provenientes da empresa Materlis- Madeiras,S.A	25
Figura 20 - Amostra de carbonato de cálcio provenientes do grupo Parapedra.....	26
Figura 21 - Equipamento Delta Wasp(<i>Wasp S.r.l</i> , n.d.).....	26
Figura 22 - Fluxograma baterias de ensaios fabrico aditivo.....	30
Figura 23 - Desenhos esquemáticos da extrusora LDM WASP XL.....	31
Figura 24 - Equipamentos utilizados nos ensaios de extrudabilidade.....	33
Figura 25 - Cone truncado metálico, placa de espalhamento e paquímetro.....	33
Figura 26 - Pastel formado ao desmoldar.....	34
Figura 27 - Proвете para ensaios à flexão dos materiais compósitos para fabrico aditivo.....	34
Figura 28 - Ensaio de Resistência à Flexão dos provetes de impressão.....	35

Figura 29 - Placa sem integridade.....	36
Figura 30 - Gráfico de relação entre condutibilidade térmica e massa volúmica.....	38
Figura 31 - Gráfico da influência do silicato de sódio na resistência à flexão.....	39
Figura 32 - Deposição 1, 2 e 3 camadas da Formulação F1 (225g Silicato de Sódio +10g de Partículas de Madeira.....	42
Figura 33 - Exemplo de formulação com fibra de madeira (A) e com serradura(B).....	43
Figura 34 - Ensaio 1 - 5: Observações e operações no G- Code derivadas do estudo dos parâmetros de impressão.....	44
Figura 35 - Ensaio 6- 10: Observações e operações no G- Code derivadas do estudo dos parâmetros de impressão.....	44
Figura 36 - Provetes utilizados na avaliação da construtibilidade.....	45
Figura 37 - Erro percentual associado à largura das camadas iniciais e finais.....	45
Figura 38 - Erro percentual associado à altura de camada.....	47
Figura 39 - Espalhamento das melhores composições de cada bateria.....	49
Figura 40 - Espalhamento das piores composições de cada bateria.....	49
Figura 41 - Exemplo de provetes obtidos nos ensaios de espalhamento.....	50
Figura 42 - Influência do teor carbonato de cálcio na resistência mecânica das composições.....	51
Figura 43 - Exemplos de conceitos Iniciais associados aos painéis decorativos.....	52
Figura 44 - Render do posicionamento dos painéis num espaço interior.....	52
Figura 45 - Comparação entre o Render e o caso de estudo.....	53
Figura 46 - Exemplo de outra aplicação (cobogó).....	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Proposta Casos de Estudo.....	3
Tabela 2 - Avaliação preliminar de matérias-primas.....	7
Tabela 3 - Comparação entre a madeira de choupo, pinho e carvalho (Lefteri, 2014; Online Materials Information Resource - MatWeb, 2024.).....	10
Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens da utilização de resíduos vegetais(Balador <i>et al.</i> , 2018).....	12
Tabela 5 - Percentagem correspondente a cada fração de partículas.....	15
Tabela 6 - Percentagem Mássica dos componentes constituintes do Choupo Negro (Poplar nigra) (Kozakiewicz <i>et al.</i> , 2020).....	16
Tabela 7 – Formulações selecionadas para ensaios de condutibilidade e de resistência à flexão.....	18
Tabela 8 - Percentagem mássica dos componentes da madeira de pinho(Reyes-Contreras <i>et al.</i> , 2013).....	23
Tabela 9 - Baterias de ensaios sequenciais realizados e respetivos objetivos acompanhados com a evolução das formulações.....	27
Tabela 10 - Melhores formulações de cada granulometria, nos ensaios de estudo da influência da granulometria e massa das partículas de madeira.....	28
Tabela 11 - Formulações contantes ao longo do estudo dos parâmetros de impressão.....	29
Tabela 12 - Definição de parâmetros associados ao filamento, à impressão e à impressora definidos no software slic3r.....	32
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de condutibilidade térmica.....	36
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão.....	37
Tabela 15 - Ensaios preliminares utilizando partículas de madeira, silicato de sódio e carbonato de cálcio.....	39
Tabela 16 - Definição do limite inferior de massa de silicato de sódio.....	40
Tabela 17 - Influência da granulometria e massa das partículas de madeira.....	40
Tabela 18 – Influência do carbonato de cálcio nas melhores composições de cada granulometria.....	43
Tabela 19 - As melhores composições selecionadas para os ensaios de espalhamento.....	46
Tabela 20 - As piores composições selecionadas para os ensaios de espalhamento.....	47
Tabela 21 - Resultados ensaios de espalhamento (melhores composições).....	47
Tabela 22 - Resultados ensaios de espalhamento (piores composições).....	48
Tabela 23 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão dos materiais para fabrico aditivo.....	50
Tabela 24 - Tabela de Benchmarking Placas Isolamento Térmico.....	54
Tabela 25 - Tabela de Benchmarking Pastas Fabrico Aditivo.....	55

Lista de Siglas e Acrónimos

3D Tridimensional

CAD Computer-Aided Design (ou Desenho Assistido por Computador)

CC Carbonato de Cálcio

CDRSP Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto

COV's Compostos Orgânicos Voláteis

EM Extrusion Multiplier (Multiplicador de Extrusão)

EPS Expanded Polystyrene (ou Poliestireno Expandido)

ESTG Escola Superior de Tecnologia e Gestão

EW Extrusion Width (Largura de Extrusão)

IPL Instituto Politécnico de Leiria

MC Madeira de Choupo

MDF Medium Density Fiberboard (ou Placa de Fibra de Média Densidade)

MEX Material Extrusion

MOF's Estruturas Metal-Orgânicas (Metal-Organic Frameworks)

PU Polyurethane (ou Poliuretano)

SS Silicato de Sódio

UE União Europeia

XPS Extruded Polystyrene (ou Poliestireno Extrudido)

E Módulo de elasticidade

F_m Força Máxima

λ Condutibilidade térmica

ρ Massa volúmica

σ_f Resistência à flexão

Índice

Originalidade e Direitos de Autor.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Siglas e Acrónimos.....	xv
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do Tema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
2 Estado da Arte.....	5
2.1 Materiais compósitos à base de madeira.....	5
2.1.1 Definição de compósito	5
2.1.2 Necessidade dos compósitos à base de madeira.....	5
2.1.3 Matrizes	5
2.1.4 Reforços.....	6
2.1.5 Processos de Fabrico.....	11
2.1.6 Aplicações.....	11
2.1.7 Fabrico aditivo com resíduos agroindustriais.....	12
3 Materiais e Métodos.....	16
3.1. Caracterização de materiais.....	16
3.1.1 Aparas de Madeira.....	16
3.1.2 Silicato de Sódio.....	17
3.2 Formulação e preparação das placas.....	18
3.3 Ensaio das placas.....	21
3.3.1 Ensaio de Condutibilidade Térmica.....	21
3.3.2 Ensaio de Resistência à Flexão.....	23
3.4 Caracterização de materiais para fabrico aditivo.....	24
3.4.1 Fibra de madeira de pinho.....	24
3.4.2 Serradura de madeira de pinho.....	25

3.4.3 Carbonato de Cálcio.....	26
3.5 Formulação das pastas para impressão.....	26
3.6 Ensaio das pastas.....	30
3.6.1 Ensaio de Extrudabilidade.....	30
3.6.2 Ensaio de Espalhamento.....	34
3.6.3 Ensaio Resistência à Flexão.....	35
4 Resultados e Discussão.....	36
4.1 Ensaio relativos às placas para isolamento térmico.....	36
4.1.1 Análise dimensional prévia.....	36
4.1.2 Ensaio de Condutibilidade Térmica.....	36
4.1.3 Ensaio de Resistência à flexão	37
4.2 Pastas para fabrico aditivo.....	38
4.2.1 Ensaio preliminares.....	39
4.2.2 Ensaio de Aglomerante.....	39
4.2.3 Ensaio de Partículas de Madeira.....	41
4.2.4 Ensaio de Carbonato de Cálcio.....	41
4.2.5 Ensaio de Parâmetros de Impressão.....	43
4.2.6 Avaliação dos provetes de impressão.....	44
4.2.7 Ensaio de Espalhamento.....	47
4.2.8 Ensaio de resistência à flexão.....	51
4.3 Casos de Estudo.....	52
4.4 Benchmarking.....	54
4.5 Outras aplicações.....	56
5 Considerações Finais.....	58
5.1 Recomendações para trabalhos futuros.....	60
6 Bibliografia.....	62
Anexos.....	68

1 Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

A sustentabilidade e a eficiência energética dos edifícios emergem como questões primordiais. Conforme destacado no estudo de Schweizer *et al.*, (2007), as pessoas estão aproximadamente 90% do seu tempo em espaços interiores, tornando-se essencial assegurar ambientes saudáveis e confortáveis. Nestes interagem diversos fatores, incluindo aquecimento e arrefecimento, a presença de luz natural, qualidade do ar e comportamento acústico.

A procura por um ambiente ideal exige uma seleção criteriosa de materiais e soluções sustentáveis. Estas devem não só proporcionar maior conforto aos ocupantes, mas também reduzir os custos energéticos associados. Resumidamente, a integração de práticas sustentáveis e a eficiência energética tornam-se fundamentais para a promoção de ambientes que atendam às necessidades dos seus utilizadores, refletindo o compromisso com a responsabilidade ambiental e o bem-estar coletivo (S. Monteiro da Silva; M. Guedes de Almeida, 2010).

O setor da construção civil enfrenta uma pressão crescente para incorporar soluções mais sustentáveis, dada a sua significativa contribuição para o consumo de recursos naturais, energia e água, assim como para as emissões de gases de efeito estufa (Commission *et al.*, 2019).

Especificamente na Europa, a atividade de construção civil corresponde a 40% do consumo energético total, sendo que 27% é relativo a residências e 13% a edifícios de serviços. É fundamental destacar que cerca de 75% dos edifícios existentes apresentam deficiências consideráveis em termos energéticos. Diante deste cenário, a urgência em desenvolver alternativas e soluções construtivas mais eficientes torna-se imperativa para enfrentar os desafios ambientais e energéticos que o mundo enfrenta atualmente (Commission *et al.*, 2019).

No estudo conduzido por Fuchsl *et al.*, 2022, foram examinadas as causas do impacto ambiental associado a cada categoria de materiais de isolamento térmico e acústicos. No caso de materiais renováveis, como cânhamo ou celulose, o fator preponderante reside nos ligantes e aditivos utilizados no seu fabrico, de forma a garantir proteção contra a decomposição, possíveis pragas e segurança em caso de incêndio. Em contraste, nos materiais orgânicos não renováveis, o impacto elevado está diretamente associado à exploração das matérias-primas necessárias. Por fim, nos materiais inorgânicos, o impacto ambiental é, principalmente, atribuído ao seu processo de produção.

Neste sentido, os principais materiais líderes do mercado, como EPS, lã de rocha e lã de vidro, apresentam semelhanças significativas em termos de impacto, sendo mais sustentáveis do que XPS, PU e outras alternativas não renováveis. Os materiais de base renovável geralmente demonstram menor impacto, desde que tenham em consideração os fatores mencionados anteriormente.

Além destes fatores, para alcançar um desenvolvimento sustentável, é importante selecionar materiais facilmente recicláveis, renováveis e localmente disponíveis. Nesse contexto, tem sido feito um esforço para desenvolver materiais de isolamento térmico e acústicos baseados em produtos naturais, bem como aglomerantes mais ecológicos que mantenham as propriedades semelhantes aos materiais convencionais (Dikmen & Ozkan, 2016).

Comparados com os materiais sintéticos, os compósitos com fibras naturais destacam-se em

relação ao baixo custo das fibras, à redução de peso e à maior capacidade de reciclagem, atendendo às exigências dos consumidores por produtos mais ecológicos.

Pesquisas associadas à aplicação de resíduos vegetais apontam para resultados promissores na fabricação de isolantes térmicos e acústicos. Esta abordagem tem sido reconhecida em diversos estudos como uma alternativa promissora para atenuar os impactos ambientais associados ao setor agroindustrial (Gaspar *et al.*, 2020). Nos últimos anos, observa-se um crescente interesse por esses recursos, incluindo fibras de cânhamo, canas, coco, milho, girassol, madeiras, entre outros (B. Mikita, 2020; Oushabi *et al.*, 2015)

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste projeto foi desenvolver e avaliar soluções de materiais sustentáveis para o isolamento térmico de espaços interiores, utilizando principalmente aparas de madeira de choupo, enquanto subproduto da indústria local. Um dos objetivos específicos foi experimentar várias formulações em forma de placas, incorporando as mencionadas aparas e utilizando silicato de sódio como aglomerante.

Após a produção das placas, criou-se uma pasta à base do mesmo gênero de materiais para impressão de padrões nas placas, combinando aspetos estéticos e funcionais. Ou seja, foi desenvolvida uma geometria/padrão que permitiu a criação de um painel decorativo atrativo para uma ampla gama de utilizadores. Em estudos futuros, esta geometria poderá ser estudada de modo a aumentar a área superficial e reduzir o ruído no interior dos espaços.

Foi realizada uma campanha experimental para avaliação das propriedades térmicas, físico-mecânicas e aplicabilidade das diferentes formulações das placas compósitas. Além disso, foi explorado o potencial do fabrico aditivo com os materiais selecionados.

Desta forma, para atingir os objetivos definidos, foram realizados procedimentos e ensaios, nas instalações do Instituto Politécnico de Leiria (IPL), nomeadamente no Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRSP), tais como:

1. Estudo de formulações de materiais compósitos à base de partículas de madeira e um aglomerante que permitiu obter placas de revestimento com propriedades mecânicas e térmicas adequadas;
2. Estudo de formulações de materiais compósitos à base de partículas de madeira e um aglomerante que permitiu o fabrico aditivo por extrusão;
3. Desenvolvimento de padrões decorativos como aplicação das tecnologias desenvolvidas anteriormente (casos de estudo).

Após a compreensão dos objetivos tudo culminou na aplicação dos materiais e tecnologias estudadas através de um caso de estudo, de acordo com a descrição, proposta de valor e requisitos apresentado na tabela 1

Tabela 1- Proposta Casos de Estudo

Descrição
Painéis Interiores com funcionalidade de isolamento térmico utilizando materiais compósitos mais sustentáveis
Proposta de Valor
Aumento da eficiência energética em edifícios Utilização de aglomerantes com baixa emissão de formaldeídos Aproveitamento de resíduos agroindustriais locais Garantia de ambientes confortáveis e saudáveis
Requisitos
Avaliados: Condutibilidade Térmica (inferior a $0,070 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (Asdrubali <i>et al.</i> , 2015)) Modularidade Leveza Geometria planar Índice de desempenho condutibilidade térmica /massa volúmica satisfatório (placas de isolamento térmico) Índice de desempenho resistência à flexão /massa volúmica satisfatório (padrões decorativos)
Outros: Baixa absorção de água Resistência ao fogo Resistência a fungos Baixa emissão de COVs

Os requisitos estabelecidos são fundamentais para garantir não apenas a eficiência e durabilidade dos painéis, mas também a segurança e o bem-estar dos utilizadores. Ao avaliar estes critérios, procura-se atender a uma série de especificações que abrangem desde propriedades físicas até questões ambientais e de saúde.

Em primeiro lugar, a condutibilidade térmica inferior a $0,070 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ foi um valor de referência utilizado tendo como objetivo obter uma boa eficiência energética das construções, mantendo um ambiente interno confortável e minimizando os custos energéticos.

A modularidade é uma característica desejável pois facilita o processo de construção e permite uma maior flexibilidade no design e na adaptação dos espaços. A geometria planar permite avaliar a condutibilidade térmica de forma regular e facilita o encaixe e a montagem dos materiais. A leveza do material também desempenha um papel importante, especialmente em construções que visam a mobilidade ou que requerem manipulação manual durante a instalação. A boa resistência à flexão é essencial para garantir a estabilidade e a integridade estrutural do material, especialmente em situações onde este pode ser submetido a cargas ou pressões variáveis ao longo do tempo.

Além dos requisitos avaliados, outros critérios como baixa absorção de água, resistência ao fogo e resistência a fungos são também considerados importantes para garantir a durabilidade e a segurança das construções, especialmente em ambientes sujeitos a condições adversas, no entanto estes não foram o foco deste estudo.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, segundo a seguinte estrutura:

- **Capítulo 1 - Introdução**

Este primeiro capítulo apresenta uma contextualização do tema abordado nesta dissertação, nomeadamente a sustentabilidade e a eficiência energética dos edifícios e a apresentação de soluções mais ecológicas. Adicionalmente são descritos sucintamente os objetivos do estudo e a estrutura da dissertação.

- **Capítulo 2 - Estado de Arte**

O segundo capítulo constitui uma revisão da literatura relevante acerca dos materiais compósitos à base de resíduos agroindustriais e a respetiva aplicação em isolamentos térmicos e no fabrico aditivo. Serão explorados estudos anteriores, destacando avanços, lacunas e desafios atuais neste campo.

- **Capítulo 3 - Materiais e Métodos**

O terceiro capítulo descreve os materiais utilizados no estudo, bem como a metodologia implementada. Serão analisados os processos de formulação, preparação e ensaios das placas compósitas, tal como a formulação e ensaios das pastas para fabrico aditivo.

- **Capítulo 4 - Resultados e Discussões**

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, juntamente com uma análise crítica e discussão desses resultados. Serão abordadas as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais desenvolvidos, comparando-os com materiais tradicionais, quando aplicável.

- **Capítulo 5 - Considerações Finais**

O quinto capítulo consiste numa síntese dos principais resultados do estudo, destacando as suas contribuições para o campo de estudo em questão. Serão discutidas as implicações práticas e teóricas dos resultados e serão identificadas possíveis limitações do estudo.

Serão ainda exploradas possíveis direções que podem ser seguidas com base nos resultados deste estudo e delineadas áreas para expansão e aprimoramento do trabalho realizado, visando contribuir para o avanço contínuo do conhecimento nesta área.

2 Estado da Arte

Neste capítulo, são resumidos os conceitos essenciais e as abordagens pertinentes à aplicação de partículas de madeira em materiais compósitos destinados ao fabrico de isolamentos térmicos e ao fabrico aditivo. Seguidamente, realiza-se uma contextualização e caracterização das espécies utilizadas. Adicionalmente, são expostas e analisadas as ideias-chave, teorias e metodologias identificadas na literatura especializada, formando assim os fundamentos teóricos que apoiam a investigação em questão.

2.1 Materiais compósitos à base de madeira

2.1.1 Definição de compósito

Os compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais, cada um contribuindo com propriedades e características distintas, de forma a melhorar as propriedades individuais. Estes componentes não se fundem nem se dissolvem mutuamente, pelo contrário estes são organizados numa estrutura única que promove um comportamento cooperativo e construtivo entre materiais (Howes & Laughlin, 2012). Deste modo pode-se definir compósito à base de madeira como a junção de uma matriz natural ou sintética, ou seja, um aglomerante e um reforço, as partículas de madeira (Aguilera & Davim, 2013).

2.1.2 Necessidade dos compósitos à base de madeira

A necessidade destes materiais surge da combinação das propriedades desejáveis da madeira natural com os benefícios adicionais da matriz. Os compósitos destacam-se como uma alternativa inovadora à madeira maciça, incorporando resíduos e ajustando as suas propriedades de acordo com as necessidades específicas do público-alvo. Esta abordagem representa não só uma resposta à necessidade de reduzir a dependência dos recursos naturais, mas também uma solução adaptável às diversas exigências do mercado (Papadopoulos, 2020). Nesse sentido, o reaproveitamento das partículas de madeira como reforço em materiais compósitos possibilita uma gestão mais eficiente dos resíduos, resultando na criação de produtos de valor acrescentado e contribuindo para uma economia circular.

2.1.3 Matrizes

As matrizes/aglomerantes utilizados na fabricação de compósitos afetam todas as suas propriedades dos materiais, desde as suas propriedades mecânicas e de absorção de água até ao seu impacto no meio ambiente. A indústria de compósitos utiliza quase exclusivamente adesivos à base de petróleo, como ureia-formaldeído e melamina-ureia-formaldeído. Devido à libertação de formaldeído, a tendência tem vindo a ser a substituição destes por alternativas mais sustentáveis, que têm sido estudadas e introduzidas no mercado gradualmente (Hemmilä *et al.*, 2017). Seguidamente apresentam-se alguns estudos, organizados segundo as matrizes que têm vindo a ser estudadas.

- **Poliméricas:**

Termoplásticas e termoendurecíveis

Um exemplo da utilização destas matrizes está presente na dissertação de Leite (2017), na qual se investigou a durabilidade de compósitos de matriz polimérica termoplástica (polipropileno) e termoendurecível (resina epóxi), reforçados com fibras de vidro e fibras naturais de juta, em ambientes corrosivos.

Elastoméricas

Outro exemplo encontra-se no estudo de Sudár *et al.* (2016). Neste foram utilizadas 3 tipos de fibra e diferentes teores de elastómero de forma a criar materiais de elevada rigidez e resistência ao impacto.

- **Metálicas:**

Como exemplo da aplicação destas matrizes apresenta-se o estudo de Tu *et al.* (2020). Este investiga um método de síntese verde que permite o crescimento in situ de nano cristais de MOFs em substratos de madeira

- **Minerais:**

Cimentícias

Neste contexto surge como exemplo o estudo de Frybort *et al.* (2008), que estuda e avalia a tenacidade e durabilidade de compósitos de madeira/cimento.

