



M 2022



DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE SUSTENTÁVEIS

MARIA HELENA CARVALHO TEIXEIRA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado em Engenharia Química

Desenvolvimento de Painéis Sanduíche Sustentáveis

Dissertação de Mestrado

de

Maria Helena Carvalho Teixeira

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial



Orientador na FEUP: Prof. Fernão Domingos de Montenegro Baptista Malheiro de Magalhães

Coordenadora no INEGI: Dr^a Susana Patrícia Bastos de Sousa



julho de 2022

“Mischief Managed”

- Harry Potter

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador académico, Prof. Fernão Magalhães, por todo o apoio, preocupação e disponibilidade para esclarecer qualquer dúvida que surgisse ao longo deste trabalho.

À minha coordenadora no INEGI, Dr^a Susana Sousa, por toda a ajuda, confiança, disponibilidade de acompanhamento, por todo o conhecimento transmitido, por nunca me deixar desanimar sempre que surgia algum problema e por todos os conselhos.

Gostaria de agradecer também a todos os colaboradores do INEGI que, de uma forma ou de outra, contribuíram para que este trabalho corresse bem, por terem sido incansáveis e estarem sempre prontos a ajudar e a esclarecer qualquer dúvida que tivesse.

Aos meus pais e irmã pelo apoio incondicional, por serem o meu suporte, por acreditarem mais em mim que eu mesma e, principalmente, por não me deixarem desistir. Por serem a minha maior inspiração e por me fazerem ser melhor todos os dias. Sem eles nada seria possível.

Finalmente, aos meus amigos de Amarante ao Porto, da Lavagem de roupa suja à Peixaria, por terem estado sempre ao meu lado, especialmente quando as coisas não corriam tão bem. Mas em especial à Inês que desde a fila das matrículas me apoiou e não me deixou bater com a cabeça na parede dia após dia, à Maria que mesmo não sabendo onde se pousa o tabuleiro soube encontrar o caminho para me dar boleia e motivar e à Lúcia que mesmo estando longe não deixou de estar perto. E sem esquecer aqueles que se cruzaram comigo nesta caminhada e me fizeram sorrir mesmo que o dia estivesse cinzento.

Uma Palavra de Apeço.

O Prof. Fernão Magalhães, orientador desta dissertação, é membro integrado do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: LA/P/0045/2020 (ALiCE), UIDB/00511/2020 e UIDP/00511/2020 (LEPABE), financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).



Este trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito do projeto “iclimabuilt” (n.º 952886), apoiado pela União Europeia no âmbito do Programa-Quadro de Investigação e Inovação HORIZON2020.

Resumo

Durante as várias fases do ciclo de vida de um edifício ocorre a emissão de uma elevada quantidade de CO₂ para a atmosfera. Deste modo, a crescente preocupação com questões ambientais e a urgência de economizar materiais e recursos energéticos tem suscitado a necessidade de desenvolvimento de soluções mais sustentáveis, como a utilização de tecnologias de construção com menores quantidades de material incorporadas ou recorrendo a materiais mais ecológicos, sendo os painéis sanduíche um exemplo promissor.

O principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um painel sanduíche sustentável, ou seja, utilizando o máximo de materiais de base biológica em detrimento dos utilizados convencionalmente. Assim, as propriedades dos vários constituintes deste painel e de um painel convencional são avaliadas, sendo, ainda, comparado o desempenho de ambos. É de referir que, para o painel de base biológica, se utilizou fibras de basalto e uma resina epoxídica de base biológica nos laminados e um núcleo de aglomerado de cortiça, enquanto para o painel convencional se recorreu a fibras de vidro, uma resina epoxídica convencional e um núcleo de espuma de poliestireno extrudido (XPS).

Em primeiro lugar, caracterizaram-se duas resinas epoxídicas, uma convencional e outra de base biológica, de modo a avaliar a possível substituição da primeira pela segunda. Concluiu-se que esta substituição poderia ser benéfica, tendo em consideração as suas propriedades físicas, térmicas e mecânicas. Seguidamente, caracterizaram-se dois laminados, o primeiro com fibras de vidro e a resina convencional e o segundo com fibras de basalto e uma resina de base biológica, e verificou-se que o de base biológica apresentava propriedades físicas e térmicas superiores. Finalmente, avaliou-se o desempenho dos dois painéis, constatando-se que o de base biológica apresentava propriedades mecânicas inferiores. Nos ensaios de compressão, o descolamento dos laminados do painel convencional ocorreu ao longo da interface laminado-núcleo, enquanto no painel de base biológica ocorreu descolamento parcial dos laminados acompanhado de algumas fendas no núcleo. É, ainda, de salientar que se realizou uma otimização do processo de infusão a vácuo para produção de laminados, concluindo-se que as condições ótimas variam significativamente de acordo com a propriedade em estudo.

Em suma, o painel de base biológica desenvolvido é mais sustentável que o painel utilizado convencionalmente, acarretando menores impactes ambientais. Contudo, o seu custo associado é superior e as suas propriedades mecânicas inferiores, sendo necessário uma contínua investigação para otimizar tanto as condições de produção como os materiais utilizados. Deste modo, possibilitaria uma maior utilização de painéis sanduíche no setor da construção e, ainda, a substituição dos materiais convencionais por materiais de base biológica.

Palavras-Chave: Painel Sanduíche; Fibras de Basalto; Aglomerado de Cortiça; Compósitos Sustentáveis

Abstract

Throughout the several phases of the building's life cycle, a large amount of CO₂ is emitted into the atmosphere. Thus, the growing concern with environmental issues and the awareness to save materials and energy resources has raised the need to develop more sustainable solutions. These include construction technologies with lower quantities of material incorporated or using more environmentally friendly materials. Sandwich panels are a promising example of these solutions.

The main objective of this dissertation consists in developing a sustainable sandwich panel, i.e., using as many bio-based materials as possible in detriment of those conventionally used. Thus, the properties of the several constituents of this panel and of a conventional one are evaluated, and the performance of both is also compared. It should be noted that the bio-based panel uses basalt fibres and a bio-based epoxy resin in the laminates and a cork agglomerate core. On the other hand, the conventional panel uses glass fibres, a conventional epoxy resin and an extruded polystyrene (XPS) foam core.

Firstly, two epoxy resins have been characterised, one conventional and one bio-based, to evaluate the possible replacement of the former by the latter. It was possible to conclude that this substitution could be beneficial, considering their physical, thermal and mechanical properties. Then, two laminates were characterised, the first with glass fibres and the conventional resin and the second with basalt fibres and a bio-based resin. The bio-based laminate presented higher physical and thermal properties. Finally, the evaluation of the performance of both panels revealed that the bio-based panel presented lower mechanical properties. In the compression tests, the detachment of the conventional panel laminates occurred in the laminate-core interface, while in the bio-based one occurred a partial detachment of the laminates and some fissures in the core. It is worth highlighting that the vacuum infusion process for the laminates' production was optimized, concluding that the optimal conditions change significantly according to the property under study.

Briefly, the developed bio-based panel is more sustainable than the conventionally used one, leading to lower environmental impacts. However, its associated cost is higher and its mechanical properties lower, requiring continuous research to optimise both the production conditions and the materials used. This would enable wider use of sandwich panels in the construction sector and the replacement of conventional materials with bio-based ones.

Keywords: Sandwich Panel; Basalt Fibres; Cork Agglomerate; Sustainable Composites.

Declaração

Eu, Maria Helena Carvalho Teixeira, declaro, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Porto, 18 de julho de 2022

Maria Helena Carvalho Teixeira

(Maria Helena Carvalho Teixeira)

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Contributos da Autora para o Trabalho	3
1.4	Organização da Dissertação	3
2	Contexto e Estado da Arte	5
2.1	Contextualização Histórica.....	5
2.2	Enquadramento no Setor da Construção	5
2.3	Estrutura e Composição dos Painéis Sanduíche	6
2.3.1	Laminados.....	7
2.3.2	Núcleo	7
2.3.3	Adesivos	9
2.4	Processos de Produção.....	10
2.4.1	Produção dos Núcleos	10
2.4.2	Produção dos Laminados	11
2.5	Principais Propriedades e Aplicações dos Painéis Sanduíche.....	14
2.5.1	Painéis Sanduíche na Literatura	14
2.5.2	Mercado de Painéis Sanduíche e Respetivas Aplicações	15
3	Materiais e Métodos	17
3.1	Painéis Sanduíche em Estudo.....	17
3.1.1	Matérias-Primas	17
3.1.2	Processo de Produção dos Laminados	18
3.1.3	Processo de Produção dos Painéis Sanduíche	20
3.1.4	Estudo da Impermeabilização do Aglomerado de Cortiça	20
3.2	Métodos de Caracterização	21
3.2.1	Ensaio de Caracterização Física	21
3.2.2	Ensaio de Caracterização Térmica	23

3.2.3	Ensaios de Caracterização Mecânica	26
3.3	Análise de Sustentabilidade	27
4	Resultados e Discussão	29
4.1	Caracterização das Resinas	29
4.2	Laminados	32
4.2.1	Otimização do Processo de Infusão a Vácuo	34
4.3	Painéis Sanduíche	37
4.3.1	Estudo da Impermeabilização do Aglomerado de Cortiça	38
4.4	Análise de Sustentabilidade	40
5	Conclusões	43
6	Avaliação do Trabalho Realizado	45
6.1	Objetivos Realizados	45
6.2	Limitações e Trabalhos Futuros	45
6.3	Apreciação Final	46
7	Referências	47
	Anexo A - Fichas Técnicas dos Materiais	51
	Anexo B - Valores do Fator de Conversão Para 23 °C Utilizados no Cálculo da Densidade	62
	Apêndice A - Resultados Para as Resinas Epoxídicas	63
	Apêndice B - Resultados Para as Resinas de Pinheiro	69
	Apêndice C - Resultados Para os Laminados	71
	Apêndice D - Resultados Para os Painéis Sanduíche	79
	Apêndice E - Análise de Sustentabilidade	89

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Representação esquemática de um painel sanduíche. Adaptado de [6].</i>	2
<i>Figura 2. Representação esquemática de a) núcleos homogêneos, b) núcleos canelados e c) núcleos em favo de mel. Adaptado de [20].</i>	8
<i>Figura 3. Representação esquemática do processo de moldação manual. Adaptado de [28].</i>	11
<i>Figura 4. Representação esquemática do processo de pulverização. Adaptado de [29].</i>	12
<i>Figura 5. Representação esquemática do processo de moldação por transferência de resina. Adaptado de [29].</i>	12
<i>Figura 6. Representação esquemática do processo infusão a vácuo. Adaptado de [32].</i>	13
<i>Figura 7. Representação esquemática do processo de pultrusão. Adaptado de [24].</i>	14
<i>Figura 8. Várias etapas do processo de infusão a vácuo para produção dos laminados.</i>	18
<i>Figura 9. Fotografia do medidor de dureza de Barcol utilizado - modelo HPE da Bareiss®.</i>	22
<i>Figura 10. Fotografia da montagem experimental utilizada nos ensaios de densidade.</i>	22
<i>Figura 11. Fotografia da mufla utilizada nos ensaios de teor de fibras e volume de vazios.</i>	23
<i>Figura 12. Fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de DSC - Modelo Q20 da TA Instruments®.</i>	24
<i>Figura 13. Exemplo das várias transições que podem ser obtidas por DSC, a) transição vítrea, b) fusão e c) cristalização. Adaptado de [54].</i>	24
<i>Figura 14. Fotografias do equipamento utilizado nos ensaios de DMA - Modelo Q800 da TA Instruments®.</i>	25
<i>Figura 15. Exemplo de um gráfico de DMA obtido para uma das amostras em estudo.</i>	25
<i>Figura 16. Fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de flexão.</i>	26
<i>Figura 17. Fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de compressão.</i>	27
<i>Figura 18. Representação gráfica do fluxo de calor em função da temperatura, obtida através de DSC, para as resinas epoxídicas convencional e de base biológica, a azul e a verde, respetivamente, ambas com uma cura de 24 h a 60 °C.</i>	29
<i>Figura 19. Resultados dos ensaios de flexão para as amostras da resina a) Biresin® CR83/CH83-6 e b) InfuGreen 810/SD 8825.2, com as duas curas em estudo.</i>	31
<i>Figura 20. Fotografias das fibras utilizadas nos laminados, a) vidro e b) basalto.</i>	33
<i>Figura 21. Representação gráfica dos resultados obtidos através de DMA para os dois laminados, de vidro com a linha a tracejado e de basalto com a linha a cheio.</i>	33

<i>Figura 22. Amostra do laminado produzido com a condição 9 da Tabela 4 após o ensaio de flexão: a) amostra fletida, b) ligeira delaminação das camadas inferiores e c) quebra das fibras da primeira camada.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 23. Amostras de painéis sanduíche a) convencional e b) sustentável, após os ensaios de flexão.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24. Amostras de painéis sanduíche a) convencional e b) sustentável, após os ensaios de compressão.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 25. Amostras de aglomerado de cortiça com as várias formulações da Tabela 5.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 26. Amostras de cortiça com absorção da formulação 1 em a) e 2 em b), nos espaços intersticiais do painel aglomerado.</i>	<i>40</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1. Exemplos de painéis sanduíche apresentados na literatura.</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 2. Empresas que comercializam painéis sanduíche e respectivas aplicações.</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 3. Propriedades dos materiais constituintes dos painéis sanduíche em estudo.</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 4. Condições utilizadas na otimização do processo de infusão a vácuo.</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 5. Formulações utilizadas no estudo da impermeabilização do aglomerado de cortiça.</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 6. Resultados obtidos para as propriedades térmicas e físicas das duas resinas em estudo, para ambas as curas. *</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 7. Resultados dos ensaios de flexão para as resinas convencional e de base biológica em estudo, com ambas as curas.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 8. Resultados obtidos para os laminados em estudo, relativamente às suas propriedades físicas e térmicas. *</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 9. Resultados de caracterização física obtidos para as várias amostras de laminados, cujas condições de produção se encontram na Tabela 4.</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 10. Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das várias amostras de laminados, cujas condições de produção se encontram na Tabela 4.</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 11. Resultados obtidos nos ensaios de flexão e de compressão para os dois painéis sanduíche em estudo.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 12. Resultados obtidos para as diferentes formulações de misturas de resina e parafina, aerogel de sílica ou aerogel de celulose apresentadas na Tabela 5. *</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 13. Resultados relativos à sustentabilidade dos painéis convencional e de base biológica, analisando a influência das fibras e do núcleo utilizados.</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 14. Valores obtidos para a análise de sustentabilidade dos laminados produzidos com as condições da Tabela 4, avaliando a influência das fibras utilizadas.</i>	<i>41</i>

Notação

m	Declive da tangente da porção inicial reta da curva tensão-deformação	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$
d	Deslocamento da amostra	mm
L	Distância entre os roletes	mm
h	Espessura da amostra	mm
t	Espessura de um laminado	mm
c	Espessura do núcleo	mm
p	Espessura do painel	mm
$\tan \delta$	Fator de perda	
F	Força aplicada	N
$F_{\max}$	Força máxima antes da falha	N
b	Largura da amostra	mm
m	Massa da amostra	g
E'	Módulo de armazenamento	MPa
E_f	Módulo de elasticidade em flexão	MPa
E''	Módulo de perda	MPa
F_s^{ult}	Resistência máxima do núcleo ao corte	MPa
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Temperatura de cristalização	$^{\circ}\text{C}$
T_f	Temperatura de fusão	$^{\circ}\text{C}$
T_g	Temperatura de transição vítrea	$^{\circ}\text{C}$
W	Teor em percentagem de massa	%
V	Teor em percentagem de volume	%
V_{vazios}	Volume de vazios	%

Letras gregas

ρ	Densidade	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
σ_c	Resistência máxima à compressão	MPa
σ_f	Tensão de flexão	MPa

Índices

fi	Final
i	Inicial

Lista de Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
ANOVA	Análise de Variância
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DSC	do inglês Differential Scanning Calorimetry (Calorimetria Diferencial de Varrimento)
DMA	do inglês Dynamic Mechanical Thermal Analysis (Análise Termomecânica Dinâmica)
DoE	Desenho de Experiências
FRP	do inglês Fiber Reinforced Polymer (Polímeros Reforçados com Fibras)
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISO	International Organization for Standardization
LAETA	Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica
PVC	Policloreto de Vinila
EPS	Poliestireno Expandido
XPS	Poliestireno Extrudido
PET	Polietileno Tereftalato
PIR	Poliisocianurato
PP	Polipropileno
PU	Poliuretano

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

A urbanização global e a exigência de um estilo de vida cada vez mais elevado afetam consideravelmente o meio ambiente e as condições do planeta Terra, contribuindo significativamente para as alterações climáticas e uso excessivo de recursos [1]. O setor da construção é, assim, um dos principais responsáveis pelo esgotamento de recursos e danos ambientais, devido aos elevados consumos energéticos, à emissão de gases com efeito de estufa, à geração de resíduos sólidos e à poluição a vários níveis. É de referir que as atividades de construção são responsáveis pela exploração e consumo de cerca de 40 % dos recursos naturais, como pedra, areia, madeira e água [1]. Além disso, segundo o Programa das Nações Unidas para o Ambiente, em 2020, o setor da construção civil foi responsável por 36 % do consumo de energia e por 37 % das emissões globais de carbono relacionadas com energia [2].

De modo a alcançar as metas definidas no Acordo de Paris, deve ocorrer uma descarbonização quase completa dos edifícios e do setor da construção até 2050. Assim, devem reduzir-se as emissões ao longo do ciclo de vida de um edifício através de três medidas: redução do consumo de energia, descarbonização do fornecimento energético e considerar a redução do carbono incorporado nos materiais de construção [2].

Através das duas primeiras medidas referidas anteriormente, seria possível eliminar praticamente todas as emissões de carbono das operações de construção até 2050. Deve, ainda, considerar-se as emissões dos materiais e dos processos de construção de forma a assegurar a otimização da construção dos edifícios para soluções com baixo nível de carbono ao longo do seu ciclo de vida. Esta estratégia inclui a remodelação de edifícios existentes, procurando minimizar os impactos de carbono iniciais e adotando medidas para evitar o carbono incorporado nos materiais até ao seu fim de vida [2]. Assim, esta crescente preocupação com o ambiente e com as alterações climáticas e a, consequente, necessidade de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera provocam uma necessidade de encontrar soluções mais sustentáveis, nomeadamente através da utilização de menos recursos ou materiais mais ecológicos [1]. Deste modo, o desenvolvimento de painéis sanduíche tornou-se numa área bastante promissora para tentar colmatar estes problemas.

Além dos benefícios dos painéis sanduíche e da construção modular ao nível da sustentabilidade, estes apresentam diversas vantagens noutros setores quando comparados com a construção tradicional. O projeto e a construção de um edifício são influenciados por fatores como o custo, o tempo e a energia. Assim, o custo é equivalente ou inferior ao custo associado aos métodos tradicionais, a velocidade de execução das estruturas em obra aumenta e o tempo

de construção diminui [3]. Adicionalmente, como a pré-fabricação dos painéis sanduíche é realizada em unidades industriais com rotinas de produção e mão de obra especializada, ocorre um maior e mais eficiente controle de qualidade ao longo de todo o ciclo produtivo, desde as matérias-primas aos ensaios do produto final [4]. Finalmente, também permitem reduzir o peso da estrutura, reduzir os resíduos no local, melhorar a segurança e a saúde no trabalho e reduzir o número de trabalhadores e comerciantes necessários [3]. Assim, atualmente, no setor da construção estas estruturas sanduíche são utilizadas essencialmente em tetos e paredes [5].

Um painel sanduíche é um material compósito constituído por uma estrutura de três camadas: duas faces externas rígidas e resistentes, os laminados, separadas por um núcleo composto por um material de baixa densidade. Este pode apresentar menor rigidez e resistência e, ainda, menor durabilidade que as faces externas. Estes laminados são ligados ao núcleo através de um adesivo, de forma a obter uma transferência de carga entre os componentes [6; 7] A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de um painel sanduíche.

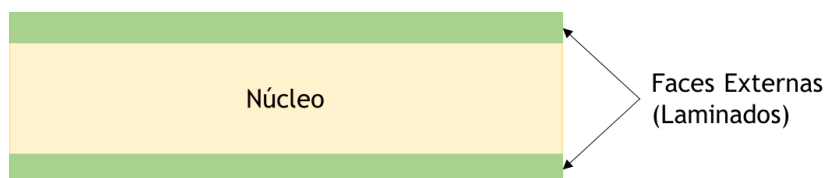


Figura 1. Representação esquemática de um painel sanduíche. Adaptado de [6].

Esta dissertação foca-se no desenvolvimento de um painel sanduíche sustentável, ou seja, um painel sanduíche que utiliza o máximo de materiais sustentáveis em detrimento dos utilizados convencionalmente, permitindo, assim, reduzir a pegada de carbono associada ao setor da construção. Além disso, as suas propriedades e o seu desempenho são comparados com um painel convencional. Caracteriza-se, ainda, os vários materiais constituintes de ambos os painéis, de modo a avaliá-los individualmente. Assim, o presente trabalho enquadra-se no projeto “iclimabuilt” - materiais funcionais e avançados de isolamento e de colheita / armazenamento de energia através de revestimentos de construções adaptados ao clima. Este projeto tem como objetivo criar um ecossistema de acesso aberto para desenvolver, ampliar e testar inovações em materiais de revestimento de edifícios e sistemas técnicos de modo a atingir o equilíbrio de edifícios de balanço energético nulo.

1.2 Apresentação da Empresa

O INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial é um Centro de Interface Tecnológico que foi criado em 1986. Realiza atividades de investigação e desenvolvimento, inovação e transferência de tecnologia, consultoria científica e tecnológica e prestação de serviços. Contribui, assim, para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral e garante o desenvolvimento pessoal e profissional dos colaboradores e o

enriquecimento do Ensino Superior. É de referir que o INEGI integra e lidera o Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica, LAETA [8].

1.3 Contributos da Autora para o Trabalho

Esta dissertação enquadra-se no projeto “iclimabuilt”, sendo a continuação de estudos prévios do mesmo. Caracterizou-se os vários constituintes de ambos os painéis sanduíche em estudo, do painel de base biológica com fibras de basalto, resina epoxídica de base biológica e núcleo de aglomerado de cortiça, e do painel convencional com fibras de vidro, resina epoxídica convencional e núcleo de espuma de XPS. Assim, procedeu-se à realização de ensaios de caracterização física (ensaios de dureza de *Barcol*, densidade, teor de fibras e volume de vazios), térmica (calorimetria diferencial de varrimento e análise termodinâmica mecânica) e mecânica (ensaios de flexão e compressão). Comparou-se, ainda, o desempenho destes painéis através de ensaios mecânicos de flexão e compressão e realizou-se uma análise de sustentabilidade aos mesmos. É de mencionar que todos os resultados obtidos foram importantes e integrados no projeto “iclimabuilt”, sendo alguns dos mesmos apresentados no artigo “*Multifunctional Fibre-Reinforced Composite Sandwiches For Eco-Friendly Buildings*” para a conferência “*The 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20)*”.

1.4 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução e enquadramento do projeto, referindo-se os principais problemas associados ao setor da construção e algumas das vantagens associadas à utilização de painéis sanduíche no mesmo.

O segundo capítulo apresenta sucintamente um enquadramento teórico necessário para a compreensão do tema desta dissertação. Refere-se a contextualização histórica dos painéis sanduíche, incluído a sua utilização no setor da construção, descrevem-se os vários constituintes dos painéis sanduíche, bem como, os materiais mais comuns. Por fim, indicam-se alguns exemplos de vários tipos de painéis e as respetivas propriedades e, ainda, algumas empresas que comercializam painéis sanduíche e respetivas aplicações.

O terceiro capítulo apresenta os principais materiais utilizados, os processos de produção realizados e os métodos de caracterização dos materiais utilizados.

O quarto capítulo foca-se na análise e discussão dos resultados obtidos e possíveis melhorias aos mesmos.

O quinto capítulo resume todas as conclusões retiradas ao longo deste trabalho.

Finalmente, o sexto capítulo apresenta uma avaliação do trabalho realizado, analisando o cumprimento dos objetivos propostos, bem como sugerindo possíveis melhorias para os problemas encontrados.

2 Contexto e Estado da Arte

2.1 Contextualização Histórica

A utilização de dois laminados com um espaçamento entre os mesmos foi introduzida por Delau por volta de 1820 [9]. Além disso, alguns historiadores referem Fairbairn como a pessoa responsável pelos primeiros registos sobre este tipo de painéis. Contudo, a ideia de construção sanduíche deverá ter ocorrido de forma independente, em diferentes épocas, a muitos outros engenheiros [10].

A primeira grande aplicação de painéis sanduíche ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, na aeronave “Mosquito”, onde se recorreu a madeira folheada como material dos laminados e madeira de balsa como núcleo [9; 11]. Assim, a madeira de balsa foi o primeiro material a ser utilizado como núcleo em construções sanduíche [12].

Na década de 1940, começaram a desenvolver-se núcleos em favo de mel para utilização na indústria aeroespacial. Antes da década de 1960, a tecnologia sanduíche era restrita a aplicações aeroespaciais devido aos elevados custos associados à produção de núcleos em favo de mel [12]. A partir desta década começou-se a explorar um crescente número de utilizações alternativas, nomeadamente, na construção, armazenamento refrigerado, indústria automóvel e construção naval. Esta época foi também considerada como o início do desenvolvimento de elementos de construção pré-fabricados para diversas aplicações [11]. Paralelamente, foram produzidos diferentes plásticos celulares adequados para utilização em núcleos. Inicialmente utilizaram-se materiais bastante macios, como o poliestireno e o poliuretano, devido às suas propriedades de isolamento. Mais tarde começou-se a produzir plásticos celulares com densidades mais elevadas, tornando as construções sanduíche bastante úteis e flexíveis [9].

Este conceito encontra-se em constante evolução a nível mundial, devido à necessidade de utilização de elementos estruturais de peso reduzido e com elevada rigidez. Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias de produção tem vindo a tornar os painéis sanduíche mais económicos e sustentáveis [5; 13].

2.2 Enquadramento no Setor da Construção

Antigamente, nas construções utilizavam-se materiais simples e disponíveis localmente, o que reduzia os custos de transporte e os impactos ambientais associados. Atualmente, a exigência associada a um melhor estilo de vida contribui para a utilização de materiais mais complexos como o betão, tijolos, cimento, aço e alumínio. Estes materiais aumentam consideravelmente os custos energéticos e os impactos ambientais [1].

Durante as várias fases do ciclo de vida de um edifício, desde a produção de materiais, construção do próprio edifício, exploração de terrenos, renovações ou reabilitações até à demolição do mesmo, ocorre a emissão de uma elevada quantidade de CO₂ para a atmosfera [14].

Assim, a crescente preocupação com questões ambientais e, consequente, necessidade de economizar materiais e recursos energéticos, tem provocado um aumento da procura de soluções sustentáveis, como a utilização de tecnologias de construção com menores quantidades de material incorporadas, das quais os painéis sanduíche são um exemplo [15].

Ao nível do setor da construção, o peso reduzido dos painéis sanduíche facilita a sua manipulação durante a montagem, reduzindo, assim, os custos de instalação e transporte. A utilização destes materiais pode acelerar a construção, nomeadamente a reconstrução em locais que sofreram catástrofes ou em locais de elevada densidade populacional, reduzindo as interrupções do tráfego [13]. Além disso, a possibilidade de alterar as várias divisões de um edifício de forma mais flexível permite aumentar o tempo de vida do mesmo. Assim, como alterar as divisões nas construções atuais implica elevados custos de intervenção, a utilização de elementos móveis como painéis sanduíche contribui para uma redução desses custos e também para uma maior flexibilidade [1]. Contudo, devido à evolução constante dos requisitos construtivos, dos materiais e das tecnologias produtivas, é necessário realizar de forma contínua investigação e desenvolvimento de algumas áreas, sendo o acesso a alguns dados sobre os mesmos limitado [7; 16].

2.3 Estrutura e Composição dos Painéis Sanduíche

Os painéis sanduíche apresentam diversas vantagens desde o seu peso, possibilidade de pré-fabricação, relação rigidez/peso, isolamento térmico ou acústico, absorção de vibrações e resistência ao impacto [6]. Estas propriedades tornam-nos excelentes materiais para aplicações na indústria aeroespacial ou marinha, na construção e arquitetura, em sistemas integrados de proteção térmica e em automóveis [16; 17].

O desempenho multifuncional dos painéis sanduíche depende essencialmente da configuração da estrutura e da escolha dos materiais utilizados [17]. Assim, existem várias combinações de laminados e núcleos, podendo variar-se a geometria, aumentando ou diminuindo as espessuras dos materiais, alterar os materiais ou os métodos de colagem e fabrico [18]. É de referir que, em aplicações estruturais, a espessura dos laminados raramente excede alguns milímetros, enquanto o núcleo pode ter mais de 50 mm. Os materiais utilizados devem ser escolhidos de acordo com alguns parâmetros, como a função da estrutura, o tempo de vida e o custo. [16].

Tal como referido anteriormente, os principais constituintes de um painel sanduíche são os laminados e o núcleo, unidos por um adesivo.

2.3.1 Laminados

Os laminados são os principais responsáveis pela resistência à tração e compressão e pela rigidez à flexão da estrutura [13]. Além disso, estes devem apresentar algumas propriedades como resistência ao impacto, ao desgaste e, ainda, resistência ambiental, nomeadamente à radiação ultravioleta e ao calor [7].

Vários materiais podem ser utilizados em aplicações aeroespaciais, automotivas e marítimas como o aço, o aço inoxidável e o alumínio. Por outro lado, os polímeros reforçados com fibras (FRP) apresentam cada vez mais um papel importante como revestimento alternativo para aplicações estruturais. É de referir que as propriedades dos revestimentos de polímeros reforçados com fibras, nomeadamente a resistência e rigidez, dependem da quantidade das fibras e da direção em que são colocadas [13].

Assim, podem utilizar-se vários tipos de fibras nos laminados dos painéis sanduíche como fibras de vidro, de carbono e aramida [13]. As primeiras são as mais utilizadas devido ao seu baixo custo em relação às seguintes, apresentando, ainda, boas propriedades mecânicas e elevada resistência ambiental. As fibras de carbono são formadas por longas cadeias moleculares carbono-carbono, obtendo-se fibras muito rígidas. Contudo, apresentam como principal desvantagem o seu elevado custo. Por outro lado, as fibras de aramida, constituídas por uma poliamida aromática de baixa densidade, apresentam um elevado módulo de elasticidade e elevada resistência. São consideradas as fibras com a maior relação resistência-peso em tensão, mas possuem uma resistência à compressão muito inferior. Estas são extremamente resistentes ao desgaste, dificultando deste modo a sua manipulação [7].

Atualmente, a utilização de fibras de basalto e de fibras de base biológica, como fibras de linho, cânhamo ou bambu, também se encontra em exploração, devido à crescente procura por soluções mais sustentáveis [13]. A produção de fibras naturais utiliza, em média, menos 60 % de energia em relação à produção de fibras de vidro, resultando em menores custos e emissões gasosas para a atmosfera. Além das vantagens referidas anteriormente, as fibras naturais são mais sustentáveis, renováveis e biodegradáveis [19].