2.1.4 Reforços

Foram analisadas e selecionadas diversos reforços/aglomerados representados na tabela 2 e posteriormente avaliados de acordo com os seguintes parâmetros, sendo os últimos dois, os parâmetros os mais valorizados:

- Não necessitar de pré-processamentos complexos
- Fácil reciclagem
- Proveniente de fonte renovável
- **Baixa condutibilidade térmica**
- **Disponibilidade local**

Tabela 2 - Avaliação preliminar de matérias-primas

Materiais	Condutibilidade Térmica	Disponibilidade Nacional	Referências
	W/m ² K		
Corn	0,101 - 0,139	Disponível	(Paiva <i>et al.</i> , 2012; Portugal Maize (Corn) Market Overview 2024, 2024)
Durian	0,054-0,1854	Não nativa	(Khedari <i>et al.</i> , 2003 ;Portugal Fresh Durian Market Overview 2023. , n.d.)
Coconut pitch	0,0416 - 0,086	Não nativa	(Sampathrajan <i>et al.</i> , 1992a; Manohar, 2012a)
Fique	0,04 - 0,08	Não nativa	(Navacerrada Saturio <i>et al.</i> , 2014)
Flax	0,033 - 0,09	Disponível	(Korjenic <i>et al.</i> , 2011;EL Hajj <i>et al.</i> , 2011;Kymäläinen & Sjöberg, 2008 ; Portugal Flax Seed Market Overview 2023. , 2023)
Hemp	0,0393-0,123	Disponível	(Kymäläinen & Sjöberg, 2008 ;Portugal Hemp Seed Market Overview 2024, 2024)
Sunflower	0,0656 - 0,077	Disponível	(Evon <i>et al.</i> , 2014 ;Mati-Baouche <i>et al.</i> , 2016 ; Portugal Sunflower Seed Market Overview 2023., 2023)
Rice	0,049-0,063	Disponível	(Yarbrough <i>et al.</i> , 2005 ;Liu <i>et al.</i> , 2012 ;Sampathrajan <i>et al.</i> , 1992b ;Portugal Rice Husk Market Overview 2023., n.d.)
Bagasse	0,046-0,068	Disponível	(Manohar, 2012b ;Portugal's Beet-Pulp and Bagasse Market Report 2023 - Prices, Size, Forecast, and Companies., 2023)
Cattail	0,0438 - 0,0606	Nativa mas não associada a processo produtivos	(Luamkanchanaphan <i>et al.</i> , 2012 ;Steven Hall, 2008)
Pineapple	0,035-0,057	Nativa (Ilhas atlânticas)	(Tanguank, 2011;Kumfu & Jintakosol, 2012)
Jute	0,0427	Disponível	(Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020;Jute and Other Textile Fibers in Portugal, n.d.)
Reed	0,059 - 0,094	Espécie Invasora	(Andreu <i>et al.</i> , 2013; Malheiro <i>et al.</i> , 2022)

Na figura 1 estão presentes alguns dados em relação à densidade e à condutibilidade térmica de alguns dos reforços selecionados.

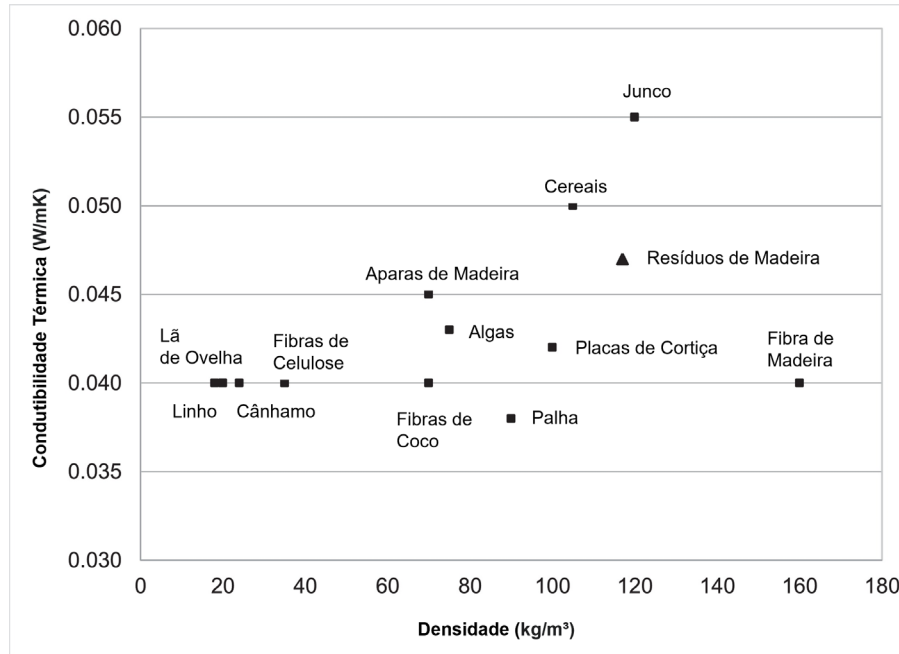


Figura 1 - Relação entre a densidade e a condutibilidade térmica de resíduos agroindustriais (Cetiner & Shea, 2018)

Ao analisar os dados fornecidos e contactar algumas empresas locais, constatou-se que os resíduos de madeira estão disponíveis em maior quantidade, não requerem pré-processamento complexos, são facilmente recicláveis e possuem baixa condutibilidade térmica. Em Portugal, todos os materiais com condutibilidade térmica inferior a $0,070 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ são considerados isolamentos térmicos (Cabrita, 2020). Portanto, os resíduos de madeira devem ser vistos como matérias-primas com potencial para produzir produtos locais e mais ecológicos. Nesse sentido, o aproveitamento destes tem contribuído para a racionalização dos recursos florestais, oferecendo uma nova alternativa socioeconómica para as empresas e uma gestão ambientalmente adequada dos resíduos industriais.

Dependendo do produto final, a madeira pode ser utilizada sob as seguintes geometrias: folha de madeira, aparas, serradura, pó ou fibra (Cruz Salgado *et al.*, 2015). A utilização desta matéria-prima baseia-se nas suas diversas propriedades e características tal como leveza (Monteiro *et al.*, 2018), resistência mecânica (Cetera *et al.*, 2018), isolamento térmico (Shalbafan *et al.*, 2017), isolamento acústico (Negro *et al.*, 2017), durabilidade (Källbom *et al.*, 2020) e resistência ao fogo (Kalali *et al.*, 2019), entre outras, que têm sido alvo de estudos/investigações.

2.1.4.1 Madeira de Choupo

Os choupos, pertencentes à família Salicaceae, são predominantes na Europa, USA e Canadá. Estas árvores são conhecidas pelo seu crescimento rápido e pela preferência por habitats próximos de cursos de água e por isso são vistas como um recurso relativamente renovável sob uma administração florestal correta. Atualmente, existem diversas variedades híbridas do género Populus, sendo a I-214, a mais reconhecida pelo seu crescimento acelerado, adaptação a diferentes tipos de solo e clima, resistência a pragas e fungos, e a alta qualidade da madeira para usos como construção e produção de papel (UTAD, n.d.; Lefteri, 2014).

De seguida encontra-se a figura 2 que ilustra a distribuição da espécie Poplar Nigra.



Figura 2- Mapa de distribuição da Espécie Poplar Nigra (Caudullo *et al.*, 2017)

As aparas de madeira, provenientes da empresa FreshWood, resultam da transformação do tronco em folhas de madeira ainda húmidas. Dada a elevada percentagem de água presente no material este é processado ainda húmido e posteriormente preserva a forma ao secar, dentro de uma estufa. Seguindo esta metodologia a empresa FreshWood consegue criar uma gama de embalagens apenas com corte e dobragens, tornando os seus produtos mais sustentáveis. Existem 4 tipos de resíduos nesta indústria: Aparas de madeira, folha de madeira não adequada ao fabrico, casca de choupo e serradura (Figura 3).



Figura 3 - Granulometria de resíduos de madeira: A) Cascas e folhas iniciais, B) Folha de Madeira, C) Aparas de Madeira

2.1.4.2 Madeira de Pinho

A madeira de pinho, pertencente à família das pináceas (pinaceae), é amplamente utilizada na indústria da construção, marcenaria, carpintaria, fabricação de móveis, embalagens, combustível e fibras de celulose. Na Europa a distribuição geográfica do pinheiro divide-se em duas subespécies: a atlântica e a mediterrânea, com ampla distribuição em regiões que orlam o mar Mediterrâneo e nas regiões litorais da Península Ibérica, incluindo Portugal, França, Itália, Espanha, etc. (Figura 4) (Sousa, 2020)

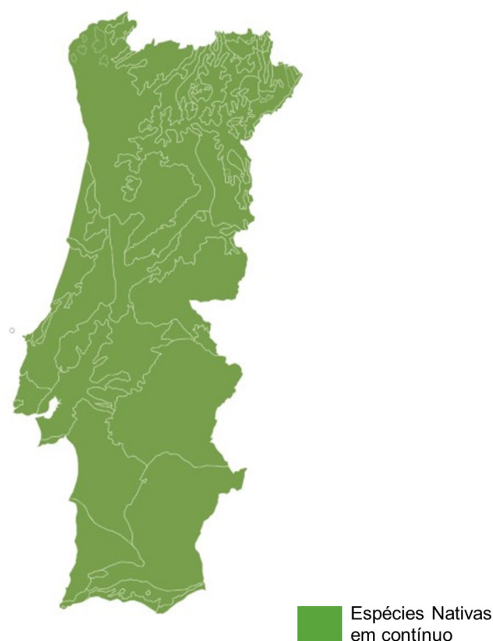


Figura 4 - Distribuição da espécie *Pinus pinaster* (UTAD, n.d.-a)

As fibras de madeira de pinho são provenientes da empresa Finsa, uma empresa reconhecida por fabricar diversos painéis de madeira, incluindo MDF, aglomerado e compensado, entre outros derivados aplicados na área de construção e mobiliário.

Por fim, na tabela 3 encontram-se uma breve comparação entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de pinho, choupo e carvalho. Esta última serve apenas de termo de comparação visto ser uma madeira também amplamente utilizada na construção.

Tabela 3 - Comparação entre a madeira de choupo, pinho e carvalho (Lefteri, 2014; Online Materials Information Resource - MatWeb, 2024.)

Propriedades Físicas	Madeira de Pinho Europeia	Madeira de Choupo Europeia	Madeira de Carvalho Europeia	Observações
Densidade (g/cm ³)	0.360	0.280 - 0.380	0.320 - 0.450	Lenho inicial (earlywood)
	0.730	0.340	0.890 - 0.930	Lenho final (latewood)
Comprimento celular (mm)	3.10	1.10	1.20	
Propriedades Mecânicas				
Dureza (N)	2400	1900	5500	
Resistência à tração (MPa)	2.90	1.50	3.00	Perpendicular à direção do grão
	102	84.0	109	Axial
Resistência à Flexão (GPa)	0.0980	0.0640	0.0910	Ensaio de flexão estático
Resistência à compressão (MPa)	7.50	35.0	7.80	Perpendicular à direção do grão
	54.0		43.0	Paralelo à direção do grão
Resistência ao corte (MPa)	9.80			
Tenacidade (J)	27.6		29.6	exemplar 2 cm x 2 cm
Clivagem (kN/m)	3.60	5.50	9.00	

2.1.5 Processos de Fabrico

O processamento destes materiais é feito através de prensagem a quente, extrusão, injeção, entre outros.

Uma revisão do processo prensagem a quente encontra-se no estudo de Wei *et al.* (2016), em que se abordam os métodos de aquecimento, mecanismos de transferência de calor e massa, modelos de prensagem a quente e testes experimentais do ambiente interno. O estudo analisa a influencia da interação entre a transferência de calor, a migração de humidade e a deformação mecânica na qualidade dos compósitos.

Um exemplo do processo de extrusão está presente no estudo de Nygård *et al.* (2008), em que se procura resolver os desafios da adição das fibras de madeira em compósitos de polímeros através da compactação destas em pellets, de forma a obter uma extrusão controlada.

Foram comparados os compósitos reforçados com fibras de madeira com os preenchidos com pó de madeira, analisando também dois agentes de acoplamento.

No caso da injeção, apresenta como exemplo o estudo de Golmakani *et al.* (2021). Neste estudo o objetivo foi preparar compósitos de polietileno reforçados com pó de madeira e um agente de acoplamento, utilizando a injeção como processo de fabrico. Procurou-se investigar o impacto do tamanho das partículas de madeira, das proporções e da temperatura de injeção nas suas propriedades mecânicas. Foram criadas cinco formulações diferentes, e realizaram-se testes de tração, flexão e impacto.

Para além destes processos pode ser necessário um pré-tratamento dos resíduos tal como a secagem ou crivagem e um pós-processamento do produto, dependendo da finalidade (Ramesh *et al.*, 2022).

2.1.6 Aplicações

Dada a diversidade de matrizes referidas, existe um crescente interesse na utilização desses compósitos nos diversos setores, desde a construção civil até a indústria automóvel e fabrico de móveis (Zanuttini & Negro, 2021b).

Devido à crescente preocupação com a gestão adequada dos resíduos provenientes da agricultura, e à busca por alternativas mais sustentáveis na construção, uma das possíveis aplicações está relacionada com os isolamentos térmicos, pois estes melhoraram a eficiência energética dos edifícios ao reduzir as perdas de calor. Para o desenvolvimento sustentável de isolamentos térmicos de base vegetal é necessário privilegiar características como a facilidade de produção e reciclagem, proveniência de fontes renováveis e disponibilidade local (Rama *et al.*, 2014)

- **Aplicação em isolamentos térmicos**

Seguidamente apresentam-se as vantagens e desvantagens da utilização de resíduos vegetais em isolamentos térmicos (Tabela 4), tal como os estudos relacionados com a utilização destes na produção de materiais para a indústria da construção civil.

Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens da utilização de resíduos vegetais(Balador *et al.*, 2018)

Vantagens	Desvantagens
Baixa Condutibilidade Térmica	Fraca Resistência Mecânica
Auto - Ligação	Espessura
Renovação Rápida	Tratamentos
Abundante	Não Homogeneidade
Natural	Variabilidade
Elevado Amortecimento De Vibrações	Modelo Teórico Sem Sucesso
Biodegradável	Sem Resistência Ao Fogo
Boa Relação Custo- Eficácia	Aditivos Perigosos
Baixo Impacto Ambiental	Contaminantes
Energeticamente eficiente	Influência Do Clima
Menos Emissões	Baixa Durabilidade
Recursos Renováveis	

No estudo de Vital (2021) foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas, de painéis compósitos com base em partículas provenientes de resíduos do processamento mecânico da madeira de Paricá, utilizando como ligante o silicato de sódio.

Foram utilizados 3 formatos de partículas proveniente da serração de madeira. Estas secaram num estufa até apresentarem 5% de humidade. Posteriormente o silicato de sódio (ligante) foi pulverizado sobre as partículas de madeira e o painel foi prensado manualmente seguido por uma prensa mecânica, durante 10 minutos aplicando uma pressão de 3,2 MPa a uma temperatura de 170°C. Foram produzidos painéis com 400x400x10mm (comprimento x largura x espessura), cuja cura decorreu a uma temperatura de 20°C e humidade relativa de 65% até a massa volúmica estabilizar. Por último foram realizados ensaios físico - mecânicos e analisados os resultados. Estes foram satisfatórios quando comparados com os valores de referência apresentados na literatura para as espécies utilizadas. No entanto não foi possível obter resultados claros em relação à influência do grau de compactação nas propriedades físicas e mecânicas.

No estudo destaca-se a espécie a *Ecclinusa guianensis* Eyma (Caucho) por apresentar os melhores resultados ao nível da propriedade físico - mecânicas. A qualidade dos painéis foi avaliada segundo a sua massa volúmica, dada a correlação entre esta e as propriedades inerentes ao material.

2.1.7 Fabrico Aditivo com resíduos agroindustriais

Nos últimos anos, nomeadamente até ao ano 2023, o mercado do fabrico aditivo e Materiais alcançou a marca de USD 65,39 bilhões, com uma projeção de crescimento anual de 20,70% até 2028 (Additive Manufacturing Materials Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029),n.d) .O avanço significativo nos materiais e tecnologias associadas permitiu a transição da prototipagem para a fabricação efetiva de peças (Mazanti & Mollica, 2020).

Existem diversas tecnologias de fabricação aditiva, cada uma com capacidades de produ-

ção distintas e uma ampla variedade de materiais. De seguida encontra-se duas tecnologias que estão na base dos estudos descritos posteriormente.

- Extrusão (MEX):

Um exemplo deste processo encontra-se no estudo de Woern *et al.* (2018) que combina matrizes partículas ou fibras de reforço com uma matriz termoplástica através do processo de fusão, com o objetivo de obter um material compósito.

Observa-se outro exemplo no estudo de Orji *et al.* (2023), que apesar de não trabalhar diretamente com o fabrico aditivo, deteta uma lacuna nesta ao verificar a inexistência materiais compósitos à base de madeira de aglomerantes inorgânicos (como por exemplo o silicato de sódio) para esta tecnologia. Além disso, existe a necessidade de criar materiais que possam ser curados a baixas temperaturas, sejam livres de formaldeído e constituídos por resíduos de madeira

- Binder Jetting:

Um exemplo desta tecnologia está presente no estudo de Henke & Treml (2013). Neste é utilizado um agente de ligação que une partículas de pó de material em camadas, resultando num objeto tridimensional. Neste caso é explorada a utilização de resíduos de madeira especialmente para aplicação no ramo da construção.

A incorporação de resíduos de madeira na tecnologia de fabrico aditivo representa uma abordagem inovadora e sustentável, visando não apenas reduzir os impactos ambientais, mas também explorar as propriedades únicas desses materiais. Essa sinergia entre resíduos abundantes e a versatilidade da impressão 3D abre perspectivas promissoras para uma produção de produtos eficiente e personalizados. Seguidamente, apresentam-se estudos relacionados com a utilização das fibras de madeira de pinho e de silicato de sódio como base para a produção de materiais inovadores para o fabrico aditivo.

Orji *et al.* (2023) investigaram a viabilidade da utilização de diferentes combinações de resíduos de madeira e silicato de sódio (SS). Esses compósitos foram elaborados com 50-60% de fibra de madeira e 50-40% de SS. O processo de cura destas formulações foi analisado utilizando calorimetria diferencial de varredura (DSC) e reométrica dinâmica.

Foi desenvolvido um sistema de extrusão personalizado para extrudir as misturas 50/50, sendo posteriormente curadas a diferentes temperaturas e avaliadas quanto às suas propriedades mecânicas, térmicas, absorção de água e de combustibilidade.

Foi observado que as propriedades mecânicas, avaliadas por meio de testes de flexão em três pontos, melhoraram com o aumento de fração volúmica de fibras de madeira. As propriedades mecânicas variaram de acordo com a temperatura de cura, sendo observada uma melhoria das propriedades após a adição de fibra de madeira. A temperatura de cura influenciou a estabilidade térmica dos compósitos, com um pico exotérmico de cura observado aos 83 °C para o SS puro, aumentando para 153 °C e 163 °C com a adição de fibra de madeira. Para além disso, verificou-se que viscosidade era superior nas misturas 50/50 e inferior no SS puro.

No estudo de Henke & Treml (2013) estudou-se a utilização resíduos de madeira (serra

gem, aparas de madeira, etc.) em processos de impressão 3D. Os resíduos com dimensões entre 0,8 - 2 mm formaram uma cama de pó sobre a qual foi depositada seletivamente um ligante adequado formando assim, camada por camada, um sólido. Os testes preliminares foram realizados utilizando diversos ligantes tal como gesso, celulose, silicato de sódio e cimento. Os resultados demonstram que não existe uma aglomeração eficiente e uniforme dos resíduos ao utilizar silicato de sódio. O gesso e o cimento apresentaram bons resultados.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo, serão abordadas as características fundamentais e propriedades dos materiais utilizados nas placas, juntamente com as metodologias implementadas na produção das mesmas. Adicionalmente, serão apresentadas as especificações dos fatores que regem a realização dos testes relativos à condutibilidade térmica e à resistência à flexão.

Posteriormente, realiza-se uma caracterização dos materiais utilizados no fabrico aditivo, incluindo as formulações e respetiva preparação. Por fim, apresentam-se os procedimentos adotados para ensaiar esses materiais, abrangendo os ensaios de extrusão, de espalhamento e de resistência à flexão.

3.1. Caracterização de materiais

3.1.1 Aparas de Madeira

As aparas de madeira utilizadas neste trabalho são da espécie Poplar nigra, resultantes do processamento da madeira das empresas FreshWood, localizada no município de Leiria.

Na Figura 5 pode-se visualizar uma amostra do material utilizado, antes e após a secagem numa estufa a 50°C durante 8 horas.



Figura 5 - Amostra de aparas de madeira, antes da secagem; Amostra de aparas de madeira, após a secagem;

A empresa produz individualmente cerca de 6 toneladas semanais de resíduo, sendo que as aparas possuem dimensões que variam entre 0,2 e 8 mm.

Apenas com objetivo de avaliar e caracterizar este material, este foi peneirado e classificado em frações com base no tamanho das partículas, conforme detalhado na tabela 5. Utilizaram-se os peneiros de 200, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 μm ao longo de 3 testes de modo a obter um valor médio em relação à massa de partículas de madeira que atravessa cada peneiro.

Tabela 5 - Percentagem correspondente a cada fração de partículas

Diâmetro do peneiro(mm)	Massa Média Retida (g)	Massa Média Retida (%)	Massa Acumulada Média Retida (%)	Massa Acumulada Média Passante (%)
8	0,32	0,32%	0,32%	99,68%
4	28,92	29,02%	29,34%	70,65%
2	37,12	37,25%	66,59%	33,42%

1	16,48	16,53%	83,12%	16,88%
0,5	9,30	9,33%	92,45%	7,55%
0,2	6,08	6,10%	98,55%	1,45%
Pan	1,44	1,45%	100,00%	0,00%
Total	99,67	100,00%		

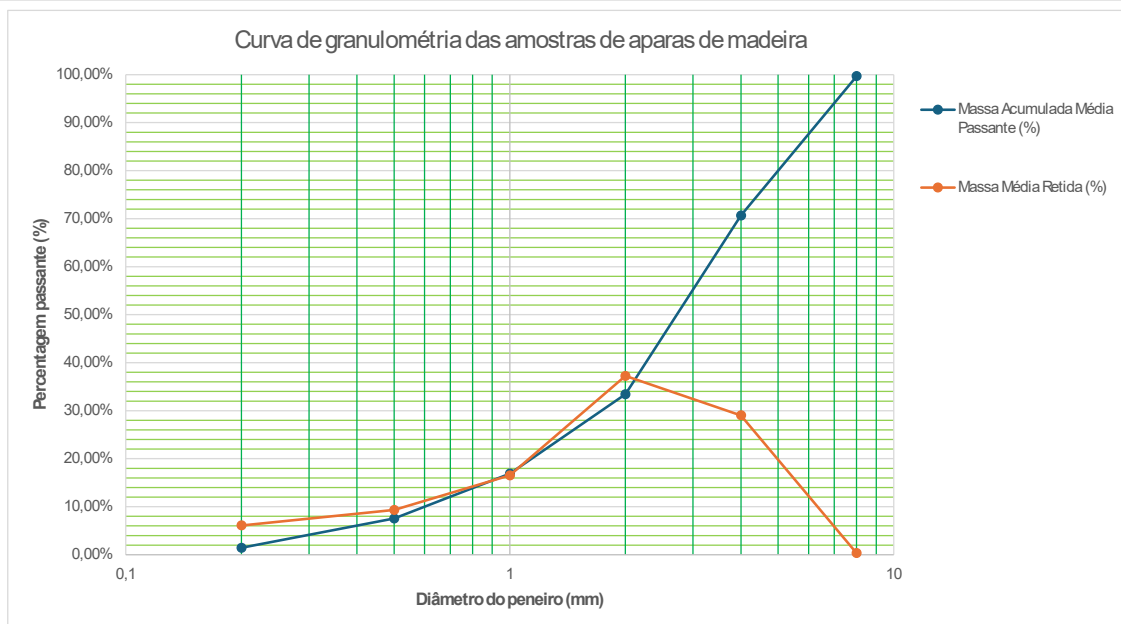


Figura 6 - Curva Granulométrica das amostras de aparas de madeira

As partículas com diâmetro superior a 8 mm foram descartadas dada a sua insignificante expressão, cerca de 0,32% da massa total. Na figura 6, apresenta-se um gráfico com a distribuição das partículas segundo o diâmetro das partículas.

Na tabela 6, pode-se visualizar a composição de modo geral da madeira de choupo, conforme Kozakiewicz *et al.*, 2020.

Tabela 6 - Percentagem Mássica dos componentes constituintes do Choupo Negro (*Poplar nigra*) (Kozakiewicz *et al.*, 2020)

Componente	Percentagem mássica (%)
celulose	52.15 ± 0.49
holocelulose	82.11 ± 0.34
hemicelulose	29.96 ± 0.83
lignina	24.12 ± 0.48
extrativos	1.80 ± 0.03

3.1.2 Silicato de Sódio

Como ligante utilizou-se o silicato de sódio (solução D40 do fabricante QUIMIALMEL Químicos e Minerais LDA.). Trata-se de um líquido viscoso, de cor transparente ou esbranquiçada (Figura 7). O material apresenta o pH entre 10,5 e 13, massa volúmica de 1,368 g/cm³ e uma viscosidade correspondente a 135 cP, de acordo com a ficha técnica do fabricante que pode ser consultada no Anexo 1.



Figura 7 - Amostra de Silicato de Sódio

Optou-se pelo silicato de sódio como aglomerante inorgânico devido à sua natureza ecológica, acessibilidade, facilidade de manipulação e preparação, para além das suas propriedades mecânicas (Dimas *et al.* 2009). É importante destacar as propriedades de incombustibilidade, a capacidade de curar a baixas temperaturas e a vantagem de não emitir formaldeídos, o que o torna uma opção segura e ambientalmente consciente para a fabricação de materiais compósitos, para ambientes interiores (Orji *et al.* 2023).

Este material possui uma vasta gama de aplicações em diversas indústrias, incluindo cerâmica, cimento, madeira, produtos de limpeza, metalurgia, tratamento de água, revestimentos e adesivos (Bialosau, 2017).

3.2 Formulação e preparação das placas

Neste estudo, foram desenvolvidas 11 formulações distintas de placas utilizando os materiais mencionados anteriormente, em que as aparas de madeira de choupo (MC) servem de agregado e o silicato de sódio (SS) de aglomerante.

É essencial ressaltar que nem todas as formulações foram selecionadas para serem submetidas aos ensaios. Inicialmente, procedeu-se a uma análise preliminar da integridade e conformidade geométrica das placas, e aquelas que não atenderam aos critérios de avaliação foram excluídas.

Para tal avaliou-se o comprimento, largura e espessura das placas bem como a sua integridade. A integridade das mesmas foi subdividida nas seguintes classes: Placa rígida, quando não existia material solto na superfície da placa; Placa semirrígida, quando existia algum material que se soltava ao toque; Placa não rígida, quando existia material solto e desintegração da placa. Estas últimas acabaram por partir ao manusear, logo apenas a rígidas e semirrígidas sofreram os ensaios de condutibilidade térmica.

Com base nisso, foram eleitas 9 formulações, assinaladas a verde na tabela 7, para a análise das suas propriedades. Procedeu-se também a replicação das 9 formulações de forma a assegurar a credibilidade dos resultados.

Tabela 7 – Formulações selecionadas para ensaios de condutibilidade e de resistência à flexão.

Placa	Material		Rácio MC/SS	Estado
	MC (g)	SS(g)		
F1	300	250	1,20 ↑	Não enche o molde, placa irregular, não viável para teste
F6	400	300	1,3(3) ↑	Placa não rígida, não viável para teste
F10	400	350	1,14 ↑	Semirrígida
F4	400	400	1,00 ↑	Semirrígida
F11	400	450	0,88 ↑	Semirrígida
F8	400	500	0,80 ↑	Rígida
F5	500	400	1,25 ↓	Semirrígida
F9	500	450	1,11 ↓	Semirrígida
F2	500	500	1,00 ↓	Rígida
F12	500	550	0,90 ↓	Rígida
F7	500	600	0,8(3) ↓	Rígida

MC- Madeira de Choupo(paras); SS -Silicato de Sódio D40

Todas as placas foram preparadas utilizando um molde de alumínio (Figura 8) e apresentavam dimensões praticamente uniformes, medindo 300 x 300 x 30 mm, com variações máximas na ordem dos 5 mm. O molde é composto por uma base, acompanhado por uma tampa e laterais removíveis.

Para a montagem das laterais do molde foram utilizados 4 parafusos M6 e na tampa 4 parafusos M8 de forma a fechar o molde e comprimir os resíduos no interior. As laterais removíveis são retiradas ao longo do processo de modo a facilitar a secagem do compósito. Na figura 9, encontra-se uma vista explodida do molde e da tampa e respetivas linhas de montagem.

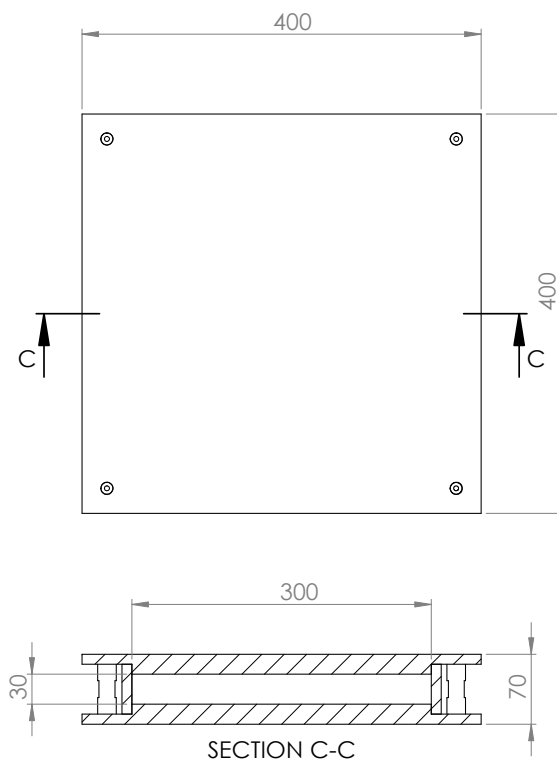


Figura 8- Molde de Alumínio fechado e respetivas dimensões gerais, em mm.

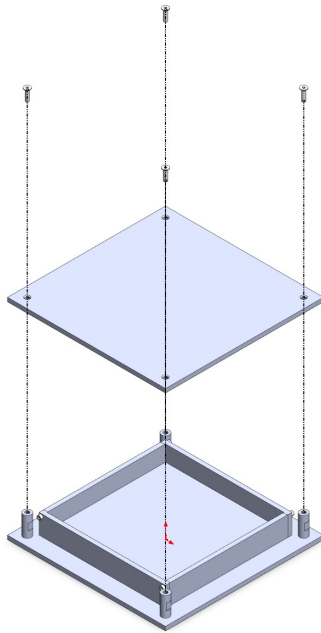


Figura 9 - Vista explodida do molde e da tampa e respectivas linhas de montagem

A preparação de cada formulação foi manual, assegurando que o aglomerante envolvia os agregados de forma uniforme. Após a mistura, o composto foi disposto no molde (Figura 10), a tampa foi devidamente apertada e o molde foi mantido fechado por um mínimo de 4 horas.



Figura 10 - Colocação da formulação no molde de alumínio

Posteriormente, as laterais do molde foram retiradas e o molde foi transferido para uma estufa, onde foi submetido a um processo de secagem a uma temperatura de 50°C, até atingir uma massa volúmica constante, ou seja, a massa é medida até estabilizar. Para garantir uniformidade e planeza da superfície das placas, neste estudo, optou-se por manter a tampa fixa nas primeiras 24 horas, em vez de retirá-la por completo. Isso evita possíveis deformações superficiais causadas pelo calor da estufa, que poderiam comprometer a precisão dos ensaios, especialmente o de condutibilidade térmica.

Após este período, a placa é retirada da estufa e armazenada em ambiente protegido e seco. Estas devem ser mantidas num ambiente de temperatura e humidade controlada de forma a não

influenciar os ensaios de condutibilidade. Na figura 11 é possível observar um exemplar de uma placa finalizada (Placa F10).



Figura 11 - Placa F10 finalizada

3.3 Ensaios das placas

3.3.1 Ensaios de Condutibilidade Térmica

Os ensaios de condutibilidade térmica permitem avaliar a capacidade de transporte de energia de determinado material e indicar a taxa a que esta energia é transferida por difusão. Este coeficiente depende diretamente da massa volúmica, da natureza química e da humidade do material (T. L. Bergman, 2011).

Neste trabalho, para determinar a condutibilidade térmica (λ) das diferentes composições de placas, após a secagem a 50°C, estas foram submetidas ao ensaio utilizando o equipamento medidor de fluxo de calor LM.PLUS 305 (Figura 12), de acordo com a norma ISO 8301 (1991) (International Organization for Standardization, 1991). Repetiu-se o ensaio quatro vezes para cada placa, de modo a obter uma média relativa a cada composição.

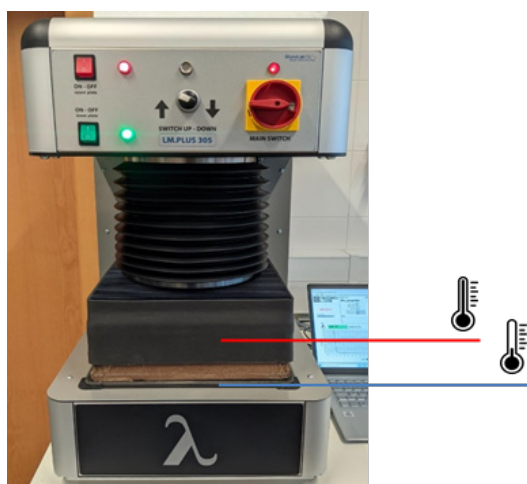


Figura 12 - Equipamento LM.PLUS 305

O material é colocado entre uma placa de arrefecimento na parte inferior e uma placa de aquecimento na parte superior, acionadas por 2 botões no equipamento. A temperatura da placa de arrefecimento definida para este ensaio foi de $(10 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ e a da placa de aquecimento foi de $(40 \pm 0.5)^\circ\text{C}$. Com as temperaturas definidas, o equipamento trabalha entre 120 - 200 min até obter um valor estável do coeficiente de condutibilidade térmica.

Na figura 13, pode-se visualizar um exemplo dos parâmetros inseridos e dos resultados obtidos através deste ensaio. Os parâmetros a serem inseridos, sublinhados na imagem, são: as dimensões da amostra (comprimento, largura, espessura e massa), as temperaturas das placas de aquecimento e arrefecimento e o tempo programado para a duração do ensaio.

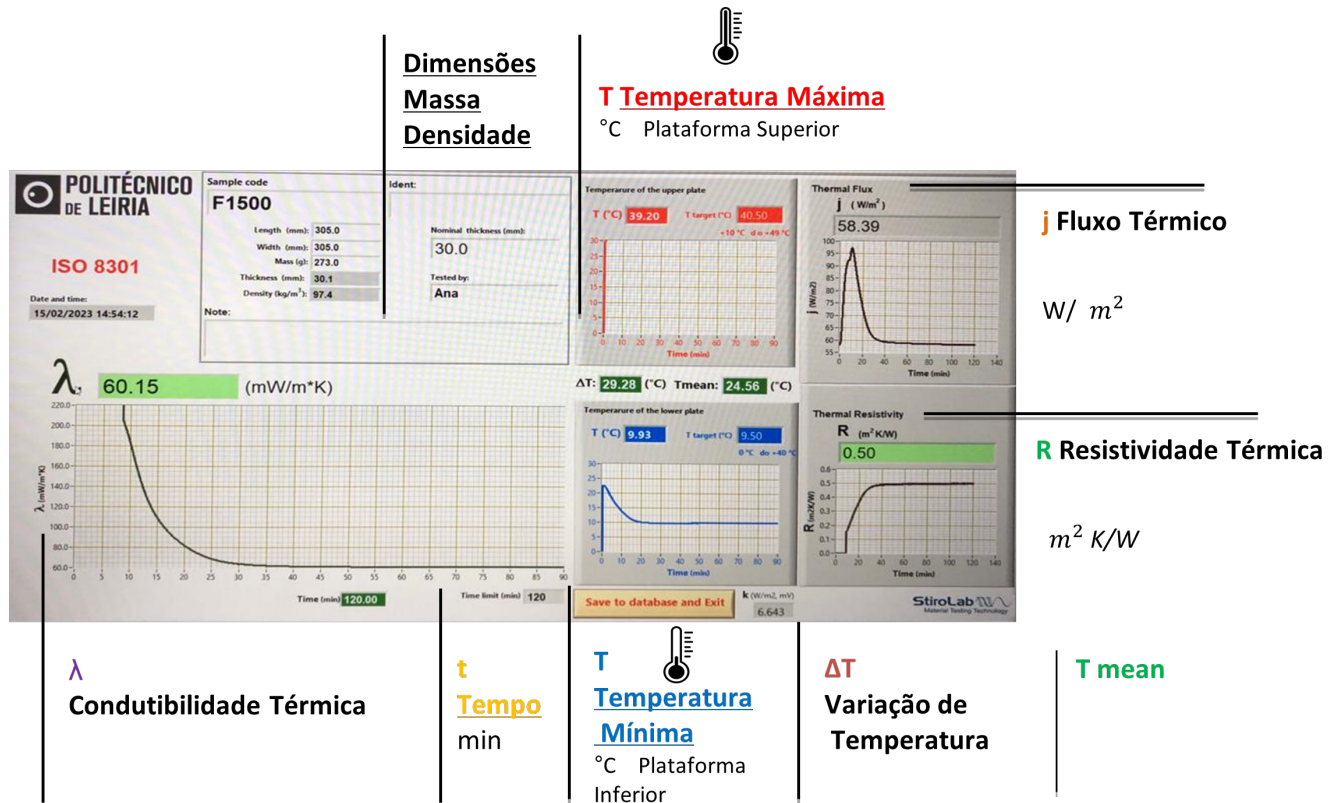


Figura 13 - Parâmetros de Ensaio Condutibilidade Térmica

A figura 13 ilustra o software utilizado nos ensaios de condutibilidade térmica, que desempenha um papel crucial na análise do comportamento térmico dos materiais. Os gráficos gerados pelo software mostram a variação das temperaturas ao longo do tempo, tanto para as placas que aquecem quanto para aquelas que arrefecem.

Adicionalmente fornece informações sobre o fluxo térmico, expresso em watts por metro quadrado (W/m²), que representa a quantidade de calor que passa por uma unidade de área em um determinado intervalo de tempo. A resistividade térmica, por sua vez, é uma propriedade fundamental que indica a capacidade de um material de resistir à transferência de calor.

A interface facilita a visualização dos dados em tempo real e permite a comparação dos resultados obtidos com padrões ou especificações, ajudando na identificação de materiais com melhor desempenho térmico.

3.3.2 Ensaios de Resistência à Flexão

Os testes de resistência à flexão foram conduzidos para avaliar a resistência mecânica das placas produzidas. A resistência à flexão é determinada pela deflexão da peça, envolvendo a aplicação de uma carga transversal até que ocorra a ruptura ou uma deformação permanente no provete.

Durante o ensaio, a carga é aplicada na parte superior da peça, enquanto a parte inferior é suportada em dois pontos previamente definidos. Para os ensaios relativos às placas de isolamento térmico utilizou-se a norma EN 12089 - Produtos de isolamento térmico para aplicações em edifícios - Determinação do comportamento à flexão, para determinar a resistência do material às tensões de flexão durante a aplicação e transporte (CEN, 2013).

A resistência à flexão é calculada a partir da seguinte equação 1:

$$\sigma_f = \frac{3xFm \times L_2}{2 \times b \times d^2} \quad (1)$$

onde:

σ_f - Resistência à flexão (MPa)

F_m - Carga máxima (N)

L - Distância entre apoios (mm)

b - Largura do provete (mm)

d - Espessura do provete (mm)

No processo de realização do ensaio, as placas foram cortadas utilizando uma serra circular (Figura 14), resultando em 5 provetes com dimensões de 300 x 50 x 30 mm.



Figura 14 - Serra Circular utilizada e provetes obtidos.

Para a execução do ensaio de flexão, utilizou-se uma máquina de ensaios universal Zwick (Figura 15). O ensaio realizado foi do tipo flexão em três pontos, posicionando o provete sobre dois apoios cilíndricos de 10 mm de diâmetro cada. A distância entre os eixos desses apoios foi de 250 mm, e um cilindro de 10 mm de diâmetro foi colocado no centro da parte superior do provete, servindo como ponto de aplicação direta da carga, conforme representado na figura 15. A carga foi aplicada a uma taxa constante de 5 mm/min.



Figura 15 - Proвете no equipamento para ensaio de resistência à flexão

3.4 Caracterização de materiais para fabrico aditivo

3.4.1 Fibra de madeira de pinho

As fibras de madeira utilizadas neste trabalho pertencem à família das pináceas (*pinaceae*). Estas resultam do processamento da madeira da empresa Finsa. Na figura 16 está presente uma amostra do material utilizado. O material foi submetido a um processo de trituração mecânica, utilizando água como meio, posteriormente este foi seco numa estufa a 50°C. Foram utilizadas 125 g de fibra para cada 500 mL de solução, e o procedimento foi realizado durante um período de 3 minutos.

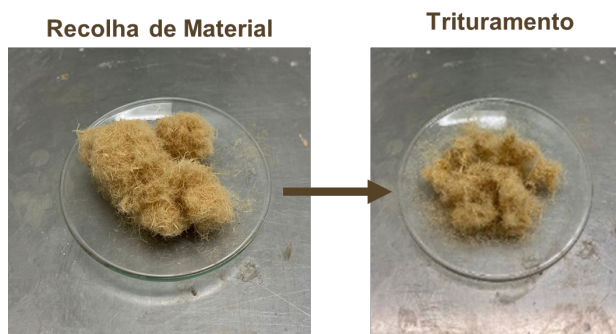


Figura 16 - Amostra de fibras de madeira de pinho provenientes da Empresa Finsa

Na tabela 8 pode-se visualizar a composição de modo geral da madeira de pinho, conforme Reyes-Contreras *et al.*, 2013.

Tabela 8 - Percentagem mássica dos componentes da madeira de pinho(Reyes-Contreras *et al.*, 2013)

Componente	Percentagem Mássica (%)
Lignina	28
Hemicelulose	27
Celulose	42
Extrativos	3

A morfologia e dimensões das fibras foram analisadas por SEM utilizando o equipamento Vega3 Tescan (Tescan, Brno, Czechia), com uma tensão de aceleração de 2.0 kV, ampliações variáveis e com uma distância de trabalho de trabalho de cerca de 10 mm.

Após a fixação das amostras num suporte de latão com fita adesiva de dupla face, estas foram revestidas a ouro/paládio (Au/Pd), por pulverização catódica. Este processo decorreu durante 45s, com 5 cm de distância entre o alvo e a amostra alvo e a amostra e uma intensidade de 20 mA (SC7620 Quorum Technologies, Lewes, Reino Unido). Na figura 17, observa-se a organização das fibras a uma escala 20x e 50x, enquanto na figura 18 é possível analisar suas dimensões.

Estas apresentam diâmetros que variam entre os 30 – 40 µm no centro da fibra e entre 18 - 22 µm nas extremidades.

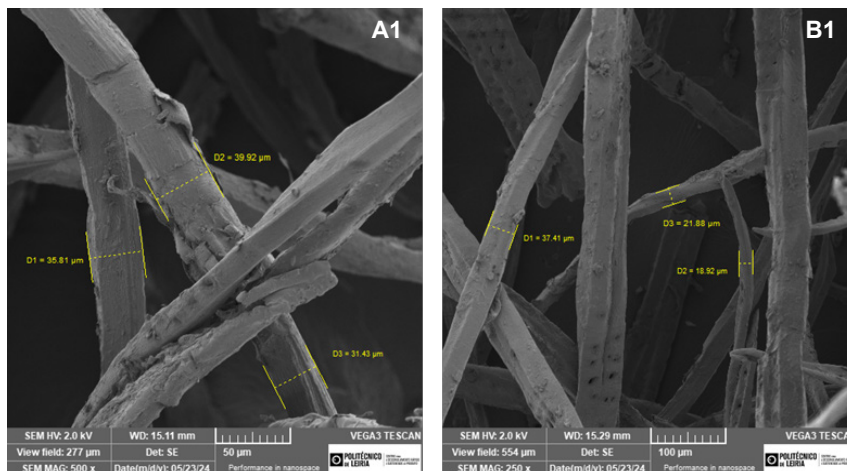


Figura 17- Imagens obtidas no equipamento SEM: fibras de madeira de pinho; A1: 50x :B1:20x

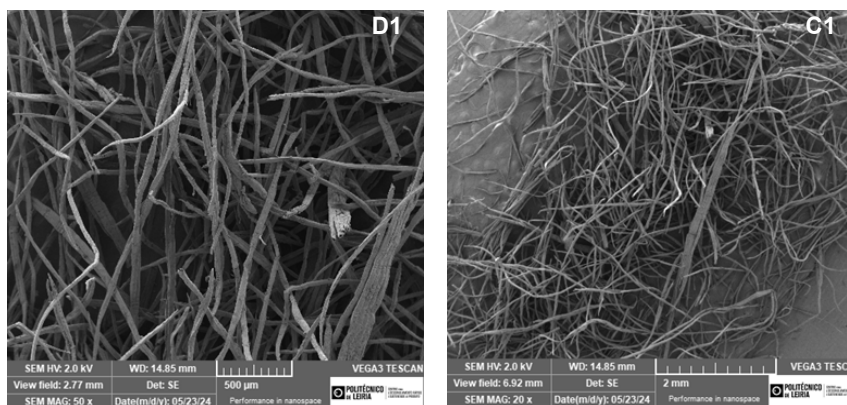


Figura 18 - Imagens obtidas no equipamento SEM e respetivas medições: fibras de madeira de pinho; C1: 500x :D1:250x

3.4.2 Serradura de madeira de pinho

A serradura de madeira utilizada neste trabalho pertence à mesma espécie e família mencionada na fibra de madeira. Estas resultam do processamento da madeira na empresa Materlis-Madeiras,S.A na região da Beira Litoral de Portugal, nomeadamente no município de Leiria. Na figura 19 está presente uma amostra do material utilizado.