2.3.2 Núcleo

No que diz respeito aos núcleos dos painéis sanduíche, estes podem dividir-se em dois grandes grupos: núcleos homogêneos e núcleos não homogêneos ou estruturados. Os primeiros referem-se aos núcleos de espumas, enquanto os segundos incluem os núcleos têxteis, os canelados e os favos de mel [20]. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática de alguns dos vários tipos de núcleos existentes.

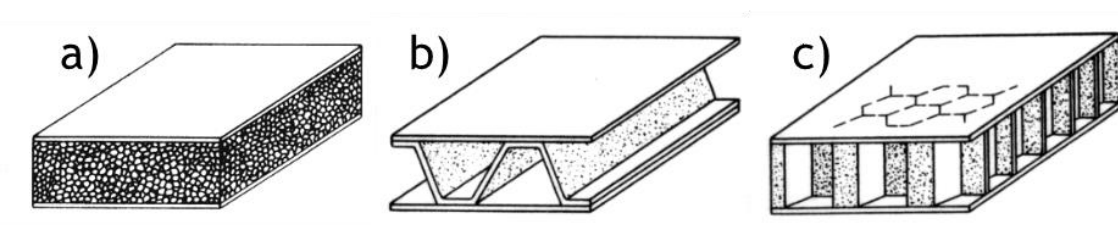


Figura 2. Representação esquemática de a) núcleos homogêneos, b) núcleos canelados e c) núcleos em favo de mel. Adaptado de [20].

2.3.2.1 Núcleos Homogêneos

Os núcleos homogêneos podem ser constituídos por lãs, espumas, diferentes tipos de plásticos expandidos, madeira de balsa ou, ainda, betão leve. Estes materiais são utilizados essencialmente em aplicações de baixo custo, como a indústria automóvel e a construção [20].

O processo de fabrico dos painéis sanduíche com este tipo de núcleo é facilitado, uma vez que a superfície é fácil de colar, a preparação e a moldagem são simples e as ligações dos laminados ao núcleo são facilmente executadas através de um adesivo [7].

Os materiais mais utilizados para a obtenção de núcleos homogêneos são as espumas de policloreto de vinila (PVC) e de poliuretano (PU). As espumas de PVC têm excelentes propriedades mecânicas, uma boa resistência química, apresentam uma baixa absorção de humidade e o seu processamento é rápido e fácil. Já as espumas de PU apresentam vantagens como maior isolamento térmico e um custo relativamente mais baixo [13; 21]. É de referir que as espumas de polipropileno (PP) têm vindo a tornar-se numa alternativa reciclável relativamente às espumas de PU. Contudo, são relativamente mais caras e apresentam propriedades mecânicas inferiores às anteriores [20]. Além destas, as espumas de polietileno tereftalato (PET) são cada vez mais utilizadas uma vez que são termoplásticas e recicláveis [13].

A madeira de balsa é considerada outro material bastante comum devido à sua leveza, boas propriedades mecânicas e em relação ao corte e, ainda, à sua contribuição para a rigidez à flexão. Além disso, melhora a resistência do painel sanduíche à indentação e ao enrugamento dos laminados [13].

2.3.2.2 Núcleos Não-Homogêneos ou Estruturados

Os núcleos não homogêneos ou estruturados são produzidos através da repetição de uma célula unitária, que pode ser uma estrutura bidimensional ou tridimensional [22].

Os núcleos em favos de mel são constituídos por células abertas colocadas perpendicularmente aos laminados de forma a desenhar uma estrutura bidimensional com geometrias triangulares, quadradas, circulares ou hexagonais [17; 22]. As boas propriedades mecânicas e a densidade

reduzida conferem a este tipo de núcleo um bom desempenho, podendo ser utilizado em aplicações de impacto a baixa velocidade e de resistência ao choque [23].

Painéis sanduíche com núcleo em favos de mel podem apresentar um melhor desempenho que os com núcleo de espuma em relação a compressão e corte com peso equivalente. Contudo, a presença de cavidades nestes núcleos reduz a capacidade dos painéis sanduíche compósitos em manter ligações mecânicas [13]. Além disso, a produção deste tipo de material de núcleo acarreta elevados custos [20].

É de referir que o material mais utilizado nos núcleos em favos de mel é o alumínio, seguido de materiais poliméricos e papel [23].

Os núcleos canelados são constituídos por uma estrutura aberta na direção x e fechada na direção y [22]. Estes núcleos podem apresentar diversas geometrias como retangulares, triangulares, trapezoidais, de arco-tangente e sinusoidais [17]. Proporcionam, ainda, uma elevada relação força/peso e podem aumentar a capacidade de resistência à deformação vertical [22].

2.3.3 Adesivos

Tal como referido anteriormente, o adesivo é utilizado para colar dois constituintes bastante diferentes, os laminados e o núcleo, devendo considerar-se alguns aspetos na escolha do mesmo, como a fadiga, a resistência, a resistência ao calor e o envelhecimento. Além disso, esta escolha deve focar-se em encontrar um adesivo que satisfaça os requisitos mecânicos da estrutura e proporcione uma boa ligação entre os vários componentes [7].

Existe uma variedade de adesivos que podem ser utilizados, nomeadamente as resinas epoxídicas, epoxídicas modificadas, de poliéster e vinílicas, o uretano-acrilato e os adesivos fenólicos ou de poliuretano [7].

As resinas epoxídicas apresentam a vantagem de poderem ser utilizadas sem a adição de solventes e curarem sem a criação de subprodutos voláteis, apresentando, ainda, um baixo volume de contração. Além disso, possuem boas propriedades mecânicas, como resistência ao corte. Contudo, podem causar problemas de saúde graves [7]. Os adesivos fenólicos têm uma excelente resistência, boas propriedades mecânicas a altas temperaturas e elevada durabilidade. Por outro lado, libertam alguma água durante o processo de cura e a sua viscosidade é bastante elevada. Por fim, o uretano-acrilato é uma resina compatível com poliésteres e vinil ésteres, esta compatibilidade torna possível a sua incorporação, nomeadamente em laminados de poliéster. Esta resina é bastante resistente e praticamente não contrai no processo de cura [7].

2.4 Processos de Produção

Existem vários processos de produção de cada um dos constituintes dos painéis sanduíche. A obtenção dos diferentes núcleos de espuma depende do material em questão. Por outro lado, para obtenção das laminados utiliza-se a moldação manual, moldação manual assistida a vácuo, infusão a vácuo, entres outros [24]. É de referir que muitos destes processos podem ser executados já com o núcleo colocado entre os laminados. Assim, no fabrico de painéis sanduíche, a junção do núcleo com os laminados pode ocorrer de diversas formas: os dois laminados podem ser unidos ao núcleo durante a cura, com ou sem a utilização de um adesivo, ou a cura dos laminados pode ocorrer separadamente, sendo estes unidos ao núcleo através de um adesivo [25].

2.4.1 Produção dos Núcleos

As espumas utilizadas na preparação de núcleos de painéis sanduíche apresentam baixa densidade e são fabricadas, maioritariamente, através de métodos convencionais [24]. Tal como referido na Secção 2.3.2.1, existe uma variedade de espumas que podem ser utilizadas em estruturas sanduíche compósitas. Assim, esta secção apresenta os processos de produção das espumas fenólicas, de poliuretano e poliestireno.

As espumas fenólicas são obtidas a partir da mistura de uma resina líquida fenólica de formaldeído com um solvente leve volátil, que atua como agente de expansão, e, ainda, com um agente de endurecimento [26].

As espumas de poliuretano são produzidas através de uma reação de isocianato com poliol, utilizando triclorofluorometano ou dióxido de carbono como agente de expansão [24]. Após a mistura dos componentes, as espumas líquidas começam a expandir rapidamente, endurecendo no final. Numa linha de produção contínua, a espuma expande essencialmente na direção vertical. Por outro lado, num processo de fabrico num molde, a espuma flui de um lado ao outro ao mesmo tempo que vai subindo verticalmente [26].

O poliestireno é um material termoplástico, podendo ser moldado através de calor. Assim, as espumas de poliestireno podem ser obtidas a partir de expansão ou extrusão [24].

A espuma de poliestireno expandido (EPS) é obtida a partir de um granulado de poliestireno que contém um agente de expansão, o pentano. As placas podem ser produzidas em linha continua ou em moldes. Estas são aquecidas com vapor quente, que provoca a expansão do granulado e volatilização do pentano que permanece encapsulado dentro das pérolas expandidas. As pérolas aderem umas às outras mas não formam uma estrutura celular totalmente fechada [26].

A espuma de poliestireno extrudido (XPS) é uma espuma mais uniforme, com uma estrutura de pequenas células fechadas e planas. Durante o fabrico, os grãos de poliestireno são fundidos e extrudidos a temperaturas e pressões elevadas, de seguida adiciona-se o agente de expansão e este é misturado, sendo a mistura, posteriormente, arrefecida. O agente de expansão mais utilizado era o triclorofluormetano mas tem-se tentado substituir por dióxido de carbono [26].

2.4.2 Produção dos Laminados

2.4.2.1 Wet Lay-Up

O método *wet lay-up* é um dos métodos mais utilizados no fabrico de painéis sanduíche com laminados compósitos. Este processo pode ser efetuado de duas formas por moldação manual ou por pulverização [13].

No processo de moldação manual coloca-se manualmente, num molde, uma quantidade apropriada de resina e as fibras que irão constituir os laminados. Com recurso a um rolo exerce-se pressão de forma a compactar o laminado e diminuir a presença de espaços vazios. De seguida, repete-se este processo até se atingir a espessura de laminado desejada [13; 27].

Uma das vantagens deste processo é o baixo custo de equipamentos. No entanto, os custos de mão de obra são elevados, o processo é demorado e a quantidade não uniforme de resina nos laminados pode afetar a qualidade do painel. É de referir que pode, ainda, aplicar-se vácuo para minimizar a formação de espaços vazios e remover excessos de resina [27].

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática do processo de moldação manual.

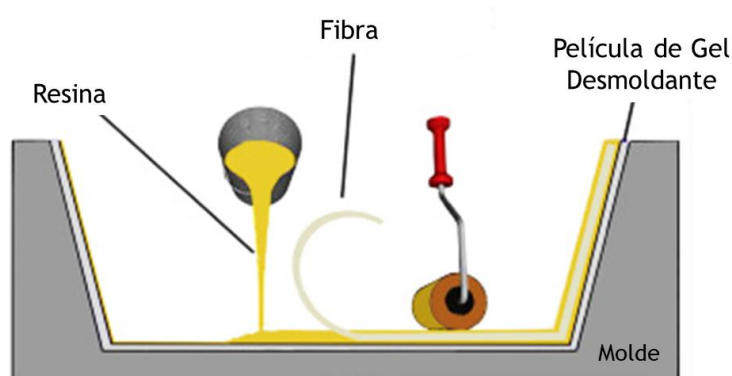


Figura 3. Representação esquemática do processo de moldação manual. Adaptado de [28].

O processo de pulverização difere do anterior na medida em que o operador pulveriza uma combinação de resina e fibras cortadas. O pulverizador corta as fibras, combinando-as com a resina e utiliza ar comprimido para depositar o compósito obtido no molde. Deste modo, ocorre uma elevada taxa de deposição de fibras e o compósito obtido apresenta propriedades mecânicas limitadas [29].

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática do processo de pulverização.

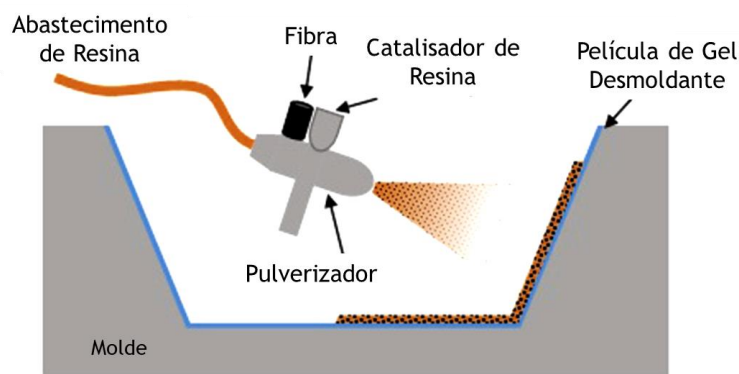


Figura 4. Representação esquemática do processo de pulverização. Adaptado de [29].

É de referir que o teor em compostos orgânicos voláteis (COV) transportados pelo ar é bastante elevado durante este tipo de processos de produção, sendo necessário considerar algumas preocupações de segurança e de saúde. Deste modo, os trabalhadores devem utilizar equipamento de proteção adequado [13].

2.4.2.2 Moldação por Transferência de Resina

A moldação por transferência de resina utiliza um molde rígido de duas faces. Em primeiro lugar, colocam-se as fibras entre as duas faces do molde e injeta-se a resina na cavidade sob pressão, normalmente entre 2 e 20 bar, sendo que esta flui e impregna as fibras. Este processo depende do gradiente de pressão, da viscosidade da resina e da natureza das fibras [29].

A utilização de um molde de duas faces permite a produção de laminados compósitos com um bom acabamento e excelentes propriedades mecânicas [29]. Embora este método seja indicado para volumes de produção elevados, a necessidade de moldes superiores e inferiores impede a produção de laminados e, consequentemente, painéis sanduíche com tamanhos muito grandes [13].

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do processo de moldação por transferência de resina.

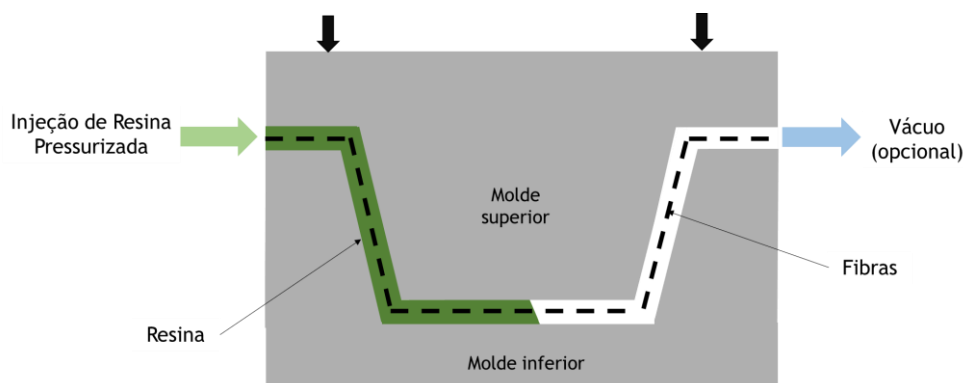


Figura 5. Representação esquemática do processo de moldação por transferência de resina. Adaptado de [29].

2.4.2.3 Infusão a Vácuo

No processo de infusão a vácuo colocam-se as fibras secas sobre o molde e um saco de vácuo sobre a pré-forma de fibras. De seguida, uma fita adesiva é utilizada em torno deste, de forma a selar e colar o saco ao molde. Adicionalmente, é necessário colocar uma bomba de vácuo para compactar a pré-forma de fibras e conduzir a resina líquida do reservatório para o molde, impregnando as mesmas. Por fim, retira-se o laminado do molde após a cura completa da resina [30].

Este processo produz compósitos com boas propriedades mecânicas e elevados rácios fibra/resina [31]. Além disso, como o processo de infusão a vácuo se inicia sem resina, qualquer excesso da mesma é sugado para fora da linha de vácuo. Deste modo, é utilizada apenas a quantidade mínima de resina necessária produzindo uma estrutura sanduíche com peso reduzido e elevada resistência. Este método é indicado para componentes sanduíche grandes em volumes de produção baixos ou médios [13].

A Figura 6 apresenta uma representação esquemática do processo de infusão a vácuo.

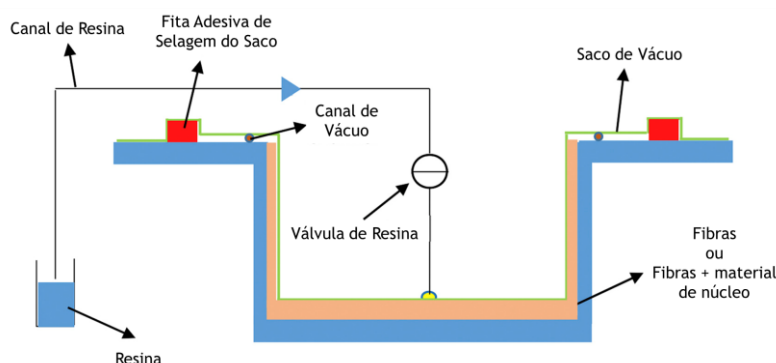


Figura 6. Representação esquemática do processo infusão a vácuo. Adaptado de [32].

2.4.2.4 Pultrusão

O processo de pultrusão é um processo contínuo de fabrico de materiais compósitos. Este processo inicia-se com a impregnação das fibras com resina, sendo o excesso removido posteriormente para garantir uma ligação adequada. De seguida, este arranjo é enviado para o molde onde os compósitos são moldados. Finalmente, estes são curados nos moldes de aquecimento antes de serem enviados para a serra de corte, de forma a se obter compósitos com as dimensões desejadas [24].

Este processo é altamente automatizado o que facilita uma produção rápida. Além disso, através deste método é possível produzir compósitos com uma elevada quantidade de fibras, reduzida mão de obra e boas propriedades estruturais e de superfície. A qualidade dos compósitos produzidos depende da viscosidade e polimerização da resina, da fração de volume de fibras, das variações de temperatura durante o processo e da velocidade da pultrusão. A

desvantagem deste processo é o facto de apenas se poderem produzir secções transversais constantes [24].

A Figura 7 apresenta uma representação esquemática do processo de pultrusão.

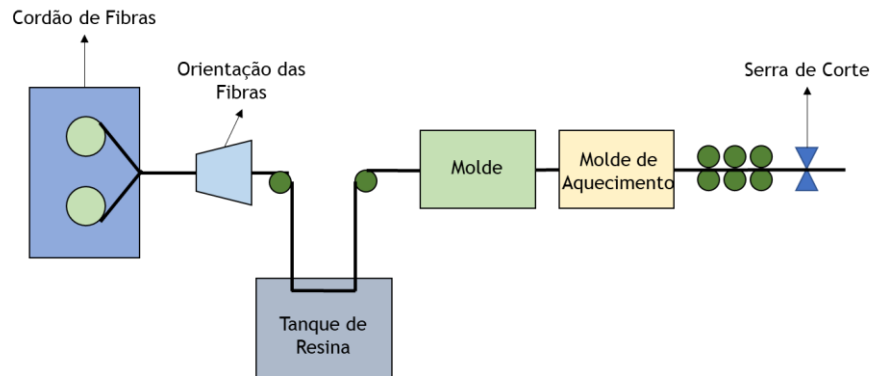


Figura 7. Representação esquemática do processo de pultrusão. Adaptado de [24].

2.5 Principais Propriedades e Aplicações dos Painéis Sanduíche

2.5.1 Painéis Sanduíche na Literatura

Tal como referido anteriormente, as propriedades dos painéis sanduíche dependem tanto da configuração da estrutura sanduíche como da escolha dos materiais utilizados e do próprio processo de produção [17]. Assim, a Tabela 1 apresenta alguns exemplos de painéis sanduíche, incluindo os vários materiais utilizados, as respetivas dimensões, o processo de produção e, ainda, as suas principais propriedades.

Tabela 1. Exemplos de painéis sanduíche apresentados na literatura.

	Tipologia das Fibras	Tipologia da Matriz	Tipologia e Dimensão do Núcleo	Outros Materiais	Dimensões do Pannel Sanduíche	Processo de Produção	Principais Propriedades
← MAIOR SUSTENTABILIDADE	Vidro	Poliéster isoftálico	Espuma de PU 90 mm de espessura	Resina de poliéster como adesivo	$2.50 \times 0.50 \times 0.10 \text{ m}^3$	Moldação manual	Rigidez e resistência significativas [33]
	Vidro	Poliéster ortoftálico	Espuma de PU 120 mm de espessura	Adesivo de poliuretano	$3,5 \times 3,5 \times 0,134 \text{ m}^3$	Infusão a Vácuo	- Rigidez e resistência significativas - Baixo desempenho acústico [34]
	Bamboo	Fenólica de formaldeído	Espuma de EPS 29 mm de espessura	Adesivo à base de poliuretano com endurecedor	$\approx 196 \times 52 \times 60 \text{ mm}^3$	Moldação por compressão	- Elevada resistência - Isolador - Elevadas propriedades de absorção de água [35]

Tabela 1 (continuação). Exemplos de painéis sanduíche apresentados na literatura.

	Tipologia das Fibras	Tipologia da Matriz	Tipologia e Dimensão do Núcleo	Outros Materiais	Dimensões do Painel Sanduíche	Processo de Produção	Principais Propriedades
← MAIOR SUSTENTABILIDADE	Vidro	Epoxídica	Aglomerado de cortiça 80 mm de espessura	Resina epoxídica como adesivo	100 × 100 × 82 mm ³	_____	• Fracas características mecânicas • Elevada resistência ao fogo [36]
	Carbono Recicladas	Polipropileno	Espuma de PET reciclado	Copolímero à base de poliéster	150 × 100 × 15,6 mm ³	Moldação por compressão a alta pressão	• Boa resistência à flexão • Boa ligação dos laminados ao núcleo [37]
	Carbono Recicladas + Linho		10 mm de espessura		150 × 100 × 16,8 mm ³		
	Laminado 1: Basalto	Epoxídica de base biológica	Cortiça	_____	500 × 900 × 8,5 mm ³	Moldação manual assistida a vácuo	• Melhor capacidade de absorção de energia em relação a painéis com laminados iguais [38]
	Laminado 2: Linho	(37 % de conteúdo biológico por massa)					
	Linho	Epoxídica	Aglomerado de cortiça 10 mm de espessura	_____	300 × 300 × 13 mm ³	Moldação a vácuo	• Baixa condutividade térmica e expansão térmica • Elevado tempo para entrar em ignição • Elevada temperatura de degradação térmica [39]

2.5.2 Mercado de Painéis Sanduíche e Respetivas Aplicações

Em 2021, o mercado de painéis sanduíche, dominado pela Ásia-Pacífico, correspondia a cerca de 2,5 mil milhões de euros, sendo de esperar que este continue a aumentar até atingir 3,9 mil milhões de euros em 2028. Este aumento deve-se, essencialmente, à rápida urbanização e industrialização no desenvolvimento de nações. Os painéis compósitos de alumínio têm sido um dos materiais de construção mais populares para utilização em revestimentos devido às suas excelentes propriedades mecânicas, o que proporciona um aumento na utilização de vários materiais de construção avançados em novos edifícios, casas e escritórios. Deste modo, a crescente procura destes painéis à base de alumínio impulsiona o mercado de painéis sanduíche [40]. Contudo, painéis sanduíche mais sustentáveis e com recurso a fibras ainda são pouco comercializados. A Tabela 2 apresenta algumas das empresas que comercializam painéis sanduíche e que contribuem para o crescimento do mercado, referindo-se os vários tipos de painéis e as suas respetivas aplicações.

Tabela 2. Empresas que comercializam painéis sanduíche e respectivas aplicações.

Empresa	Tipo de Pannel	Aplicações	Sede
FTB [41]	Laminados metálicos de aço e núcleo isolante de lã mineral	Fachadas e Tetos	Portugal
ISOPAN [42]	Laminados metálicos e núcleo de espuma de PU ou lã mineral	Paredes e Tetos	Itália
PROFHOLOD [43]	Laminados de OBS e núcleo de espuma de PU	Construção de estruturas de casas pré-fabricadas	Rússia
	Laminados metálicos de aço e espuma de Poliisocianurato (PIR)	Câmaras frigoríficas, armazéns	
ARPANEL [44]	Laminados metálicos de aço e núcleos de espuma de PU ou espuma de PIR ou lã mineral	Paredes e Tetos	Polónia
EUROPANELS [45]	Laminados de aço e núcleos de espuma de PU ou espuma de EPS ou lã mineral	Paredes e Tetos	Polónia
Italpannelli [46]	Laminados de aço ou alumínio e núcleos de poliuretano ou lã de rocha	Paredes, Tetos e Câmaras Frigoríficas	Itália
EM LIVING - THERMOCHIP [47]	Laminados de fibras de madeira e núcleo de XPS	Paredes e Tetos	Espanha

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos os vários painéis sanduíche em estudo, nomeadamente os seus materiais, os processos de produção e, ainda, algumas formulações utilizadas no desenvolvimento desta dissertação. Tal como referido anteriormente, serão comparados dois painéis distintos, um painel convencional e um painel constituído por materiais de base biológica. Assim, de modo a caracterizar e compreender o desempenho dos painéis sanduíche em estudo e dos vários materiais que os constituem, aplicaram-se os diferentes métodos de caracterização física, térmica e mecânica descritos de seguida.

3.1 Painéis Sanduíche em Estudo

3.1.1 Matérias-Primas

Na produção dos laminados do painel convencional utilizou-se uma resina epoxídica de dois componentes, a *Biresin® CR83/CH83-6* da *Sika®*, e fibras de vidro da *Castro Composites*. Como material de núcleo recorreu-se a poliestireno extrudido com 80mm de espessura da *Soprema®*. Por outro lado, na produção do painel de base biológica recorreu-se a uma resina epoxídica com 38 % de conteúdo biológico, a *SR InfuGreen 810/SD 8825.2* da *Sicomín®*, e fibras de basalto da *Castro Composites* para os laminados e a um aglomerado de cortiça expandida da *Amorim Cork Insulation®* como material do núcleo. A Tabela 3 apresenta as principais propriedades dos materiais mencionados, sendo de referir que o Anexo A apresenta as suas fichas técnicas.

Tabela 3. Propriedades dos materiais constituintes dos painéis sanduíche em estudo.

	<i>Biresin® CR83/ CH83-6</i>	Fibras de Vidro	XPS	<i>SR InfuGreen 810/SD 8825.2</i>	Fibras de Basalto	Cortiça
Resistência à tração / MPa	91	2 000	-	68	3 000	-
Módulo de elasticidade / MPa	3 200	78 000	-	2 700	87 000	-
Alongamento na rutura / %	8,4	-	-	9,1	-	-
Resistência à flexão / MPa	134	-	-	112	-	-
Módulo de elasticidade em flexão / MPa	3 360	-	-	2 700	-	-
Resistência à compressão / MPa	111	-	0,3	95	-	-
Densidade / g·cm ⁻³	1,15	2,55	0,03	1,16	2,67	0,11
Resistência ao impacto / kJ·m ⁻²	84	-	-	80	-	-
Temperatura de transição vítrea / °C	80	-	-	91	-	-
Condutividade térmica / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	-	-	0,035	-	-	0,039

É de referir que se estudou a viabilidade da utilização de resinas de pinheiro em substituição da resina epoxídica de base biológica, contudo, uma vez que estas não se apresentaram viáveis, não foram utilizadas na produção dos laminados do painel de base biológica.

3.1.2 Processo de Produção dos Laminados

Os laminados dos painéis sanduíche em estudo foram produzidos através do processo de infusão a vácuo. Em primeiro lugar, é necessário cortar as fibras nas dimensões pretendidas, considerando sempre uma margem de cerca de 50 mm. De seguida, prepara-se o molde, colocando-se fita de papel para definir a área de trabalho, na qual se aplica o desmoldante, sendo que neste caso utilizou-se o desmoldante *LOCTITE® FREKOTE 770NC*. Após a preparação do molde, corta-se os tecidos técnicos: o *Peel Ply* que tem como função ajudar na desmoldagem do laminado e permitir um acabamento superficial rugoso, a rede de infusão que auxilia no fluxo e dispersão da resina e o filme perfurado que possibilita a desmoldagem entre o *Peel Ply* e a rede de infusão, sendo este último opcional. É de referir que o *Peel Ply* e o filme perfurado devem ter dimensões iguais e semelhantes às das fibras, enquanto a rede de infusão deve ser mais curta na zona de saída para que no final da infusão a frente de resina esteja uniforme.

Posteriormente, prepara-se o saco de vácuo, sendo necessário cortar a membrana de vácuo com dimensões superiores à área de trabalho, cerca de 200 mm, evitando que esta rasgue ou seja perfurada quando se aplica o vácuo. A junta de vácuo é, então, aplicada nas extremidades da membrana de vácuo.

Após a preparação de todo o material, coloca-se as várias camadas, uma a uma, no centro da área de trabalho definida anteriormente, começando pelas fibras, seguidas do *Peel Ply*, do filme perfurado e da rede de infusão. Coloca-se, ainda, as espirais, os *T's* de ligação e os tubos de entrada e de saída. Posteriormente, é necessário fechar o saco de vácuo, colando-se a junta de vácuo na zona que se tinha definido como área de trabalho, primeiro as pontas e depois a parte central até chegar novamente às extremidades. Finalmente, prepara-se a mistura de resina com endurecedor, que deve corresponder, no mínimo, a 1,5 vezes o peso total das camadas de fibras. Começa-se, assim, a infusão, ligando o tubo de saída à bomba de vácuo e colocando o de entrada mergulhado na resina.

A Figura 8 apresenta os vários passos do processo de infusão a vácuo, em que a) corresponde à definição da área de trabalho e aplicação de desmoldante, b) à colocação das fibras e dos tecidos técnicos, c) à colocação das espirais e dos tubos de entrada e de saída, d) à colocação do saco de vácuo e, por fim, e) à aplicação do vácuo e ao decorrer do processo de infusão.

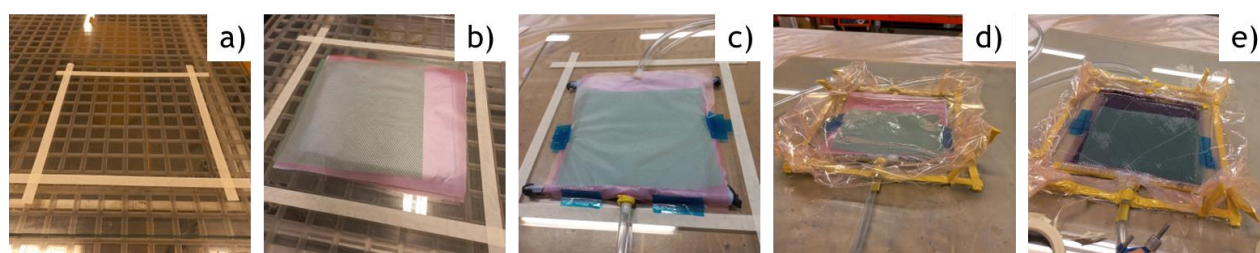


Figura 8. Várias etapas do processo de infusão a vácuo para produção dos laminados.

De forma a determinar as melhores condições a utilizar neste processo de infusão a vácuo, recorreu-se ao método de Taguchi utilizando uma matriz ortogonal L9. Este método de Desenho de Experiências (DoE) é utilizado para otimizar as condições de um determinado processo, sendo possível obter um plano de experiências correspondente a uma fração do número total de combinações possíveis das variáveis de entrada. Utilizou-se em conjunto com este método de DoE a análise de variância (ANOVA) para analisar os dados obtidos pelas matrizes ortogonais, permitindo verificar a significância e o efeito de cada fator na variação global da resposta ou característica alvo [48]. De modo a obter o plano de experiências dos ensaios a realizar, começa-se por seleccionar os principais fatores e interações a analisar, eleger os níveis adotados pelos mesmos, escolher a matriz ortogonal de Taguchi mais adequada e, por fim, atribuir os principais fatores e/ou interações às colunas dessa matriz. Este método, possibilita a planificação dos ensaios a realizar para a sua posterior caracterização e determinação da formulação ótima relativa a cada parâmetro em estudo. Assim, o método de Taguchi permite reduzir as fontes de “ruído” ou perturbações externas e diminuir consideravelmente os custos e o tempo de desenvolvimento de um produto através da realização de um menor número de experiências. Permite, ainda, identificar os fatores que mais influenciam a resposta em causa, bem como, a interação entre os mesmos [49].