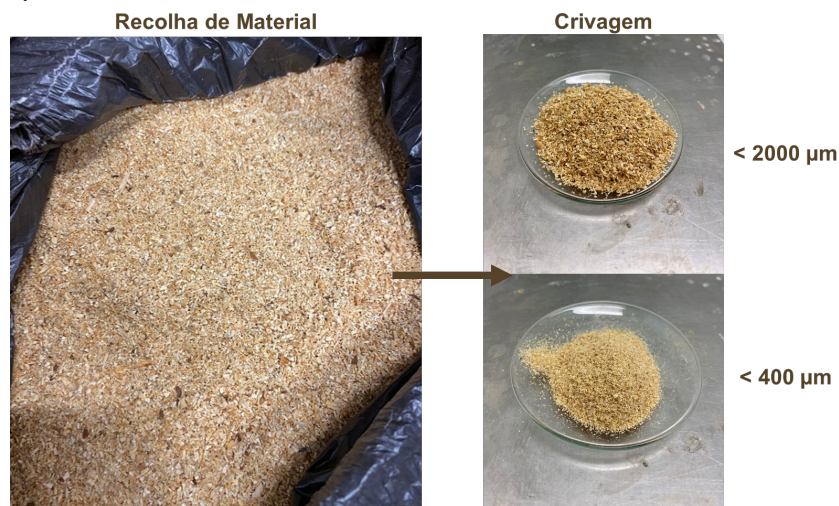


Figura 19 - Amostra de serradura de pinho provenientes da empresa Materlis - Madeiras,S.A

Esta amostra possui composição química idêntica à descrita na tabela 8 e requer como pré-tratamento o processo de secagem e crivagem. A secagem decorreu durante 24h numa estufa a 50°C e na crivagem utilizaram-se os peneiros de 2000 e 400 µm.

3.4.2 Carbonato de Cálcio

Neste estudo utilizou-se o carbonato de cálcio proveniente do grupo Parapedra como filler nas formulações mencionadas. Na fase de ensaios utilizou-se este material dada a variabilidade existente na composição do resíduo de pó de pedra.

A mistura do carbonato de cálcio com o silicato de sódio produz uma reação que origina solidificação do material. O carbonato de cálcio em soluções aquosas de silicato de sódio desempenha uma dupla função, como enchimento e contribui para a fase reativa em sistemas ativados alcalinamente, levando à formação de C-S-H (Firdous *et al.*, 2021).

Este filler mineral, quando adicionado a matrizes pode influenciar a viscosidade e a fluidez do material. Estudos indicam que a presença de partículas de carbonato de cálcio pode aumentar a viscosidade da mistura, o que, por sua vez, pode dificultar o espalhamento do material (Benini *et al.*, 2019; Webb *et al.*, 2024)

O carbonato de cálcio foi previamente seco em estufa durante 24h a 50°C antes de ser utilizado e foi depois peneirado com um crivo de 500 microns. Na figura 20 encontra-se uma amostra do carbonato de cálcio depois da crivagem.

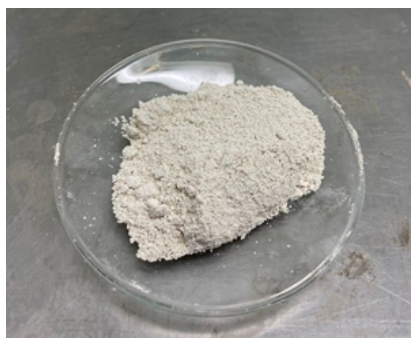


Figura 20 - Amostra de carbonato de cálcio provenientes do grupo Parapedra

3.5 Formulação das pastas para impressão

Neste estudo, foram desenvolvidas diversas formulações distintas de pastas utilizando os materiais mencionados anteriormente, em as que partículas de madeira e o carbonato de cálcio servem de agregado e o silicato de sódio (SS) como aglutinante. Utilizaram-se fibras e serradura de madeira de pinho (no caso da serradura, granulometria inferiores a 2000 µm e 400 µm).

A preparação de cada formulação foi manual, assegurando que o aglomerante envolvia os agregados de forma uniforme. Paralelamente à otimização das formulações foram realizados os ensaios de extrudabilidade. Logo após a mistura, o compósito foi colocado no interior de um depósito que abastece o equipamento Delta Wasp 2040 Clay (Figura 21) de forma a realizar os mesmos.

De modo a otimizar a formulação e impressão das placas foram realizadas 5 baterias de ensaios sequenciais subdividas por grupos e objetivos: **Ensaio Preliminares, Ensaio de Aglome-**

rante, **Ensaio de Partículas de madeira, Ensaio de Carbonato de Cálcio e Ensaio de Parâmetros de impressão**. Estes últimos foram transversais a todos os ensaios de formulação de pasta pois foi necessário adaptar os parâmetros de impressão ao material utilizado. Na figura 22 encontra-se um fluxograma que demonstra a sequência dos ensaios.



Figura 21- Equipamento Delta Wasp
(Wasp S.r.l, n.d.)

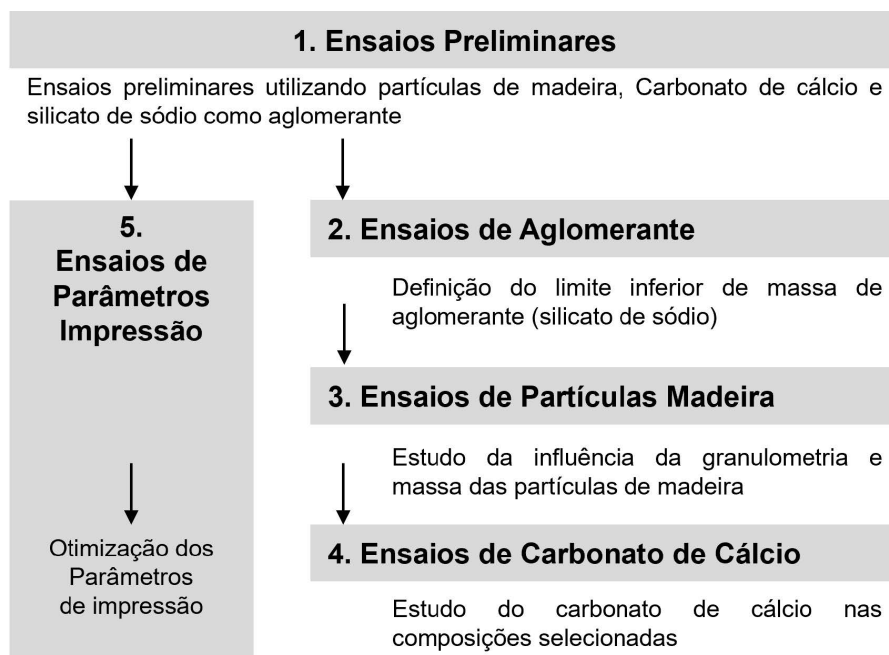


Figura 22 - Fluxograma baterias de ensaios

Nos **ensaio preliminar (1)**, procedeu-se a uma análise da extrudabilidade das pastas através de um bico de pasteleiro. Teve como objetivo fazer uma avaliação visual da extrudabilidade e avaliar a possibilidade de prosseguir com ensaios adicionais tendo em vista a extrusão no equipamento delta wasp.

Depois selecionou-se a pasta com melhor performance para ser testada no equipamento mencionado. Nos **ensaio de aglomerantes (2)** pretendeu-se definir o limite mínimo de silicato de

sódio a utilizar, pois as pastas do grupo inicial apresentavam excesso de aglomerante.

Com o limite inferior definido, nos **ensaios de partículas de madeira (3)** realizou-se um conjunto 14 ensaios com as 3 granulometrias selecionadas (fibra triturada, serradura < 2000 µm, serradura < 400 µm) de modo a compreender a influência da granulometria e o limite superior de massa de partículas de madeira. Na tabela 9 é possível observar os objetivos de cada bateria de ensaios tal como as formulações efetuadas.

Tabela 9 - Baterias de ensaios sequenciais realizados e respetivos objetivos acompanhados com a evolução das formulações

Formulação	Silicato de Sódio(g)	Fibra de Madeira (g)	Serradura de Madeira (g)		Carbonato de Cálcio(g)
			<2000 µm	<400 µm	
1.ENSAIOS PRELIMINARES					
Ensaio preliminar com base em partículas de madeira, Carbonato de cálcio e silicato de sódio como aglomerante					
1	225 ↘	10			20
2	200 ↘	10			20
3	175 ↘	10			20
2.ENSAIOS DE AGLOMERANTE					
Definição do limite inferior de massa de aglomerante (silicato de sódio)					
4	200 ↘	10			20
5	175 ↘	10			20
6	125 ↘	10			20
3.ENSAIOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA					
Estudo da influência da granulometria e massa das partículas de madeira					
7	125		10 ↗		20
8	125			10 ↗	20
9	125	15 ↗			20
10	125		15 ↗		20
11	125			15 ↗	20
12	125	20 ↗			20
13	125		20 ↗		20
14	125			20 ↗	20
15	125	25 ↗			20
16	125		25 ↗		20
17	125			25 ↗	20
18	125	30			20
19	125		30		20
20	125			30	20
4.ENSAIOS DE CARBONATO DE CÁLCIO					
Estudo da influência do carbonato de cálcio nas composições selecionadas					
21	125	10			25 ↗
22	125		20		25 ↗
23	125			25	25 ↗
24	125	10			30
25	125		20		30
26	125			25	30

Na bateria de ensaios relativa às partículas de madeira, a quantidade de silicato de sódio era constante (125g – o limite inferior), o carbonato cálcio também era constante (20 g) e fez-se variar a granulometria e a massa das partículas de madeira entre 10,15,20,25 e 30 g, tal como se pode observar na tabela 9. A tabela 10 apresenta a pastas com o melhor desempenho.

Tabela 10 - Melhores formulações de cada granulometria, nos ensaios de estudo da influência da granulometria e massa das partículas de madeira

Variáveis Fixas		Madeira	
Silicato de Sódio	Carbonato de Cálcio	Granulometria	Massa
g	g	Descrição (μm)	g
125	20	Fibra triturada	10 ↗
125	20	Serradura < 2000	20 ↗
125	20	Serradura < 400	25 ↗

Nos ensaios de carbonato de cálcio (4), com base nas melhores formulações de cada granulometria estudou-se a influência do carbonato de cálcio nestas. Não foram testadas pastas com valores inferiores a 20 g pois o objetivo era maximizar a utilização de resíduos, desde que não interfira com as outras propriedades dos materiais.

Como mencionado anteriormente o carbonato de cálcio é um resíduo que foi selecionado para desempenhar o papel de filler, melhorando a performance e consistência da pasta. Com valores inferiores a 20 g a pasta apresenta elevada fluidez e acumulações de silicato no momento da impressão. Nesse sentido pretende-se maximizar a utilização do resíduo até obter uma boa construtibilidade com o material

No decorrer deste grupo de ensaios foram descartas as formulações com serradura porque o silicato de sódio se acumulava no fundo do depósito, criando uma pasta mais fluida inicialmente, não permitindo uma impressão uniforme.

O estudo dos parâmetros de impressão (5) decorreu ao longo dos ensaios de otimização da pasta. Na tabela 11, encontra-se enumerado de 1-5, a formulação 1, enquanto nos ensaios de 6-10 utilizou-se a formulação 2. Estas composições apresentam-se de seguida:

1. Formulação 1 - 200 g Silicato de Sódio, 10 g Fibra de Madeira e 20 g de Carbonato de cálcio, sendo esta a que teve melhor desempenho nos ensaios preliminares
2. Formulação 2 - 125 g Silicato de Sódio, 10 g Fibra de Madeira e 20 g de Carbonato de cálcio que resulta da definição do limite inferior de massa de silicato de sódio nos ensaios de Aglomerante.

Em ambas fez-se variar a altura de camada, a velocidade, o extrusion width (largura da camada) e o extrusion multiplier (parâmetro que altera proporcionalmente a quantidade de fluxo).

Tabela 11 - Formulações contantes ao longo do estudo dos parâmetros de impressão.

Ensaio	SS	FM	CC	h camada	velocidade	Extrusion Width	Extrusion Multiplier	bico
	(g)	(g)	(g)	(mm)	(mm/s)	(mm)		(mm)
1	200 ↘	10	20	4 ↘	100 ↘	8,5 ↘	1 ↗	8 ↘
2	200 ↘	10	20	3 ↘	100 ↘	6,5	1 ↗	6 ↘
3	200 ↘	10	20	3 ↘	15 ↘	6,5	2 ↗	6
4	200 ↘	10	20	3 ↘	15	6,5	2,5 ↘	6
5	200 ↘	10	20	3 ↘	15	6,5	2,3 ↘	6
6	125 ↘	10	20	3 ↘	15	6,5 ↗	2,2 ↘	6
7	125	10	20	2,5 ↘	15	8,5 ↗	2,2	6
8	125	10	20	2,5 ↘	15	10,5 ↗	2,2	6
9	125	10	20	2 ↘	15	8,5	2,2	6
10	125	10	20	2	15	10,5	2,2	6

FM- Fibras de madeira SS- Silicato de Sódio D40 CC-carbonato de cálcio

Entre os ensaios 1-5 efetuou-se a alteração do bico de 8 mm para 6 mm e conseqüentemente a altura e largura de camada dado que as quantidades de pasta ensaiadas eram insuficientes para fornecer continuamente o bico de 8 mm. Fez-se variar a velocidade da cabeça de impressão na própria interface da impressora. Por último testaram-se vários valores de extrusion multiplier (multiplicador da velocidade de rotação do fuso) para que a deposição do material fosse mais contante.

A partir do ensaio 7 foi possível obter uma impressão mais regular e aumentar o nº de camadas. Com o intuito de evitar deformações, reduziu-se a altura de camada e aumentou-se a largura da camada. Testaram-se valores de altura de camada de 2 mm e 2,5 mm e larguras de camada de 8,5 mm e 10,0mm.

No capítulo Resultados e Discussão encontra-se um fluxograma onde se analisa a evolução sequencial e respetiva adaptação dos parâmetros de impressão no G-Code.

3.6 Ensaios das pastas

3.6.1 Ensaios de Extrudabilidade

Ensaios de extrudabilidade são procedimentos concebidos para avaliar a aptidão de um material para ser processado por extrusão, tendo em consideração aspetos como fluidez e qualidade do filamento extrudido.

Neste trabalho, para determinar a extrudabilidade das diferentes composições, estas foram submetidas a ensaios utilizando o equipamento Delta Wasp 2040.

Este dispositivo está equipado com uma extrusora do tipo LDM WASP XL, composta por elementos essenciais, incluindo um servomotor, um fuso, um canal de alimentação e um bico de extrusão (Figura 23). A introdução do material ocorre por meio de um depósito cilíndrico que armazena a matéria-prima.

Neste o material é empurrado por um êmbolo, impulsionado por ar comprimido. Ao ser empur-

rado, o material percorre o canal que abastece a extrusora, seguindo em direção ao fuso. Este último é acionado pelo servomotor, obedecendo às instruções do sistema operacional, girando de maneira precisa e doseando a quantidade adequada de material a ser impressa.

Quando todos os parâmetros, como pressão do ar, velocidade de impressão e deposição do material, estiverem em harmonia, o material é extrudado por meio de um bico, resultando num filamento contínuo (Gouveia, L. ,2023).

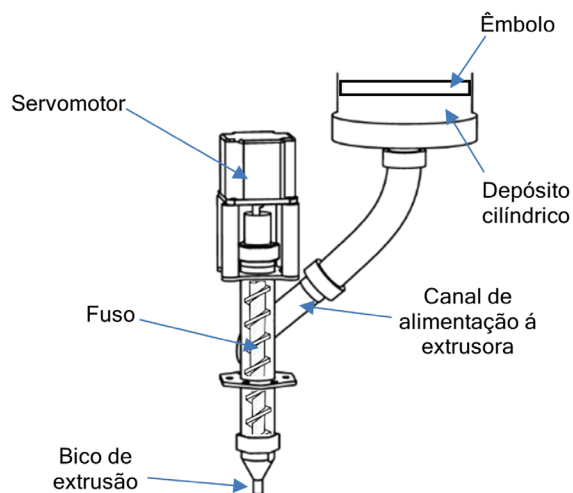


Figura 23 - Desenhos esquemáticos da extrusora LDM WASP XL (Gouveia, L. ,2023)

Para os ensaios foram utilizadas as proporções mencionadas na tabela 9, um bico de extrusão de 6 mm e uma pressão variável entre 3 – 7,5 Bar. Na figura 24 apresenta-se todo o sistema utilizado para estes ensaios.



Figura 24 - Equipamentos utilizados nos ensaios de extrudabilidade

Em seguida, estão descritos os passos a adotar desde a montagem do equipamento até à impressão:

1. Preparação de uma placa para impressão
2. Montagem do servomotor junto com o fuso e a extrusora LDM WASP XL
3. Montagem deste equipamento no equipamento Delta Wasp 2040
4. Colocação do Bico de 6mm
5. Conectar eletricamente a impressora e extrusora
6. Conexão da impressora com o computador via WiFi
7. Colocar lubrificante no êmbolo e nos O-rings
8. Colocar o êmbolo no interior do depósito, libertando espaço para a quantidade de material necessária
9. Preparação do material a imprimir
10. Colocação do material dentro do depósito
11. Fechar o depósito juntamente com o braço hidráulico
12. Colocar todo este equipamento no equipamento delta wasp 2040
13. Conectar o fundo do depósito ao canal de alimentação da extrusora.
14. Posicionar os eixos da impressora a 0 mm (origem)
15. Ligar o ar comprimido e aumentar de acordo com o indicado previamente
16. Purgar (extrudir até obter um filamento contínuo)
17. Iniciar impressão com o código g desenvolvido previamente
18. Ajustar o ar de acordo com a impressão

Na fase de teste das formulações desenvolvidas, foi necessário criar um modelo tridimensional em formato STL por meio de um software CAD. Inicialmente, o modelo CAD utilizado consistiu num cilindro de 100 mm de diâmetro. Através de um software de fatiamento, como o Slic3r, é possível gerar um G-code, isto é, a linguagem de programação usada para fornecer instruções ao equipamento.

Ao utilizar o G-code, a impressão foi iniciada, e os parâmetros de impressão foram ajustados de acordo com as propriedades do material em questão, tal como mencionado anteriormente.

Os parâmetros utilizados nesse processo são primeiramente relativos ao material (**parâmetros filamento**) em que se define o diâmetro do filamento e o extrusion multiplier. Este pode ser necessário configurar para obter um bom acabamento superficial ou para corrigir a largura da parede. Nos **parâmetros relativos à impressão** define-se as camadas e perímetros, velocidades, entre outros parâmetros. Na altura de camada optou-se por uma camada de 2,5 mm e utilizar o adaptive slicing, isto é, uma ferramenta que define automaticamente as alturas de camada de acordo com a topologia do objeto, em vez de assumir um valor estático. Na subdivisão vertical and horizontal Shells utilizou-se apenas um perímetro, ou seja, a peça é constituída por uma parede única e sem preenchimento, daí o valor 0 no horizontal shells. É também definido que a

posição inicial de cada camada deve alterar apenas em Z, formando uma costura alinhada.

Em termos de velocidades, optou-se por diminuir a velocidade de impressão para 15 mm/s e manter a velocidade dos restantes movimentos em 100 mm/s.

Em relação à extrusion width, este definiu-se como 8,5 mm de acordo com os estudos efetuados na tabela 9.

Nos **parâmetros da impressora** considera-se o diâmetro do nozzle (6 mm), os limites de altura de camada possíveis para o adaptive slicing, e o início e fim do G-Code.

Na tabela 12 encontra-se resumido os parâmetros associados ao filamento, à impressão e à impressora.

Tabela 12 - Definição de parâmetros associados ao filamento, à impressão e à impressora definidos no software slic3r

Parâmetros	Valor	Unidades
Filamento		
<i>Filament:</i>		
<i>Diameter</i>	6	mm
<i>Extrusion Multiplier</i>	2,2	
Impressão		
<i>Layers and perimeters</i>		
<i>Layer Height:</i>		
<i>Layer Height</i>	2,5	mm
<i>Use adaptive slicing</i>	✓	
<i>Vertical Shells:</i>		
<i>Perimeters</i>	1	(minimo)
<i>Spiral Vase</i>	X	
<i>Horizontal Shells:</i>		
<i>Solid Layers</i>	0	
<i>Advanced:</i>		
<i>Seam position</i>	aligned	
<i>Speed</i>		
<i>Speed for printing moves:</i>		
<i>perimeters</i>	15	mm/s
<i>Speed for non -printing moves:</i>		
<i>travel</i>	100	mm/s
<i>Modifiers:</i>		
<i>First Layer speed</i>	15	mm/s
<i>Advanced:</i>		
<i>Extrusion Width</i>	8,5	mm
<i>First Layer</i>	8,5	mm
<i>Perimeters</i>	8,5	mm
Impressora		
<i>Extruder 1</i>		
<i>Size:</i>		
<i>Nozzle Diameter</i>	6	mm
<i>Limits:</i>		
<i>Min</i>	0,1	mm
<i>Max</i>	2,5	mm
<i>Custom G-Code</i>		
<i>Start G- Code:</i>		

G28 ; home all axes

G1 Z5 F5000 ; lift nozzle

End G- Code:

M104 S0 ; turn off temperature

G28 X0 ; home X axis

3.6.2 Ensaios de Espalhamento

Os ensaios de espalhamento foram realizados para avaliar a consistência das melhores e piores formulações de cada ensaio de extrudabilidade. Esses resultados devem ser confrontados com os obtidos na extrusão, pois a viscosidade e a dispersão do material afetam diretamente a deposição das camadas.

À semelhança da Norma EN 1015 -3 (CEN, 1999) utilizada para determinar a consistência de argamassas frescas através de uma mesa de espalhamento, este teste decorreu com auxílio de um cone truncado metálico, de uma placa de espalhamento e de um paquímetro de 500 mm, tal como ilustrado na figura 25. As melhores e as piores formulações de cada bateria de ensaios foram identificadas e replicadas se forma a executar estes testes.

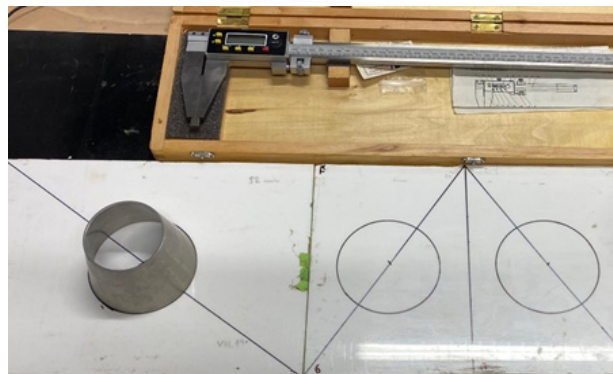


Figura 25 - Cone truncado metálico, placa de espalhamento e paquímetro

Cada formulação foi inserida no cone previamente lubrificado e depois posicionada no centro da placa. Na figura 26 é possível observar o resultado do desmoldar do cone, formando um pastel.



Figura 26 - Geometria em Pastel formado ao desmoldar

O cone deve ser sempre preenchido na totalidade e retirado lentamente de modo a não deformar o pastel. Foi avaliado o espalhamento de cada formulação ao longo de 15 minutos no total, em que a cada 5 minutos foram medidos os diâmetros de espalhamento da pasta em duas direções perpendiculares.

3.6.3 Ensaio Resistência à Flexão

À semelhança dos ensaios de resistência à flexão efetuados nas placas, utilizou-se o mesmo equipamento e metodologia, tendo por base a norma ASTM D790 (ASTM, 2016) que estabelece os procedimentos para determinar as propriedades de flexão de plásticos não reforçados e reforçados e materiais isolantes elétricos. Foram utilizados 6 provetes (160 x 40 x 20 mm) impressos pelo equipamento delta wasp 2040 (Figura 27).



Figura 27 - Provetes para ensaios à flexão dos materiais compostos para fabricação aditiva

Na metodologia mencionada previamente, o provete foi posicionado sobre dois apoios cilíndricos de 10 mm de diâmetro cada, e um cilindro de 10 mm de diâmetro foi colocado no centro da parte superior do provete, servindo como ponto de aplicação direta da carga, conforme representado na figura 28. A carga foi aplicada a uma taxa constante de 5 mm/min.



Figura 28 - Ensaio de Resistência à Flexão dos provetes de impressão

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão expostos os resultados obtidos, acompanhados de uma discussão abrangente sobre os mesmos, no que diz respeito às placas de isolamento térmico e às pastas destinadas ao fabrico aditivo.

4.1 Ensaio relativos às placas para isolamento térmico

Primeiramente, são avaliadas as placas selecionadas para realizar os ensaios de condutibilidade térmica e resistência à flexão. De seguida, apresentam-se os dados recolhidos, acompanhados de uma breve discussão sobre os mesmos.

4.1.1 Análise dimensional prévia

De modo a assegurar a fiabilidade e precisão dos ensaios seguintes, foi realizada uma avaliação preliminar das placas, tendo em consideração a geometria, as dimensões e a integridade. De acordo com os parâmetros mencionados, nem todas as placas produzidas reuniam as condições necessárias para realizar os ensaios e por isso foram descartadas. Na figura 29 é possível observar um exemplar (Placa F6) rejeitado devido à sua falta de integridade.



Figura 29 - Placa sem integridade

É essencial também verificar a planeza das placas, uma vez que irregularidades podem influenciar os ensaios de condutibilidade térmica. A falta de material dentro do molde pode originar irregularidade dado que o material não está em contacto com a tampa do molde.

Não foram testadas misturas com menos de 400 g de madeira de choupo dado que esta foi a quantidade mínima necessária para preencher o molde, com altura de 30 mm. Por outro lado, quantidades superiores a 500 g de madeira impossibilitaram o aperto manual do molde.

Misturas com 400 g de madeira de choupo, com a adição de 350 g de silicato de sódio, não apresentaram integridade estrutural suficiente e, portanto, não foram consideradas para análise. Assim, foi estabelecido um limite inferior de 350 g de silicato de sódio para cada 400 g de madeira de choupo, ou seja, formulações com um rácio madeira/aglomerante superiores a 1,14 perdem a sua integridade estrutural. Por outro lado, o limite superior de aglomerante não foi estabelecido, pois o objetivo era utilizar a menor quantidade possível, tendo em conta as propriedades térmicas do material. O mesmo critério foi aplicado às misturas com 500 g de madeira de choupo, com um limite inferior definido de 450 g de silicato de sódio, ou seja, foram excluídas formulações com rácio madeira/aglomerante superiores a 1,11.

4.1.2 Ensaios de Condutibilidade Térmica

Após a análise preliminar, as placas selecionadas foram submetidas ao ensaio de condutibilidade térmica. Os resultados destes ensaios serviram de comparação entre as diversas composições de placas e os valores de condutibilidade térmica dos produtos já existentes no mercado.

A tabela 13 exibe os resultados das composições submetidas aos ensaios.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de condutibilidade térmica

Placa	Material		Rácio MC/SS	Massa volúmica (g/cm ³)	Condutibilidade térmica (W/m. K)
	MC (g)	SS(g)			
F10	400	350 ↓	1,14 ↑	0,227 ↓	6,01 x 10 ⁻²
F4	400	400	1,00	0,245	6,28 x 10 ⁻²
F11	400	450	0,88	0,272	6,55 x 10 ⁻²
F8	400	500 ↓	0,80 ↑	0,254 ↓	7,06 x 10 ⁻²
F9	500	450 ↓	1,11 ↑	0,268 ↓	6,82 x 10 ⁻²
F2	500	500	1,00	0,268	6,79 x 10 ⁻²
F12	500	550	0,91	0,287	6,40 x 10 ⁻²
F7	500	600 ↓	0,83 ↑	0,293 ↓	7,26 x 10 ⁻²

MC- Madeira de Choupo; SS -Silicato de Sódio D40

Para facilitar a compreensão dos dados, o gráfico da figura 30 combina as informações sobre a condutibilidade térmica (400 MC - λ ;500 MC - λ) das diferentes composições, para além de incluir também a massa volúmica (400 MC - ρ ;500 MC - ρ) correspondente a cada uma dessas composições e o valor de referência para a condutibilidade térmica, assinalado a vermelho.

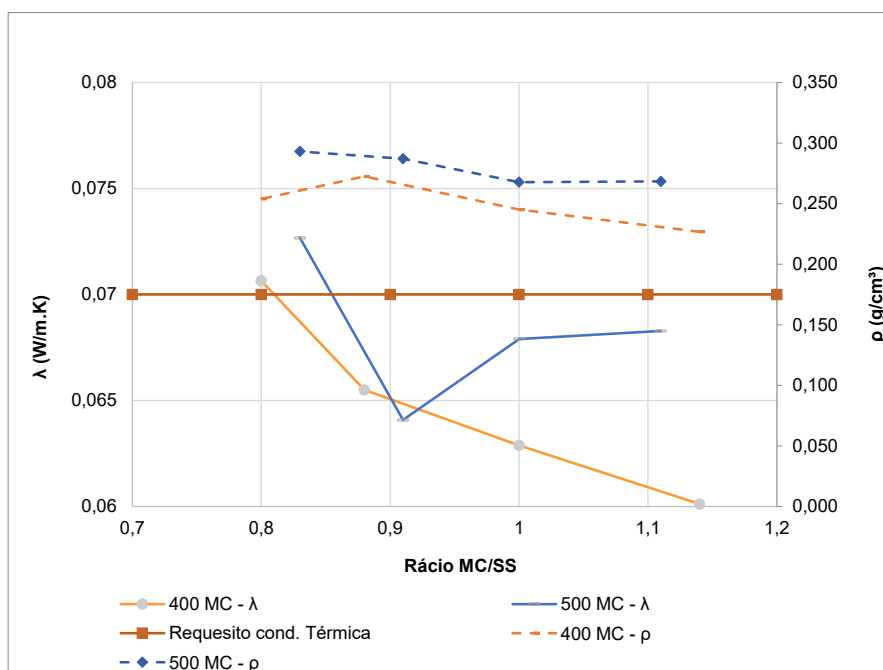


Figura 30 - Gráfico de relação entre condutibilidade térmica e massa volúmica

A partir do gráfico da figura 30 é possível observar que todas as formulações cumprem com a referência de condutibilidade térmica inferior a 0,070 W/m.K, com exceção da formulação 400 MC/ 500 SS (Rácio= 0,8) e a formulação 500 MC /600 SS (Rácio = 0,83). Destaca-se a formu-

lação 500 MC/ 550 SS (Rácio = 0,91) com uma condutibilidade térmica de $6,40 \times 10^{-2}$ W/m. K e formulação 400/350 (Rácio = 1,14) com uma condutibilidade térmica de $6,01 \times 10^{-2}$ W/m.K.

Nas placas de 400g de madeira pode-se concluir que à medida que o rácio MC/SS aumenta, o valor da condutibilidade diminui, ou seja, com o aumento do silicato de sódio (aglomerante) o valor da condutibilidade térmica aumenta.

A condutibilidade térmica também tende a ser maior nas composições com 100 g adicionais de madeira de choupo, com exceção da placa F12 (500 g MC + 550 g SS). Este valor pode ser derivado da criação de espaços intersticiais que podem contribuir para uma condutibilidade térmica mais baixa.

Quanto à massa volúmica é possível observar que as placas com 400g de madeira apresentam uma massa volúmica menor quando comparadas com as placas de 500 g de madeira. Em ambos os casos a massa volúmica tem tendência para diminuir com o aumento do rácio MC/SS, com exceção da formulação 400/450.

Para as placas constituídas por 400 g de Madeira, estas análises evidenciam uma relação entre a massa volúmica e a condutibilidade térmica das composições, dado que quanto maior é o rácio MC/SS, menor a massa volúmica da placa e menor a sua condutibilidade térmica. O mesmo não acontece nas placas com 100g adicionais de madeira dado à provável presença de espaços intersticiais.

4.1.3 Ensaios de Resistência à flexão

Após a análise preliminar, as placas definidas como rígidas foram submetidas ao ensaio de resistência à flexão. Os resultados destes ensaios foram utilizados para comparar várias composições de placas com os valores médios de resistência à flexão (σ_f) dos produtos atualmente disponíveis no mercado. Na seguinte tabela 14, apresentam-se os dados obtidos nos ensaios descritos.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão

Placa	Material		Rácio MC /SS	Fmax média (N)	σ_f média (MPa)
	MC (g)	SS(g)			
F8	400	500	0.8	3.0	$3,18 \times 10^{-2}$
F2	500	500	1.0	7.5	$6,60 \times 10^{-2}$
F12	500	550	0.91	5.8	$4,64 \times 10^{-2}$
F7	500	600	0.83	7.7	$5,92 \times 10^{-2}$

MC- Madeira de Choupo(apas); SS -Silicato de Sódio D40

Os ensaios demonstraram que a composição F2 (Rácio MC/SS = 1) alcançou a maior resistência mecânica, com um valor máximo de $6,60 \times 10^{-2}$ MPa. Por outro lado, a composição com o resultado mais baixo foi a F8 com um valor igual a $3,18 \times 10^{-2}$ MPa.

Analisando o gráfico da figura 31, pode-se observar a influência do teor de silicato de sódio na resistência mecânica das composições.

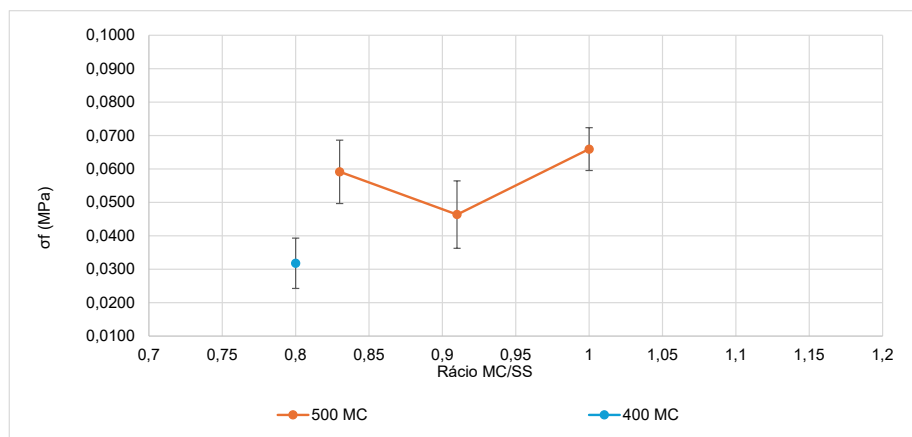


Figura 31 - Gráfico da influência do silicato de sódio na resistência à flexão.

Era expectável que com o aumento do rácio MC/SS o valor σ_f média diminuísse, dado a menor % de aglomerante, no entanto isso não se verifica na formulação com rácio MC/SS igual a 1.

As placas com 400g de madeira apresentaram menor resistência mecânica, possivelmente devido à distribuição e compactação das aparas. Uma quantidade de material inferior resulta numa menor compactação, o que interfere diretamente com as propriedades mecânicas avaliadas.

4.2 Pastas para fabrico aditivo

No contexto do fabrico aditivo são discutidos os resultados dos ensaios de extrudabilidade, espalhamento e resistência à flexão. Os ensaios de extrudabilidade foram divididos em cinco baterias de testes com diferentes objetivos. São apresentadas observações e discussões em relação aos ensaios de extrudabilidade, juntamente com os dados recolhidos nos ensaios de espalhamento, de modo a existir uma comparação entre os mesmos e fundamentação adicional. Por fim, são apresentados os resultados da resistência à flexão dos provetes produzidos.

4.2.1 Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares decorreram com o principal objetivo de verificar o grau de dificuldade em extrudir manualmente as formulações apresentadas. Estes foram realizados com auxílio de um bico de pasteleiro de forma a simular a deposição de 1 a 3 camadas. Na tabela 15 é possível verificar as formulações testadas bem como o grau de dificuldade de extrusão com um equipamento manual.

Tabela 15 - Ensaio preliminares utilizando partículas de madeira, silicato de sódio e carbonato de cálcio.

Formulação	Material			Rácio FM/ SS	Rácio CC/ SS	Observações
	FM (g)	SS(g)	CC(g)			
F1	10	225	\	0.044	0	Muito Fácil de extrudir manualmente, acumulação de silicato na base da camada;
F2	10	200	\	0.050	0	Fácil de extrudir manualmente
F3	10	175	\	0.057	0	Difícil de extrudir manualmente
F4	10	200	10 ↗	0.050	0.050	Sem alterações evidentes após adição do CC;
F5	10	200	20	0.050	0.100	Fácil de extrudir manualmente, acumulação de silicato na base da camada;
F6	10	200	30	0.050	0.150	Difícil de extrudir manualmente
F7	10	175	10 ↗	0.057	0.057	Difícil de extrudir manualmente
F8	10	175	20 ↗	0.057	0.114	Não extrudiu manualmente
F9	10	175	30	0.057	0.171	Não extrudiu manualmente

Na figura 32 encontra-se um exemplo da formulação F1 com um rácio FM /SS de 0.044 , em que é visível a acumulação de silicato de sódio na base das camadas.



Figura 32 - Deposição 1, 2 e 3 camadas da Formulação F1 (225g Silicato de Sódio +10g de Partículas de Madeira

Quando o rácio madeira / aglomerante aumenta de 0.044 para 0.057, observa-se uma diminuição na acumulação de silicato de sódio, no entanto existe também um aumento na dificuldade de extrusão manual. Esta mesma tendência é observada com o rácio carbonato de cálcio / aglomerante, onde o carbonato de cálcio atua como um material de enchimento. No entanto, quando presente em quantidades excessivas, pode dificultar ou até mesmo impedir o processo de extrusão.

4.2.2 Ensaios de Aglomerante

Nos ensaios de Aglomerante pretende-se reduzir a quantidade de silicato de sódio, enquanto for possível extrudir com sucesso. Na tabela 16 estão presentes as formulações testadas até se definir o limite inferior de silicato de sódio.

Tabela 16 - Definição do limite inferior de massa de silicato de sódio.

Formulação	Material			Rácio FM/SS	Observações
	FM (g)	SS(g)	CC(g)		
F10	10	200 ↘	20	0.050	Demasiado fluído; Segregação do silicato de sódio nas camadas iniciais
F11	10	175 ↘	20	0.057	Demasiado fluído; Segregação do silicato de sódio nas camadas iniciais
F12	10	150 ↘	20	0.066	Sem segregação
F13	10	125 ↘	20	0.08	Limite inferior do SS
FM- Fibras de madeira SS- Silicato de Sódio D40 CC-carbonato de cálcio					

As partículas de madeira absorvem rapidamente o aglomerante, não sendo possível extrudir com menos de 125g de aglomerante para 10g de fibra de madeira, ou seja, um rácio de FM/SS de 0,08.

Este valor define-se como o limite inferior de SS, ou seja, com valores superiores a 0,08 a pasta não extrude e com valores inferiores a pasta é demasiado fluída.

Neste ensaio foram descartas as formulações em que existiu segregação do silicato de sódio e as formulações de não extrudiram.

4.2.3 Ensaios de Partículas de Madeira

Seguidamente, mantendo constante o valor mínimo de aglomerante e o teor de carbonato de cálcio, fez-se variar a massa e a granulometria das partículas de madeira. Até ao momento, apenas as fibras haviam sido exploradas. No entanto, neste ensaio introduz-se a serradura de madeira de pinho com granulometria inferior a 2000 µm e 400 µm. A massa variou entre 10 e 30 gramas para as diferentes geometrias de partículas. Na tabela 17 para cada ensaio são apresentadas as observações e os limites superiores para cada partícula.

Tabela 17 - Influência da granulometria e massa das partículas de madeira

Silicato Sódio	Carbonato Cálcio	Granulometria	Massa Madeira	Rácio Madeira/ Aglomerante	Rácio CC/SS	Observações
g	g	µm	g			
125	20	Fibra triturada	10 [↗]	0.08	0.16	Pasta extrude; ligeiro alargamento das camadas iniciais; Limite Superior
125	20	Fibra Triturada	15 [↗]	0.12	0.16	Pasta não extrude devido à dificuldade em alimentar a mangueira;

125	20	Fibra triturada	20↗	0.16	0.16	Não foi testado pois o limite encontra-se nas 10g de fibra
125	20	Fibra Triturada	25↗	0.2	0.16	Não foi testado pois o limite encontra-se nas 10g de fibra
125	20	Fibra triturada	30↗	0.24	0.16	Não foi testado pois o limite encontra-se nas 10g de fibra
125	20	Serradura <2000	10↗	0.08	0.16	Pasta extrude; demasiado fluída; Fusão total entre camadas e espalhamento total;
125	20	Serradura <2000	15↗	0.12	0.16	Pasta extrude; Fusão entre camadas e espalhamento involuntário de todas as camadas; alargamento da primeira camada; Maior fusão entre camadas ao longo do tempo (especialmente após a impressão)
125	20	Serradura <2000	20↗	0.16	0.16	Pasta extrude; Fusão parcial entre camadas e espalhamento involuntário apenas da primeira camada; Limite Superior
125	20	Serradura <2000	25↗	0.2	0.16	Pasta não extrude devido à dificuldade em alimentar a mangueira; A pasta ficou acumulada no depósito;
125	20	Serradura <2000	30↗	0.24	0.16	Não foi testado pois o limite encontra-se nas 25g de serradura
125	20	Serradura <400	10↗	0.08	0.16	Pasta extrude; demasiado fluída; Fusão total entre camadas e espalhamento total;
125	20	Serradura <400	15↗	0.12	0.16	Pasta extrude; demasiado fluída; Fusão total entre camadas e espalhamento total;
125	20	Serradura <400	20↗	0.16	0.16	Pasta extrude; Fusão entre camadas e espalhamento involuntário de todas as camadas; alargamento da primeira camada
125	20	Serradura <400	25↗	0.2	0.16	Pasta extrude; Menor fusão entre camadas; Limite Superior
125	20	Serradura <400	30↗	0.24	0.16	Pasta não extrude devido à dificuldade em alimentar a mangueira;

Ao analisar a tabela e respectivas granulometrias, compreende-se que para a fibra triturada o rácio madeira/aglomerante têm um limite de 0,08, e caso seja superior não extrude. Já na serradura com dimensão inferior a 2000 μm esse limite encontra-se no valor 0,16 para o mesmo rácio madeira/ aglomerante. Valores inferiores demonstram fusão entre camadas e espalhamento de todas as camadas ou alargamento das camadas iniciais. Valores superiores não apresentam sucesso ao extrudir.

No caso da serradura inferior a 400 μm a situação é semelhante, no entanto dado a dimensão da partícula o rácio ideal é de 0,2. Nenhuma das impressões com serradura apresentou um comportamento e extrusão uniforme ao longo das camadas.

Neste contexto ao aplicar a proporcionalidade na preparação das formulações, o silicato acumula-se no fundo do depósito, criando uma pasta mais fluida inicialmente e acumulando a serradura seca no interior do depósito.

Na figura 33B pode-se observar um exemplo em que foi utilizado serradura e existe a fusão parcial entre camadas e consequentemente o alargamento da primeira camada enquanto na figura 33A está presente uma impressão com fibra sem qualquer deformação.

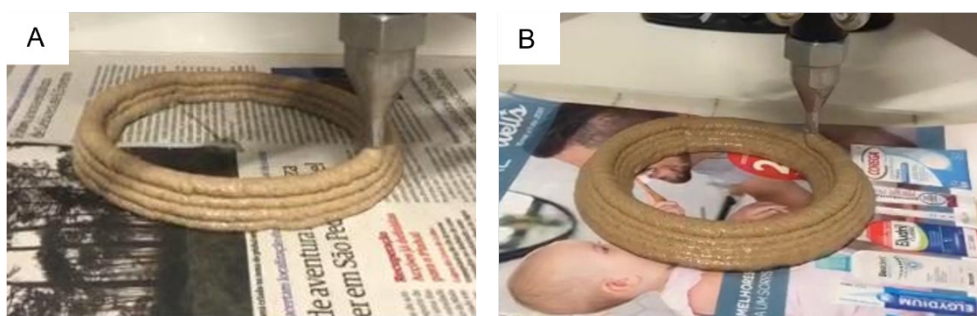


Figura 33 - Exemplo de formulação com fibra de madeira (A) e com serradura(B)

Neste ensaio foram descartas todas as formulações que não extrudiram ou que apresentaram uma fusão total entre as camadas. Nesse sentido destaca-se as formulações seguintes:

1. 125 g SS, 10 g FM, 20g CC
2. 125 g SS, 20 g SM < 2000 μm , 20 g CC
3. 125 g SS, 25 g SM < 400 μm , 20 g CC

Apesar das últimas duas formulações destacadas não apresentarem uma extrusão uniforme estas foram as que apresentaram menor fusão entre camadas. Nesse sentido foram utilizadas nos ensaios com carbonato de cálcio na expectativa de obter uma pasta funcional.