Assim, estudaram-se nove combinações de condições para otimização deste processo de produção de laminados, sendo de referir que os fatores considerados foram a pressão, o tipo de fibras, a temperatura e o tempo da cura e pós-cura. É de mencionar que se utilizaram oito camadas de fibras e que após as infusões e uma cura de 24 h à temperatura ambiente (T_{amb}), se realizou uma pós-cura. A Tabela 4 apresenta as várias combinações de parâmetros utilizadas. Nas várias infusões deste estudo utilizou-se a resina convencional, uma vez que é mais barata e apresenta propriedades semelhantes à resina epoxídica de base biológica.

Tabela 4. Condições utilizadas na otimização do processo de infusão a vácuo.

	Pressão	Fibras	Pós-Cura	
			Temperatura	Tempo
1	500 mbar (constante)	Vidro	60 °C	8 h
2		Basalto	70 °C	12 h
3		Vidro + Basalto	80 °C	16 h
4	500 mbar → 800 mbar	Vidro	70 °C	16 h
5		Basalto	80 °C	8 h
6		Vidro + Basalto	60 °C	12 h
7	800 mbar → 500 mbar	Vidro	80 °C	12 h
8		Basalto	60 °C	16 h
9		Vidro + Basalto	70 °C	8 h

É de salientar que nos ensaios 4 a 9 se realizou ciclos de compressão-descompressão, antes de introduzir a resina, com as pressões mencionadas na Tabela anterior, de forma a estudar a sua influência na compactação das fibras e diminuição dos espaços vazios. Estes ciclos têm um período de 1 minuto e realizaram-se cerca de 10 ciclos em cada ensaio.

3.1.3 Processo de Produção dos Painéis Sanduíche

O painel convencional foi obtido através do processo de infusão a vácuo mencionado anteriormente. Assim, colocaram-se quatro camadas de fibras de vidro nas partes superior e inferior do núcleo de espuma de XPS, procedendo-se à introdução da resina a 500mbar. Posteriormente, definiu-se a pressão para 800 mbar, de modo a ocorrer uma melhor compactação dos laminados. Realizou-se uma cura à temperatura ambiente e uma pós-cura a 60 °C, ambas durante 16 h. Relativamente ao painel de base biológica, produziram-se os laminados pelo processo de infusão a vácuo e, de seguida, utilizou-se um adesivo, uma cola universal de contacto, para unir os mesmos ao núcleo de aglomerado de cortiça.

3.1.4 Estudo da Impermeabilização do Aglomerado de Cortiça

Dado que o aglomerado de cortiça apresenta diversos interstícios, a produção de painéis sanduíche com este núcleo através do processo de infusão a vácuo é dificultada pela infiltração de resina nos mesmos. Deste modo, é necessário encontrar uma solução que permita a impermeabilização do aglomerado de cortiça, impedindo que a resina penetre nos seus interstícios. Assim, estudou-se o efeito da adição, na superfície do núcleo, de uma camada fina de resina com parafina, aerogel de sílica ou aerogel de celulose. Optou-se por utilizar estes componentes, uma vez que apresentam boas propriedades térmicas, podendo contribuir, adicionalmente, para uma melhor capacidade isoladora do núcleo.

Recorreu-se, novamente, ao método de Taguchi utilizando uma matriz ortogonal L9 para estudar os fatores: tipo de resina, tipo de componente adicionado, percentagem de componente adicionado e cura realizada. Assim, produziram-se as misturas de resina com parafina, aerogel de sílica ou aerogel de celulose, apresentadas na Tabela 5. Aplicou-se cada uma das nove formulações na superfície de uma amostra diferente de aglomerado de cortiça e procedeu-se, posteriormente, à sua cura à temperatura e tempo indicados.

Tabela 5. Formulações utilizadas no estudo da impermeabilização do aglomerado de cortiça.

Formulação	Resina		Adição		Cura
	Tipo	Quantidade / g	Tipo	Quantidade / g	
1	<i>Biresin</i> [®] <i>CR83/CH83-6</i>	50	Parafina	0	8 h a 80 °C
2	<i>Biresin</i> [®] <i>CR83/CH83-6</i>	47,5	Aerogel de sílica	2,5	10 h a 80 °C

Tabela 5 (continuação). Formulações utilizadas no estudo da impermeabilização do aglomerado de cortiça.

Formulação	Resina		Adição		Cura
	Tipo	Quantidade / g	Tipo	Quantidade / g	
3	<i>Biresin[®]</i> <i>CR83/CH83-6</i>	45	Aerogel de celulose	5	12 h a 80 °C
4	<i>SR InfuGreen</i> <i>810/SD 8825.2</i>	47,5	Parafina	2,5	12 h a 80 °C
5	<i>SR InfuGreen</i> <i>810/SD 8825.2</i>	45	Aerogel de sílica	5	8 h a 80 °C
6	<i>SR InfuGreen</i> <i>810/SD 8825.2</i>	50	Aerogel de celulose	0	10 h a 80 °C
7	Resina de pinheiro líquida <i>Aquadhes[®]</i>	45	Parafina	5	10 h a 80 °C
8	Resina de pinheiro líquida <i>Aquadhes[®]</i>	50	Aerogel de sílica	0	12 h a 80 °C
9	Resina de pinheiro líquida <i>Aquadhes[®]</i>	47,5	Aerogel de celulose	2,5	8 h a 80 °C

3.2 Métodos de Caracterização

Nesta dissertação, recorreu-se a ensaios de caracterização física e térmica e, ainda, a ensaios mecânicos de flexão para caracterizar os laminados e as resinas e apenas a ensaios mecânicos para caracterizar os painéis sanduíche.

3.2.1 Ensaios de Caracterização Física

3.2.1.1 Ensaio de Dureza *Barcol*

Para determinar a dureza das várias amostras de resinas e laminados em estudo utilizou-se o medidor de dureza *Barcol* do modelo *HPE* da *Bareiss[®]* apresentado na Figura 9, seguindo a norma da *American Society for Testing and Materials*, ASTM D2583 [50].

No teste de dureza *Barcol*, a profundidade de penetração de um indentador fornece uma medida comparativa da dureza do material. Assim, este teste consiste na aplicação de uma força uniforme sobre o instrumento utilizado, de forma que o indentador penetre perpendicularmente a amostra e o mostrador indique o valor de dureza. É de referir que se deve evitar o deslizamento ou raspagem enquanto o indentador estiver em contacto com a amostra [50]. Este método é, frequentemente, utilizado em materiais compósitos como resinas termoendurecíveis reforçadas com fibras [51].



Figura 9. Fotografia do medidor de dureza de Barcol utilizado - modelo HPE da Bareiss®.

3.2.1.2 Ensaio de Densidade

A densidade de um sólido é uma propriedade que pode ser utilizada para verificar alterações físicas numa amostra, para indicar o grau de uniformidade entre várias amostras ou para obter a densidade média de um elemento grande.

Para a determinação da densidade das várias amostras de laminados e resinas seguiu-se a norma ASTM D792 e utilizou-se a montagem experimental apresentada na Figura 10 [52]. Assim, foi necessário pesar as várias amostras em seco, sendo estas, de seguida, imersas em água e obtida a sua massa aparente. Por fim, calculou-se a densidade das amostras (ρ), em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, através da Equação (1), onde m_{seco} corresponde à massa da amostra em seco e $m_{\text{água}}$ à massa da amostra em água, ambas em g. É de referir que o Anexo B apresenta os valores do fator de conversão para 23 °C.

$$\rho = \frac{m_{\text{seco}}}{m_{\text{seco}} - m_{\text{água}}} \times \text{fator de conversão para 23 °C} \quad (1)$$

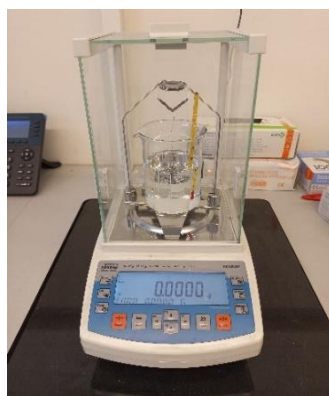


Figura 10. Fotografia da montagem experimental utilizada nos ensaios de densidade.

3.2.1.3 Ensaio de Teor de Fibras e Volume de Vazios

De forma a avaliar o teor de fibras e o volume de vazios presentes nos vários laminados em estudo, realizaram-se vários ensaios, de acordo com a norma ASTM D3171 [53]. Para tal, colocaram-se três amostras de cada tipo de laminado, devidamente pesadas em cadinhos, dentro de uma mufla, apresentada na Figura 11, durante 1 hora e 30 minutos a 625 °C.



Figura 11. Fotografia da mufla utilizada nos ensaios de teor de fibras e volume de vazios.

Posteriormente, pesaram-se novamente os cadinhos e obteve-se o teor de fibras em percentagem de massa (W_{fibra}) ou em percentagem de volume (V_{fibra}), através da Equação (2) e da Equação (3), respetivamente. É ainda possível determinar o volume de vazios (V_{vazios}) através da Equação (4), na qual V_{resina} corresponde ao teor de resina em percentagem de volume, dado pela Equação (5) .

$$W_{\text{fibra}} = \frac{m_{\text{fi}}}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

$$V_{\text{fibra}} = \frac{m_{\text{fi}}}{m_i} \times \frac{\rho_{\text{amostra}}}{\rho_{\text{fibra}}} \times 100 \quad (3)$$

$$V_{\text{vazios}} = 100 - (V_{\text{resina}} + V_{\text{fibra}}) \quad (4)$$

$$V_{\text{resina}} = \frac{m_i - m_{\text{fi}}}{m_i} \times \frac{\rho_{\text{amostra}}}{\rho_{\text{resina}}} \times 100 \quad (5)$$

Sendo m_{fi} a massa final da amostra; m_i a massa inicial da amostra; ρ_{amostra} a densidade da amostra em estudo, obtida através da Equação (1); ρ_{fibra} a densidade das fibras e, por fim, ρ_{resina} a densidade da resina e igual $1,15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

É de referir que se utilizou um ρ_{fibra} de $2,55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para as fibras de vidro, $2,67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para as de basalto e $2,61 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para as fibras dos laminados híbridos, valor correspondente à média das duas densidades anteriores, uma vez que se utilizou a mesma quantidade de cada uma das fibras.

3.2.2 Ensaios de Caraterização Térmica

3.2.2.1 Calorimetria Diferencial de Varrimento - DSC

A calorimetria diferencial de varrimento (DSC) foi utilizada, de acordo com a norma ASTM D3418, para caracterizar o comportamento térmico e as transições térmicas das diferentes amostras de resina em estudo [54]. A Figura 12 apresenta uma fotografia do calorímetro diferencial de varrimento utilizado, o modelo Q20 da TA Instruments®.



Figura 12. Fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de DSC - Modelo Q20 da TA Instruments®.

Esta técnica mede a diferença de fluxo de calor entre a amostra e uma amostra de referência, em função do tempo ou da temperatura, durante o aquecimento, arrefecimento ou em condições isotérmicas [55]. Para tal, utiliza-se um gás de purga a um caudal controlado, neste caso, o azoto a $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ [54].

A DSC é uma técnica de análise térmica versátil que pode ser utilizada para estudar diversas propriedades, como o comportamento de fusão e cristalização, a temperatura de transição vítrea, o comportamento de cura e a capacidade calorífica específica [56]. Assim, uma transição é marcada pela absorção ou libertação de energia pela amostra, resultando num pico endotérmico ou exotérmico ou, ainda, numa mudança na linha de base na curva de aquecimento ou arrefecimento. É de referir que a presença de impurezas pode afetar a temperatura de transição, principalmente quando estas tendem a formar soluções sólidas ou ser miscíveis com a fase fundida [54].

A Figura 13 apresenta exemplos das várias transições térmicas que podem ser obtidas por DSC, podendo determinar-se em a) a temperatura de transição vítrea (T_g), em b) a temperatura de fusão (T_f) e em c) a temperatura de cristalização (T_c), em °C.

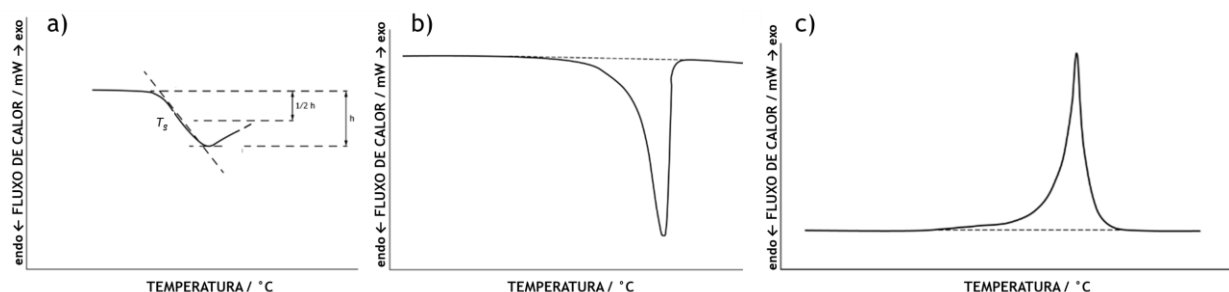


Figura 13. Exemplo das várias transições que podem ser obtidas por DSC, a) transição vítrea, b) fusão e c) cristalização. Adaptado de [54].

3.2.2.2 Análise Termomecânica Dinâmica - DMA

De modo a ensaiar as propriedades mecânicas e térmicas das várias amostras de resina e laminados em estudo, recorreu-se à análise termomecânica dinâmica (DMA), seguindo-se a

norma da *International Organization for Standardization*, ISO 6721 [57]. A Figura 14 apresenta o analisador termomecânico dinâmico utilizado, o modelo Q800 da *TA Instruments*®.

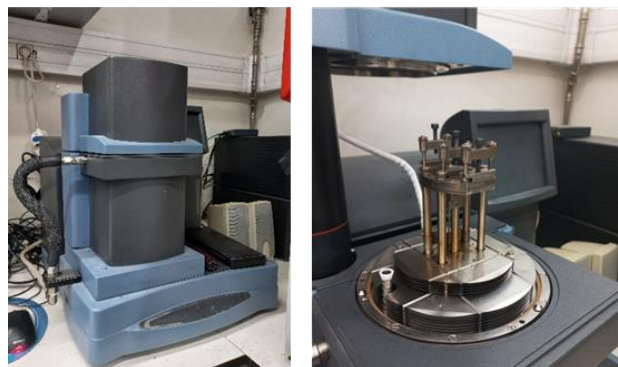


Figura 14. Fotografias do equipamento utilizado nos ensaios de DMA - Modelo Q800 da *TA Instruments*®.

Nesta técnica, uma amostra, de geometria conhecida, é colocada num sistema mecânico e fechada numa câmara de temperatura, que pode ser aquecida a uma taxa controlada. Assim, aplica-se uma tensão oscilatória na amostra, a uma frequência fixa de 1 Hz, monitorizando-se as mudanças na resposta viscoelástica do material. A configuração utilizada nos vários ensaios foi a de *single cantilever*, ou seja, um dos extremos do provete está preso num suporte enquanto o outro está a sofrer a deformação. Deste modo, é possível obter o módulo de armazenamento (E') e o de perda (E''), ambos em MPa, e, ainda, a razão entre o módulo de perda e o de armazenamento, correspondente ao fator de perda ($\tan \delta$) [57].

A Figura 15 apresenta um exemplo de um gráfico de DMA de uma das amostras analisadas. Relativamente à curva E' , o primeiro patamar corresponde à região onde o material se encontra no estado vítreo, o degrau à região viscoelástica, na qual ocorre a transição vítrea, e o segundo patamar à região borrachosa. Por outro lado, quanto maior o pico da curva E'' , maior a capacidade de absorção de energia. O pico da curva $\tan \delta$ corresponde à temperatura de transição vítrea do material.

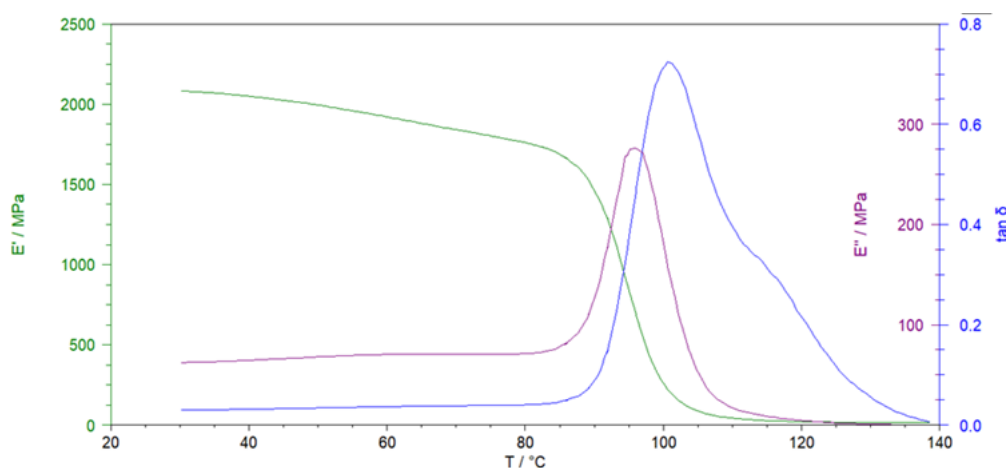


Figura 15. Exemplo de um gráfico de DMA obtido para uma das amostras em estudo.

3.2.3 Ensaios de Caracterização Mecânica

3.2.3.1 Ensaio de Flexão

Para determinar as propriedades de flexão realizou-se um teste de flexão em três pontos, recorrendo-se à norma ISO 14125 para as resinas e laminados e à norma ASTM C393/C393M para os painéis sanduíche, e ao equipamento INSTRON® 5900R com a montagem experimental apresentada na Figura 16 [58; 59].



Figura 16. Fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de flexão.

Neste teste as amostras são sujeitas a uma deformação flexural a velocidade constante até ocorrer a fratura da amostra.

É de referir que se utilizou uma célula de carga de 5 kN para as resinas e de 100 kN para os laminados, e uma velocidade de 5 mm·min⁻¹ e que, através da Equação (6), é possível calcular a tensão de flexão das amostras (σ_f), em MPa.

$$\sigma_f = \frac{3F_{\max}L}{2bh^2} \quad (6)$$

Em que $F_{\max}$ corresponde à força máxima antes da falha, em N; L à distância entre os roletes em mm, sendo 64 mm para as resinas e 40 mm para os laminados; h à espessura e b à largura da amostra, ambos em mm.

Por outro lado, para os painéis sanduíche utilizou-se uma célula de carga de 100 kN e uma velocidade de 5 mm·min⁻¹. Respeitando a norma ASTM C393/C393M é possível determinar, em MPa, a resistência máxima do núcleo ao corte (F_s^{ult}) e a tensão de flexão do laminado que sofre a carga (σ_f), recorrendo à Equação (7) e à Equação (8), respetivamente.

$$F_s^{\text{ult}} = \frac{F_{\max}}{(p + c)b} \quad (7)$$

$$\sigma_f = \frac{F_{\max}L}{2t(p + c)b} \quad (8)$$

Sendo p a espessura do painel e c a espessura do núcleo, ambos em mm; L igual a 150 mm, correspondente à distância entre os roletes e t a espessura de um laminado, em mm.

Pode, ainda, obter-se, utilizando a Equação (9), o módulo de elasticidade em flexão (E_f), em MPa, tanto para as resinas e laminados como para os painéis sanduíche em estudo [58; 60].

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (9)$$

Sendo m o declive da tangente da porção inicial reta da curva tensão-deformação, em $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$.

3.2.3.2 Ensaio de Compressão

Como o comportamento de curvatura das estruturas sanduíche pode ser afetado por qualquer imperfeição, realizaram-se ensaios de compressão dos painéis sanduíche, de acordo com a norma ASTM C364/C364M [61]. Assim, avaliou-se a adequação do processo de fabrico aos materiais em questão. A Figura 17 apresenta a montagem experimental do equipamento INSTRON® 5900R.



Figura 17. Fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de compressão.

Durante os vários ensaios cada painel é sujeito a uma força compressiva crescente paralela ao plano das faces. Assim, utilizou-se uma célula de carga de 100 kN e provetes de dimensões 80 mm × 50 mm × 50 mm. Assim, é possível determinar a resistência máxima à compressão (σ_c), em MPa, através da Equação (10), e a percentagem de descolamento dos laminados através do quociente entre a quantidade de laminado descolado e altura do laminado total do painel sanduíche.

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{2tb} \quad (10)$$

3.3 Análise de Sustentabilidade

De modo a realizar uma análise de sustentabilidade aos painéis em estudo recorreu-se ao programa GRANTA EduPack 2021 R1 e à funcionalidade EcoAudit. O programa GRANTA EduPack permite estudar materiais e processos, de modo a otimizar o projeto de um produto e estimar o impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida. Adicionalmente, utiliza modelos para prever

propriedades e custos do produto, sendo possível aprofundar conhecimentos sobre materiais através das bases de dados que apresenta. O objetivo da funcionalidade *EcoAudit* é proporcionar ao utilizador uma avaliação rápida do impacto ambiental de um produto e ajudar a encontrar soluções para o reduzir. Este objetivo é conseguido através do estudo de dois setores ambientais importantes, a energia consumida e a pegada de dióxido de carbono, e da identificação das fases de vida do produto que apresentam maior influência para estes setores [62].

Assim, em primeiro lugar, é necessário definir um nome para o produto em estudo e adicionar informações sobre os materiais, manufatura dos materiais e fim de vida do produto produzido. Deve incluir-se o tipo de componente e a quantidade do mesmo no produto final, a quantidade de material reciclado utilizada, os processos associados às matérias-primas e a percentagem de produto removida no processo secundário. Pode, ainda, referir-se os métodos de acabamento e junção, o transporte utilizado na distribuição do produto final e o seu uso. De seguida, o programa analisa os valores inseridos e determina os impactos ambientais associados ao produto em questão, ou seja, a energia consumida e a pegada de dióxido de carbono. Caso seja solicitado pode, ainda, calcular os custos do produto.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e uma discussão dos mesmos. Numa primeira fase apresentam-se os resultados para as várias resinas em estudo, de seguida para os laminados produzidos e, finalmente, para os painéis sanduíche.

4.1 Caracterização das Resinas

Tal como referido anteriormente, estudaram-se as propriedades térmicas, físicas e mecânicas das resinas *Biresin*® CR83/CH83-6 e *InfuGreen* 810/SD 8825.2.

Inicialmente, realizaram-se ensaios preliminares de DSC para determinar o intervalo de temperatura de cura ótimo das duas resinas. Obteve-se para a resina convencional um intervalo de 60 a 115 °C e para a de base biológica de 55 a 105 °C. O Apêndice A apresenta os gráficos obtidos para determinação do intervalo de cura das resinas, bem como os gráficos que auxiliaram na obtenção dos resultados de caracterização das resinas apresentados de seguida.

De seguida, prepararam-se amostras de cada resina com duas curas diferentes, a primeira uma cura de 24 h à temperatura ambiente, seguida de uma pós-cura de 60 °C durante 24 h e a segunda apenas uma cura de 60 °C durante 24 h. Assim, de modo a avaliar as propriedades térmicas destas amostras, nos ensaios de DSC realizaram-se duas rampas de aquecimento intercaladas por uma rampa de arrefecimento entre 50 e 170 °C, a uma taxa de 10 °C·min⁻¹. Para os ensaios de DMA, realizou-se um aquecimento até 150 °C para a resina de base biológica e até 170 °C para a resina epoxídica convencional, ambos a uma taxa de 10 °C·min⁻¹.

A Figura 18 apresenta uma representação gráfica do fluxo de calor em função da temperatura, obtida através de DSC, para as duas resinas em estudo com uma cura de 24 h a 60 °C, através da qual é possível determinar as temperaturas de transição vítrea.

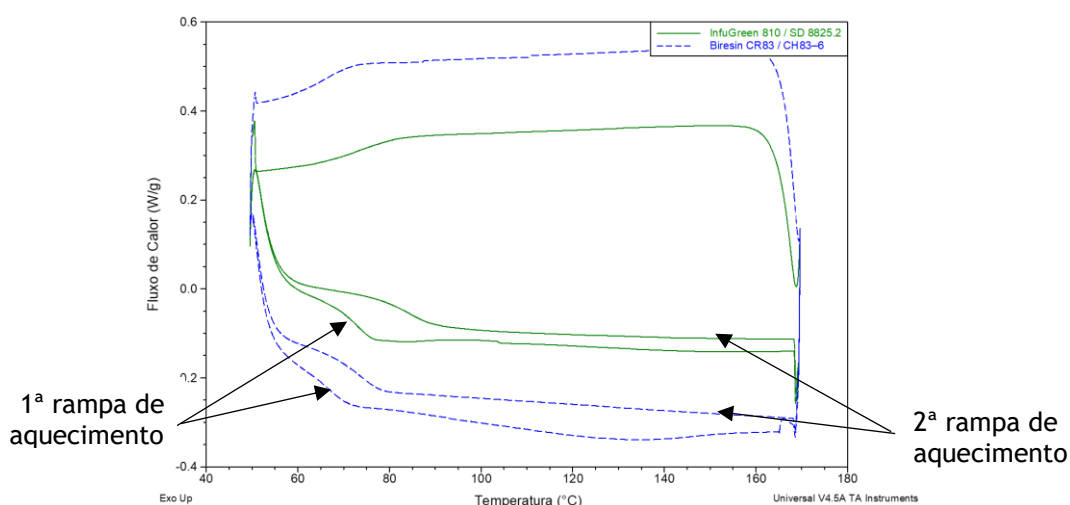


Figura 18. Representação gráfica do fluxo de calor em função da temperatura, obtida através de DSC, para as resinas epoxídicas convencional e de base biológica, a azul e a verde, respetivamente, ambas com uma cura de 24 h a 60 °C.

A Tabela 6 apresenta os resultados de DSC, DMA, densidade, calculados através da Equação (1), e dureza para as resinas *Biresin*® CR83/CH83-6 e *InfuGreen* 810/SD 8825.2, para ambas as curas em estudo.

*Tabela 6. Resultados obtidos para as propriedades térmicas e físicas das duas resinas em estudo, para ambas as curas.**

		<i>Biresin</i> ® CR83/CH83-6		<i>InfuGreen</i> 810/SD 8825.2	
	Cura	24 h a T_{amb} + 24 h a 60 °C	24 h a 60 °C	24 h a T_{amb} + 24 h a 60 °C	24 h a 60 °C
DSC	T_{g1} / °C	67,6 ± 2,3	65,6 ± 1,7	84,1 ± 1,2	72,4 ± 1,1
	T_{g2} / °C	74,2 ± 0,2	73,8 ± 0,5	88,6 ± 0,3	83,9 ± 1,3
DMA	$E' \times 10^{-3}$ / MPa	2,03 ± 0,10	2,07 ± 0,18	1,93 ± 0,03	1,66 ± 0,11
	$E'' \times 10^{-3}$ / MPa	0,26 ± 0,01	0,24 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,16 ± 0,01
	T_g / °C	83,6 ± 1,8	86,5 ± 1,5	95,3 ± 2,0	90,3 ± 0,9
Densidade / g·cm ⁻³		1,14 ± 0,01	1,15 ± 0,02	1,14 ± 0,02	1,13 ± 0,02
Dureza		22,1 ± 1,7	22,1 ± 4,2	19,2 ± 5,8	16,5 ± 2,6

* Os valores de T_{g1} e T_{g2} correspondem aos pontos de inflexão da curva de fluxo de calor em função da temperatura, para a primeira e segunda rampas de aquecimento, respetivamente; o valor de E' à média de valores na porção inicial da curva do módulo de armazenamento, aproximadamente entre 30 e 35 °C; o valor de E'' ao valor no pico da curva do módulo de perda e o valor da T_g à temperatura do pico da curva $\tan \delta$.

Através da análise da Tabela anterior, é possível concluir que os resultados obtidos para as duas resinas são bastante semelhantes entre si. As maiores diferenças residem na temperatura de transição vítrea, sendo esta superior para a resina *InfuGreen* 810/SD 8825.2. Uma vez que um valor superior de T_g se encontra associado a uma maior resistência ao aumento de temperatura, é possível constatar que a utilização da resina epoxídica de base biológica pode ser benéfica.

Além disso, dado que as curvas correspondentes às rampas de aquecimento, apresentadas na Figura 18, não se encontram sobrepostas e a T_{g2} é superior à T_{g1} , é possível concluir que a cura de ambas as resinas não foi completa, podendo otimizar-se este parâmetro.

É, ainda, de salientar que a resina *InfuGreen* 810/SD 8825.2 com uma cura de 24 h a 60 °C apresentou valores inferiores nos ensaios de DMA e dureza em relação à outra cura, ao contrário do que seria expectável. Esta alteração pode dever-se a algumas impurezas presentes nas amostras de resina escolhidas. Contudo, a utilização de qualquer uma destas resinas reproduzirá resultados bastante semelhantes, não havendo consequências negativas na substituição da resina epoxídica convencional por uma resina epoxídica de base biológica.

Adicionalmente, de forma a determinar as propriedades mecânicas das amostras de resina, recorreu-se a ensaios de flexão, considerando apenas os cinco ensaios com resultados mais

coerentes. A Tabela 7 apresenta a força máxima aplicada, a tensão de flexão, obtida através da Equação (6), e o módulo de elasticidade em flexão, obtido através da Equação (9), das resinas em estudo com as duas curas diferentes. É de referir que o declive presente na Equação (9) é determinado na região de deslocamento entre 0,1 e 0,3 mm, correspondente à zona representativa da região elástica do material.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de flexão para as resinas convencional e de base biológica em estudo, com ambas as curas.

Cura	Biresin® CR83/CH83-6		InfuGreen 810/SD 8825.2	
	24 h a T_{amb} + 24 h a 60 °C	24 h a 60 °C	24 h a T_{amb} + 24 h a 60 °C	24 h a 60 °C
F_{max} / N	137 ± 6	214 ± 23	133 ± 9	267 ± 13
σ_f / MPa	105 ± 1	113 ± 4	113 ± 3	111 ± 2
$E_f \times 10^{-3}$ / MPa	3,5 ± 0,1	3,2 ± 0,1	2,8 ± 0,7	2,9 ± 0,1

Relativamente à força máxima e tensão de flexão, os resultados destes ensaios são bastante semelhantes para as duas resinas em estudo. É de notar que os valores de tensão de flexão não apresentam alterações significativas quando se realiza uma cura diferente. Contudo, ambas as resinas apresentam melhores valores de força máxima quando se realiza a cura de 24 h a 60 °C, o que pode dever-se ao facto da cura à temperatura ambiente não ser controlada, influenciando as propriedades das resinas. Além disso, verifica-se que, com esta mesma cura, o valor obtido para a resina *InfuGreen 810/SD 8825.2* é ligeiramente superior ao obtido para a outra resina. Por outro lado, ao nível do módulo de elasticidade em flexão, os resultados são semelhantes independentemente da cura realizada, tanto para a resina *Biresin® CR83/CH83-6* como para a resina epoxidica de base biológica, contudo a primeira apresenta valores superiores.