4.2.4 Ensaio de Carbonato de Cálcio

De forma a avaliar a influência do carbonato de cálcio nas formulações, foram utilizadas formulações destacadas. Com estes valores, manteve-se constante o valor de aglomerante e de madeira para cada granulometria. O carbonato de cálcio variou entre 25 e 30g, dado que com 20g já tinha sido testado. Valores superiores a 30g não foram testados pois existia segregação do carbonato de cálcio e falta de homogeneidade na pasta. Na tabela 18 está presente os ensaios realizados e respetivas informações.

Tabela 18 – Influência do carbonato de cálcio nas melhores composições de cada granulometria

Ensaio	SS (g)	Madeira(g)	Granulometria (mm)	CC(g)	Rácio CC/SS	Observações
F28	125	10	Fibra triturada	25	0.2	Sem modificações aparentes;
F29	125	20	Serradura <2000	25	0.2	Sem modificações aparentes;
F30	125	25	Serradura <400	25	0.2	Sem modificações aparentes;
F31	125	10	Fibra triturada	30	0.24	Aparência esbranquiçada
F32	125	20	Serradura <2000	30	0.24	Aparência esbranquiçada
F33	125	25	Serradura <400	30	0.24	Aparência esbranquiçada

SS- Silicato de Sódio D40 CC-carbonato de cálcio

Após os ensaios foram descartadas as formulações com serradura, pois existia a fusão total entre as camadas ou a alteração do estado do material ao longo do processo de impressão. Consequentemente, com base nos ensaios realizados não foi possível obter casos de estudo finalizados com a aplicação de serradura.

Nas restantes formulações dado que não foi possível registrar modificações aparentes, para além da cor esbranquiçada, a influência do carbonato de cálcio foi avaliada nos ensaios de espalhamento.

4.2.5 Ensaios de Parâmetros de Impressão

De acordo com os ensaios descritos na tabela 11, no capítulo materiais e métodos, foram registadas observações e respetivas operações no *g-code* para melhorar a extrudabilidade do material. Na figura 34 e figura 35 está presente um fluxograma que ilustra a evolução da adaptação dos parâmetros, em que *h* camada (altura de camada), *V* (velocidade), *E.W* (Extrusion Width) e *E.M* (Extrusion Multiplier).

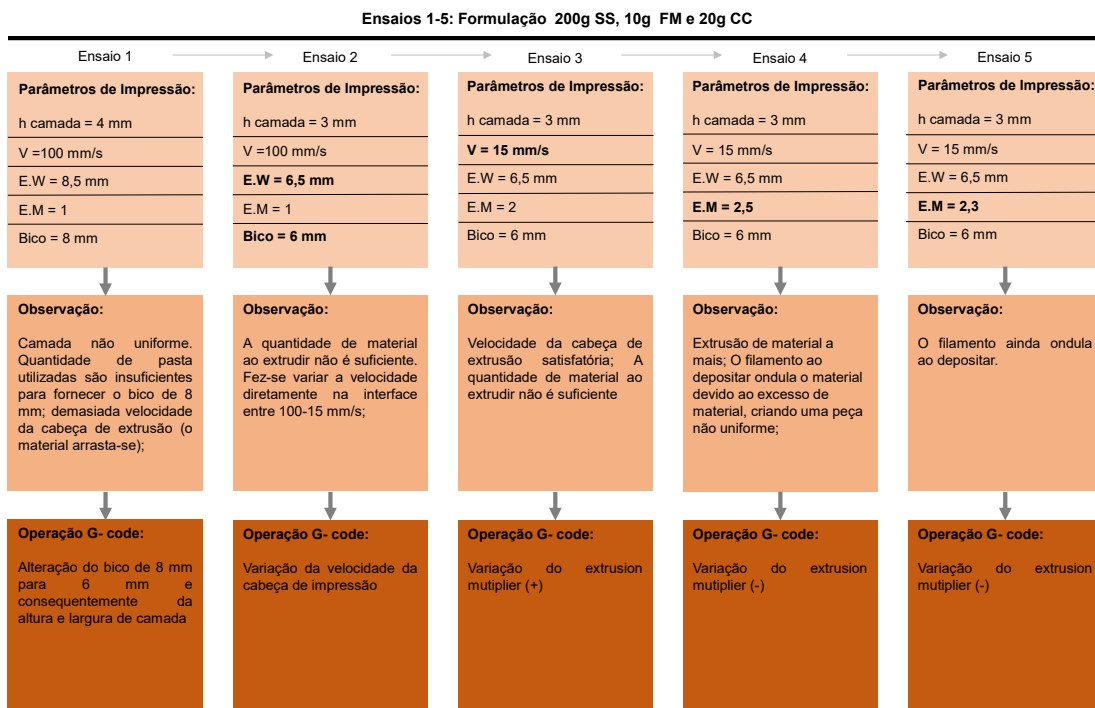


Figura 34 - Ensaios 1- 5: Observações e operações no G- Code derivadas do estudo dos parâmetros de impressão

Ensaio 6-10: Formulação 125g SS, 10g FM e 20g CC

Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10
Parâmetros de Impressão:	Parâmetros de Impressão:	Parâmetros de Impressão:	Parâmetros de Impressão:	Parâmetros de Impressão:
h camada = 3 mm	h camada = 2,5 mm	h camada = 2,5 mm	h camada = 2 mm	h camada = 2 mm
V = 15 mm/s	V = 15 mm/s	V = 15 mm/s	V = 15 mm/s	V = 15 mm/s
E.W = 6,5 mm	E.W = 8,5 mm	E.W = 10 mm	E.W = 8,5 mm	E.W = 10 mm
E.M = 2,2	E.M = 2,2	E.M = 2,2	E.M = 2,2	E.M = 2,2
Bico = 6 mm	Bico = 6 mm	Bico = 6 mm	Bico = 6 mm	Bico = 6 mm
Observação:	Observação:	Observação:	Observação:	Observação:
Peça mais uniforme, no entanto deforma em altura; experimentar alargar a camada e reduzir a altura da camada para 2,5 mm e 2 mm	Peça com maior potencial para crescer em altura; Experimentar com um valor de extrusion width superior.	Peça com camada demasiado larga e com criação de um ondulado pois a alteração da largura da camada induz maior deposição de material;	Peça com maior potencial para crescer em altura; Experimentar com um valor de extrusion width superior.	Peça com camada demasiado larga e com criação de um ondulado pois a alteração da largura da camada induz maior deposição de material;
Operação G-code:	Operação G-code:	Operação G-code:	Operação G-code:	Parâmetros de Impressão:
Redução da altura de camada e alargamento da mesma para evitar deformação	Alargamento da camada	Redução da altura de camada e alargamento da mesma para evitar deformação	Alargamento da camada	h camada = 2,5 mm
				V = 15 mm/s
				E.W = 8,5 mm
				E.M = 2,2
				Bico = 6 mm

Figura 35 - Ensaio 6- 10: Observações e operações no G- Code derivadas do estudo dos parâmetros de impressão

4.2.6 Avaliação dos provetes de impressão

Após a seriação das melhores pastas para impressão, foi avaliada a contrutibilidade (*buildability*) das mesmas através da análise da estabilidade dimensional dos cilindros obtidos. Foram tidas em consideração as larguras das primeiras e últimas camadas em 4 pontos da peça, assinalados a laranja na figura 36 e a altura total da peça. Estes dados foram comparados com uma altura total de 22,5 mm e largura de camada de 6,5 mm predefinidos no g-code.



Figura 36 - Provetes utilizados na avaliação da construtibilidade

As composições apresentadas variam apenas no rácio de CC/SS entre 0.16-0.24. A partir da figura 37 e figura 38 é possível analisar o erro percentual presente na impressão das camadas iniciais e finais, tal como na altura total da peça. O erro percentual foi calculado através da seguinte equação 2:

$$\text{Erro Percentual} = \left(\frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Experimental}}{\text{Valor Teórico}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Valor Teórico - valor definido no g-code

Valor Experimental - média dos valores medidos em 4 pontos da peça

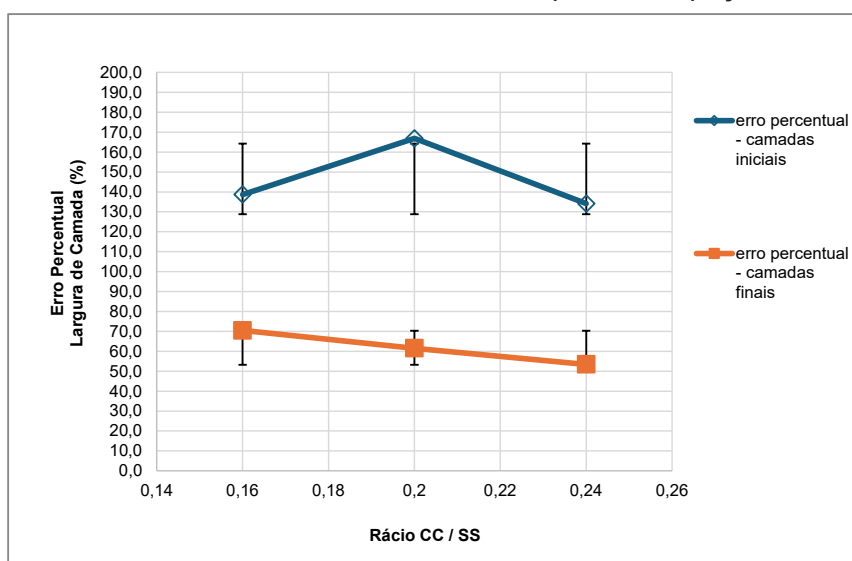


Figura 37 - Erro percentual associado à largura das camadas iniciais e finais

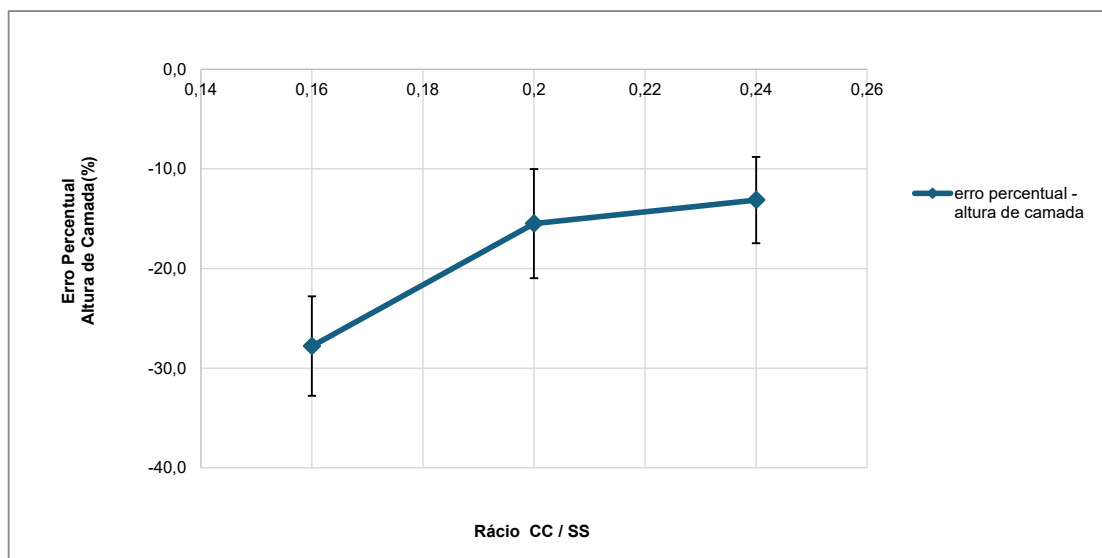


Figura 38- Erro percentual associado à altura de camada

Ao analisar a Figura 37, observa-se que o erro percentual diminui ao longo das camadas, indicando um maior espalhamento nas camadas iniciais devido à carga das camadas subsequentes. A formulação com um rácio CC/SS de 0,24 destaca-se por apresentar o menor erro percentual tanto nas camadas iniciais quanto nas finais, proporcionando melhor construtibilidade em comparação com as outras formulações.

Em relação à altura total dos provetes, destaca-se a formulação com o rácio CC/SS de 0,24 dado o seu erro percentual ser aproximadamente -13,1%. Dentro das formulações avaliadas, esta é a que menos sofre com o alargamento das camadas, pois a altura da camada observada está próxima do valor esperado, indicando que não houve um espalhamento significativo do material.

4.2.7 Ensaio de Espalhamento

Para realizar os ensaios de espalhamento selecionaram-se as melhores e piores composições de cada bateria mencionada anteriormente. As melhores composições estão presentes na tabela 19. Nestas formulações, estão presentes diferentes granulometrias para comparação (FM, SM < 2000 µm e SM < 400 µm). Embora as que contêm serradura tenham sido excluídas devido a uma extrusão irregular e inconstante, é importante entender o seu comportamento de espalhamento.

Tabela 19 - As melhores composições selecionadas para os ensaios de espalhamento

Melhores Composições de cada bateria					
Formulação	SS(g)	FM(g)	SM(g)		CC(g)
			< 2000 µm	< 400 µm	
6	125	10			20
13	125		20		20
17	125			25	20
21	125	10			25
24	125	10			30

FM- Fibras de madeira; Silicato de Sódio D40; **CC**-carbonato de cálcio
SM – Serradura de Madeira

As composições enumeradas na tabela 19 surgem dos seguintes ensaios:

1. Nos ensaios de aglomerante foi selecionada a formulação 6 que representa o limite inferior de SS.
2. Na bateria que avalia a influência da granulometria e da massa das partículas de madeira selecionou-se a formulação 13, com o limite superior para a serradura com granulometria inferior a 2000 µm tal como a formulação 17, que representa o limite superior para a serradura com granulometria inferior a 400 µm.
3. Nos ensaios que estudam a influência do carbonato de cálcio foram escolhidas as formulações 21 e 24 de forma a compreender a influência do carbonato de cálcio no espalhamento das pastas.

Na tabela 20 apresentam-se as piores formulações. Estas caracterizaram-se por ser mais fluídas e impróprias para a impressão, no entanto foi realizado o espalhamento de forma a fundamentar este comportamento.

Tabela 20 - As piores composições selecionadas para os ensaios de espalhamento

Piores Composições de cada bateria					
Formulação	SS(g)	FM(g)	SM(g)	SM(g)	CC(g)
			< 2000 µm	< 400 µm	
4	200	10			20
7	125		10		20
8	125			10	20

FM- Fibras de madeira; Silicato de Sódio D40; **CC**-carbonato de cálcio
SM – Serradura de Madeira

As composições enumeradas na tabela 20 surgem dos seguintes ensaios:

1. Nos ensaios de aglomerante, a formulação 4 é a composição com maior % de aglomerante, cerca de 200 g de silicato de sódio.
2. Na bateria que avalia a influência da granulometria e da massa das partículas de madeira, a formulação 7 e 8 representam o limite inferior testado para as diferentes granulometrias de serradura.

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento das formulações presentes na tabela 21 e na Figura 39.

Tabela 21 - Resultados ensaios de espalhamento (melhores composições)

Ensaio Espalhamento							
Medições ao longo do tempo (mm)							
Formulação	Média Geral 5 min		Média Geral 10 min		Média Geral 15 min		
	mm	%	mm	%	mm	%	
6	100,36	0,4	100,64	0,6	100,99	1,0	
13	106,96	7,0	108,93	8,9	109,72	9,7	
17	101,40	1,4	101,76	1,8	101,94	1,9	
21	102,47	2,5	102,95	2,9	104,09	4,1	
24	101,47	1,5	102,19	2,2	102,67	2,7	

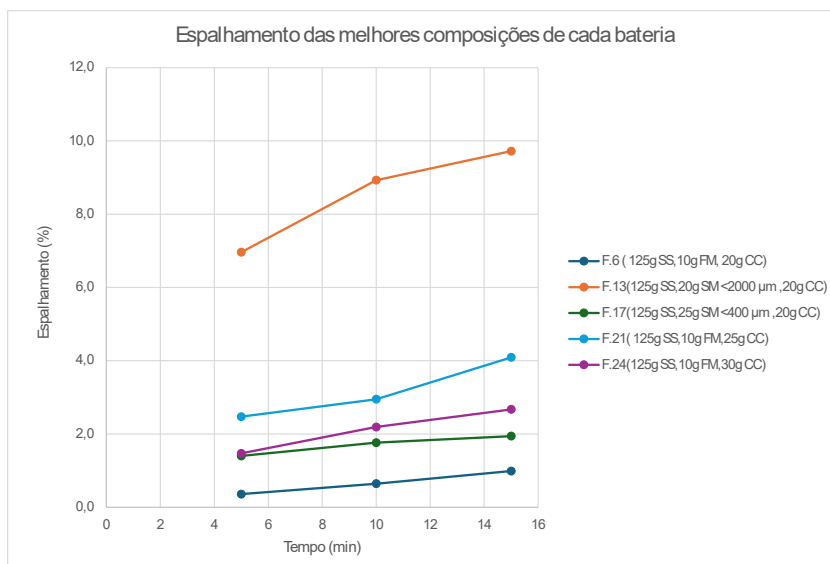


Figura 39 - Espalhamento das melhores composições de cada bateria

Avaliou-se a influência do carbonato de cálcio no espalhamento através das formulações 6, 21 e 24 que apresentam 20, 25 e 30g de CC, respetivamente. Estas não apresentaram modificações evidentes ao imprimir, no entanto seria expetável que com uma maior adição de carbonato de cálcio (filler) existisse um menor espalhamento de material .

Ao observar o gráfico da figura 39 compreende-se que esta hipótese não se verifica, pois, a formulação que apresenta menor espalhamento, entre os 0.4 a 1 %, é a F.6 com um rácio CC/SS de 0,16. As restantes formulações com rácio CC/SS de 0.20 e 0.24 apresentam um espalhamento entre 2,5 e 4,1% e 1.5 a 2.7%, respetivamente.

Em relação à formulação 13, esta apresenta um espalhamento significativos ao longo dos 15 min, entre 7,0 a 9,7 % e superior após o ensaio. Este resultado vai de acordo com as observações efetuadas na impressão pois existe fusão parcial entre camadas e espalhamento involuntário das primeiras camadas.

Em relação à formulação 17, o espalhamento não é significativo, cerca de 1,4 a 1,9%, correspondendo a uma menor fusão entre camadas observada na impressão. No entanto nenhuma das impressões com serradura apresentou uma extrusão uniforme ao longo das camadas.

A partir dos ensaios correspondentes às formulações da tabela 22 obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 22 - Resultados ensaios de espalhamento (piores composições)

Ensaio Espalhamento						
Medições ao longo do tempo (mm)						
Formulação	Média Geral 5 min		Média Geral 10 min		Média Geral 15 min	
	mm	%	mm	%	mm	%
6	100,36	0,4	100,64	0,6	100,99	1,0
13	106,96	7,0	108,93	8,9	109,72	9,7
17	101,40	1,4	101,76	1,8	101,94	1,9
21	102,47	2,5	102,95	2,9	104,09	4,1
24	101,47	1,5	102,19	2,2	102,67	2,7

Ao analisar a tabela 22 e a figura 40, observa-se que na formulação 4, a adição de 200 g de aglomerante resulta numa relação FM/SS de 0,050. Como consequência, existe uma acumulação significativa de aglomerante na base, tanto durante o processo de impressão quanto nos ensaios de espalhamento. Os dados indicam que o espalhamento varia entre 23,2% e 32,7%, o que demonstra um comportamento demasiado fluido durante a impressão.

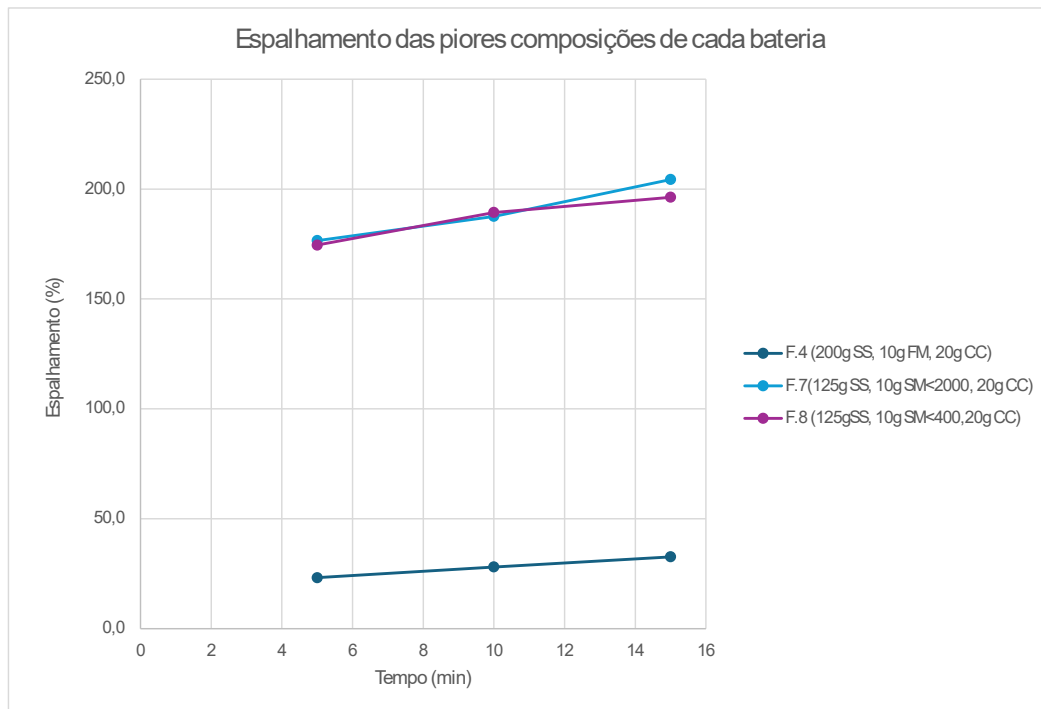


Figura 40 - Espalhamento das piores composições de cada bateria

Na formulação 7, verifica-se que a pasta extrude com elevada fluidez no momento da impressão, resultando na fusão total entre camadas e no espalhamento da composição ao longo da placa de impressão. O mesmo se verifica nos ensaios de espalhamento com uma percentagem que ronda os 176,6% a 204,3%.