A Figura 19 apresenta os resultados dos ensaios de flexão de duas das amostras com curas diferentes da resina *Biresin® CR83/CH83-6* em a) e da resina *InfuGreen 810/SD 8825.2* em b). Nestes gráficos é possível observar a evolução da força aplicada (F), em N, em função do deslocamento da amostra (d), em mm.

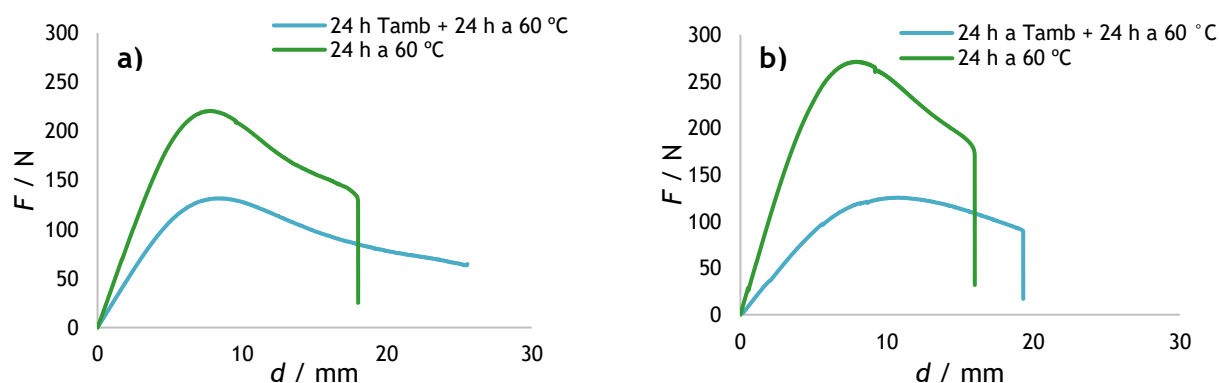


Figura 19. Resultados dos ensaios de flexão para as amostras da resina a) Biresin® CR83/CH83-6 e b) InfuGreen 810/SD 8825.2, com as duas curas em estudo.

Nestes ensaios as amostras apresentaram primeiramente uma zona linear, correspondente a deformações elásticas, ou seja, reversíveis com recuperação instantânea. Com o decorrer do tempo a deformação tornou-se viscoelástica com uma recuperação mais retardada e a partir do ponto de cedência, ponto onde a força é máxima, a deformação tornou-se irreversível. Finalmente, ocorreu a rotura na maioria das amostras, caracterizada por uma descida abrupta nos valores da força aplicada.

Assim, uma vez que ambas as resinas, de uma forma geral, apresentam propriedades físicas e mecânicas bastante semelhantes, reforça-se a ideia da possível substituição da resina epoxídica por uma resina mais sustentável.

É, ainda, de referir que se realizaram ensaios de DSC para três resinas de pinheiro diferentes, sendo uma delas líquida. Contudo, como estas resinas não se apresentaram viáveis devido, essencialmente, à sua resistência reduzida, não foram consideradas na produção dos painéis sanduíche. O Apêndice B apresenta os vários resultados de caracterização térmica obtidos para estas resinas.

4.2 Laminados

Procedeu-se, ainda, à caracterização dos laminados em estudo, o primeiro constituído por fibras de vidro e pela resina *Biresin*® CR83/CH83-6 e o segundo por fibras de basalto e pela resina *InfuGreen*/SD 8825.2. O Apêndice C apresenta os gráficos de DMA e flexão que auxiliaram na obtenção dos resultados de caracterização destes laminados.

A Tabela 8 apresenta os valores de densidade, determinados através da Equação (1), de dureza e, ainda, os resultados obtidos através de DMA para estes dois laminados.

*Tabela 8. Resultados obtidos para os laminados em estudo, relativamente às suas propriedades físicas e térmicas.**

	<i>Vidro + Biresin</i> ® CR83/CH83-6	<i>Basalto + InfuGreen</i> 810/SD 8825.2
Densidade / g·cm ⁻³	1,74 ± 0,02	1,87 ± 0,00
Dureza	57 ± 7	53 ± 8
<i>E'</i> × 10 ⁻³ / MPa	5,65 ± 0,19	6,84 ± 0,32
DMA <i>E''</i> × 10 ⁻³ / MPa	0,62 ± 0,02	0,76 ± 0,04
<i>T_g</i> / °C	91,4 ± 1,7	93,5 ± 0,4

*O valor de *E'* corresponde à média de valores na porção inicial da curva do módulo de armazenamento, aproximadamente entre 30 e 35 °C; o valor de *E''* ao valor no pico da curva do módulo de perda e o valor da *T_g* à temperatura do pico da curva tan δ .

É possível verificar que a densidade dos laminados de base biológica é ligeiramente superior à dos laminados de fibras de vidro e resina epoxídica, uma vez que as fibras de basalto são mais

densas que as de vidro, tal como se pode observar através da Figura 20. Relativamente à dureza destes laminados, esta é bastante semelhante entre os dois.

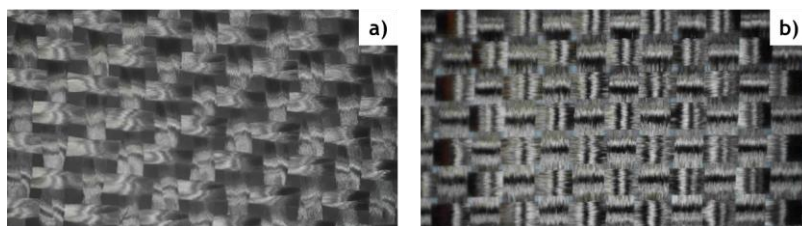


Figura 20. Fotografias das fibras utilizadas nos laminados, a) vidro e b) basalto.

Além disso, os laminados de fibras de basalto apresentam valores de módulo de armazenamento e de perda mais elevados, tal como se pode confirmar através do gráfico da Figura 21. O módulo de armazenamento superior indica uma maior resistência dos mesmos, enquanto o módulo de perda indica que os laminados de basalto apresentam uma maior capacidade de absorção de energia, apresentando, assim, propriedades amortecedoras notáveis. Relativamente à temperatura de transição vítrea, apresentada na Tabela 8 e obtida através do ponto máximo da curva $\tan \delta$, esta é bastante semelhante para os dois laminados em questão, sendo ligeiramente superior para o laminado de fibras de basalto.

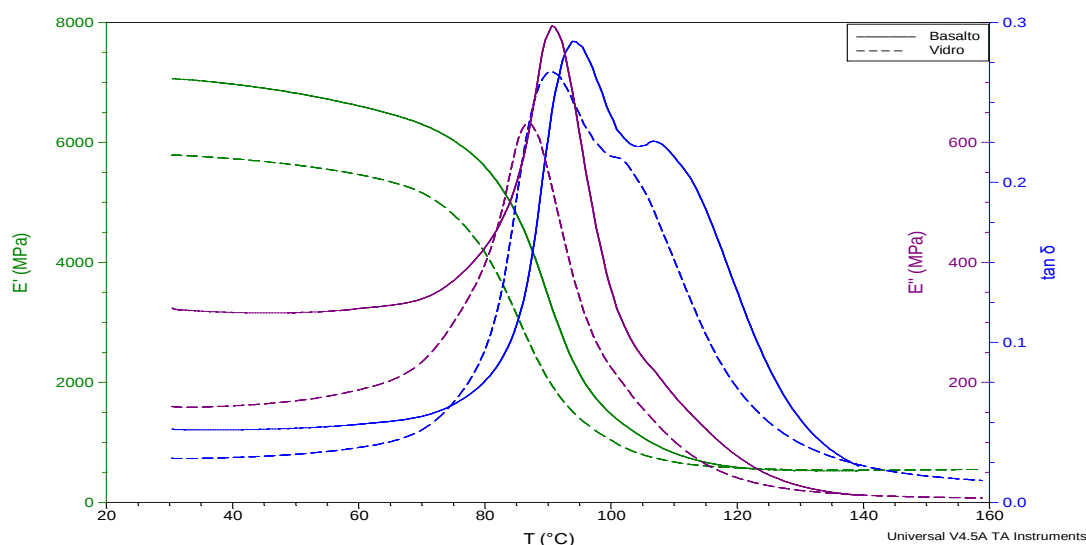


Figura 21. Representação gráfica dos resultados obtidos através de DMA para os dois laminados, de vidro com a linha a tracejado e de basalto com a linha a cheio.

Através da análise da Figura 21 é, ainda, possível concluir que ambos os laminados não apresentam uma cura completa da resina, uma vez que na curva $\tan \delta$ é possível observar um segundo pico.

Assim, é possível concluir que, de uma forma geral, os laminados com fibras de basalto e resina *InfuGreen 810/SD 8825.2* apresentam melhores propriedades físicas e térmicas, sendo, por isso, vantajosa a sua utilização em painéis sanduíche.

4.2.1 Otimização do Processo de Infusão a Vácuo

Dado que a cura da resina não foi completa e, principalmente nos laminados com fibras de basalto, as camadas de fibras não ficaram completamente impregnadas, procedeu-se a uma otimização do processo de infusão a vácuo, de acordo com as condições indicadas na Tabela 4 da Secção de Materiais e Métodos. De modo a avaliar quais as melhores condições para a realização deste processo de produção, recorreu-se a ensaios de caracterização física e de flexão, aplicando-se o método de Taguchi L9.

Em primeiro lugar, avaliaram-se as várias amostras de laminados através da sua densidade, determinada pela Equação (1), da sua dureza, do seu teor de fibras e do volume de vazios, obtidos através da Equação (3) e da Equação (4), respetivamente. Assim, a Tabela 9 apresenta os resultados de caracterização física obtidos para as várias amostras em estudo.

Tabela 9. Resultados de caracterização física obtidos para as várias amostras de laminados, cujas condições de produção se encontram na Tabela 4.

Formulação	Densidade / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Dureza	Teor de Fibras / %	Volume de Vazios / %
1	$1,75 \pm 0,07$	49 ± 7	$47,8 \pm 2,8$	$5,8 \pm 2,9$
2	$1,90 \pm 0,02$	48 ± 5	$52,0 \pm 0,7$	$3,5 \pm 0,9$
3	$1,84 \pm 0,01$	50 ± 5	$50,8 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,6$
4	$1,56 \pm 0,02$	26 ± 5	$44,0 \pm 0,6$	$18,0 \pm 1,2$
5	$1,96 \pm 0,01$	49 ± 6	$55,2 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,6$
6	$1,84 \pm 0,01$	43 ± 9	$53,5 \pm 0,2$	$7,8 \pm 0,8$
7	$1,81 \pm 0,01$	53 ± 5	$50,8 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,5$
8	$1,91 \pm 0,01$	46 ± 3	$53,3 \pm 0,4$	$4,2 \pm 0,9$
9	$1,86 \pm 0,01$	50 ± 5	$51,9 \pm 0,5$	$4,2 \pm 0,5$

Relativamente à densidade dos laminados em questão, através da análise da Tabela anterior, é possível concluir que, tal como seria expectável, a densidade dos laminados com fibras de basalto (2, 5 e 8) é superior, seguida dos laminados híbridos (3, 6 e 9) e, por fim, dos com fibras de vidro (1, 4 e 7). Além disso, é possível constatar que os valores de densidade não são afetados significativamente pela alteração das condições do processo de produção dos laminados, uma vez que são semelhantes para os laminados com o mesmo tipo de fibras. Contudo, para o conjunto de condições número 4, esta é bastante inferior às restantes, estando este valor associado ao mais reduzido teor de fibras em percentagem de volume e a um valor bastante elevado de volume de vazios. Para estas condições também a dureza é bastante inferior às restantes, sendo todas as outras bastante semelhantes e próximas de 50.

Analizando a Tabela 9, é ainda possível verificar que os valores de teor de fibras se encontram intimamente ligados às densidades, dado que teores de fibras inferiores se encontram

associados a densidades mais baixas. Assim, apesar de todos os laminados em estudo apresentarem teores próximos de 50,0 %, para um dado conjunto de condições, os valores dos ensaios correspondentes às fibras de basalto são superiores.

Finalmente, o volume de vazios é inferior para os laminados com fibras de basalto e consideravelmente superior para os laminados com fibras de vidro. É de referir que os ensaios com ciclos de compressão-descompressão de 800 a 500 mbar apresentam valores deste parâmetro bastante semelhantes entre si, independentemente do tipo de fibras utilizadas nos laminados. E, tal como referido anteriormente, o laminado 4 apresenta um valor elevado de volume de vazios, resultante de erros durante o processo de infusão a vácuo.

Assim, uma vez que valores superiores de densidade e volumes de vazios inferiores correspondem a laminados mais resistentes, conclui-se novamente que as fibras de basalto seriam as mais adequadas para utilizar nos painéis sanduíche.

Aplicando o método de Taguchi L9 e a ANOVA para os parâmetros referidos anteriormente, conclui-se, através dos resultados apresentados no Apêndice C, que a melhor combinação de condições para se obter laminados com densidades superiores e volume de vazios inferior seria realizar ciclos de compressão-descompressão de 800 mbar a 500 mbar antes da infusão, mantendo de seguida uma pressão constante de 500 mbar, utilizar fibras de basalto e, ainda, realizar uma cura à temperatura ambiente durante 24 horas e uma pós-cura durante 8 horas a 80 °C. Assim, com este processo de produção obter-se-ia um valor de densidade entre 1,98 e 2,09 g·cm⁻³ e um volume de vazios entre 0 e 0,27 %. Por outro lado, para se produzir laminados com uma dureza superior deveria apenas alterar-se a tipologia das fibras e utilizar fibras de basalto e vidro. Deste modo, os laminados apresentariam uma dureza entre 48 e 72. É de referir que a influência do tipo de fibras na dureza dos laminados é muito baixa, pelo que utilizar fibras de basalto não alteraria significativamente as propriedades dos mesmos. Relativamente ao teor de fibras em percentagem de volume, deveria optar-se por ciclos de compressão-descompressão de 500 a 800 mbar antes de se introduzir a resina e manter posteriormente uma pressão de 800 mbar, realizar uma pós-cura a 60 °C durante 8 horas e, tal como para os parâmetros de densidade e volume de vazios, utilizar fibras de basalto. Assim, realizando um processo de infusão a vácuo com estas condições, seria possível obter laminados com um teor de fibras em percentagem de volume entre 44,9 e 70,8 %. É, ainda, de salientar que para os parâmetros densidade, teor de fibras e volume de vazios o fator com mais influência é o tipo de fibra, enquanto para a dureza é a pressão.

Por fim, recorreu-se a ensaios de flexão para avaliar a resistência das várias amostras sujeitas a uma pressão em três pontos. Assim, obteve-se a $F_{\max}$ através do valor máximo da curva de força em função do deslocamento para cada um dos laminados, a σ_f através da Equação (6) e o E_f através da Equação (9). É de referir que se considerou a média dos valores dos cinco melhores

ensaios. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de flexão para as várias amostras de laminados.

Tabela 10. Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das várias amostras de laminados, cujas condições de produção se encontram na Tabela 4.

Formulação	$F_{\max} / \text{N}$	σ_f / MPa	$E_f \times 10^{-3} / \text{MPa}$
1	345 ± 59	183 ± 34	$7,8 \pm 1,9$
2	221 ± 8	134 ± 6	$6,8 \pm 1,3$
3	236 ± 14	148 ± 10	$10,4 \pm 2,0$
4	132 ± 13	50 ± 3	$5,4 \pm 0,5$
5	198 ± 16	124 ± 11	$8,3 \pm 1,4$
6	288 ± 31	174 ± 14	$10,0 \pm 0,5$
7	326 ± 31	183 ± 10	$10,3 \pm 1,1$
8	221 ± 8	130 ± 3	$8,3 \pm 0,9$
9	206 ± 11	121 ± 8	$8,1 \pm 0,9$

Através da análise da Tabela anterior, é possível concluir que os laminados que apresentam, de uma forma geral, melhores propriedades são o 1 e 7, seguidos do laminado 6, uma vez que possuem valores mais elevados para os três parâmetros em estudo. Por outro lado, o laminado 4 apresenta propriedades bastante inferiores, associadas ao elevado volume de vazios apresentado anteriormente. Relativamente aos laminados de basalto (2, 5 e 8), estes apresentam valores de força máxima, tensão de flexão e módulo de elasticidade em flexão bastante semelhantes entre si, independentemente das condições utilizadas na sua produção.

É de mencionar que, nestes ensaios de flexão, não ocorreu rotura das amostras, estas apenas fletiram de forma irreversível, com uma ligeira delaminação das camadas de fibra inferiores da amostra e uma quebra das fibras da primeira camada. A Figura 22 apresenta fotografias de uma amostra de laminado após o ensaio de flexão em três pontos.

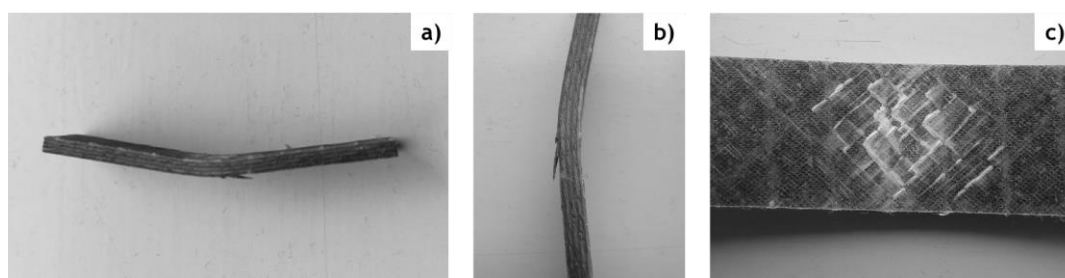


Figura 22. Amostra do laminado produzido com a condição 9 da Tabela 4 após o ensaio de flexão: a) amostra fletida, b) ligeira delaminação das camadas inferiores e c) quebra das fibras da primeira camada.

Com recurso ao método Taguchi L9 e ANOVA foi possível obter, mais uma vez, as melhores condições para o processo de produção, de modo a otimizar cada um dos parâmetros em estudo nos ensaios de flexão. Para a força máxima, conclui-se que, para se obter um valor mais

elevado, seria necessário utilizar fibras de vidro, uma pressão constante de 500 mbar, realizar uma cura de 24 h à temperatura ambiente e, ainda, uma pós-cura a 60 °C durante 12 h. Assim, obter-se-ia um valor de $F_{\max}$ entre 317 e 430 N. Relativamente à tensão de flexão, todos os parâmetros se mantêm iguais aos anteriores, à exceção do tipo de fibras, sendo que se deveria utilizar fibras híbridas, ou seja, basalto e vidro, resultando num valor de σ_f entre 183 e 243 MPa. Finalmente, para o módulo de elasticidade em flexão, também se deveria utilizar fibras de basalto e vidro, mas com ciclos de compressão-descompressão de 800 a 500 mbar e uma pós-cura de 80 °C durante 12 h. Com estas condições o valor de E_f dos laminados produzidos estaria entre $9,3 \times 10^3$ e $14,7 \times 10^3$ MPa. Adicionalmente, é de referir que, ao contrário das propriedades físicas, o fator com mais influência nas propriedades mecânicas é a temperatura, tendo o tipo de fibras uma influência bastante reduzida, tanto na força máxima como na tensão de flexão.

Em suma, dependendo da propriedade em estudo, as condições para obtenção de laminados com melhores resultados variam significativamente. Deste modo, após definir quais os parâmetros mais importantes para os laminados em questão, selecionar-se-iam as condições a utilizar no processo de infusão a vácuo.

4.3 Painéis Sanduíche

Numa primeira fase, estudaram-se as propriedades mecânicas e o desempenho dos painéis sanduíche através de ensaios de flexão e de compressão. O Apêndice D apresenta os gráficos obtidos nestes ensaios para os vários provetes testados. É de referir que o final dos ensaios de flexão ocorreu quando a montagem experimental tocou na amostra, o que poderá ter influenciado os resultados obtidos, uma vez que os ensaios não foram completos. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos tanto para o painel convencional, produzido por infusão a vácuo, como para o painel de base biológica.

Tabela 11. Resultados obtidos nos ensaios de flexão e de compressão para os dois painéis sanduíche em estudo.

Teste	Propriedade	Painel Convencional	Painel de Base Biológica
Flexão*	$F_{f,\max} / \text{N}$	$1\,207 \pm 59$	593 ± 40
	$F_s^{\text{ult}} / \text{MPa}$	$0,102 \pm 0,003$	$0,047 \pm 0,002$
	σ_f / MPa	$5,92 \pm 1,72$	$2,45 \pm 0,23$
	E_f / MPa	$3,66 \pm 0,34$	$0,89 \pm 0,09$
Compressão	$F_{c,\max} / \text{N}$	746 ± 127	583 ± 201
	σ_c / MPa	$5,05 \pm 0,68$	$3,52 \pm 1,45$
	Descolamento / %	48 ± 4	60 ± 29

* Os ensaios de flexão foram interrompidos antes da rutura, uma vez que quando as amostras atingiam alguma deformação começavam a tocar na montagem experimental devido às limitações da mesma.

O painel de base biológica apresenta propriedades mecânicas bastante inferiores ao painel convencional, tal como se pode observar através dos resultados dos ensaios apresentados na Tabela anterior. Assim, considerando este tipo de ensaios, a utilização de materiais tradicionais permite a obtenção de painéis mais resistentes.

É de referir que nos ensaios de flexão, as falhas se deram, essencialmente, através de delaminação laminado-núcleo em ambas as faces, para os dois painéis em estudo. A Figura 23 apresenta fotografias de uma amostra de um painel convencional e de um painel de base biológica, após os ensaios de flexão.

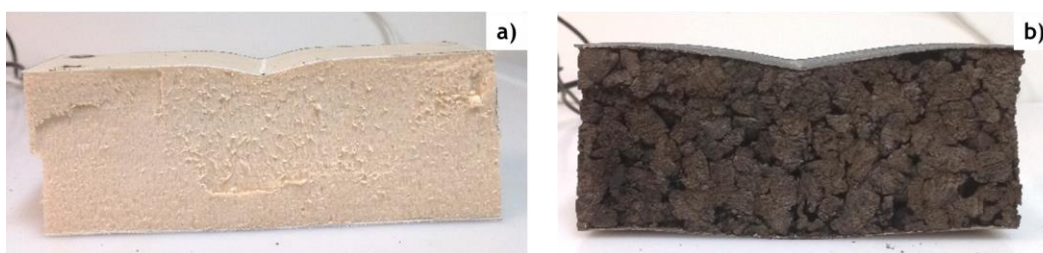


Figura 23. Amostras de painéis sanduíche a) convencional e b) sustentável, após os ensaios de flexão.

Nos ensaios de compressão, o descolamento dos laminados no painel convencional ocorreu ao longo da interface laminados - núcleo, enquanto no painel sanduíche de base biológica ocorreu descolamento parcial acompanhado de algumas fendas no núcleo, uma vez que a superfície da cortiça é irregular, proporcionando uma melhor adesão entre os laminados e o núcleo. A Figura 24 apresenta fotografias dos painéis sanduíche em estudo após os ensaios de compressão.

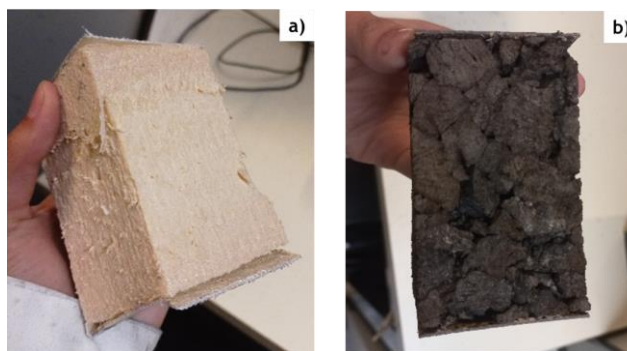


Figura 24. Amostras de painéis sanduíche a) convencional e b) sustentável, após os ensaios de compressão.

4.3.1 Estudo da Impermeabilização do Aglomerado de Cortiça

De modo a impedir a absorção de resina nos interstícios do aglomerado de cortiça ou, ainda, melhorar a aderência dos laminados ao núcleo e tentar evitar a criação de fendas no mesmo, procedeu-se a um estudo da impermeabilização do aglomerado de cortiça, utilizando as formulações apresentadas na Tabela 5 da Secção de Materiais e Métodos. A Figura 25 apresenta as amostras de cortiça com cada uma das nove formulações em questão.

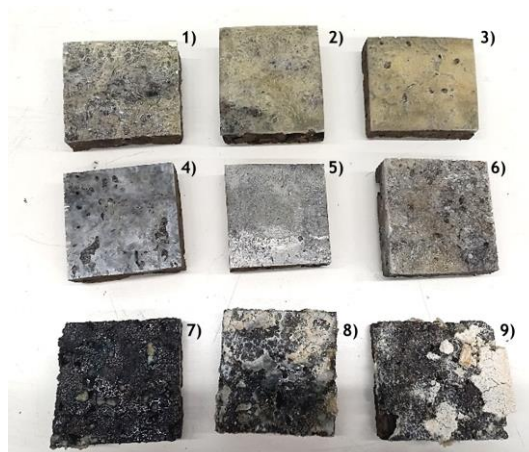


Figura 25. Amostras de aglomerado de cortiça com as várias formulações da Tabela 5.

Assim, caracterizaram-se as várias formulações de misturas de resina com parafina, aerogel de sílica ou aerogel de celulose, apresentadas na Tabela 5, através de DMA e DSC e determinou-se, ainda, a sua densidade, através da Equação (1). A Tabela 12 apresenta os resultados de caracterização obtidos para cada uma das formulações em estudo.

Tabela 12. Resultados obtidos para as diferentes formulações de misturas de resina e parafina, aerogel de sílica ou aerogel de celulose apresentadas na Tabela 5.*

Formulação	DMA			DSC		Densidade / g·cm ⁻³
	$E' \times 10^{-3} / \text{MPa}$	$E'' \times 10^{-3} / \text{MPa}$	$T_g / ^\circ\text{C}$	$T_{g1} / ^\circ\text{C}$	$T_{g2} / ^\circ\text{C}$	
1	$1,32 \pm 0,22$	$0,21 \pm 0,02$	$91,9 \pm 1,4$	$76,6 \pm 1,8$	$83,6 \pm 1,2$	$1,11 \pm 0,00$
2	$1,29 \pm 0,14$	$0,15 \pm 0,03$	$84,5 \pm 1,8$	$58,1 \pm 0,1$	$79,1 \pm 0,3$	$1,15 \pm 0,00$
3	$1,94 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,02$	$94,3 \pm 1,2$	$60,7 \pm 1,0$	$84,2 \pm 0,0$	$1,08 \pm 0,01$
4	$1,28 \pm 0,07$	$0,16 \pm 0,00$	$88,6 \pm 0,3$	$58,0 \pm 2,1$	$72,4 \pm 1,0$	$1,10 \pm 0,00$
5	$0,43 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,00$	$82,9 \pm 1,2$	$58,7 \pm 0,0$	$85,8 \pm 2,8$	$0,65 \pm 0,00$
6	**	**	**	$69,7 \pm 0,4$	$80,8 \pm 1,7$	$0,90 \pm 0,00$
7	***	***	***	$95,7 \pm 3,1$	$71,7 \pm 0,2$	***
8	***	***	***	$96,1 \pm 3,5$	$74,6 \pm 3,1$	***
9	***	***	***	$104,9 \pm 0,7$	$69,1 \pm 2,9$	***

* Os valores de T_{g1} e T_{g2} correspondem aos pontos de inflexão da curva de fluxo de calor em função da temperatura, para a primeira e segunda rampas de aquecimento, respetivamente; o valor de E' à média de valores na porção inicial da curva do módulo de armazenamento, aproximadamente entre 30 e 35 °C; o valor de E'' ao valor no pico da curva do módulo de perda e o valor da T_g à temperatura do pico da curva $\tan \delta$.

** Não foi possível realizar os ensaios de DMA para esta formulação devido a problemas técnicos com o equipamento.

*** A resina de pinheiro líquida destas formulações não apresenta resistência suficiente para se obter provetes para a realização de ensaios de DMA e de densidade.

Tal como referido anteriormente, a resina de pinheiro não apresenta resistência suficiente para se obter provetes que possam ser utilizados em DMA ou na medição da densidade. Desta forma, para as formulações que contêm resina de pinheiro, formulações 7 a 9, apenas se realizaram ensaios de DSC, de modo a avaliar as suas propriedades térmicas após a cura. A adição do aerogel de sílica diminui os módulos de armazenamento e de perda, bem como a densidade das amostras. Assim, a amostra 5 apresenta valores de E' e E'' bastante inferiores aos restantes e, por outro lado, a amostra 3 apresenta valores ligeiramente superiores às restantes. Adicionalmente, é possível concluir que a densidade das amostras 5 e 6 é bastante inferior às restantes amostras.

Através do método de Taguchi L9 e da ANOVA, considerando os ensaios de DSC e os resultados apresentados no Apêndice D, foi possível concluir que a combinação de parâmetros que proporcionava melhores propriedades térmicas seria utilizar a resina *Biresin*® CR83/CH83-6 com adição de 10 % de aerogel de sílica e realizar uma cura de 8 h a 80 °C. Como não foi possível realizar ensaios de DMA e de densidade para as amostras 7 a 9, não se aplicou o DoE para retirar as respetivas conclusões relativamente às melhores combinações a utilizar para estes parâmetros.

É de referir que as amostras de cortiça absorveram alguma da resina colocada, tal como se pode observar através da Figura 26. Deste modo, para que a impermeabilização do aglomerado de cortiça fosse melhor, seria necessário otimizar a quantidade de resina e parafina, aerogel de sílica ou de celulose utilizada.

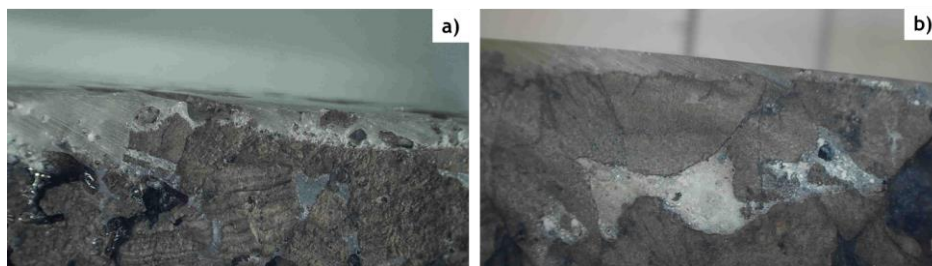


Figura 26. Amostras de cortiça com absorção da formulação 1 em a) e 2 em b), nos espaços intersticiais do painel aglomerado.

É de mencionar que o Apêndice D apresenta os vários gráficos de DMA e DSC para as várias misturas de resina e parafina, aerogel de sílica ou aerogel de celulose em estudo.