A mesma tendência é observada na formulação 8, com um espalhamento que ronda os 174,5% e 196,3%, e uma fusão total entre camadas durante a impressão.

Na figura 41 é possível observar exemplos dos provetes obtidos e respetivo espalhamento.

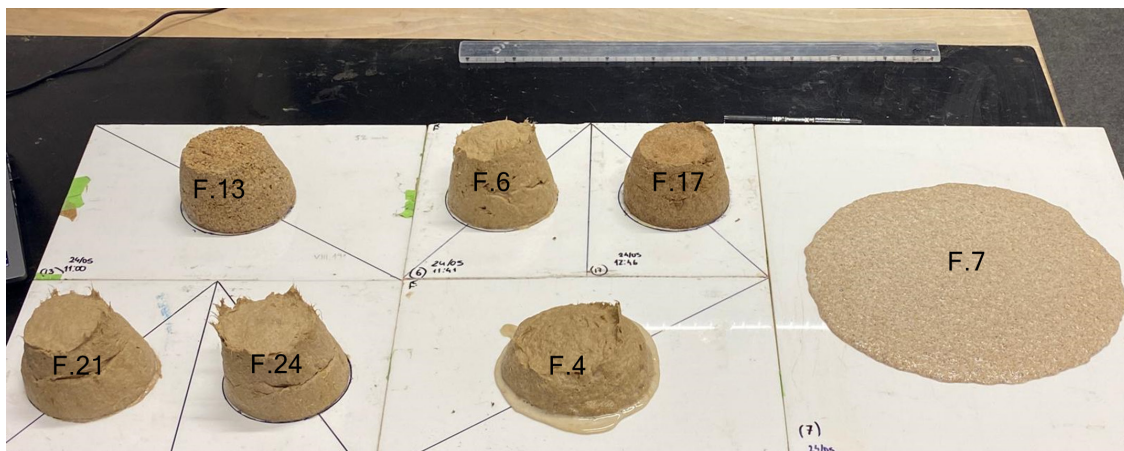


Figura 41 - Exemplo de provetes obtidos nos ensaios de espalhamento

4.2.8 Ensaios de resistência à flexão

Na seguinte tabela 23, apresentam-se os resultados médios de resistência à flexão obtidos através dos ensaios mecânicos nos provetes de cada composição.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão dos materiais para fabrico aditivo

Placa	Material			Rácio CC /SS	Fmax média	σ_f média
	SS(g)	FM(g)	CC(g)		(N)	(MPa)
6	125	10	20	0.16	30,3	1,79
21	125	10	25	0.20	47,7	3,01
24	125	10	30	0.24	43,6	2,26

FM- Fibra de Madeira; CC- Carbonato de cálcio; SS -Silicato de Sódio D40

É esperado que até um certo rácio de CC/SS, o CC contribua positivamente para a resistência mecânica do material. No entanto, em proporções muito elevadas, isso pode prejudicar devido à rigidez excessiva que pode ser alcançada.

Os ensaios demonstraram que a composição com um rácio CC /SS de 0.20 alcançou a maior resistência mecânica, com um valor máximo de 3.01 MPa. Por outro lado, a composição com o resultado mais baixo foi a com rácio CC/SS de 0.16, apresentando um valor de σ_f média igual a 1,79 MPa.

Analisando o gráfico da figura 42, pode-se observar a influência do teor carbonato de cálcio na resistência mecânica das composições.

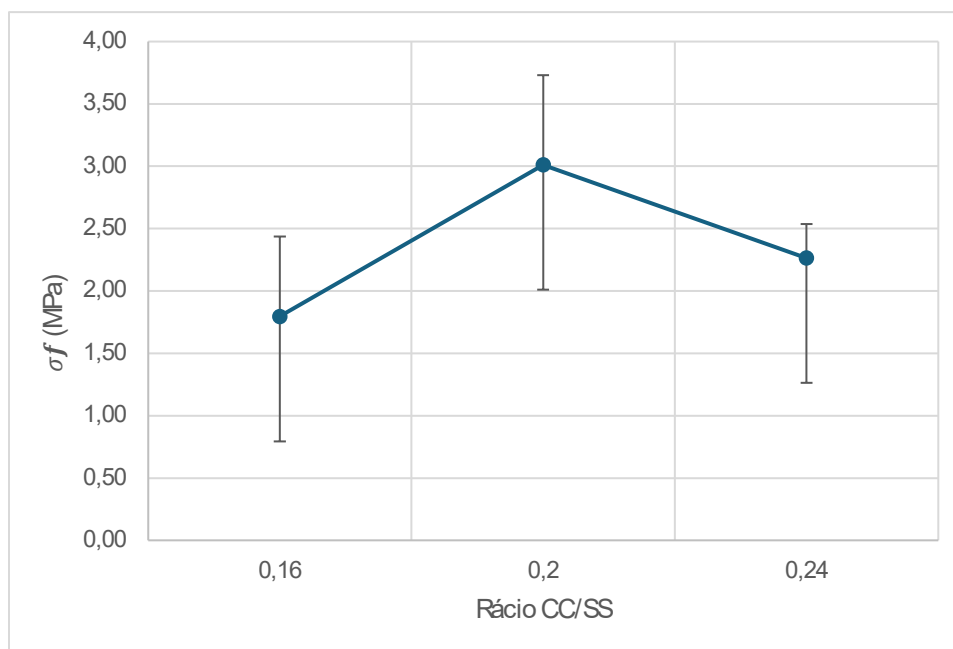


Figura 42 - Influência do teor carbonato de cálcio na resistência mecânica das composições.

Os valores mais baixos de resistência mecânica podem estar associados a diversos fatores, tais como:

- a) distribuição não homogênea do material durante o momento da impressão;
- b) fraca ligação entre camadas;

4.3 Casos de Estudo

De forma a aplicar as tecnologias desenvolvidas anteriormente desenvolveram-se painéis decorativos para interiores. Estes foram impressos no topo das placas de forma a criar um padrão com a dupla funcionalidade mencionada.

Seguidamente apresentam-se alguns conceitos iniciais de padrões a imprimir (figura 43) e respetivos render dos selecionados (Figura 44).



Figura 43 - Exemplos de conceitos Iniciais associados aos painéis decorativos

Após a impressão dos primeiros padrões teste, compreendeu-se a necessidade de considerar os seguintes aspetos:

- A continuidade do padrão era essencial devido à impossibilidade de movimentar a cabeça sem depositar material.
- Para garantir a continuidade, o conceito deveria ser desenvolvido a partir de um esboço fechado.
- Evitar esboços quadrados pois estes tendem a ficar arredondadas durante o processo de impressão. Seria dada preferência a formas orgânicas.
- Ter em consideração o espalhamento do material.



Figura 44 - Render do posicionamento dos painéis num espaço interior

Para a impressão dos painéis propostos inicialmente foi analisada a adesão entre a pasta formulada e a placas produzidas . Na figura 45 é possível comparar o render e o painel impresso e analisar o painel como unidade e os painéis como um conjunto formando um padrão.



Figura 45 - Comparação entre o Render e o caso de estudo

A adesão da pasta à placa está de acordo com o expectável, aderindo na perfeição, dada a viscosidade da pasta. A cura decorre em 24h- 48h à temperatura e humidade ambiente

4.4 Benchmarking

Os isolamentos térmicos desempenham um papel fundamental na eficiência energética dos edifícios. Entre as diversas opções disponíveis no mercado, os aglomerados à base de madeira surgem como uma alternativa sustentável e eficiente. Este capítulo procura apresentar na tabela 24 uma breve comparação entre o material desenvolvido, os isolamentos térmicos à base de madeira existentes no mercado e os isolamentos mais utilizados na construção civil, tendo em conta a sua composição, massa volúmica, condutibilidade térmica e resistências à flexão. Por último apresenta-se um índice de desempenho que relaciona a massa volúmica e a condutibilidade térmica (Equação 3) e que permite avaliar o desempenho destes materiais consoante esta propriedades.

$$\text{Índice de Desempenho} = \frac{\text{Condutibilidade Térmica } (\lambda)}{\text{Massa Volúmica } (\rho)} \quad (3)$$

Em que a unidades são:

Índice de desempenho – W/kg·K

Massa Volúmica – Kg/ m³

Condutibilidade Térmica -W/mK

Tabela 24 - Tabela de Benchmarking Placas Isolamento Térmico

Isolamento térmicos com aglomerados à base de madeira							
Marca	Composição		Massa Volúmica*	Condutibilidade Térmica*	Resistência à Flexão*	Índice de Desempenho	Referências
	Aglomerado	Aglomerante	kg/m ³	W/mK	MPa	W/kg·K	
Celenite	Lã de Madeira (wood wool), pó de marmore	Cimento Portland	N/A	0,065	N/A	N/A	(Celenit ABE - Lusomatec, n.d.)
BetonWood	Lã de Madeira (wood wool)	Cimento Portland	1350	0,26	9	$1,9 \times 10^{-4}$	(BetonWood, n.d.)
Baux	Lã de Madeira (wood wool), pó de marmore	Cimento Portland	300	0,085	0,7	$2,83 \times 10^{-4}$	(BAUX - World Leader in Sustainable Acoustic Sound Absorbers, n.d.)
Eterno Ivica	Fibra de madeira	Gesso	270	0,063	N/A	$2,33 \times 10^{-3}$	(Eterno Ivica - Building Products and Accessories, n.d.)
Isolamentos mais utilizados							
Fibrosom	Poliestireno Expandido (EPS)		15-40	0,034-0,042		$2,26 \times 10^{-3}$ a $1,05 \times 10^{-3}$	(Fibrosom Isolamentos, n.d.)
Fibrosom	Lã Mineral		12-100	0,032-0,040		$2,66 \times 10^{-3}$ a $4,0 \times 10^{-3}$	(Fibrosom Isolamentos, n.d.)
Fibrosom	Lã de Rocha		40-200	0,033-0,038		$8,25 \times 10^{-3}$ a $1,9 \times 10^{-3}$	(Fibrosom Isolamentos, n.d.)
Castro Composite	Espuma de Poliuretano (PU)		100-200	0.020-0.030		$2,0 \times 10^{-3}$ a $1,5 \times 10^{-3}$	(Castro Composites Specialists in Resins and Fibre Reinforcements, n.d.)
Fibrosom	Poliestireno extrudido (XPS)		30-50	0,033-0,037		$1,1 \times 10^{-2}$ a $7,4 \times 10^{-3}$	(Fibrosom Isolamentos, n.d.)
Material Desenvolvido							
	Aparas de madeira de choupo	Silicato de Sódio	227-293	0.0601- 0.0726	0.0660	$2,64 \times 10^{-4}$ a $2,47 \times 10^{-4}$	
* para espessuras entre 20 - 30 mm							

No caso dos materiais utilizados na formulação de pastas para impressão, não existem muitos materiais similares no mercado. No entanto, foram selecionados o Viroc e o MDF devido à utilização de madeira como aglomerado. Na tabela 25 apresenta-se um índice de desempenho que relaciona a massa volúmica e a resistência à flexão (Equação 4) e que permite avaliar o desempenho destes materiais consoante esta propriedades.

$$\text{Índice de Desempenho} = \frac{\text{Resistência à Flexão}}{\text{Massa Volúmica}(\rho)} \quad (4)$$

Em que a unidades são:

Índice de desempenho – MPa/(kg/m³)

Massa Volúmica – Kg/m³

Resistência à Flexão - MPa

Tabela 25 - Tabela de Benchmarking Pastas Fabrico Aditivo

Materiais mais utilizados							
Marca	Composição		Massa Volúmica*	Condutibilidade Térmica*	Resistência à Flexão*	Índice de Desempenho	Referências
	Aglomerado	Aglomerante	kg/m ³	W/mK	MPa	MPa/(kg/ m ³)	
Viroc Portugal - Indústrias de Madeira e Cimento, S.A.	Aparas de Madeira Sulfato de Alumínio Água	Cimento Portland Silicato de Sódio	1350 ± 100	0,22	≥ 9	6,6 x 10 ⁻³	(EN_Viroc_Technical-Data-Sheet_2023_1-1, n.d.)
Valbopan	Fibra de Madeira de Pinho	resinas sintéticas	730	N/A	22-23	3,01 x 10 ⁻² a 3,15 x 10 ⁻²	(Valbopan - Fibras de Madeira, S.a, n.d.)
Material Desenvolvido							
	Fibra de Madeira Carbonato de Cálcio	Silicato de Sódio	1040	N/A	3.01	2,89 x 10 ⁻³	
* para espessuras entre 20 - 30 mm							

Ao contrário do MDF e do Viroc, o material desenvolvido não é um material estrutural e por isso esta comparação tem como único propósito compreender se o índice de desempenho deste material é satisfatório. Através da tabela, pode-se concluir que o MDF possui um índice de desempenho resistência à flexão/massa volúmica significativamente maior que o Viroc e que o material desenvolvido. Isso significa que, em termos de resistência à flexão relativa à sua massa volúmica, este é mais eficiente do que os restantes.

4.5 Outras aplicações

Este material tem potencial para ser utilizado na criação de elementos construtivos vazados (cobogós), que permitam a entrada de luz natural nos ambientes, enquanto possibilitam a circulação do ar e reduzem o calor. Além disso, oferece a vantagem de proporcionarem privacidade quando utilizado como divisória interna em edificações. Este não deve ser utilizado como elemento estrutural, mas sim decorativo. Este também pode ser aplicado como revestimento em paredes, pavimentos e tetos interiores.

Em termos superficiais, pode ser estudada a área superficial de modo a reduzir o ruído no interior dos espaços. Os estudos efetuados demonstram uma boa adesão entre o material e as placas de isolamento térmico desenvolvidas e o potencial de crescer uma geometria mais eficiente em termos acústicos. Na figura 46 apresentam-se um exemplo de um cobogós com geometria similar às utilizadas nos painéis decorativos

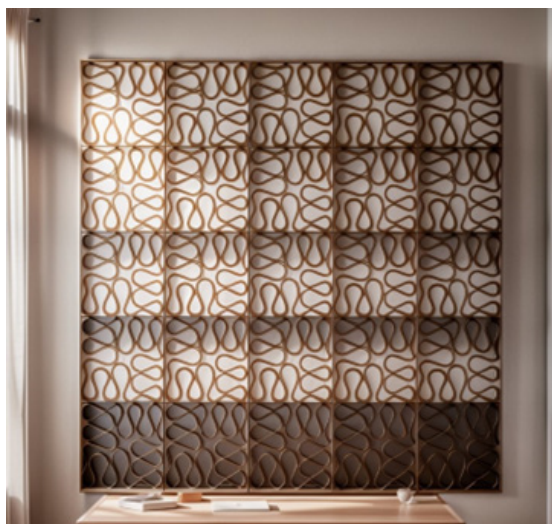


Figura 46 - Exemplo de outra aplicação (cobogó)

5 Considerações Finais

A presente dissertação procurou investigar a viabilidade e eficácia da utilização de resíduos agroindústrias, nomeadamente resíduos de madeira e pó de pedra, na produção de materiais compósitos na área dos isolamentos térmicos e do fabrico aditivo.

A partir de revisão bibliográfica acerca do tema e com os resultados obtidos neste estudo, foi possível constatar que a incorporação de resíduos da agricultura em materiais de isolamento térmico pode ser uma alternativa promissora, com potencial para contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais causados pela construção civil.

Para a produção das placas de isolamento térmico optou-se por uma geometria planar que facilitasse o encaixe e o transporte dos painéis, bem como a realização precisa de ensaios de condutibilidade térmica. As aparas de madeira apresentaram excelentes resultados em termos de condutibilidade térmica, alcançando valores de 0,0601 a 0,0726 W/m.K nas placas de isolamento térmico.

A maioria das formulações cumpre com a referência de condutibilidade térmica inferior a 0,070 W/m.K, exceto as formulações 400 MC/500 SS (Rácio=0,8) e 500 MC/600 SS (Rácio=0,83). Destacam-se as formulações 500 MC/550 SS (Rácio=0,91) com condutibilidade térmica de 0,0640 W/m.K e a formulação 400 MC /350 SS (Rácio=1,14) com 0,0601 W/m.K.

Para placas de 400g de madeira, a condutibilidade térmica diminui com o aumento do rácio MC/SS, indicando que maior quantidade de silicato de sódio aumenta a condutibilidade térmica. Em composições com 100g adicionais de madeira de choupo, a condutibilidade térmica tende a ser maior, exceto na placa F12 (500 g MC + 550 g SS), possivelmente devido à criação de espaços intersticiais que reduzem a condutibilidade.

No que diz respeito à resistência à flexão, os resultados não foram os desejados, com o valor máximo de σ_f média igual a 0.0660 MPa. Para melhorar esses resultados, seria necessário aumentar a percentagem de aglomerante, no entanto, esse aumento também comprometeria os valores de condutibilidade térmica.

No caso das placas, após a análise das propriedades estudadas, observaram-se resultados favoráveis em todas as propriedades e características, com exceção da resistência à flexão. Nesse sentido, é necessário reavaliar esta propriedade utilizando novas formulações. No subcapítulo recomendações para trabalhos futuros encontram-se outros ensaios que seriam importantes realizar de forma a assegurar a segurança e sustentabilidade do produto.

No contexto do fabrico aditivo, a revisão bibliográfica revelou a ausência de estudos sobre a inserção de materiais compósitos à base de madeira e aglomerantes inorgânicos em equipamentos de fabrico aditivo, bem como a análise dos parâmetros de impressão correspondentes.

Nesse contexto ao utilizar o silicato de sódio como aglomerante concluiu-se que o seu limite inferior apresenta um rácio FM/SS de 0.08, ou seja com valores superiores a 0.08 a pasta não extrude e com valores inferiores a pasta é demasiado fluída. As pastas com serradura foram excluídas por não apresentarem uma impressão uniforme e constante. Este comportamento poderá ser derivado da acumulação de aglomerante no fundo do depósito, criando uma pasta mais fluida inicialmente e acumulando a serradura seca no interior do depósito.

Nos ensaios com carbonato de cálcio não foram possíveis registar modificações aparentes, para além da cor esbranquiçada. Portanto, a influência deste *filler* foi avaliada nos ensaios de espa-

lhamento e na avaliação da construtibilidade.

Nos ensaios de espalhamento conclui-se que a formulação 6 com um rácio de CC/SS de 0,16 apresenta um menor espalhamento ao longo com tempo, entre os 0,4 e 1,0%, comparativamente com as formulações de rácio CC/SS igual 0,20 e 0,24, que apresentam valores de espalhamento entre os 2,5 a 4,1% e 1,5 a 2,7%, respetivamente.

Os espalhamentos das formulações com serradura fundamentam as observações registadas nos ensaios de extrudabilidade, uma vez que há fusão entre camadas e alargamento das camadas correspondente a um maior espalhamento. A formulação 17 é a única que não apresenta um espalhamento significativo, variando entre 1,4% e 1,9%, o que corresponde a uma menor fusão entre camadas observada na impressão. No entanto, nenhuma das impressões com serradura apresentou uma extrusão uniforme ao longo das camadas.

Em relação à resistência mecânica dos provetes obtidos por impressão verifica-se que o CC nem sempre contribui positivamente para a resistência mecânica do material.

Os ensaios revelaram que a composição com um rácio CC/SS de 0,20 atingiu a maior resistência mecânica, com um valor máximo de 3,01 MPa, e foi também a formulação que apresentou o maior espalhamento. Em contraste, a composição com o rácio CC/SS de 0,16 teve a menor resistência, com um valor médio de 1,79 MPa, para além de apresentar o menor espalhamento. Assim, sugere-se que um maior espalhamento pode estar associado a uma maior resistência mecânica, provavelmente devido a uma melhor ligação entre as camadas.

Nos ensaios de parâmetros de impressão, através de ensaios sequencial foi possível otimizar a h camada (2,5 mm), a velocidade (15 mm/s), a extrusion width (8,5 mm), o extrusion multiplier (2,2) e o diâmetro do bico (6 mm).

Nos ensaios que avaliam a construtibilidade selecionaram-se as formulações com melhor performance (rácio CC/SS de 0,24) dado apresentar um menor erro percentual em termos de largura de camada e altura total do provete.

Os casos de estudo foram obtidos com sucesso aplicando os métodos e os materiais descritos, ou seja, através da produção das placas de isolamento térmico e da impressão de padrões sobre as mesmas. A adesão e cura entre o material de impressão e as placas é excelente, sem que seja necessário o consumo adicional de recursos e energia.

Relativamente aos índices de desempenho, pode-se afirmar que o material desenvolvido com a finalidade de isolamento térmico apresenta um índice condutibilidade térmica/ massa volúmica que se enquadra dentro da respetiva competição, sendo por isso considerado satisfatório.

Em relação ao índice que relaciona a resistência à flexão com a massa volúmica, o material utilizado nas impressões apresenta um índice um pouco inferior aos materiais competidores.

Em ambos os casos em comparação com os materiais existentes no mercado, os materiais utilizados apresentam imenso potencial pois utilizam silicato de sódio como aglomerante, destacando-se pela sua sustentabilidade, em comparação com o cimento Portland utilizado nos restantes materiais. Adicionalmente, apresentam um impacto ambiental significativamente menor quando comparado com os compósitos sintéticos, pois estes são derivados de recursos não renováveis e são difíceis de reciclar.

Embora ainda não alcance totalmente o desempenho dos materiais mais utilizados, estes aproximam-se das soluções existentes à base de madeira, torna-se uma alternativa eficaz e sustentável para diversas aplicações.

Por fim, a investigação destacou a importância de explorar a utilização de resíduos agroindustriais não apenas como uma abordagem sustentável, mas também como uma solução económica e viável para a indústria da construção. A implementação dessas tecnologias pode ajudar a mitigar os problemas de gestão de resíduos e promover práticas de economia circular, contribuindo para um futuro mais sustentável.

Recomenda-se a continuidade dos estudos para aperfeiçoar as formulações e os processos de fabricação. No capítulo seguinte são destacados alguns dos ensaios necessários para garantir a aplicabilidade destes materiais em contextos reais. Dessa forma, espera-se que as inovações propostas nesta dissertação possam ser integradas de forma eficiente e sustentável na indústria da construção e do fabrico aditivo.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

No seguimento desta dissertação sugerem-se alguns aspetos que podem ser explorados e desenvolvidos em trabalhos futuros em relação à produção das placas para isolamento térmico, dos quais:

- **Granulometria**

Em estudos futuros, dependendo da condutibilidade térmica exigida recomenda-se a análise da fração específica de partículas que proporciona o desempenho térmico ideal.