4.4 Análise de Sustentabilidade

Finalmente, é importante avaliar a sustentabilidade e os custos associados aos painéis em estudo. Assim, recorreu-se ao programa *GRANTA EduPack 2021 R1* e à funcionalidade *EcoAudit* para avaliar estes parâmetros. É de referir que este programa não apresenta a opção de resina epoxídica de base biológica nem o núcleo XPS, pelo que se optou por selecionar materiais com propriedades semelhantes, uma resina epoxídica convencional e a espuma EPS,

respetivamente. Assim, o efeito da resina não será avaliado, pelo que os resultados do painel de base biológica poderiam ser melhores. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos relativos à sustentabilidade dos dois painéis sanduíche em estudo, mais concretamente a energia consumida, a pegada de dióxido de carbono e o custo associado.

Tabela 13. Resultados relativos à sustentabilidade dos painéis convencional e de base biológica, analisando a influência das fibras e do núcleo utilizados.

	Painel Convencional	Painel de Base Biológica
Energia / MJ	323	169
Pegada de Dióxido de Carbono / kg CO ₂	15,3	8,69
Custo / €	11,4	26,7

Através da Tabela anterior, é possível concluir que o painel convencional acarreta maiores impactes ambientais, associados essencialmente ao consumo de energia e à sua pegada de carbono. Por outro lado, o painel de base biológica, apesar das consequências no meio ambiente serem bastante mais reduzidas, apresenta um custo associado mais elevado, sendo por isso uma opção menos rentável e, consequentemente, menos procurada no setor da construção civil.

Adicionalmente, realizou-se uma análise de sustentabilidade aos vários laminados produzidos durante a otimização do processo de infusão a vácuo com as condições apresentadas na Tabela 4. A Tabela 14 apresenta os valores obtidos, através do programa *GRANTA EduPack 2021 R1*, considerando a massa total de laminado produzida e a aproveitada após a maquinação para obtenção das amostras a analisar e, ainda, os teores de fibras e de resina em percentagem de massa, apresentados na Tabela E.1 do Apêndice E. É de referir que este estudo de sustentabilidade foi realizado para um tempo de vida de 1 ano e que apenas se está a avaliar os materiais utilizados, mais concretamente as fibras, e não as condições de produção.

Tabela 14. Valores obtidos para a análise de sustentabilidade dos laminados produzidos com as condições da Tabela 4, avaliando a influência das fibras utilizadas.

Formulação	Energia / MJ	Pegada de CO ₂ / kg CO ₂	Custo / €
1	17,9	1,03	0,79
2	9,4	0,53	0,79
3	13,6	0,78	0,84
4	16,7	0,96	0,76
5	8,6	0,49	0,77
6	12,3	0,70	0,81
7	17,8	1,02	0,79
8	8,5	0,48	0,75
9	13,3	0,76	0,83

Em primeiro lugar, tal como seria expectável os valores obtidos são bastante semelhantes para o mesmo tipo de laminados, uma vez que o programa apenas considera os materiais utilizados. Deste modo, a análise será realizada comparando apenas a influência do tipo de fibras dos laminados em estudo.

Através da Tabela anterior, é possível constatar que os laminados com fibra de basalto, tal como seria expectável, apresentam impactes ambientais consideravelmente mais baixos, tanto ao nível de consumo energético como de pegada ecológica. Os laminados com fibras híbridas de vidro e basalto apresentam valores intermédios. Finalmente, os laminados de fibras de vidro apresentam impactes ambientais mais elevados, sendo estes cerca de 48 a 53 % superiores aos associados aos laminados com fibras de basalto e cerca de 24 a 26 % superiores em relação aos laminados híbridos, tanto ao nível energético como da pegada de dióxido de carbono. Relativamente ao custo, este é bastante semelhante para os três tipos de laminados com fibras diferentes em estudo, podendo considerar-se ligeiramente mais elevado para os laminados híbridos.

5 Conclusões

Os elevados consumos energéticos, a emissão de gases com efeito de estufa, a geração de resíduos sólidos e a poluição a vários níveis tornam o setor da construção um dos principais responsáveis pelo esgotamento de recursos e danos ambientais do planeta. Assim, é cada vez mais importante encontrar soluções de materiais e processos mais sustentáveis e com menor pegada ecológica, de forma a diminuir a contribuição deste setor para as alterações climáticas. Deste modo, a utilização de painéis sanduíche de base biológica torna-se numa solução vantajosa, pelo que se desenvolveu e caracterizou um painel com núcleo de aglomerado de cortiça e laminados de fibra de basalto e resina epoxídica de base biológica. Caracterizou-se, ainda, os vários materiais que o constituem e comparou-se o seu desempenho com o de um painel convencional com núcleo de espuma de XPS e laminados de fibra de vidro e resina epoxídica convencional.

Primeiramente, avaliou-se, através de ensaios de caracterização física, térmica e mecânica, a possível substituição de uma resina epoxídica convencional, a *Biresin® CR83/CH83-6*, por uma de base biológica, a *InfuGreen/SD 8825.2*, concluindo-se que a utilização da segunda poderia ser benéfica. Os resultados obtidos foram bastante semelhantes para as duas resinas, sendo a temperatura de transição vítrea ligeiramente superior para a resina epoxídica de base biológica, favorecendo-a. Ao nível das curas estudadas, uma cura de 60 °C durante 24 h foi a que produziu melhores propriedades.

De seguida, caracterizou-se dois laminados diferentes: um convencional, utilizando a resina *Biresin® CR83/CH83-6* e fibras de vidro, e outro com materiais biológicos, fibras de basalto e a resina de base biológica. Os segundos apresentaram propriedades físicas e térmicas superiores, comprovando, novamente, as vantagens da utilização de materiais mais sustentáveis.

Adicionalmente, realizou-se uma otimização do processo de infusão a vácuo para produção dos laminados, aplicando-se o DoE, de forma a determinar as condições que produzem laminados com melhores propriedades. Concluiu-se que, de um modo geral, estas condições variam significativamente dependendo da propriedade em estudo, sendo necessário selecionar o parâmetro mais importante para o problema em questão e, conseqüentemente, as condições a utilizar no processo de produção. Para os parâmetros densidade, teor de fibras e volume de vazios o fator com mais influência é o tipo de fibra, enquanto para a dureza é a pressão. Por outro lado, relativamente à caracterização mecânica, o fator que apresentou maior influência foi a temperatura, tendo o tipo de fibras uma influência bastante reduzida, tanto na força máxima como na tensão de flexão.

Posteriormente, estudou-se o desempenho dos painéis convencional e de base biológica, concluindo-se que o segundo apresentava propriedades mecânicas inferiores. Ao nível dos

ensaios de flexão apenas se podem retirar conclusões concretas acerca do tipo de falha, tendo esta sido, essencialmente, delaminação laminado - núcleo no laminado superior, para os dois painéis sanduíche em estudo. Relativamente aos ensaios de compressão, o descolamento dos laminados do painel convencional ocorreu maioritariamente ao longo da interface laminado-núcleo. Por outro lado, no painel de base biológica ocorreu descolamento parcial dos laminados acompanhado de algumas fendas no núcleo, uma vez que a adesão entre os componentes é melhor devido à rugosidade do núcleo.

De forma complementar, de modo a tentar encontrar uma solução que permita a impermeabilização do aglomerado de cortiça e impedir que a resina penetre nos seus interstícios, estudou-se o efeito da adição, na superfície do núcleo, de uma camada fina de uma mistura de resina com parafina, aerogel de sílica ou aerogel de celulose. Verificou-se que as amostras de aglomerado de cortiça absorveram as formulações colocadas, sendo necessário otimizar a quantidade de resina e de componente adicionados.

Finalmente, avaliou-se a sustentabilidade e custo dos painéis sanduíche em estudo. Concluiu-se que o painel convencional acarreta maiores impactes ambientais, associados essencialmente ao consumo de energia e à sua pegada de dióxido de carbono. Contudo, o painel de base biológica apresenta um custo associado mais elevado, sendo por isso uma opção menos rentável e menos procurada no setor da construção civil.

Em suma, o painel de base biológica em estudo é mais sustentável que o utilizado convencionalmente, no entanto o seu custo associado é superior e as suas propriedades mecânicas inferiores. Assim, é necessário otimizar as condições de produção ou encontrar soluções que melhorem os problemas encontrados ao nível das propriedades mecânicas do mesmo, de forma a ser possível ocorrer uma substituição dos painéis sanduíche convencionais no setor da construção.

6 Avaliação do Trabalho Realizado

6.1 Objetivos Realizados

Tal como referido anteriormente, esta dissertação foca-se no desenvolvimento de um painel sanduíche que utilize o máximo de materiais sustentáveis em detrimento dos utilizados convencionalmente. Este objetivo foi concluído, uma vez que se estudou o desempenho de um painel com um núcleo de aglomerado de cortiça e com laminados de fibras de basalto e resina epoxídica de base biológica com 38 % de conteúdo biológico. Além disso, comparou-se as suas propriedades mecânicas com as de um painel convencional e, tal como estipulado, estudaram-se as várias propriedades físicas, térmicas e mecânicas de cada um dos constituintes dos dois painéis em estudo.

6.2 Limitações e Trabalhos Futuros

As limitações encontradas ao longo deste trabalho deveram-se, essencialmente, à ocorrência de avarias nos equipamentos e outras limitações técnicas, resultantes das obras a decorrer na instituição de acolhimento. Este facto limitou a realização de alguns ensaios de DMA e DSC previstos, e, consequentemente, as conclusões associadas aos mesmos.

Relativamente a trabalhos futuros, deve, em primeiro lugar, realizar-se ensaios de DSC ou DMA aos laminados produzidos de forma a determinar se a cura dos mesmos foi ou não completa. Uma otimização da cura poderia contribuir para a melhoria das propriedades finais dos laminados. É, ainda, de referir que o volume de vazios é um fator bastante relevante nas propriedades mecânicas dos laminados, devendo, desta forma, tentar reduzir-se ao mínimo este valor. Ao otimizar o processo de produção de forma a melhorar os pontos mencionados, dado que, de acordo com a literatura, as fibras de basalto possuem melhores propriedades mecânicas, poderá, num futuro próximo, conseguir utilizar-se uma menor quantidade deste tipo de fibras para obter resultados semelhantes às de vidro. Assim, reduzir-se-ia o custo do produto final, tornando esta solução sustentável mais apelativa para o mercado.

Deve, ainda, proceder-se à produção dos laminados com as condições determinadas através do método Taguchi e avaliar se estes apresentam melhores propriedades. Após se verificar se as condições obtidas produzem efetivamente laminados com melhores propriedades, poderá tentar produzir-se novos painéis sanduíche aplicando as melhores condições encontradas. Outra sugestão é utilizar núcleos com uma espessura inferior, de modo a ser possível realizar ensaios de flexão em três pontos e avaliar as propriedades associadas.

Para melhorar o processo de infusão a vácuo, poderá tentar-se diminuir a rede de infusão, de forma que o fluxo da resina seja mais lento numa maior porção de laminado e,

consequentemente, ocorra uma melhor impregnação das fibras e os laminados contenham uma menor quantidade de espaços vazios. Deve, ainda, retirar-se sempre as bolhas de ar da resina antes do processo e evitar que estas se formem quando se mergulha o tubo na mesma.

De forma a tornar a solução convencional mais sustentável e com melhores propriedades, poderia produzir-se painéis com uma combinação de laminados constituídos por fibras de basalto e resina de base biológica com um núcleo de XPS. Esta seria uma solução intermédia a nível de sustentabilidade, contudo poderia apresentar melhores propriedades que os painéis sanduíche estudados, uma vez que os laminados de base biológica apresentaram melhores propriedades em comparação com os laminados de fibras de vidro.

Uma outra sugestão passa por utilizar outras metodologias ou ferramentas de análise de sustentabilidade, uma vez que o programa utilizado possui como limitação o facto de não ter na sua base de dados o impacto de resinas epoxídicas de base biológica. Deste modo, utilizou-se a mesma base que para a resina epoxídica convencional, aumentando o impacte ambiental da solução de base biológica.

6.3 Apreciação Final

A realização desta dissertação foi um processo desafiante e um pouco frustrante que me ajudou no desenvolvimento de várias competências pessoais como a comunicação, gestão de tempo e, mais importante, resiliência. Foi bastante enriquecedor trabalhar com pessoas que sempre me ajudaram, mas que ao mesmo tempo me proporcionaram bastante autonomia.

No decorrer deste trabalho adquiri diversos conhecimentos ao nível de materiais e aplicação de metodologias para caracterização dos mesmos e fiquei, ainda, a conhecer um pouco das vantagens e inúmeras possibilidades de utilização de painéis sanduíche no sector da construção. Além disso, penso que o mesmo foi um contributo importante para a continuação das investigações do projeto “iclimabuilt”.

7 Referências

- [1] Mateus, R., Neiva, S., Bragança, L., Mendonça, P., & Macieira, M. (2013). Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls - Comparison with conventional technologies. *Building and Environment*, 67, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.012>
- [2] United Nations Environment Programme. (2021). *2021 Global status report for buildings and construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector* (Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector). <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>
- [3] Kozlovská, M., Kaleja, P., & Struková, Z. (2014). Sustainable Construction Technology Based on Building Modules. *Advanced Materials Research*, 1041, 231-234. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.231>
- [4] Couto, A. B., & Couto, J. P. (2007). *Vantagens Produtivas e Ambientais da Pré-Fabricação* Conferências de Engenharia "Engenharias'07", Covilhã, Portugal. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/8520>
- [5] Pan, L., & Han, C. (2012). Study on the New-Style Building Materials in Civil Engineering – Architectural Sandwich Panel and its Application. *Advanced Materials Research*, 568, 112-115. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.568.112>
- [6] Jackson, K. P., Allwood, J. M., & Landert, M. (2008). Incremental forming of sandwich panels. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1), 290-303. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.117>
- [7] Zenkert, D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1366187/FULLTEXT01.pdf>
- [8] INEGI. (2022). *Sobre o INEGI*. Acedido a 13 de março em <http://www.inegi.pt/pt/sobre-o-inegi/o-inegi/>
- [9] DIAB. (2003). Sandwich concept. In *DIAB Sandwich Handbook* (pp. 52).
- [10] Allen, H. G. (1969). "Chapter 1 - Introduction", in *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, H. G. Allen Ed.: Pergamon, pp. 1-7. ISBN 978-0-08-012870-2
- [11] Davies, J. M. (2001). "Introduction", in *Lightweight Sandwich Construction*, pp. 1-13. ISBN 0-632-04027-0
- [12] Hassan, T. K., & Reis, E. M. (2003). Innovative 3-d Frp Sandwich Panels for Bridge Decks.
- [13] Manalo, A., Aravinthan, T., Fam, A., & Benmokrane, B. (2017). State-of-the-Art Review on FRP Sandwich Systems for Lightweight Civil Infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, 21(1), 04016068. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000729](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000729)
- [14] González, M. J., & García Navarro, J. (2006). Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, 41(7), 902-909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- [15] Sousa, S. P. B., Samani, P., Gomes, C. F. S., & Mateus-Correia, N. (2018). Compósitos Avançados Aplicados no Setor da Construção. *Construção* 2018, 10.
- [16] Birman, V., & Kardomateas, G. A. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142, 221-240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>

- [17] Feng, Y., Qiu, H., Gao, Y., Zheng, H., & Tan, J. (2020). Creative design for sandwich structures: A review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3), 1729881420921327. <https://doi.org/10.1177/1729881420921327>
- [18] Langdon, G. S., & Cantwell, W. J. (2020). "14 - The blast response of composite and fiber-metal laminate materials", in *Polymer Composites in the Aerospace Industry (Second Edition)*, P. Irving & C. Soutis Eds.: Woodhead Publishing, pp. 415-439. ISBN 978-0-08-102679-3
- [19] Mohammadabadi, M., Yadama, V., & Dolan, J. D. (2021). Evaluation of Wood Composite Sandwich Panels as a Promising Renewable Building Material. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(8), 2083. <https://doi.org/10.3390/ma14082083>
- [20] Pflug, J., Vangrimde, B., & Verpoest, I. (2003). Continuously produced honeycomb cores. 48. https://www.researchgate.net/publication/242111263_Continuously_produced_honeycomb_cores
- [21] Yang, L., Li, X., Yang, L., Lu, J., Wang, Z., & Yang, J. (2021). Experimental and numerical analysis of dynamic response of graded PVC foam sandwich panel under impact load. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1959685>
- [22] Ma, Q., Rejab, M., Siregar, J., & Guan, Z. (2021). A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 55(18), 2513-2555. <https://doi.org/10.1177/0021998321990734>
- [23] Tarlochan, F. (2021). Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review. *Materials*, 14(16), 4731. <https://doi.org/10.3390/ma14164731>
- [24] Joseph, A., Mahesh, V., Mahesh, V., & Harursampath, D. (2022). "Introduction to Sandwich Composite Panels and Their Fabrication Methods", in *Sandwich Composites: Fabrication and Characterization*, S. Krishnasamy, C. Muthukumar, S. M. K. Thiagamani, S. M. Rangappa, & S. Siengchin Eds., 1 ed.: CRC Press. ISBN 978-1-003-14303-1
- [25] Behera, B. K., Jain, M., Tripathi, L., & Chowdhury, S. (2022). "Low-Velocity Impact Behaviour of Textile Reinforced Composite Sandwich Panels", in *Sandwich Composites: Fabrication and Characterization*, S. Krishnasamy, C. Muthukumar, S. M. K. Thiagamani, S. M. Rangappa, & S. Siengchin Eds. ISBN 978-1-003-14303-1
- [26] Davies, J. M. (2001). "Materials", in *Lightweight Sandwich Construction*, pp. 14-42. ISBN 0-632-04027-0
- [27] John, M. J., & John, M. J. (2017). "Design and Manufacturing of Bio-Based Sandwich Structures", in *Handbook of Composites from Renewable Materials*, pp. 93-110. ISBN 9781119441632
- [28] Raji, M., Abdellaoui, H., Essabir, H., Kakou, C.-A., Bouhfid, R., & Qaiss, A. e. k. (2019). "3 - Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites", in *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, M. Jawaid, M. Thariq, & N. Saba Eds.: Woodhead Publishing, pp. 27-62. ISBN 978-0-08-102290-0
- [29] Middleton, B. (2016). "3 - Composites: Manufacture and Application", in *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*, V. Goodship, B. Middleton, & R. Cherrington Eds. Oxford: William Andrew Publishing, pp. 53-101. ISBN 978-0-323-34061-8
- [30] Caglar, B., Hancioglu, M., & Sozer, E. M. (2021). Monitoring and modeling of part thickness evolution in vacuum infusion process. *Journal of Composite Materials*, 55(8), 1053-1072. <https://doi.org/10.1177/0021998320963173>

- [31] Rahman, M., Jasani, A. A., & Ibrahim, M. A. (2017). Flexural Strength of Banana Fibre Reinforced Epoxy Composites Produced through Vacuum Infusion and Hand Lay-Up Techniques - A Comparative Study. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 2(2), 31-36. <https://doi.org/10.26776/ijemm.02.02.2017.02>
- [32] Cucinotta, F., Guglielmino, E., & Sfravara, F. (2017). Life cycle assessment in yacht industry: A case study of comparison between hand lay-up and vacuum infusion. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3822-3833. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.080>
- [33] Correia, J. R., Garrido, M., Gonilha, J. A., Branco, F. A., & Reis, L. G. (2012). GFRP sandwich panels with PU foam and PP honeycomb cores for civil engineering structural applications. *International Journal of Structural Integrity*, 3(2), 127-147. <https://doi.org/10.1108/17579861211235165>
- [34] Proença, M., Neves e Sousa, A., Garrido, M., & Correia, J. R. (2020). Acoustic performance of composite sandwich panels for building floors: Experimental tests and numerical-analytical simulation. *Journal of Building Engineering*, 32, 101751. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101751>
- [35] Navin Kumar, B., Vijayarangam, J., Vasudevan, A., Pandiyarajan, R., Balaji, G., Karunagaran, N., Sathish, T., & Nanthakumar, P. (2021). Design and fabrication of bamboo composites sandwich panels for flooring. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4313-4321. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.186>
- [36] Ferreira, R., Pereira, D., Gago, A., & Proença, J. (2016). Experimental characterisation of cork agglomerate core sandwich panels for wall assemblies in buildings. *Journal of Building Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.01.003>
- [37] Jiang, Q., Chen, G., Kumar, A., Mills, A., Jani, K., Rajamohan, V., Venugopal, B., & Rahatekar, S. (2021). Sustainable Sandwich Composites Manufactured from Recycled Carbon Fibers, Flax Fibers/PP Skins, and Recycled PET Core. *Journal of Composites Science*, 5(1), 2. <https://doi.org/10.3390/jcs5010002>
- [38] Hoto, R., Furundarena, G., Torres, J. P., Muñoz, E., Andrés-Esperanza, J., & Garcia-Manrique, J. (2014). Flexural behavior and water absorption of asymmetrical sandwich composites from natural fibers and cork agglomerate core. *Materials Letters, Materials Letters*, 48-52. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.088>
- [39] Prabhakaran, S., Krishnaraj, V., Sharma, S., Senthilkumar, M., Jegathishkumar, R., & Zitoune, R. (2020). Experimental study on thermal and morphological analyses of green composite sandwich made of flax and agglomerated cork. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(5), 3003-3012. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08691-x>
- [40] The Insight Partners. (2022). *Sandwich Panel Market Forecast to 2028 - COVID-19 Impact and Global Analysis By Material (Polyurethane, Polyisocyanurate, Mineral Wool, and Others), Application (Wall Panels, Roof Panels, and Others), and End Use (Residential and Non-Residential)*. Acedido a 29 de março em <https://www.prnewswire.com/news-releases/sandwich-panel-market-size-worth-4-256-62-mn-globally-by-2028-at-6-7-cagr--exclusive-report-by-the-insight-partners-301488220.html>
- [41] FTB. (2022). *Products*. Acedido a 17 de março em <http://www.ftb.pt/en>
- [42] ISOPAN. (2022). *Company Profile*. Acedido a 17 de março em <https://isopan.com/isopan/company-profile/>
- [43] PROFHOLOD. (2022). *Product catalogue: Sandwich Panels*. Acedido a 17 de março em <https://profholod.com/catalog/panels/>
- [44] ARPANEL. (2022). *Arpanel in Sumary*. Acedido a 17 de março em <https://arpanel.eu/company/>
- [45] EuroPanels. (2022). *Sandwich Panels*. Acedido a 17 de março em <https://www.europanels.pl/en/products/sandwich-panels/>

- [46] italpannelli. (2022). *Company*. Acedido a 20 de março em <https://www.italpannelli.it/en/azienda/>
- [47] EM LIVING. (2022). *Technical Data: Thermochip*. Acedido a 28 de março em <https://em-living.com/en/brand-detail/15/thermochip>
- [48] Carbas, R. J. C. (2008). *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi* [Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto].
- [49] Sousa, S. P. B. d. (2016). *Análise da segurança ao fogo de argamassas poliméricas modificadas com nano óxidos* [Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto].
- [50] ASTM. (2013). Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor, Norma D2583. <https://doi.org/10.1520/D2583-13A>
- [51] Stringfixer. (2022). *Teste de dureza Barcol*. Acedido a 29 de abril em https://stringfixer.com/pt/Barcol_hardness_test
- [52] ASTM. (2013). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, Norma D792. <https://doi.org/10.1520/D0792-13>
- [53] ASTM. (2015). Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, Norma D3171. <https://doi.org/10.1520/D3171-15>
- [54] ASTM. (2015). Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry, Norma D3418. <https://doi.org/10.1520/D3418-15>
- [55] Mutlur, S. (2004). "Thermal Analysis of Composites Using DSC", in *Advanced Topics in Characterization of Composites*, M. R. Kessler Ed.: Trafford, pp. 11-33. ISBN 1-4120-3639-9
- [56] David Mulligan, Samuel Gnaniyah, & Sims, G. (2003). *Thermal Analysis Techniques for Composites and Adhesives* (2ª ed., Vol. 62).
- [57] ISO. (2012). Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 11: Glass transition temperature, Norma 6721-11.
- [58] ISO. (1998). Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties, Norma 14125.
- [59] ASTM. (2016). Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, Norma C393/C393M. https://doi.org/10.1520/C0393_C0393M-16
- [60] ASTM. (2017). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Norma D790. <https://doi.org/10.1520/D0790-17>
- [61] ASTM. (2016). Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions, Norma C364/C364M. https://doi.org/10.1520/C0364_C0364M-16
- [62] Ansys GRANTA. (2022). *Enhance your Materials Teaching*. Acedido a 15 de junho em <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack/#tab1-2>

Anexo A - Fichas Técnicas dos Materiais

Resina Epoxídica *Biresin*® CR83

Biresin® CR83 Composite resin system

Product Description

Biresin® CR83 is an epoxy resin system with extremely low viscosity designed specifically for the infusion process for the production of high performance fibre reinforced composites parts and moulds. The system has thermal properties up to 80°C. Biresin® CR83 epoxy resin has a low tendency to crystallise.

Application Areas

Biresin® CR83 is especially suited to the infusion and injection processes due to its low viscosity range. It can be used in the marine and general industrial composite areas. Due to its good wetting properties it is particularly suited for use with carbon fibre reinforcement.

Features / Advantages

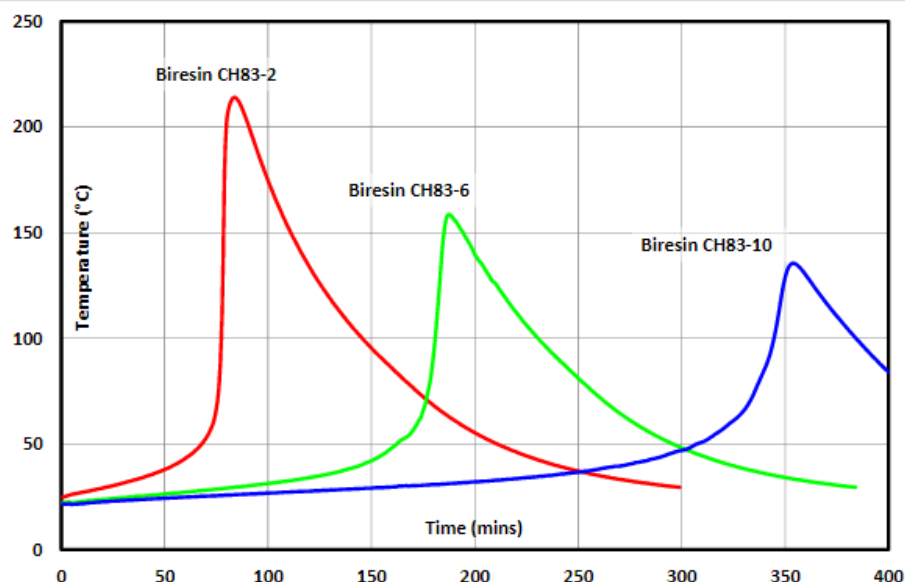
- 3 hardeners (B) give a wide range of processing times
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Fast infusion and good wet-out of fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics even at low temperatures
- All systems DNV GL approved, Certificate No. TAK000019Z
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions
- Biresin® CR83 resin (A) has a low tendency to crystallise

Physical Data	Resin (A)	Hardener (B)		
Individual Components	Biresin® CR83	Biresin® CH83-2	Biresin® CH83-6	Biresin® CH83-10
Mixing ratio, parts by weight	100	30		
Mixing ratio, parts by volume	100	36		
Colour	translucent	colourless to yellowish		
Viscosity, 25°C	mPa.s ~610	<10	<10	< 10
Density, 25°C	g/ml 1.14	0.95	0.94	0.95
		Mixture		
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min	60	180	300
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPa.s	155	170	155

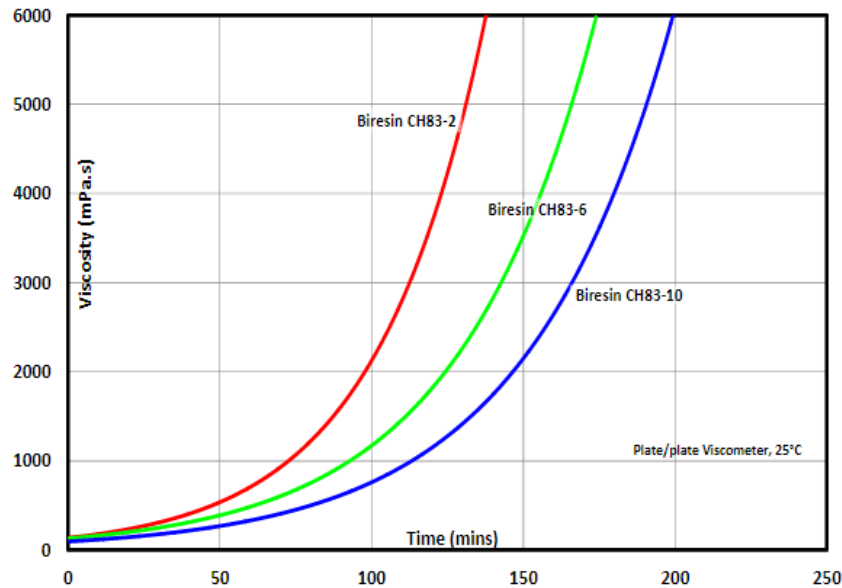
Processing

- The material and processing temperatures should be in the range 18 - 35°C.
- The mixing ratio must be followed accurately to obtain best results. Deviating from the correct mix ratio will lead to lower performance.
- The final mechanical and thermal values are dependent on the applied postcuring cycles.
- It is recommended to clean brushes or tools immediately after use with Sika Reinigungsmittel 5.
- Additional information is available in "Processing Instructions for Composite Resins".

Development of Exotherm of Biresin® CR83-Resin (A)-Hardener (B)-Mixtures, 100g / RT, insulated



Development of Viscosity of Biresin® CR83 (A)-Resin-Hardener (B)-Mixtures, 25°C

**Postcuring**

The suitable cure cycle and the attainable mechanical and thermal values depend on various factors, such as laminate thickness, fibre volume, reactivity of the resin system etc.

An appropriate cure cycle could look as follows:

- Heat-up rate of ca. 0.2°C/Minute until approx. 10°C below the required glass transition temperature (T_g)
- Followed by a dwell at that temperature of between 2 and 12 hours.
- Part(s) should then be cooled at ~0.5°C per minute

The specific postcure should be adapted to the required technical and economic requirements.

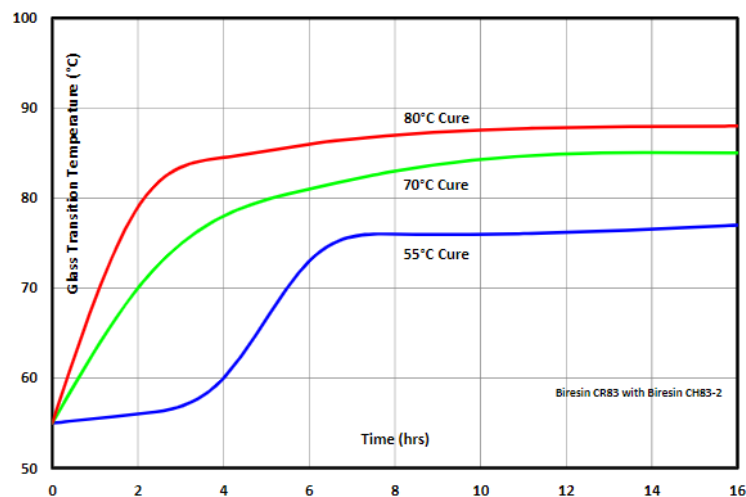
To measure the mechanical performance of the resin system a Sika Advanced Resins standard cycle is used to ensure that the full T_g potential of the system in question is reached.

Typical Mechanical Properties of Fully Cured Neat Resin

Biresin® CR83 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH83-2	CH83-6	CH83-10
Tensile strength	ISO 527	MPa	84	91	86
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	2,960	3,200	3,100
Elongation at break	ISO 527	%	6.7	8.4	7.9
Flexural strength	ISO 178	MPa	129	134	131
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,125	3,360	3,340
Compressive strength	ISO 604	N/mm ²	107	111	109
Density	ISO 1183	g/cm ³	1.15	1.15	1.15
Shore-hardness	ISO 868		D 85	D 85	D 85
Impact resistance	ISO 179	kJ/m ²	93	84	83

Typical Thermal Properties of Fully Cured Neat Resin

Biresin® CR83 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH83-2	CH83-6	CH83-10
Heat distortion temperature	ISO 75B	°C	79	79	78
Glass transition temperature	ISO 11357	°C	84	80	81

Glass Transition Temperature vs. Cure Cycle

Packaging (net weight, kg)

Biresin® CR83 resin (A)	1,000	200	10
Biresin® CH83-2 hardener (B)		180	20
Biresin® CH83-6 hardener (B)		180	20
Biresin® CH83-10 hardener (B)		180	20

Storage

- Minimum shelf life of Biresin® CR83 resin (A) is 24 month and of Biresin® CH83-2, CH83-6 and CH83-10 hardeners (B) is 12 month under room conditions (18 - 25°C), when stored in original unopened containers.
- The tendency to of crystallise with this system is very low. However, if crystallisation of the resin (A) component appears, it can be easily removed by warming up the resin for a sufficient time to at least 60°C.
- Containers must be closed tightly immediately after use. The residual material needs to be used up as soon as possible.

Health and Safety Information

For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Safety Data Sheet (SDS) containing physical, ecological, toxicological and other safety related data.

Disposal considerations

Product Recommendations: Must be disposed of in a special waste disposal unit in accordance with the corresponding regulations.

Packaging Recommendations: Completely emptied packagings can be given for recycling. Packaging that cannot be cleaned should be disposed of as product waste.

Value Bases

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Legal Notice

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

Further information available at:

Sika Deutschland GmbH
 Subsidiary Bad Urach
 Stuttgarter Str. 139
 D - 72574 Bad Urach
 Germany
 Tel: +49 (0) 7125 940 492
 Fax: +49 (0) 7125 940 401
 Email: tooling@de.sika.com
 Internet: www.sikaadvancedresins.com



Biresin® CR83 4 / 4



Fibras de Vidro



Technical Datasheet - METYX Composite Reinforcements

PRODUCT CODE	5200.002.361
PRODUCT NAME	X450 E05C-45/45 BIAxIAL E GLASS FABRIC-127CM
PRODUCT DESCRIPTION	.
CUSTOMER CODE	.
CUSTOMER ID	.

REINFORCEMENT CONSTRUCTION		
LAYER	FIBER TYPE	AREA WEIGHT
1	+45°	300 Tex
2	0°	68 Tex
3	90°	68 Tex
4	-45°	300 Tex
5	Stitch	7,6 Tex
6		
7		

* Checked via own test based on ISO 3374.

TOTAL* 441 gr / m2 (± %3)

OTHER PROPERTIES		ROLL INFO	
Stitch Gauge	5 stitches/inch	Roll Width	127 cm
Stitch Type	Pillar	Roll Weight	196 kg
Stitch Length	3 mm	Roll Length	350 m
Pilot Yarn / Position	Blue	Core Diameter	76 mm

Resin Compatibility	Loss on Ignition	Moisture Content
Polyester, Vinylester, Epoxy resins	Max.%0,70 by weight (ISO 1887)	Max.%0,20 by weight (ISO 3344)

Packaging	All rolls are wrapped with polyethylene bags; placed in pallet boxes or in single cardboard boxes or in pyramid style on pallets.
Labelling	Each roll is labelled on the inner side of the core, on the bag or on the cardboard boxes including a unique reference number for its traceability.
Storage	Store at %40-70 relative humidity and 18-30 °C temperature range. Recommended to be brought to working area 24 hrs prior to use.

Certification	DNV	Lloyd's Register
MetYx products are produced by Telateks A.S. company who is run by ISO 9001:2008 QA System.	TYPE Approved	-

Note: The above specifications reflect the product data on release date but are subject to change without prior notice.

Address:

Orhanli Beldesi 34956
Tuzla Istanbul – TURKIYE



Phone : +90-216-394-32-60
Fax : +90-216-394-32-58
Web : www.metyx.com

TDM-I.00/20.03.08

FR-4.01-12B.00

Poliestireno Extrudido

CATÁLOGO
GERAL
PRODUTOS

ISOLAMENTOS

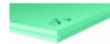
POLIESTIRENO EXTRUDIDO (XPS)

FIBROSOM
JUNTOS, CONSTRUIMOS CONFORTO

INFORMAÇÃO DO PRODUTO

DESCRIÇÃO

Paredes Duplas
(Caixas de Ar)



ETICS - Revestimento
exterior de fachadas



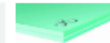
Terraço - Cobertura plana
(terraços)



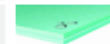
Chão - (pisos)



400 kPa - Pavimentos com
cargas elevadas



500 kPa - Pavimentos com
cargas muito elevadas
(Automóveis / Coberturas
ajardinadas / Naves
industriais)



700 kPa - Pavimentos com
cargas muito elevadas
(Automóveis / Coberturas
ajardinadas / Naves
industriais)



Tipo Encaixe	Dimensões (mm)			Resistência à Compressão	Condutibilidade Térmica, λ_D (W/mK)	Reação ao fogo	Resistência Térmica R_D (m².k/w)
	Comp.	Larg.	Esp.				
	2600	600	30	> 200 kPa	0,033	E	0,90
			40		0,033		1,20
			50		0,035		1,40
			60		0,035		1,70
			80		0,035		2,25
			100		0,037		2,70
			120		0,037		3,20
	1250	600	20*	> 300 kPa	0,033	E	0,60
			30		0,033		0,90
			40		0,033		1,20
			50		0,035		1,40
			60		0,035		1,70
			80		0,035		2,25
			100		0,037		2,70
	1250	600	30	> 300 kPa	0,033	E	0,90
			40		0,033		1,20
			50		0,035		1,40
			60		0,035		1,70
			80		0,035		2,25
			100		0,037		2,70
			120		0,037		3,20
	1250	600	30	> 300 kPa	0,033	E	0,90
			40		0,033		1,20
			50		0,035		1,40
			60		0,035		1,70
			80		0,035		2,25
	1250	600	30	> 400 kPa	0,033	E	9,00
			40		0,033		1,20
			50		0,035		1,40
			60		0,035		1,70
			80		0,035		2,25
	1250	600	50	> 700 kPa	0,035	E	1,40
			60		0,035		1,70
			80		0,035		2,25
			100		0,037		2,70
			120		0,037		3,20
	1250	600	50	> 700 kPa	0,035	E	1,40
			60		0,035		1,70
			80		0,035		2,25
			100		0,037		2,70
			120		0,037		3,20

** A resistência térmica de produtos com espessura não constante, não pode ser declarada.

Para outras dimensões, espessuras e referências, consultar o nosso departamento comercial.

Resina Epoxídica de Base Biológica - SR InfuGreen 810



InfuGreen / E 1649.8 / SD 882x2 SD 477x E 1616
Page 1 / 9
Version 01/03/2017

SR InfuGreen 810

Green Epoxy systems for Injection and Infusion

The **InfuGreen 810** is a two-component epoxy system. It has been specially formulated for resin transfer processes, such as injection or infusion.

This system has a very low viscosity at ambient temperature.

The different hardeners allow the production of small to very large parts.

The cured system gives a temperature resistance up to 100°C (Tg onset)

The hardeners SD 4770 and 4771 are designed for very thick laminates by infusions.

SR InfuGreen 810 Epoxy resin is produced with about 38 % of carbon from plant origin and has a lower environmental impact than standard Epoxy systems.

The bio-based Carbon content of our resin is certified by an independent laboratory using Carbon 14 measurements (ASTM D6866 or XP CEN/TS 16640).

This percentage is function of the carbon origin contained in the epoxy molecule.

SR InfuGreen 810 is DNV-GL Maritime approved .



Epoxy resin SR InfuGreen 810

Aspect		Clear liquid
Color Gardner		1 maximum
Viscosity (± 20 % mPa.s)	@ 15 °C @ 20 °C @ 25 °C @ 30 °C @ 40 °C	2 200 1200 750 470 210
Carbon Green content (± 3 %)		38 %
Density Pycnometer (±0.01) Helium (±0.005)	@ 20 °C	1.16 1.152
Refractive index (± 0.0020)	@ 25 °C	1.5491
Storage stability	24 Months @ ambient temperature	
Can crystallize at low temperature or after a long storage. If SR InfuGreen 810 develops a haziness or crystallizes during storage, warming it @ 50 to 60 °C, with stirring, will restore it to its original state		

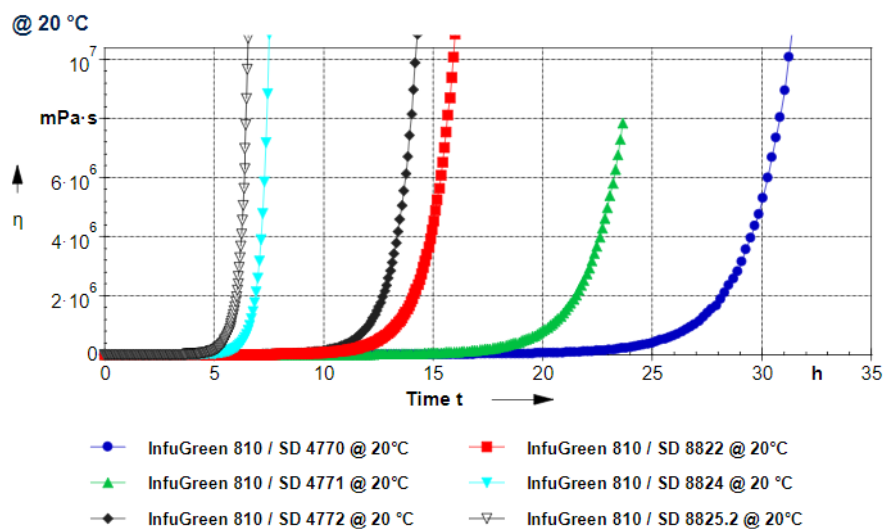
Hardeners SD 882x SD 477x

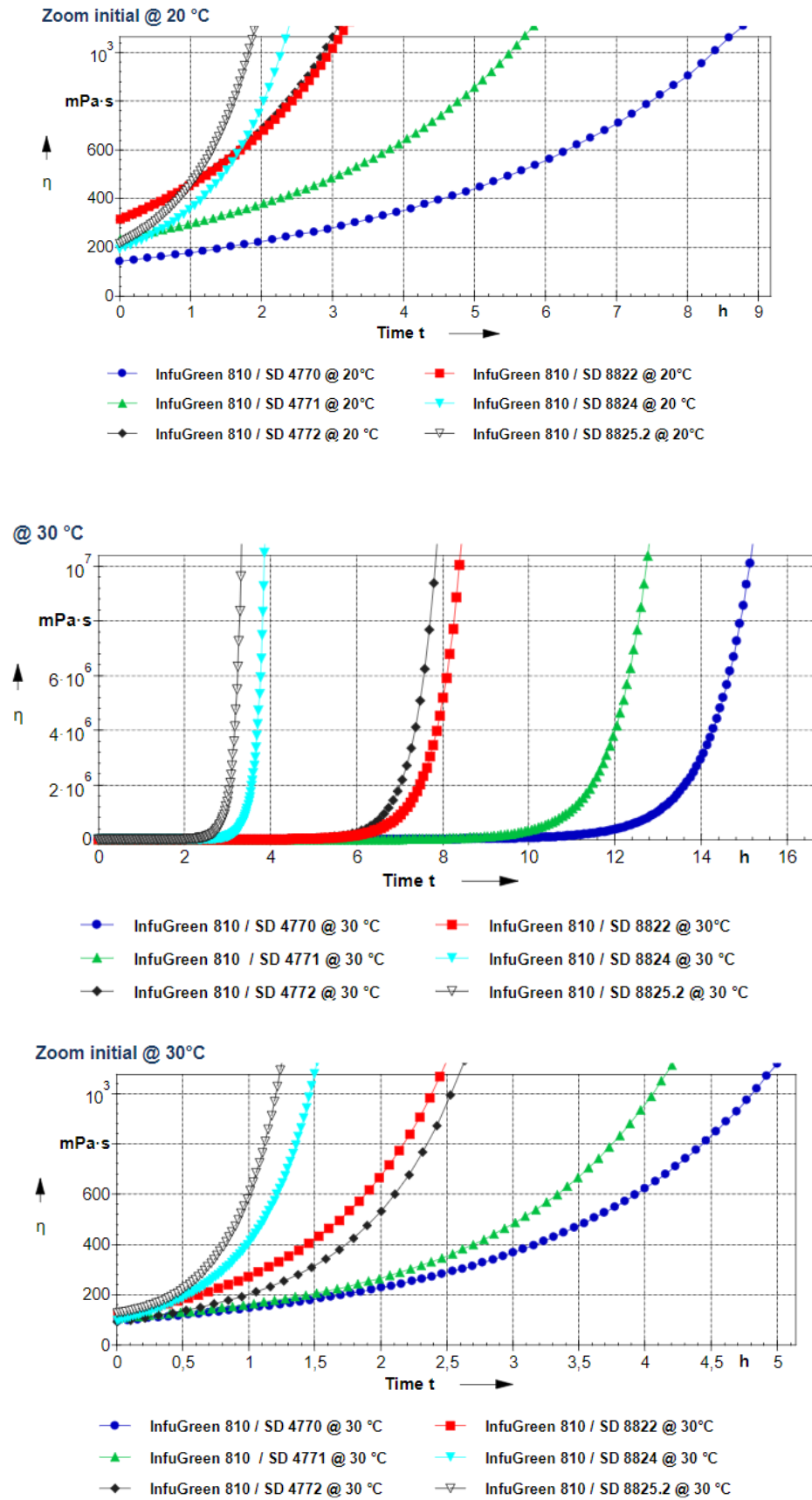
Reference		SD 8825.2	SD 8824	SD 8822	SD 4772	SD 4771	SD 4770
Reactivity type		Fast	Standard	Slow		Ultra-slow	Mega slow
Aspect / colour		Light yellow liquid					
Color Gardner		3 maximum	4 maximum	5 maximum	3 maximum		
Viscosity (+ 20 % mPa.s)	@ 15 °C	9	7	27	13		
	@ 20 °C	7	6	20	11		
	@ 25 °C	6	5	16	9		
	@ 30 °C	5	4	13	7		
	@ 40 °C	4	3	9	5		
Carbon Green content	%	none					
Storage stability	AT	24 months					
		Hardeners react with carbon dioxide and moisture. Keep tightly closed packaging, minimize maximum contact with the air.					
Density Pycnometer (+0.010)	@ 20 °C	0.915	0.944	0.935	0.927	0.944	0.944
Refractive index (± 0.002)	@ 25 °C	1.4785	1.4982	1.4712	1.4822	1.4594	1.4604

SR InfuGreen 810 / SD 8822 SD 477x Mixes

References		SD 8825.2	SD 8824	SD 8822	SD 4772	SD 4771	SD 4770
Mixing ratio by weight		100 / 22	100 / 22	100 / 31	100 / 29		
Mixing ratio by volume		100 / 28	100 / 27	100 / 39	100 / 36		
Initial mix viscosities	@ 20 °C	230	200	320	330	235	142
	@ 30 °C	130	100	120	90	115	100
Time to reach 300 cps "Optimal infusion time"	@ 20 °C	28'	44'	/	/	60'	3 h 20'
	@ 30 °C	40'	50'	67'	90'	130'	160'
Carbon Green content maximum Calculated ($\pm 3\%$)		31	31	29	29	29	29

Viscosities increase on 1 mm film thickness





Mechanical properties on cast resin

		SR InfuGreen 810 / SD 8825.2			SR InfuGreen 810 / SD 8824		
Curing cycle							
		AT + 24 hrs 40 °C	AT + 16 hrs 60 °C	AT + 8 hrs 80 °C	AT + 8 hrs 40 °C	AT + 16 hrs 60 °C	AT + 8 hrs 80 °C
Tension							
Modulus of elasticity	N/mm ²	3000	2700	2600	3000	2800	2600
Maximum resistance	N/mm ²	69	68	67	68	65	60
Resistance at break	N/mm ²	55	53	64	57	57	52
Elongation at max.load	%	3.8	4.8	5.7	3.6	4.4	5.0
Elongation at break	%	5.9	9.1	8.0	5.3	5.9	9.5
Flexion							
Modulus of elasticity	N/mm ²	3000	2700	2600	3100	2800	2600
Maximum resistance	N/mm ²	113	112	108	109	107	101
Elongation at max.load	%	4.9	6.1	6.6	4.6	5.7	6.0
Elongation at break	%	12.6	11.6	11.9	12.6	9.3	13.4
Shear strenght							
Maximum resistance	N/mm ²	46	45	45	43	42	41
Compressive							
Compressive yield strength	N/mm ²	98	95	93	91	87	82
Offset compressive yield	%	11.7	15.1	15.7	12.3	13.0	14.9
Impact Choc Charpy							
Resilience	KJ/m ²	80	80	70	100	90	90
Glass Transition							
Tg1 onset	°C	72	91	96	69	83	82
Tg1 onset maximum	°C			94			82

		SR InfuGreen 810 / SD 8822			SR InfuGreen 810 / SD 4770		
Curing cycle		AT + 24 hrs 40 °C	AT + 24 hrs 40 °C	AT + 16 hrs 60 °C	AT + 8 hrs 80 °C	AT + 16 hrs 60 °C	AT + 8 hrs 80 °C
Tension							
Modulus of elasticity	N/mm ²	3000	2900	2700	3160	3100	2700
Maximum resistance	N/mm ²	66	67	61	71	74	70
Resistance at break	N/mm ²	55	60	53	70	68	69
Elongation at max.load	%	3.5	4.4	4.9	3.1	4.2	5.0
Elongation at break	%	4.3	6.1	8.0	3.2	5.1	5.6
Flexion							
Modulus of elasticity	N/mm ²	2900	2800	2700	3250	3000	2770
Maximum resistance	N/mm ²	99	106	101	116	116	115
Elongation at max.load	%	4.4	5.6	6.0	4.6	5.4	6.4
Elongation at break	%	15.5	13.6	13.6	9.8	7.4	7.8
Shear strenght							
Maximum resistance	N/mm ²	43	43	41	47	47	45
Compressive							
Compressive yield strength	N/mm ²	91	91	84	104	100	95
Offset compressive yield	%	11	12	13	11.3	12.8	14.6
Impact Choc Charpy							
Resilience	KJ/m ²	85	88	75	85	83	80
Glass Transition							
Tg1 onset	°C	63	74	85	69	84	97
Tg1 onset maximum	°C			84			98

Fibras de Basalto

Technical Data Sheet



Basalt Multiaxial Fabric

BAS BI 450

Identification & Application

Multiaxial basalt fabric is made of 100% BCF (basalt continuous filament) roving. It is primary used as reinforcement of epoxy composites.

Property	Standard/Method	Unit	Value
Base material			
Density of unsized filament		kg/dm ³	2,67
Moisture content of basaltic rock		%	0,1
Melting point*		°C	1350
Fabric			
Specific surface weight	ISO 3374:2000	g/m ²	464
Weave type			biaxial
Yarn density:			
- -45°		g/m ²	228
- 0°		g/m ²	0
- +45°		g/m ²	228
- +90°		g/m ²	0
- stitching		g/m ²	8
Sizing type			
		°C	Silane
Continuous max temperature			
			-250°C – 550°C
			1200°C fire blocking
Width	ISO 5025:1997	mm	1270
Thickness	ISO 4603:1993	mm	0,45
Moisture content (fabric)	ISO 3344:1997	%	<0,3
LOI, also sizing content	ISO 1887:1995	%	0,4-0,6
Combustibility	NF P92-503:1995	M0	Pass
UV stability	ISO 105-B02		>7

* after drying according ISO 3344:1997

Packaging

Standard fabric length: 50lm (Other lengths on request)

Fabric roll has support cardboard tube (ID 76mm), identification label with piece and batch number. Wrapping of roll in PE-foil, tape sealed. Rolls are arranged on a pallet with secure strapping.

Product Stability

All evidence obtained to date indicates that the performance should not significantly change over a significant period of time when basalt products are not subjected to excessive heat, wear and abrasion.

It is the responsibility of the developer of the end-product to test its performance in the end-application.

Aglomerado de Cortiça

Descrição

O AGLOMERADO DE CORTIÇA EXPANDIDA é um material sustentável para a construção sustentável. Processo 100% natural no qual se utiliza apenas cortiça como matéria prima. Solução de elevada performance em isolamento térmico, acústico e anti-vibrático, especialmente adequado para isolamento de paredes exteriores e interiores, lajes e pisos, coberturas e tetos.

Vantagens

- 100% natural e reciclável
- Baixa Energia incorporada
- Sumidouro de CO₂ (carbono negativo)
- Excelente isolamento térmico, acústico e anti-vibrático
- Estabilidade mecânica
- Durabilidade praticamente ilimitada, mantendo as características técnicas
- Promove o atraso térmico
- Qualidade do ar interior A +
- Permeabilidade ao vapor de água

Linhas de produto

- Dimensão de placa: 1000 x 500 (mm)
- Espessura até 300 (mm)
- Opção: Sistema meia-madeira

Especificações do produto

- Densidade: +/- 110 Kg/m³
- Condutividade térmica: 0,039 W/m.K
(declarada 0,040 W/m.K para certificação ACERMI)



CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA

Performance declarada: ICB - EN 13170 - L2 - W2 - T2 - CS(10)100 - TR50 - WS - MU20 - CC(0,8/0,4/10)5 - AF+35

Características essenciais	Performance	Especificação técnica harmonizada EN 13170: 2012
Reação ao fogo, Euroclasse	Reação do fogo	Euroclasse E
Resistência térmica	Resistência térmica	ver Tabela A
	Condutividade térmica	0,039 W/m.K
	Espessura, d _L	T1 - T2 (d > 50mm)
Permeabilidade à água	Absorção de água	WS
Vapor de água	Transmissão do vapor de água	MU20
Resistência à compressão	Resistência à compressão a 10% deformação	CS(10)100
Durabilidade da reação ao fogo com o calor, agentes atmosféricos, envelhecimento/degradação	Características de durabilidade	Satisfaz
Durabilidade da resistência térmica com o calor, agentes atmosféricos, envelhecimento/degradação	Resistência térmica e condutividade térmica	Satisfaz
	Características de durabilidade	Satisfaz
Resistência à tração / flexão	Resistência à tração perpendicular às faces	TR50
Durabilidade da resistência à compressão com o envelhecimento/degradação	Deformação compressiva	CC(0,8/0,4/10)5

Tabela A

Resistência térmica (R) Segundo a Norma EN 13170: 2012+A1: 2015

Espessura, d _L [mm]	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Resistência térmica [m ² . K/W]	0,50	0,60	0,75	0,85	1,00	1,10	1,25	1,35	1,50	1,60	1,75	1,85	2,00	2,10	2,25	2,35
Espessura, d _L [mm]	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
Resistência térmica [m ² . K/W]	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25

Anexo B - Valores do Fator de Conversão Para 23 °C Utilizados no Cálculo da Densidade

Density of Water (g/mL) vs. Temperature (°C)

(from Handbook of Chemistry and Physics, 53rd Edition, p. F4)

Whole degrees are listed down the left hand side of the table, while *tenths of a degree* are listed across the top.

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
15	0.999099	0.999084	0.999069	0.999054	0.999038	0.999023	0.999007	0.998991	0.998975	0.998959
16	0.998943	0.998926	0.998910	0.998893	0.998877	0.998860	0.998843	0.998826	0.998809	0.998792
17	0.998774	0.998757	0.998739	0.998722	0.998704	0.998686	0.998668	0.998650	0.998632	0.998613
18	0.998595	0.998576	0.998558	0.998539	0.998520	0.998501	0.998482	0.998463	0.998444	0.998424
19	0.998405	0.998385	0.998365	0.998345	0.998325	0.998305	0.998285	0.998265	0.998244	0.998224
20	0.998203	0.998183	0.998162	0.998141	0.998120	0.998099	0.998078	0.998056	0.998035	0.998013
21	0.997992	0.997970	0.997948	0.997926	0.997904	0.997882	0.997860	0.997837	0.997815	0.997792
22	0.997770	0.997747	0.997724	0.997701	0.997678	0.997655	0.997632	0.997608	0.997585	0.997561
23	0.997538	0.997514	0.997490	0.997466	0.997442	0.997418	0.997394	0.997369	0.997345	0.997320
24	0.997296	0.997271	0.997246	0.997221	0.997196	0.997171	0.997146	0.997120	0.997095	0.997069
25	0.997044	0.997018	0.996992	0.996967	0.996941	0.996914	0.996888	0.996862	0.996836	0.996809
26	0.996783	0.996756	0.996729	0.996703	0.996676	0.996649	0.996621	0.996594	0.996567	0.996540
27	0.996512	0.996485	0.996457	0.996429	0.996401	0.996373	0.996345	0.996317	0.996289	0.996261
28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.996060	0.996031	0.996002	0.995973
29	0.995944	0.995914	0.995885	0.995855	0.995826	0.995796	0.995766	0.995736	0.995706	0.995676
30	0.995646	0.995616	0.995586	0.995555	0.995525	0.995494	0.995464	0.995433	0.995402	0.995371

Example: to find the density of water at 16.1 °C, you would first find the whole degree by searching down the left hand column until you reach '16'. Then you would slide across that row until you reach the column labeled '0.1'. The density of water at 16.1°C is 0.998926 g/mL

Apêndice A - Resultados Para as Resinas Epoxídicas

De modo a avaliar quais as melhores temperaturas a que se poderia realizar a cura das resinas *Biresin*® CR83/CH83-6 e *InfuGreen*/SD 8825.2, realizaram-se ensaios preliminares de DSC. A Figura A.1 apresenta a representação gráfica do fluxo de calor em função da temperatura para a resina a) convencional e b) de base biológica.

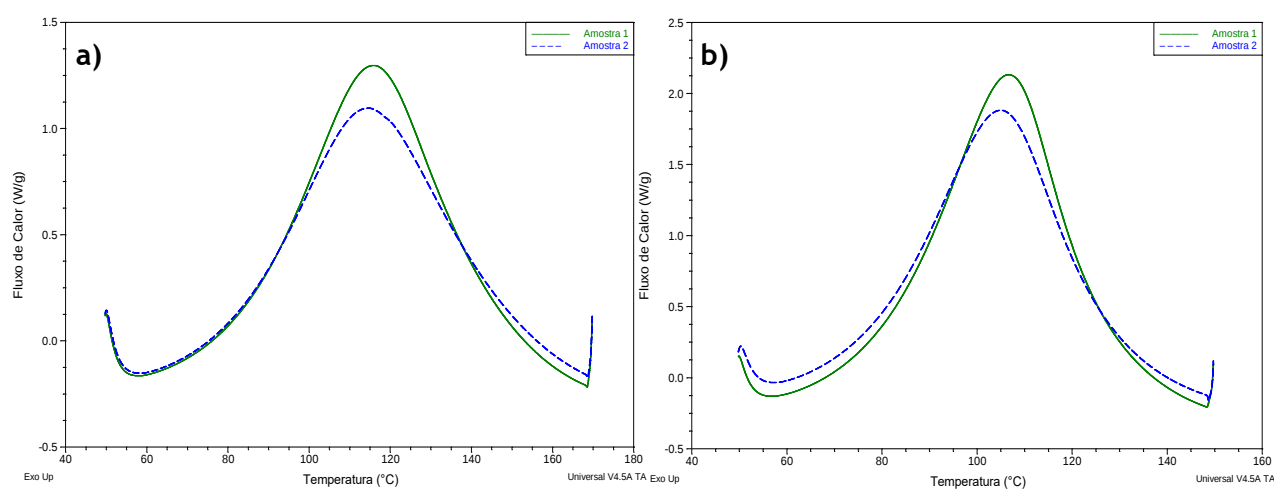


Figura A.1. Representação gráfica do fluxo de calor em função da temperatura para a resina a) *Biresin*® CR83/CH83-6 e b) *InfuGreen*/SD 8825.2, obtidas através de DSC.

Ensaio de DSC

A Figura A.2 e a Figura A.3 apresentam as representações gráficas, obtidas através de DSC, do fluxo de calor em função da temperatura para a resina *Biresin*® CR83/CH83-6 com uma cura de 24 h seguida de uma pós-cura a 60 °C durante 24 h e apenas com uma cura de 60 °C durante 24 h, respetivamente.

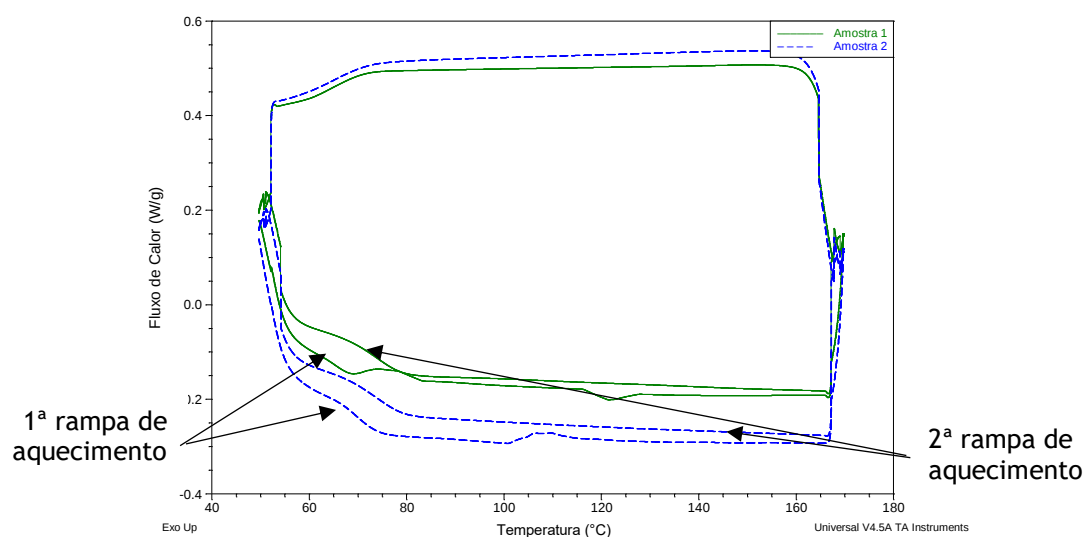


Figura A.2. Representação gráfica, obtida através de DSC, do fluxo de calor em função da temperatura para a resina *Biresin*® CR83/CH83-6 com uma cura de 24 h seguida de uma pós-cura a 60 °C durante 24 h.