- **Análise do ciclo de vida**

Permite a avaliação do desempenho ambiental dos materiais. Neste contexto, pode ser utilizado para compreender o impacto ambiental dos materiais utilizados, especialmente os aglomerantes. Considera desde a extração das matérias-primas até o fim de sua vida útil, incluindo o descarte ou a reciclagem. Esses dados podem ajudar a identificar oportunidades para tornar o produto final mais sustentável.

- **Ensaio de absorção de água**

Seria necessário avaliar a absorção de água e a suscetibilidade ao crescimento de fungos, numa câmara climática. Com estes dados pode-se averiguar a integridade das placas quando sujeitas a ambientes húmidos e a necessidade de aplicar fungicidas.

- **Ensaio de resistência ao fogo**

Quanto à resistência ao fogo, optou-se por utilizar o silicato de sódio devido às suas propriedades de incombustibilidade. É importante consultar normas e regulamentos específicos para determinar a classe adequada para o material a testar. A Euroclasse dependerá das exigências regulamentares locais, das características específicas do edifício e da finalidade do espaço interior.

E seguidamente em relação aos materiais para fabrico aditivo, em que se destaca:

- **Processo de Cura**

A utilização do silicato de sódio permite a cura a temperatura ambiente. Este processo deveria ser estudado de forma a obter maior controlo durante e após a impressão. Para reduzir o tempo de presa poderia utilizar-se um acelerador tal como a ácido acético.

- **Equipamento e Otimização dos parâmetros de impressão**

De forma a otimizar o equipamento deveria existir uma ligação direta entre o abastecimento de material e a extrusora, pois a mangueira muitas vezes dificulta a passagem de materiais mais difíceis de extrudir.

Ao nível dos parâmetros de impressão, apenas foi possível imprimir códigos contínuos e fechados, e por isso as geometrias e os parâmetros devem ser projetados de acordo com essas limitações. Estas podem ser ultrapassadas através de reformulação da pasta ou da utilização de uma tecnologia distinta.

6 Bibliografia

- Additive Manufacturing Materials Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029). (n.d.). Retrieved June 19, 2024, from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-additive-manufacturing-and-material-market-industry>
- Aguilera, A., & Davim, J. P. (2013). Preface. *Research Developments in Wood Engineering and Technology*, 1–390. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-4554-7>
- Andreu, J., Medina, E., Ferrández García, M., Ferrández-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C., Paredes, C., Bustamante, M., & Moreno-Caselles, J. (2013). Agricultural and Industrial Valorization of *Arundo donax* L. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.745363>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- ASTM. (n.d.). ASTM D790-10 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. In 2016.
- Balador, Z., Gjerde, M., Isaacs, N., & Imani, N. (2018). Thermal and Acoustic Building Insulations from Agricultural Wastes. In *Handbook of Ecomaterials*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_190
- Baltrushevich, M. (2021). Thermal insulation materials containing reed fiber filler. [Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve]. <http://hdl.handle.net/10400.8/6348>
- BAUX - World leader in sustainable acoustic sound absorbers. (n.d.). Retrieved July 1, 2024, from <https://www.baux.com/>
- Benini, G., Fröhlich, J., Brehm, F., Kulakowsk, M., Miranda, L., & Modolo, R. (2019). AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE VALORAÇÃO DA LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO COMO COPRODUTO EM DIFERENTES SETORES.
- BetonWood. (n.d.). Retrieved July 1, 2024, from <https://www.betonwood.com/>
- Castro Composites | Specialists in Resins and Fibre Reinforcements. (n.d.). Retrieved July 1, 2024, from <https://castrocomposites.com/en/>
- Celenit ABE - Lusomatec. (n.d.). Retrieved July 1, 2024, from <http://www.lusomatec.pt/pt/produtos/celenit/produtos/celenit-abe>
- CEN. (n.d.). EN 1015-3 Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). In 1999.
- CEN. (2013). EN 12089 Thermal insulating products for building applications - Determination of bending behaviour.
- Cetera, P., Negro, F., Cremonini, C., Todaro, L., & Zanuttini, R. (2018). Physico-Mechanical Properties of Thermally Treated Poplar OSB. *Forests*, 9. <https://doi.org/10.3390/f9060345>
- Cetiner, I., & Shea, A. D. (2018). Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *Energy and Buildings*, 168, 374–384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.019>
- Commission, E., Centre, J. R., Filippidou, F., & Jimenez Navarro, J. (2019). Achieving the cost-effective energy transformation of Europe's buildings – Combinations of insulation and heating & cooling technologies renovations – Methods and data. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2760/278207>
- Costa, J., & Fernando, A. (2018). Potential of wood waste in Portugal - A bio-based ecosystem model.
- Cruz Salgado, J., Alonso, S., Roberto, Z.-G., & Dominguez, J. (2015). Optimization of the

- Tensile and Flexural Strength of a Wood-PET Composite *. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 25. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72111-6](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72111-6)
- Dimas, Daniela & Giannopoulou, Ioanna & Panias, Dimitrios. (2009). Polymerization in sodium silicate solutions: A fundamental process in geopolymerization technology. *Journal of Materials Science*. 44. 3719-3730. [10.1007/s10853-009-3497-5](https://doi.org/10.1007/s10853-009-3497-5).
- Dikmen, N., & Ozkan, S. T. E. (2016). Unconventional Insulation Materials. In A. Almusaed & A. Almssad (Eds.), *Insulation Materials in Context of Sustainability*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/63311>
- EL Hajj, N., Mboumba-Mamboundou, B., Dheilly, R. M., Aboura, Z., Benzeggagh, M., & Quéneudec, M. (2011). Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows. *Industrial Crops and Products - IND CROPS PRODUCTS*, 34, 921–928. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.02.012>
- EN_Viroc_Technical-Data-Sheet_2023_1-1. (n.d.). Retrieved June 21, 2024, from (www.viroc.co.uk)
- Eterno Ivica - Building products and accessories. (n.d.). Retrieved July 1, 2024, from <https://www.eternoivica.com/en>
- Evon, P., Vandenbossche, V., Pontalier, P.-Y., & Rigal, L. (2014). New thermal insulation fiberboards from cake generated during biorefinery of sunflower whole plant in a twin-screw extruder. *Industrial Crops and Products*, 52, 354–362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.049>
- Firdous, R., Hirsch, T., Klimm, D., Lothenbach, B., & Stephan, D. (2021). Reaction of calcium carbonate minerals in sodium silicate solution and its role in alkali-activated systems. *Minerals Engineering*, 165, 106849. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106849>
- Fibrosom isolamentos. (n.d.). Retrieved July 1, 2024, from <https://fibrosom.com/>
- Frybort, S., Mauritz, R., Teisinger, A., & Müller, U. (2008). Cement bonded composites - A mechanical review. *Bioresources*, 3, 602–626. <https://doi.org/10.15376/biores.3.2.602-626>
- Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*, 5, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>
- Gaspar, F., Bakatovich, A., Davydenko, N., & Joshi, A. (2020). Building insulation materials based on agricultural wastes (pp. 149–170). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8>
- Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55(3), 829–892. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- Golmakani, M. E., Wiczenbach, T., Malikan, M., Aliakbari, R., & Eremeyev, V. A. (2021). Investigation of Wood Flour Size, Aspect Ratios, and Injection Molding Temperature on Mechanical Properties of Wood Flour/Polyethylene Composites. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ma14123406>
- Gouveia, L. (2023). Relatório Final Projeto AM4CER [Trabalho não publicado]. Instituto Politécnico de Leiria.
- Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O., & Kumar, A. (2017). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels – A Review. *RSC Advances*, 7(61), 38604–38630. <https://doi.org/10.1039/C7RA06598A>
- Henke, K., & Treml, S. (2013). Wood based bulk material in 3D printing processes for applications in construction. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1), 139–

141. <https://doi.org/10.1007/S00107-012-0658-Z>
- Howes, P., & Laughlin, Z. (2012). *Material matters : new materials in design*. 237. Black Dog Publishing. ISBN: 978-1-907317-73-6. https://books.google.com/books/about/Material_Matters.html?hl=pt-PT&id=d75VYAAACAAJ
- International Organization for Standardization. (1991). ISO 8301:1991 - Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus.
- Jute and Other Textile Fibers in Portugal. (n.d.). Retrieved June 12, 2024, from <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/jute-and-other-textile-fibers/reporter/prt>
- Kalali, E. N., Zhang, L., Shabestari, M. E., Croyal, J., & Wang, D.-Y. (2019). Flame-retardant wood polymer composites (WPCs) as potential fire safe bio-based materials for building products: Preparation, flammability and mechanical properties. *Fire Safety Journal*, 107, 210–216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.001>
- Källbom, S., Lillqvist, K., Spoljaric, S., Seppälä, J., Segerholm, K., Rautkari, L., Hughes, M., & Wålinder, M. (2020). Effects of Water Soaking–drying Cycles on Thermally Modified Spruce Wood–plastic Composites. *Wood and Fiber Science*, 52(1), 2–12. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2761>
- Khedari, J., Charoenvai, S., & Hirunlabh, J. (2003). New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, 38(3), 435–441. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00030-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00030-6)
- Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>
- Kozakiewicz, P., Drożdżek, M., Laskowska, A., Grzeskiewicz, M., Bytner, O., Radomski, A., Mróz, A., Betlej, I., & Zawadzki, J. (2020). Chemical Composition as a Factor Affecting the Mechanical Properties of Thermally Modified Black Poplar (*Populus nigra* L.). *Bioresources*, 15, 3915–3929. <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3915-3929>
- Kumfu, S., & Jintakosol, T. (2012). Thermal Insulation Produced From Pineapple Leaf Fiber and Natural Rubber Latex. *Advanced Materials Research*, 506, 453–456. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.506.453>
- Kymäläinen, H.-R., & Sjöberg, A.-M. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(7), 1261–1269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
- Lefteri, C. (2014). *Materials for design*. 256. Hachette UK. ISBN: 1780675348. https://books.google.pt/books/about/Materials_for_Design.html?id=kfUgEAAAQBAJ&redir_esc=y
- Leite, F. (2017). Durabilidade de compósitos de matriz termoplástica/termoendurecível reforçada com fibras sintéticas e naturais. *Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho*. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/48258/1/Fernando%20Luis%20Pinheiro%20Pires%20Leite.pdf>
- Liu, D., Xia, K., Li, J., Chen, K., & Nazhad, M. (2012). Manufacturing of a biocomposite with both thermal and acoustic properties. *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER*, 46, 1011–1020. <https://doi.org/10.1177/0021998311414069>
- Luamkanchanaphan, T., Chotikaprakhan (Nok), S., & Jarusombuti, S. (2012). A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers. *APCBEE Procedia*, 1, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.009>
- Malheiro, R., Ansolin, A., Guarnier, C., Fernandes, J., Cosentino, L., Silva, S., & Mateus, R.

- (2022). Reed as a Thermal Insulation Material: Experimental Characterisation of the Physical and Thermal Properties. 676–684. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.676>
- Manohar, K. (2012a). Experimental Investigation of Building Thermal Insulation from Agricultural By-products. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2, 227–239. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2012/1528>
- Manohar, K. (2012b). Experimental Investigation of Building Thermal Insulation from Agricultural By-products. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2, 227–239. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2012/1528>
- Mati-Baouche, N., de Baynast, H., Michaud, P., Dupont, T., & Leclaire, P. (2016). Sound absorption properties of a sunflower composite made from crushed stem particles and from chitosan bio-binder. *Applied Acoustics*, 111, 179–187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.04.021>
- Mazzanti, V., & Mollica, F. (2020). A Review of Wood Polymer Composites Rheology and Its Implications for Processing. *Polymers*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/polym12102304>
- Monteiro, S., Martins, J., Magalhães, F., & Carvalho, L. (2018). Lightweight Wood Composites: Challenges, Production and Performance (pp. 293–322). https://doi.org/10.1007/978-3-319-68696-7_7
- Navacerrada Saturio, M. Á., Díaz, C., & Fernandez-Morales, P. (2014). Characterization of a Material Based on Short Natural Fique Fibers. *BioResources*, 9. <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3480-3496>
- Negro, F., Cremonini, C., Fringuellino, M., & Zanuttini, R. (2017). An innovative composite plywood for the acoustic improvement of small closed spaces. *Holzforschung*, 71(6), 521–526. <https://doi.org/10.1515/HF-2016-0122>
- Nygård, P., Tanem, B. S., Karlsen, T., Brachet, P., & Leinsvang, B. (2008). Extrusion-based wood fibre–PP composites: Wood powder and pelletized wood fibres – a comparative study. *Composites Science and Technology*, 68(15), 3418–3424. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.029>
- Online Materials Information Resource - MatWeb. (n.d.). Retrieved February 21, 2024, from <https://www.matweb.com/>
- Orji, B. O., Thie, C., Baker, K., Maughan, M. R., & McDonald, A. G. (2023). Wood fiber - sodium silicate mixtures for additive manufacturing of composite materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 81(1), 45–58. <https://doi.org/10.1007/S00107-022-01861-Z/TABLES/4>
- Oushabi, A., Sair, S., Abboud, Y., Tanane, O., & Abdeslam, E. B. (2015). Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: Characterization of local date palm fibers (LDPF). 6, 3395–3402. https://www.researchgate.net/publication/290297069_Natural_thermal-insulation_materials_composed_of_renewable_resources_Characterization_of_local_date_palm_fibers_LDPF
- Paiva, A., Pereira, S., Sá, A., Cruz, D., Varum, H., & Pinto, J. (2012). A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*, 45, 274–279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>
- Papadopoulos, A. N. (2020). Advances in wood composites. *Polymers*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/POLYM12010048>
- Portugal Fresh Durian market overview 2023. . (n.d.). Retrieved June 12, 2024, from <https://www.tridge.com/intelligences/durian/PT>
- Portugal Hemp Seed market overview 2024. (2024). <https://www.tridge.com/intelligences/hemp->

seed/PT

- Portugal Maize (Corn) market overview 2024. (2024). <https://www.tridge.com/intelligences/corn/PT>
- Portugal Rice Husk market overview 2023. (n.d.). Retrieved June 12, 2024, from <https://www.tridge.com/intelligences/rice-husk/PT>
- Portugal's beet-pulp and bagasse market report 2023 - prices, size, forecast, and companies. (2023). <https://www.indexbox.io/store/portugal-beet-pulp-and-bagasse-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/>
- Radwan, S. (2007). EFFECTIVE THERMAL PROPERTIES OF PEANUT AS A FUNCTION OF MOISTURE CONTENT. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 32, 3541–3556. <https://doi.org/10.21608/jssae.2007.201186>
- Rama, J., Tadeu, A., & Almeida, J. (2014). Eco-painéis construídos a partir de madeira e resíduos de palha/casca de arroz. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/38631>
- Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvaneshwari, V., & Bhoopathi, R. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030589>
- Reyes-Contreras, P., Mendonça, R., Rodríguez, J., Fardim, P., & Vega, B. (2013). Characterization of the hemicellulosic fraction obtained by pre-hydrolysis of *Pinus radiata* wood chips with hot-water at different initial pH. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 58, 1415–1419. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072013000100024>
- S. Monteiro da Silva; M. Guedes de Almeida. (2010). INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 39, Lisboa – “International Congress and Exposition on Noise Control Engineering : INTER-NOISE 2010”. [S.l. : s.n., 2010].
- Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C., & Swaminathan, K. R. (1992a). Mechanical and thermal properties of particle boards made from farm residues. *Bioresource Technology*, 40(3), 249–251. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90151-M](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90151-M)
- Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C., & Swaminathan, K. R. (1992b). Mechanical and thermal properties of particle boards made from farm residues. *Bioresource Technology*, 40(3), 249–251. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90151-M](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90151-M)
- Schweizer, C., Edwards, R., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W., Ilacqua, V., Jantunen, M., Lai, H.-K., Nieuwenhuijsen, M., & Künzli, N. (2007). Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 17, 170–181. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500490>
- Sousa, E. (2020, November). Pinheiro-bravo: a conífera mais abundante em Portugal. <https://florestas.pt/conhecer/pinheiro-bravo-a-conifera-mais-abundante-em-portugal/>
- Steven Hall. (2008). *Typha domingensis* (southern cattail). In *CABI Compendium*. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.54296>
- Sudár, A., Renner, K., Móczó, J., Lummerstorfer, T., Burgstaller, Ch., Jerabek, M., Gahleitner, M., Doshev, P., & Pukánszky, B. (2016). Fracture resistance of hybrid PP/elastomer/wood composites. *Composite Structures*, 141, 146–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.031>
- T. L. Bergman. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (ilustrada). John Wiley & Sons.
- Tangjuank, S. (2011). Thermal insulation and physical properties of particleboards from pineapple leaves. *International Journal of Physical Sciences*, 6, 4528–4532.
- Tu, K., Puértolas, B., Adobes-Vidal, M., Wang, Y., Sun, J., Traber, J., Burgert, I., Pérez-

- Ramírez, J., & Keplinger, T. (2020). Green Synthesis of Hierarchical Metal–Organic Framework/Wood Functional Composites with Superior Mechanical Properties. *Advanced Science*, 7(7), 1902897. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/advs.201902897>
- UTAD. (n.d.). Espécie *Populus nigra*. Retrieved June 12, 2024, from https://jb.utad.pt/especie/Populus_nigra
- Valbopan - Fibras de Madeira, S.a. (n.d.). Retrieved June 27, 2024, from <https://www.investwood.pt/valbopan/>
- Vital, B. (n.d.). Propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos do processamento mecânico da madeira. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. Retrieved January 10, 2024, from https://www.academia.edu/67501964/Propriedades_de_pain%C3%A9is_aglomerados_produzidos_com_res%C3%ADduos_do_processamento_mec%C3%A2nico_da_madeira
- Wasp S.r.l. (n.d.). Retrieved June 26, 2024, from <https://www.3dwasp.com/en/>
- Webb, C., Qi, K., Anguilano, L., & Schmidt Rivera, X. (2024). Mechanical and environmental evaluation of ground calcium carbonate (CaCO₃) filled polypropylene composites as a sustainable alternative to virgin polypropylene. *Results in Materials*, 22, 100562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100562>
- Wei, P., Rao, X., Yang, J., Guo, Y., Chen, H., Zhang, Y., Chen, S., Deng, X., & Wang, Z. (2016). Hot Pressing of Wood-Based Composites: A Review. *Forest Products Journal*, 66(7–8), 419–427. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-15-00047>
- Woern, A. L., Byard, D. J., Oakley, R. B., Fiedler, M. J., Snabes, S. L., & Pearce, J. M. (2018). Fused Particle Fabrication 3-D Printing: Recycled Materials' Optimization and Mechanical Properties. *Materials*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/ma11081413>
- Yarbrough, D., Wilkes, K., Olivier, P., Graves, R., & Vohra, A. (2005). Apparent Thermal Conductivity Data and Related Information for Rice Hulls and Crushed Pecan Shells.
- Zanuttini, R., & Negro, F. (2021). Wood-Based Composites: Innovation towards a Sustainable Future. *Forests*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/f12121717>

Anexos

Anexo 1 – Fichas Técnicas

Silicato de Sódio

Carbonato de Cálcio (calcite 70)

Silicato de Sódio



Quimialmel Químicos e Minerais LDA.
Escritórios:
Estrada Nacional, 1. Apto 150
3850-200 Albergaria-A-Velha
Portugal
TEL +351 234 529 160
FAX +351 234 529 169
quimialmel@quimialmel.pt
www.quimialmel.pt

NOTA TÉCNICA

Pág. 1 de 1

SILICATO DE SÓDIO EM SOLUÇÃO D40

1 – IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Denominação Comercial: Silicato de Sódio em Solução D40

2 – ESPECIFICAÇÕES

Propriedades Físico-Químicas:

Rácio molar SiO ₂ /Na ₂ O	3.4	± 0.1
Rácio em peso SiO ₂ /Na ₂ O	3.3	± 0.1
% Na ₂ O	8.2	± 0.5
% SiO ₂	26.7	± 1.0
Sólidos (% P/P)	34.9	± 2.5
Densidade a 20°C (°Be)	39.0	± 1.0
Densidade a 20°C (g/cm ³)	1.368	± 0.015
Viscosidade a 20°C (cP)	135	
pH	≥ 10,5 – 13	

3 – EMBALAGEM E ARMAZENAGEM

Disponível em bilhas, bidões, IBC's e em camião cisterna.

Deve-se armazenar em local fresco, seco e bem ventilado.

4 – DATA DE ELABORAÇÃO/REVISÃO

Data de Elaboração: Setembro de 2014

Revisão: Fevereiro de 2021 (v7)

5 – OUTRAS INFORMAÇÕES

Trata-se de um produto líquido viscoso, usado essencialmente em betão, tijolos, telhas, materiais cerâmicos, madeira natural, detergente, pinturas e indústria química.

É sempre da exclusiva responsabilidade do utilizador a correta aplicação deste produto.

Para maior informação, contactar com: Quimialmel – Químicos e Minerais, Lda.

Carbonato de Cálcio(calcite 70)

NATUREZA	CARBONATO DE CÁLCIO *			
	PRP 20	Filler A	Filler B	Calcite 70
NOME COMERCIAL				
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA ¹				
DIÂMETRO D₅₀	5 µm	8,55 µm	76 µm	8,5 µm
MÉDIA PARTÍCULAS < 45 µm	100 %	85 %	37 %	94 %
MÉDIA PARTÍCULAS < 5 µm	40 %	32 %	17 %	33 %
CORTE SUPERIOR	30 µm	170 µm	315 µm	100 µm
¹ Mastersizer				
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS ² (%)				
CaO	55,4	55,1	55,1	55,1
MgO	0,32	0,32	0,32	0,32
Fe ₂ O ₃	0,04	0,04	0,04	0,04
SiO ₂	0,10	0,10	0,10	0,10
Al ₂ O ₃	0,10	0,10	0,10	0,10
TiO ₂	0,01	0,01	0,01	0,01
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01
Na ₂ O	0,02	0,02	0,02	0,02
P ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01	0,01
CaCO ₃	98,9	98,4	98,4	98,4
² F.R.X.				
HUMIDADE	≤ 0,3%	≤ 0,3%	≤ 0,3%	≤ 0,3%

*A elaboração deste produto baseia-se numa matéria prima natural, pelo que nos reservamos o direito de alteração dos valores apresentados.