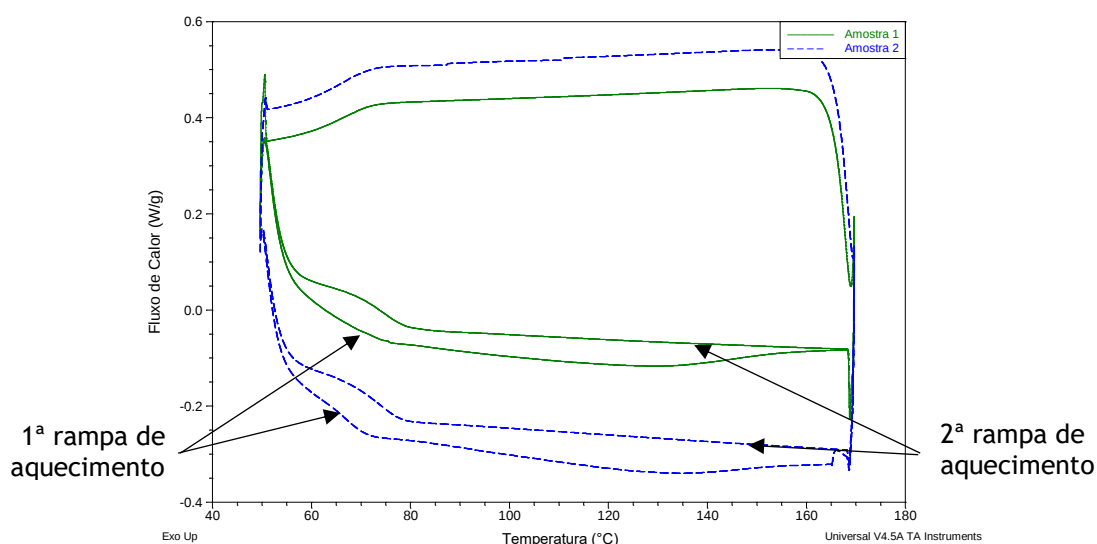


Figura A.3. Representação gráfica, obtida através de DSC, do fluxo de calor em função da temperatura para a resina Biresin® CR83/CH83-6 com uma cura a 60 °C durante 24 h.

A Figura A.4 e a Figura A.5 apresentam representações gráficas semelhantes às anteriores para a resina InfuGreen/SD 8825.2.

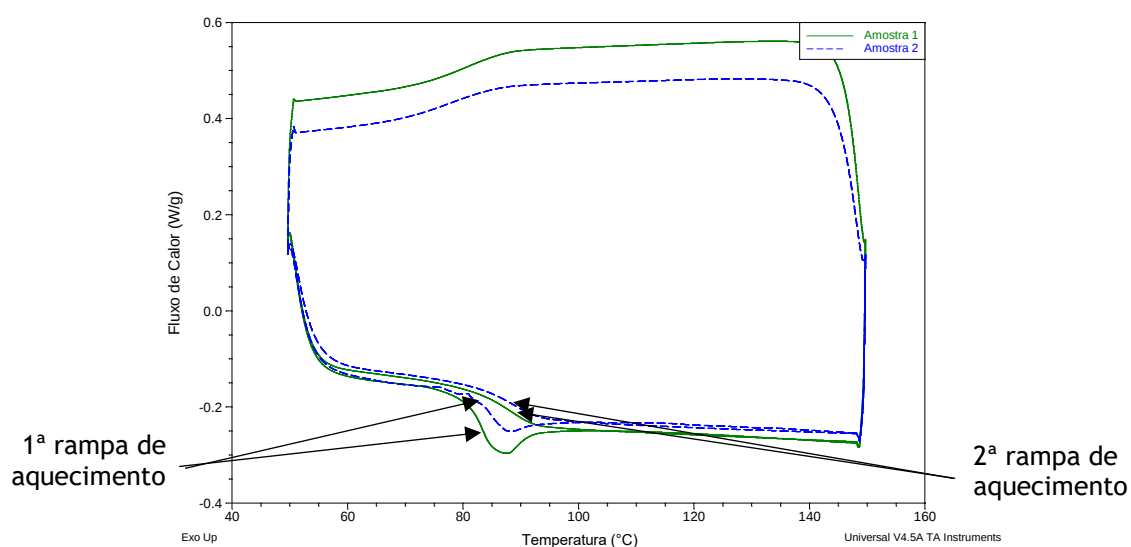


Figura A.4. Representação gráfica, obtida através de DSC, do fluxo de calor em função da temperatura para a resina InfuGreen 810/SD 8825.2 com uma cura de 24 h seguida de uma pós-cura a 60 °C durante 24 h.

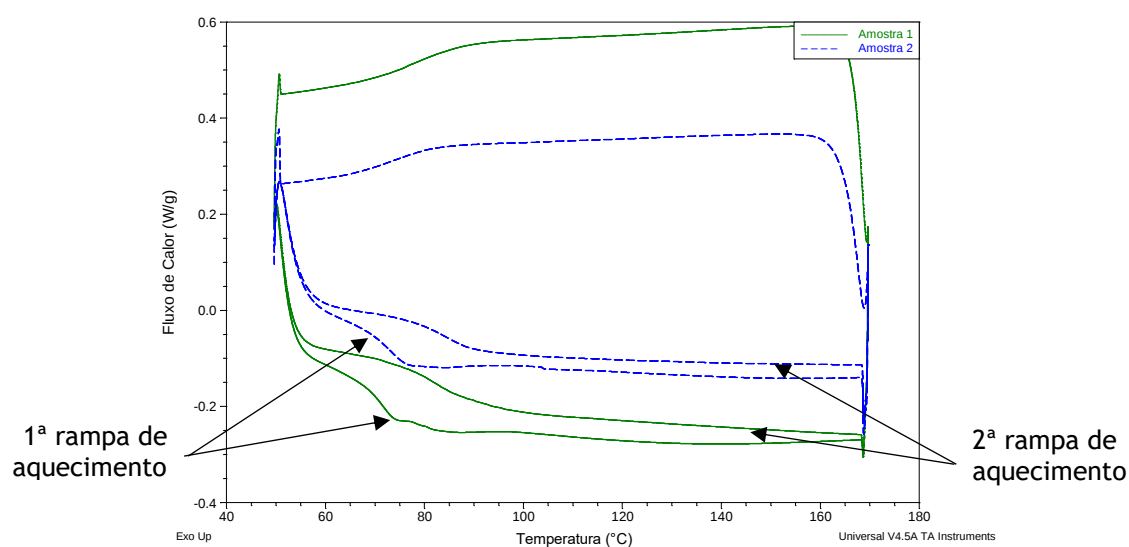


Figura A.5. Representação gráfica, obtida através de DSC, do fluxo de calor em função da temperatura para a resina InfuGreen 810/SD 8825.2 com uma cura a 60 °C durante 24 h.

Ensaio de DMA

Nos ensaios de DMA é necessário obter dois ensaios concordantes. A Figura A.6 e a Figura A.7 apresentam os resultados de DMA para a resina convencional com uma cura de 24 h à temperatura ambiente seguida de uma pós-cura durante o mesmo período de tempo a 60 °C, e com uma cura de 60 °C durante 24 h, respectivamente.

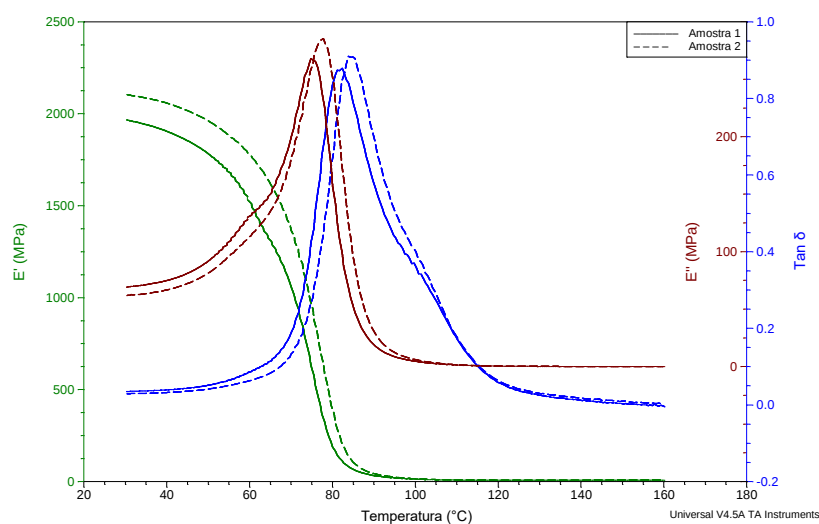


Figura A.6. Resultados de DMA para a resina convencional com uma cura de 24 h à T_{amb} seguida de uma pós-cura a 60 °C durante 24 h.

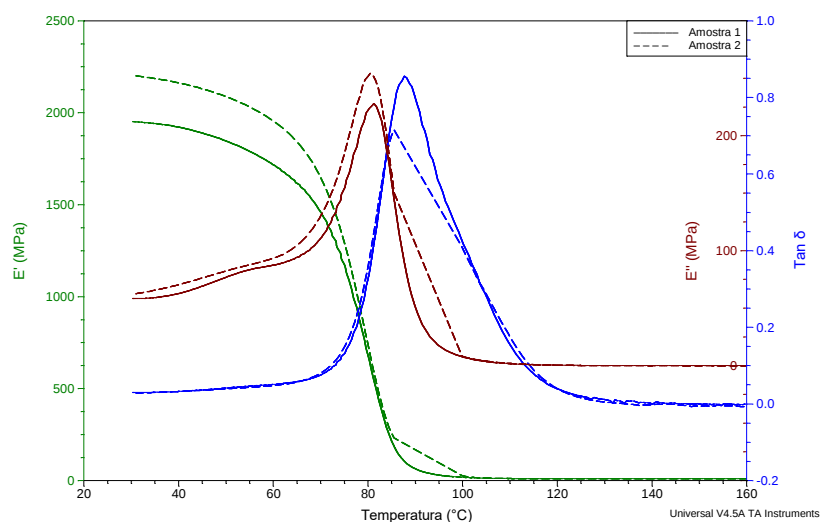


Figura A.7. Resultados de DMA para a resina convencional com uma cura a 60 °C durante 24 h.

A Figura A.8 e a Figura A.9 apresentam os resultados de DMA para a resina epoxídica de base biológica.

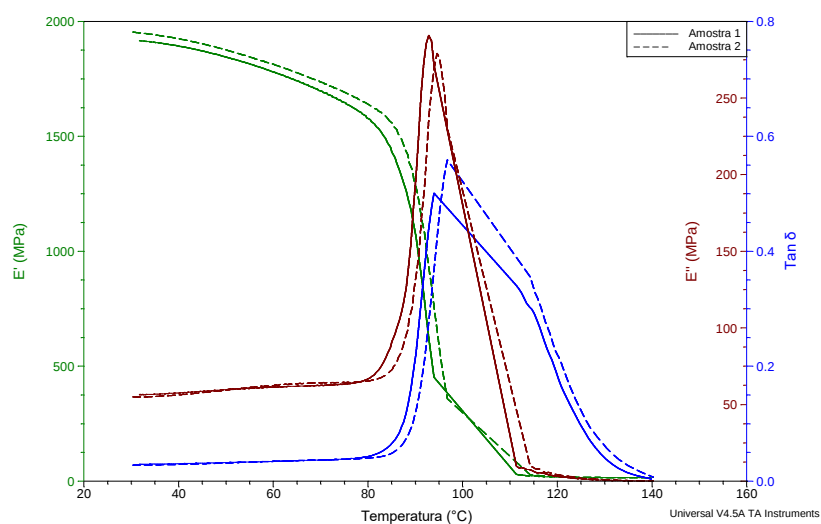


Figura A.8. Resultados de DMA para a resina de base biológica com uma cura de 24 h à T_{amb} seguida de uma pós-cura a 60 °C durante 24 h.

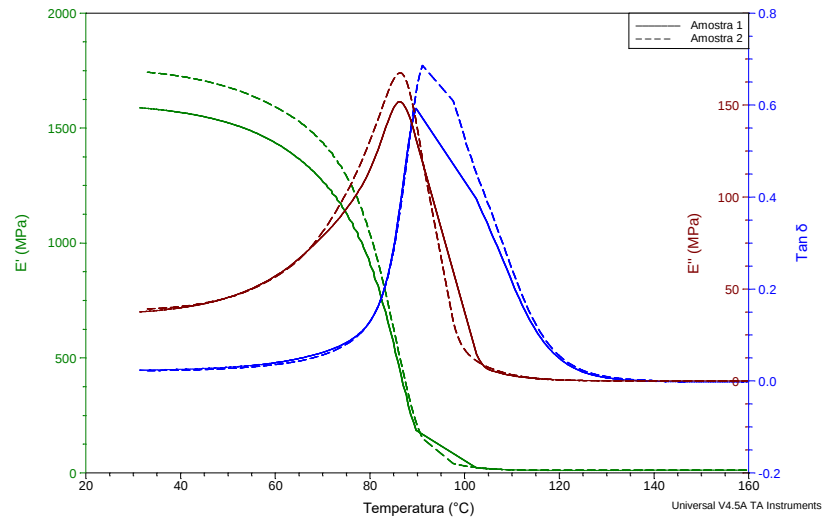


Figura A.9. Resultados de DMA para a resina convencional com uma cura a 60 °C durante 24 h.

Ensaio de Flexão

Para os ensaios de flexão em três pontos considerou-se válidos os cinco resultados mais coerentes. A Figura A.10 apresenta a representação gráfica da força em função do deslocamento para as cinco amostras de provetes de resina epoxídica *Biresin*® CR83/CH83-6.

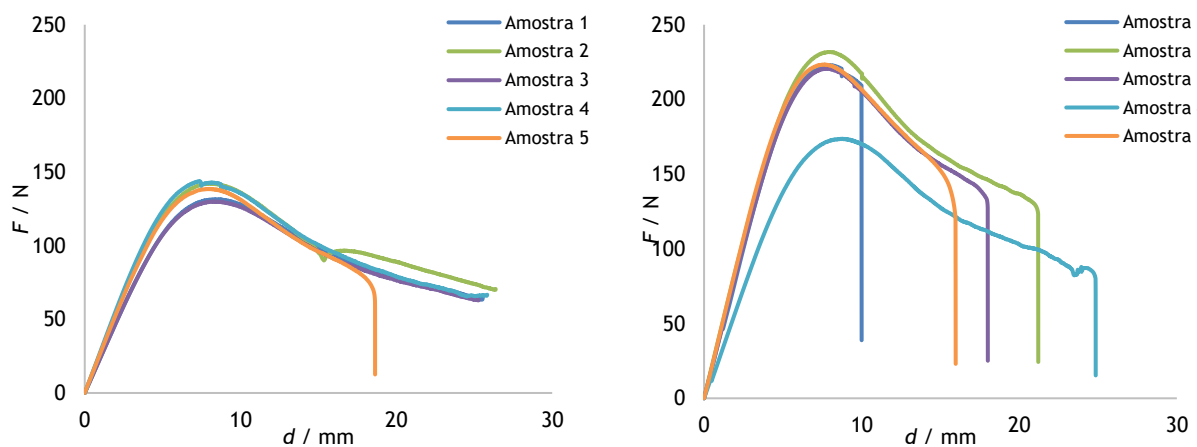


Figura A.10. Representação gráfica da força em função do deslocamento dos provetes de resina *Biresin*® CR83/CH83-6.

A Figura A.11 apresenta a representação gráfica da força em função do deslocamento para as cinco amostras de provetes de resina epoxídica de base biológica.

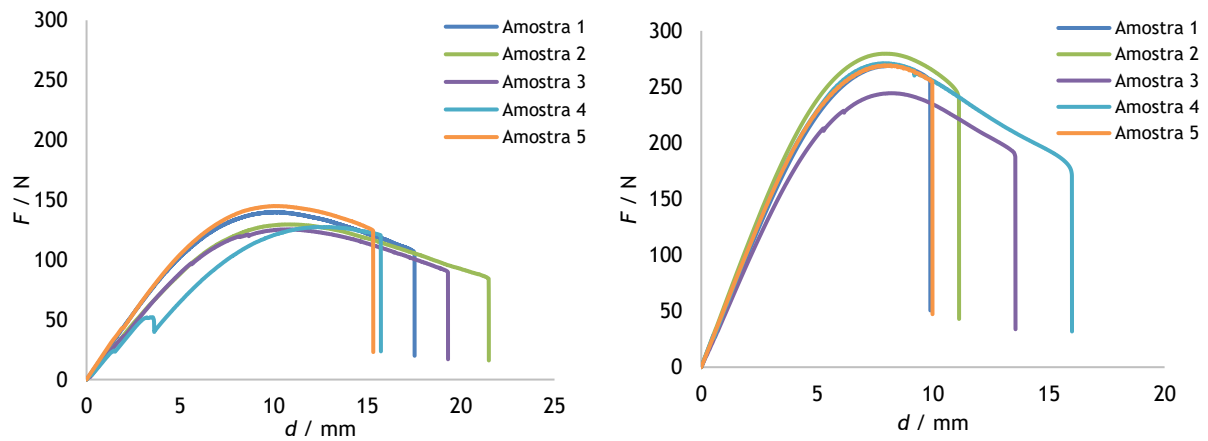


Figura A.11. Representação gráfica da força em função do deslocamento dos provetes de resina InfuGreen 810/SD 8825.2.

Apêndice B - Resultados Para as Resinas de Pinheiro

Com o objetivo de substituir as resinas epoxídicas utilizadas na produção dos laminados dos painéis sanduíche por resinas mais sustentáveis como as resinas de pinheiro, caracterizaram-se, através de DSC, três resinas de pinheiro diferentes, uma fornecida pelo fornecedor Costa & Irmãos®, outra pela *Resipinus* e a resina líquida *Aquadhes*® 6203 fornecida pela *PinoPine*.

Em primeiro lugar, para as duas resinas de pinheiro sólidas realizou-se apenas uma rampa de aquecimento de $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ de -40 a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Tabela B.1 apresenta os resultados obtidos para estas duas resinas.

Tabela B.1. Resultados de DSC obtidos para as resinas de pinheiro sólidas.

Fornecedor	Amostra	$T_g / ^{\circ}\text{C}$
<i>Resipinus</i>	1	47,2
	2	50,6
Costa e Irmãos®	1	51,2
	2	49,8

Através destes ensaios apenas foi possível retirar a temperatura de transição vítrea para cada uma das resinas, sendo esta bastante inferior comparativamente às resinas epoxídicas consideradas nesta dissertação. Deste modo, a utilização destas resinas pioraria o desempenho térmico dos laminados.

De seguida, para a resina colofónia da *Resipinus*, realizaram-se duas rampas de aquecimento e uma de arrefecimento a uma taxa de $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ entre -40 a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, com o objetivo de avaliar possíveis degradações das amostras. A Tabela B.2 apresenta os resultados de DSC obtidos para estes ensaios.

Tabela B.2. Resultados de DSC obtidos para a resina de pinheiro da Resipinus.

Amostra	$T_{g1} / ^{\circ}\text{C}$	$T_{g2} / ^{\circ}\text{C}$
3	46,7	46,9
4	49,5	50,0

Conclui-se que as amostras degradam a temperaturas superiores a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, não sendo possível aquecer as amostras a temperaturas superiores sem se perder componentes. Esta conclusão pode ser comprovada pela perda de massa das amostras em questão.

Finalmente, caracterizou-se uma resina de pinheiro líquida através de duas rampas de aquecimento intercaladas por uma de arrefecimento a uma taxa de $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ entre -40 a 200

°C. A Figura B.1 apresenta o gráfico de DSC, correspondente ao fluxo de calor em função da temperatura, para a resina Aquadhes® 6203 da PinoPine.

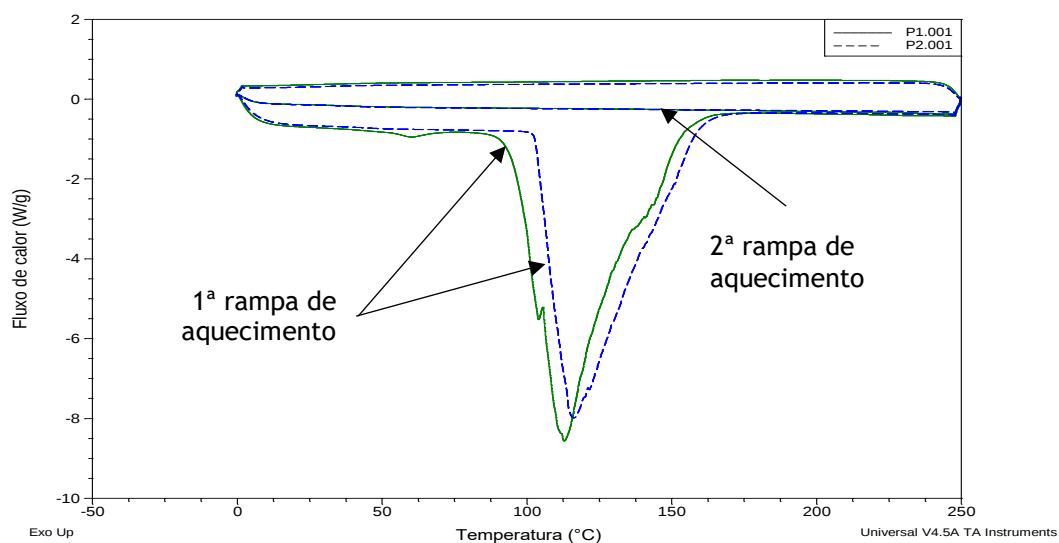


Figura B.1. Representação gráfica do fluxo de calor em função da temperatura obtida através de DSC para a resina Aquadhes® 6203.

Através da Figura anterior é possível observar que durante a primeira rampa de aquecimento ocorreu um pico endotérmico associado à evaporação da água que esta resina continha.

A Tabela B.3 apresenta os resultados obtidos através de DSC para as temperaturas de transição vítrea para a primeira e segunda rampas de aquecimento, T_{g1} e T_{g2} , respetivamente.

Tabela B.3. Resultados de DSC obtidos para a resina de pinheiro da PinoPine.

Amostra	T_{g1} / °C	T_{g2} / °C
1	57,2	70,9
2	55,4	72,2

Através da análise da Tabela anterior, é possível concluir que, após a evaporação da água presente nas amostras, a temperatura de transição vítrea aumenta significativamente.

É, ainda, de referir que estas resinas apresentaram todas uma resistência reduzida, pelo que a obtenção de provetes para ensaios de DMA e de densidade não foi possível.

Apêndice C - Resultados Para os Laminados

Ensaio de DMA para os dois laminados em estudo

A Figura C.1 e a Figura C.2 apresentam os resultados de DMA obtidos, uma representação gráfica do módulo de armazenamento, do módulo de perda e do fator de perda em função da temperatura, para os laminados convencional e de base biológica, respectivamente.

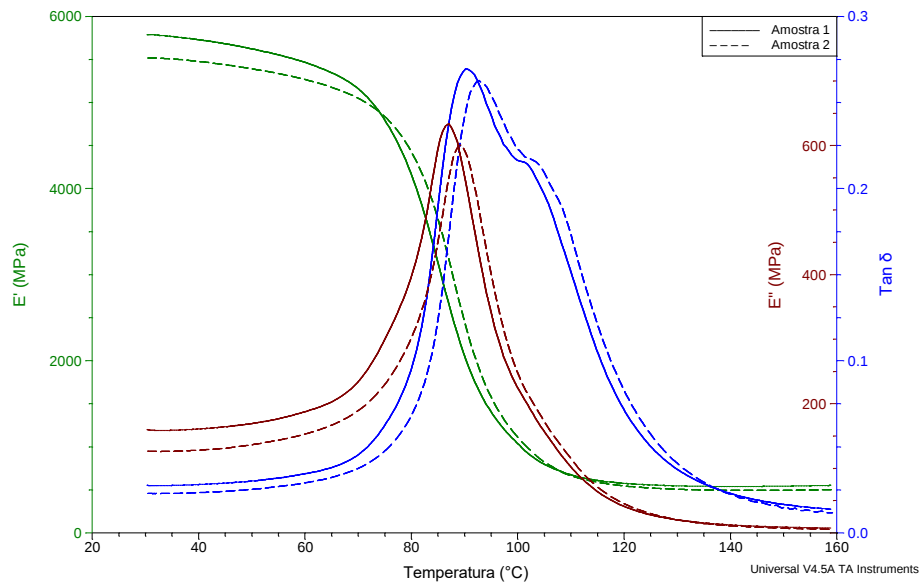


Figura C.1. Resultados de DMA para o laminado de fibras de vidro e resina convencional.

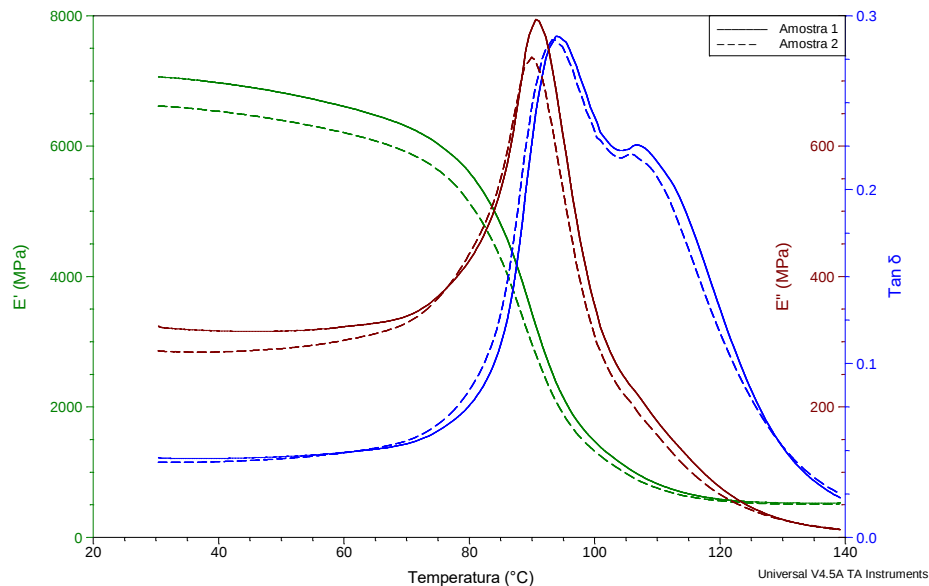


Figura C.2. Resultados de DMA para o laminado de fibras de basalto e resina de base biológica.

Otimização do Processo de Infusão a Vácuo

Para avaliar quais as melhores condições a aplicar no processo de infusão a vácuo, tal como se referiu na Secção de Resultados e Discussão, caracterizou-se várias amostras de nove tipos de laminados com condições de produção diferentes.

Ensaio de Flexão

Da Figura C.3 à Figura C.11 encontram-se apresentadas as representações gráficas dos ensaios de flexão dos laminados de 1 a 9, respetivamente, produzidos no processo de otimização da infusão a vácuo.

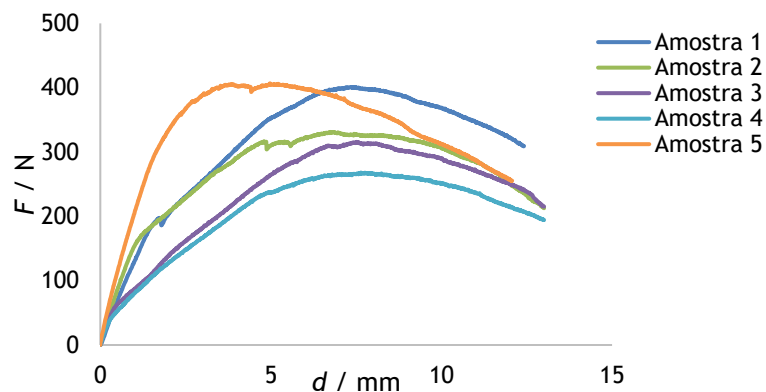


Figura C.3. Representação gráfica da força aplicada em função da deformação para o laminado produzido com as condições 1.

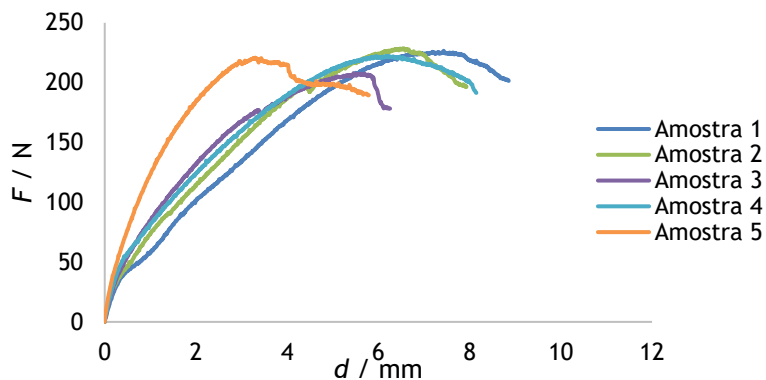


Figura C.4. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 2.

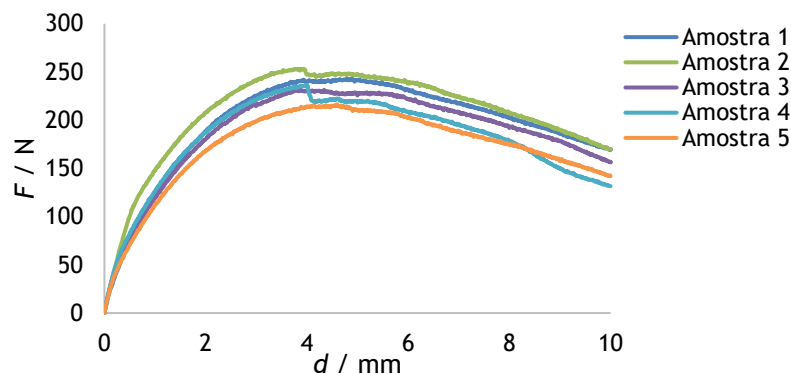


Figura C.5. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 3.

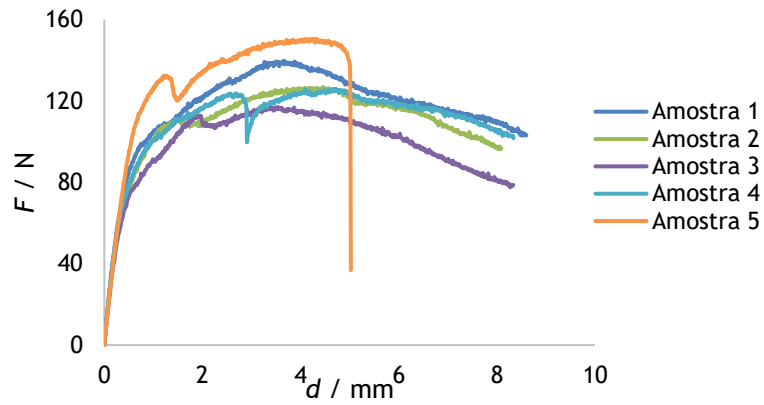


Figura C.6. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 4.

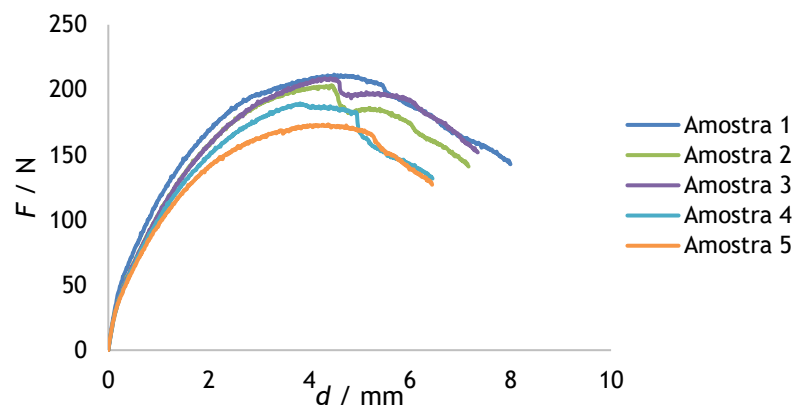


Figura C.7. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 5.

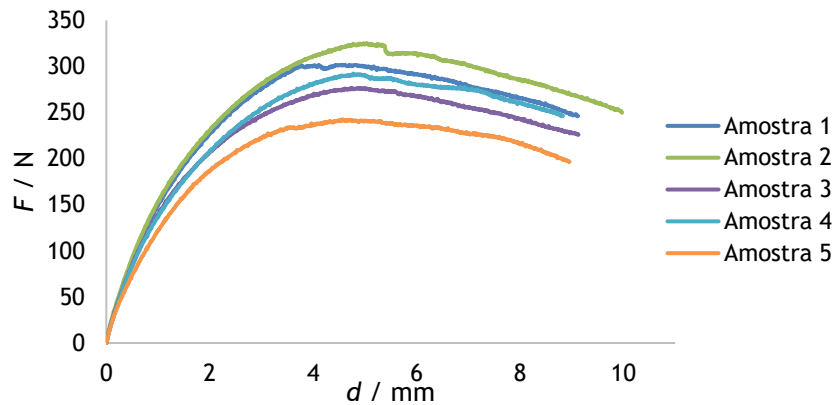


Figura C.8. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 6.

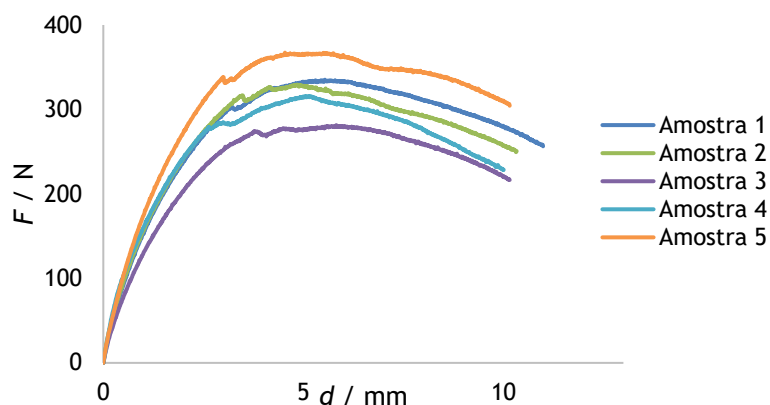


Figura C.9. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 7.

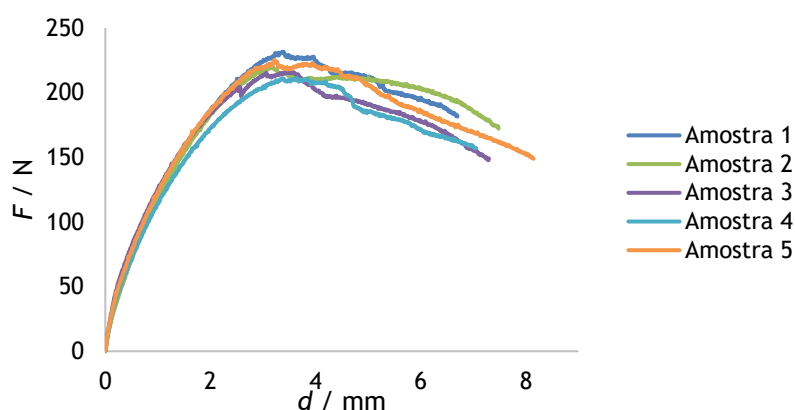


Figura C.10. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 8.

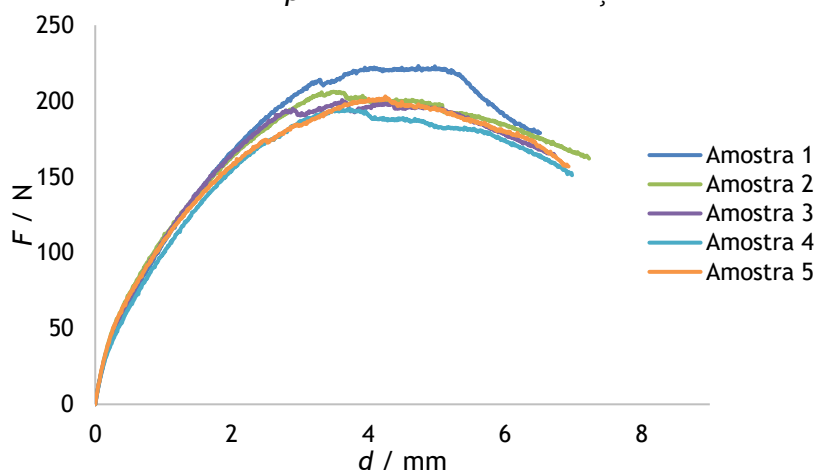


Figura C.11. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o laminado produzido com as condições 9.

Método Taguchi L9 e ANOVA

Para obtenção das melhores condições a aplicar no processo de infusão a vácuo recorreu-se ao método de Taguchi e à análise estatística ANOVA. Da Figura C.12 à Figura C.15 encontram-se apresentados os gráficos de resposta para os parâmetros físicos em estudos.

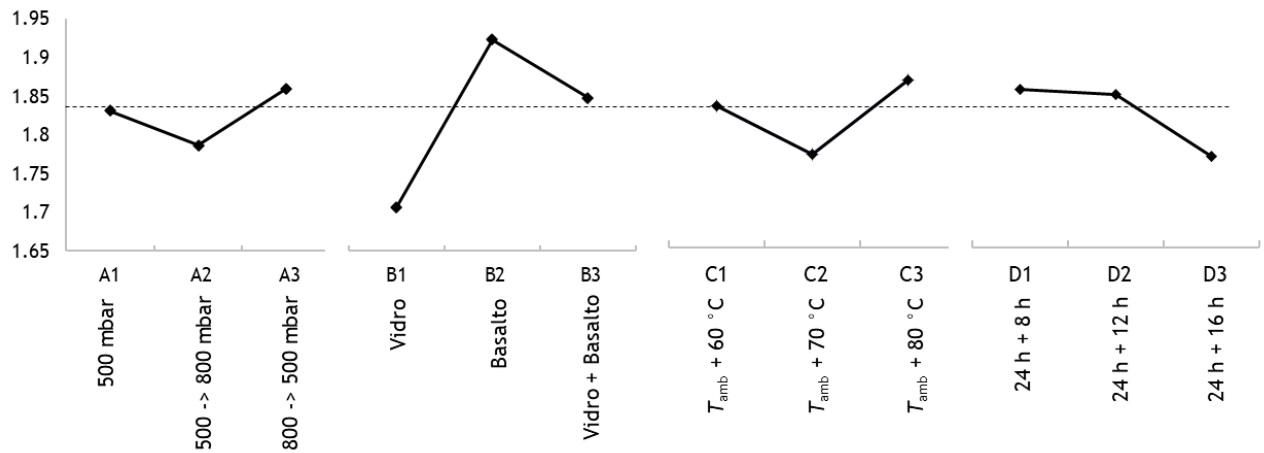


Figura C.12. Gráfico de resposta para o parâmetro densidade.

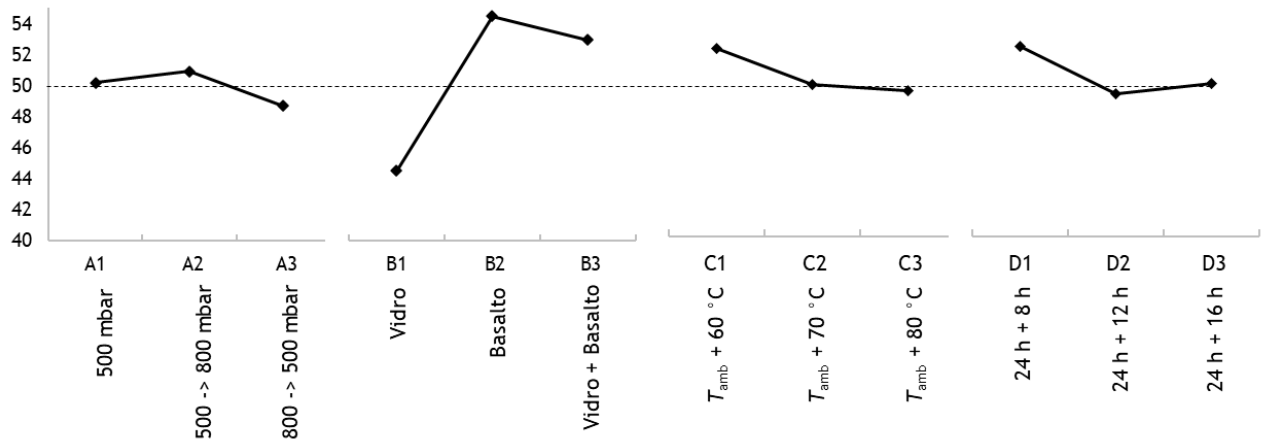


Figura C.13. Gráfico de resposta para o parâmetro teor de fibras.

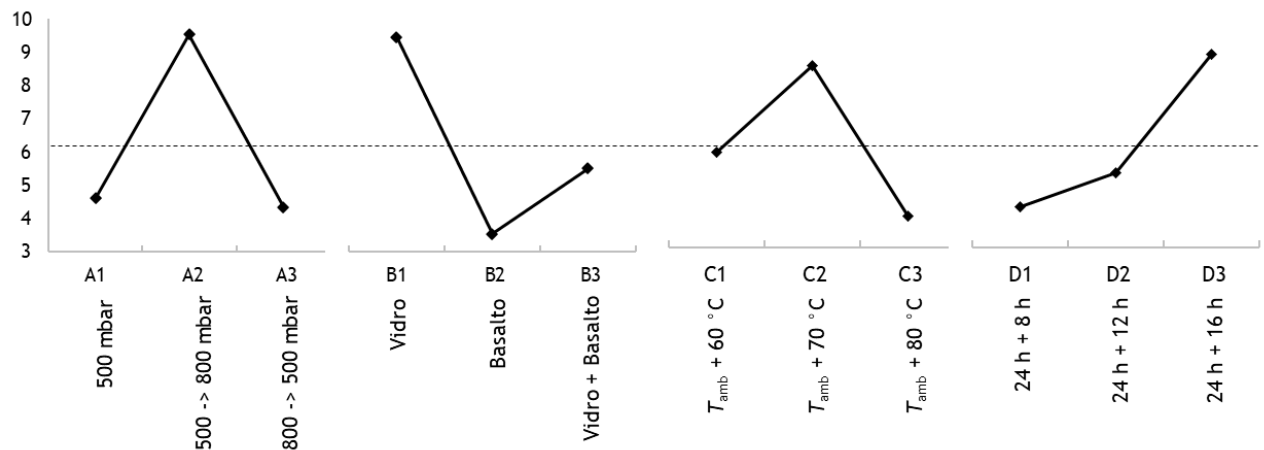


Figura C.14. Gráfico de resposta para o parâmetro volume de vazios.

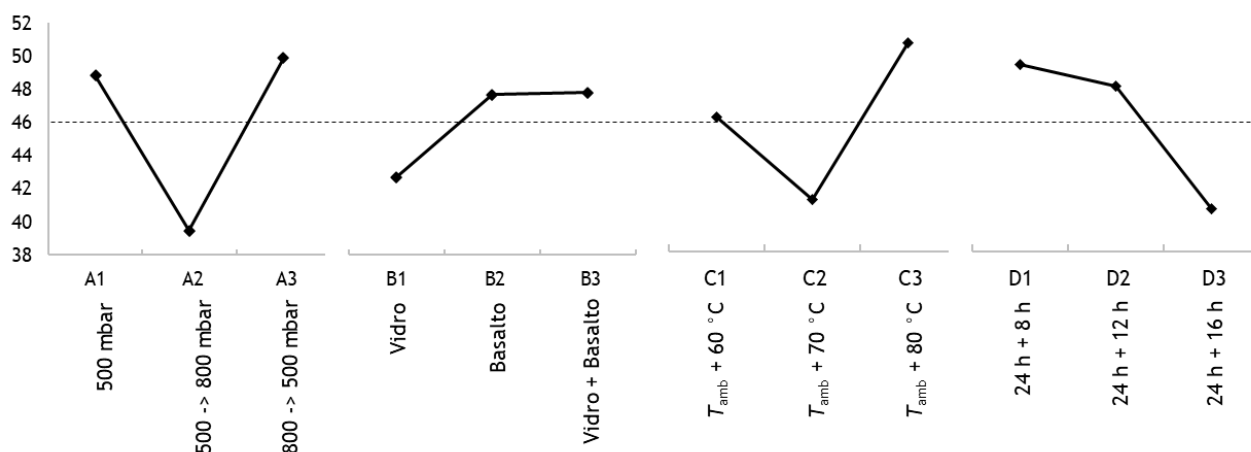


Figura C.15. Gráfico de resposta para o parâmetro dureza.

A Tabela C.1 apresenta os valores obtidos através da análise de variância dos parâmetros relativos aos ensaios de caracterização física.

Tabela C.1. Valores obtidos através da ANOVA para os parâmetros relativos aos ensaios de caracterização física.

Parâmetro	Fatores	Graus de Liberdade	Somatório dos quadrados	Desvio Médio Quadrático	Valor do Rácio do F-Teste	Porcentagem de Contribuição Para a Variação Global
Densidade	A: Pressão	2	0,02	0,1	18,42	6,78
	B: Tipologia Fibras	2	0,22	0,11	163,27	63,14
	C: Temperatura	2	0,04	0,02	33,21	12,53
	D: Tempo	2	0,04	0,02	33,09	12,49
Teor de Fibras	A: Pressão	2	23,34	11,67	0,34	-
	B: Tipologia Fibras	2	452,37	226,19	6,6	32,79
	C: Temperatura	2	35,93	17,96	0,52	-
	D: Tempo	2	41,73	20,86	0,61	-
Volume de Vazios	A: Pressão	2	154,63	77,31	53,17	27,57
	B: Tipologia Fibras	2	164,25	82,12	56,48	29,32
	C: Temperatura	2	96,86	48,43	33,31	17,07
	D: Tempo	2	108,35	54,18	37,26	19,16
Dureza	A: Pressão	2	1969,62	984,81	30,18	24,22
	B: Tipologia Fibras	2	506,96	253,48	7,77	5,62
	C: Temperatura	2	1392,96	696,48	21,34	16,89
	D: Tempo	2	1349,69	674,84	20,68	16,34

Da Figura C.16 à Figura C.18 encontram-se apresentados os gráficos de resposta para os parâmetros associados aos ensaios de flexão.

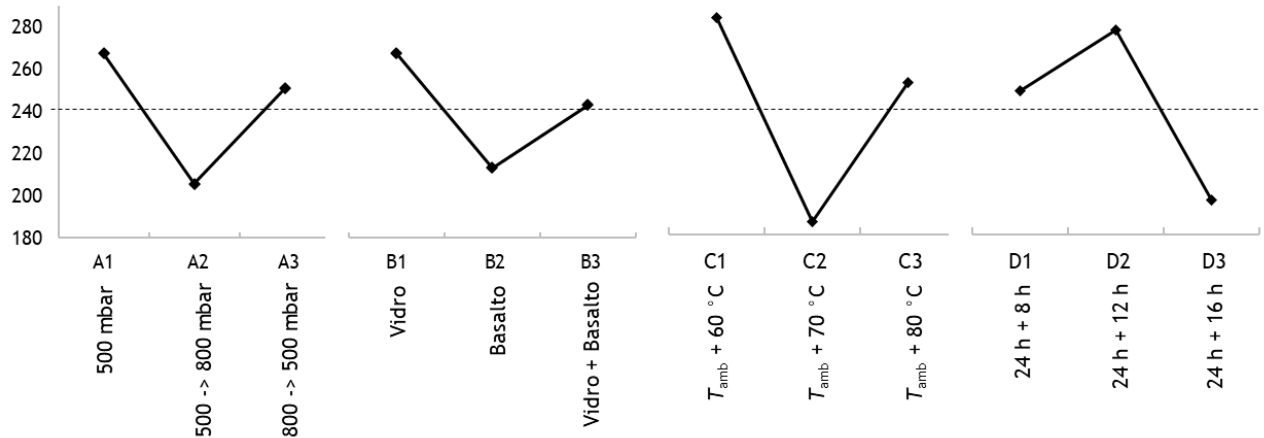


Figura C.16. Gráfico de resposta para o parâmetro força máxima.

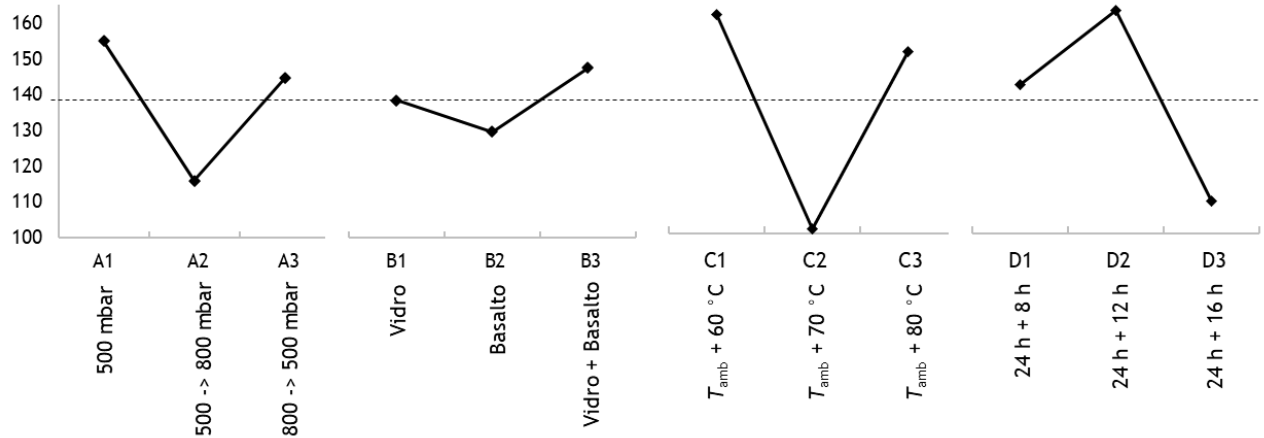


Figura C.17. Gráfico de resposta para o parâmetro tensão de flexão.

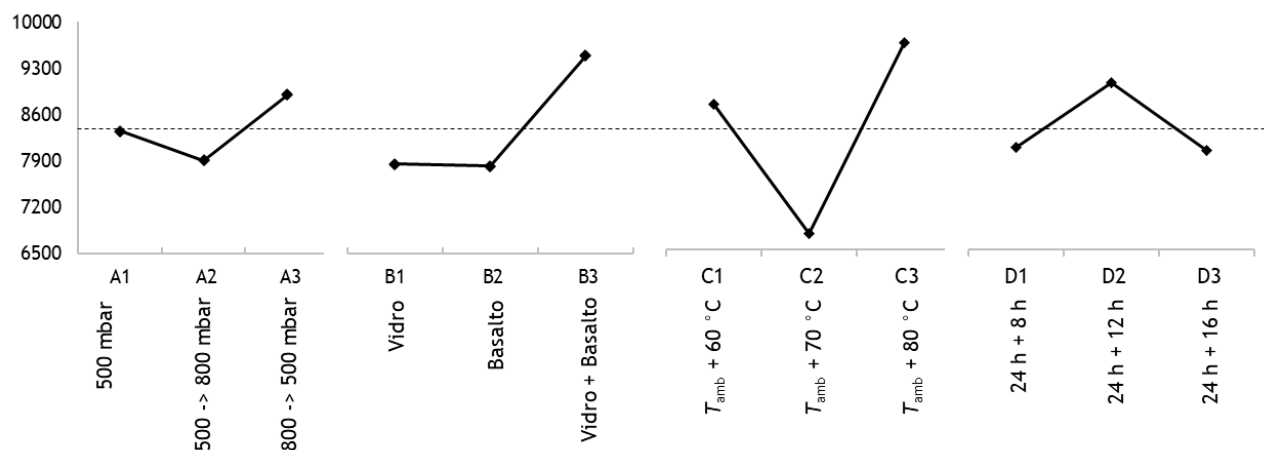


Figura C.18. Gráfico de resposta para o parâmetro módulo de elasticidade em flexão.

A Tabela C.2 apresenta os valores obtidos através da análise de variância dos parâmetros relativos aos ensaios de flexão.

Tabela C.2. Valores obtidos através da ANOVA para os parâmetros relativos aos ensaios de flexão.

Parâmetro	Fatores	Graus de Liberdade	Somatório dos quadrados	Desvio Médio Quadrático	Valor do Rácio do F-Teste	Porcentagem de Contribuição Para a Variação Global
Força máxima	A: Pressão	2	$30,5 \times 10^3$	$15,2 \times 10^3$	21,97	14,21
	B: Tipologia Fibras	2	$22,1 \times 10^3$	$11,1 \times 10^3$	15,94	10,13
	C: Temperatura	2	$75,5 \times 10^3$	$37,7 \times 10^3$	54,36	36,17
	D: Tempo	2	$51,7 \times 10^3$	$25,9 \times 10^3$	37,25	24,57
Tensão de flexão	A: Pressão	2	$12,3 \times 10^3$	$6,1 \times 10^3$	31,38	15,64
	B: Tipologia Fibras	2	$2,4 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$	6,14	2,64
	C: Temperatura	2	$31,8 \times 10^3$	$15,9 \times 10^3$	81,24	41,31
	D: Tempo	2	$22,5 \times 10^3$	$11,2 \times 10^3$	57,49	29,08
Módulo de Elasticidade em Flexão	A: Pressão	2	$7,5 \times 10^6$	$3,7 \times 10^6$	2,36	2,54
	B: Tipologia Fibras	2	$27,4 \times 10^6$	$13,7 \times 10^6$	8,66	14,33
	C: Temperatura	2	$66,9 \times 10^6$	$33,5 \times 10^6$	21,15	37,71
	D: Tempo	2	$10,3 \times 10^6$	$5,2 \times 10^6$	3,28	4,26

Apêndice D - Resultados Para os Painéis Sanduíche

Ensaio de Flexão

A Figura D.1 e a Figura D.2 apresentam uma representação da força em função do deslocamento, obtida através dos ensaios de flexão em três pontos, para os painéis sanduíche convencional e de base biológica, respectivamente.

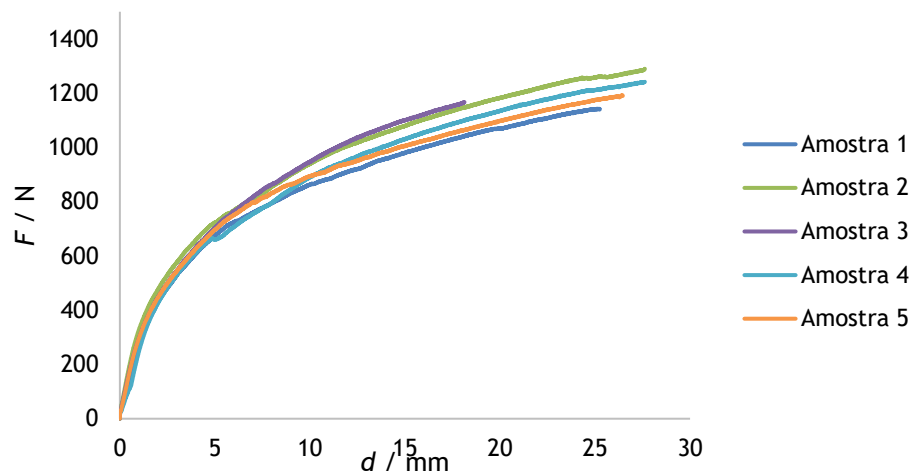


Figura D.1. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o painel convencional, obtida através de ensaios de flexão.

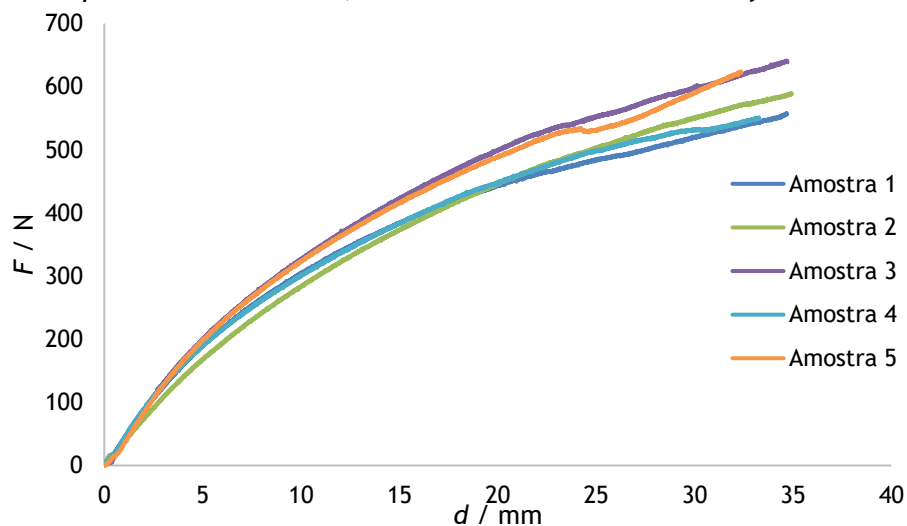


Figura D.2. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o painel de base biológica, obtida através de ensaios de flexão.

Ensaio de Compressão

A Figura D.3 e a Figura D.4 apresentam uma representação da força em função do deslocamento, obtida através dos ensaios de compressão, para o painel sanduíche convencional e de base biológica, respetivamente.

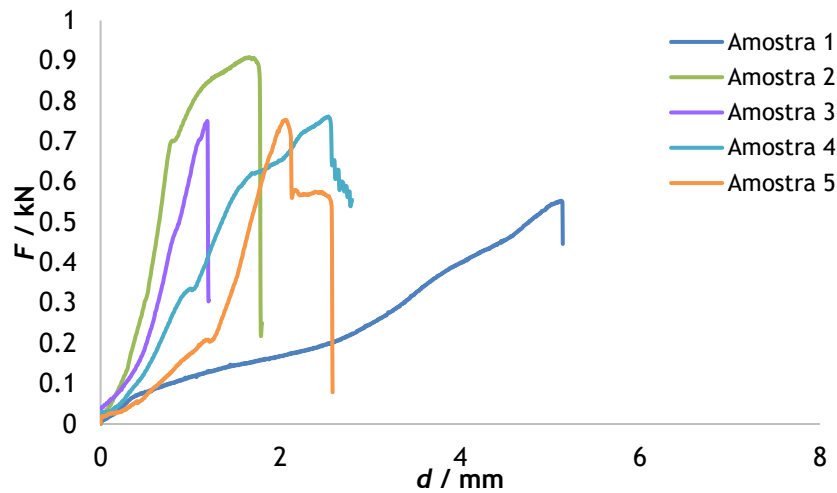


Figura D.3. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o painel convencional, obtida através de ensaios de compressão.

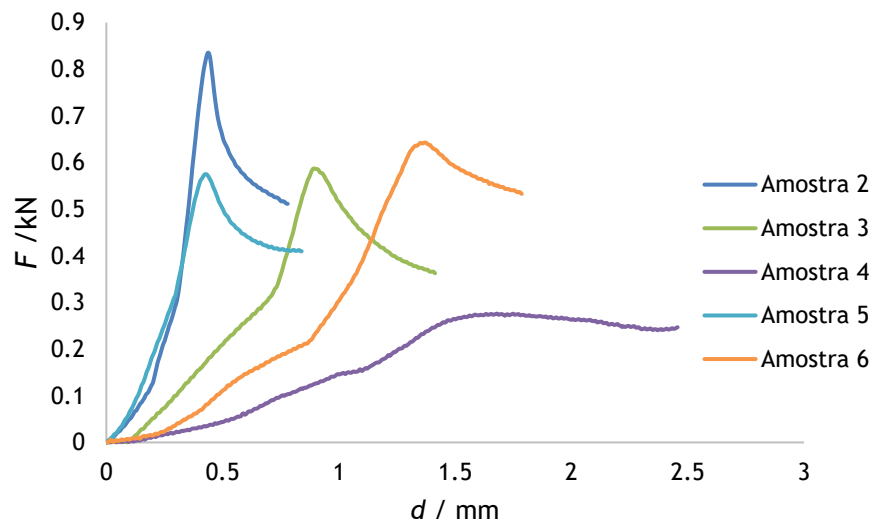


Figura D.4. Representação gráfica da força aplicada em função do deslocamento para o painel de base biológica, obtida através de ensaios de compressão.

Estudo da Impermeabilização do Aglomerado de Cortiça

No estudo da impermeabilização da cortiça realizou-se ensaios de DMA e DSC e os gráficos obtidos encontram-se apresentados de seguida.

Ensaio de DMA

Da Figura D.5 à Figura D.9 encontram-se apresentadas as representações gráficas do fluxo de calor em função da temperatura, obtidas através de DMA, para as várias misturas de resina e parafina, aerogel de sílica e aerogel de celulose.

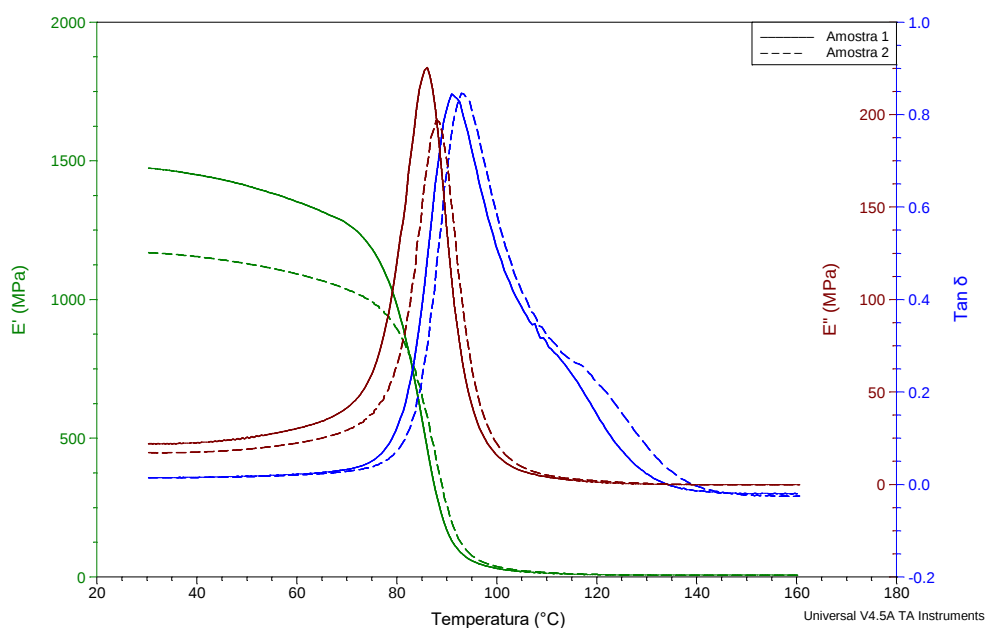


Figura D.5. Resultados de DMA para a mistura da formulação 1 da Tabela 5.

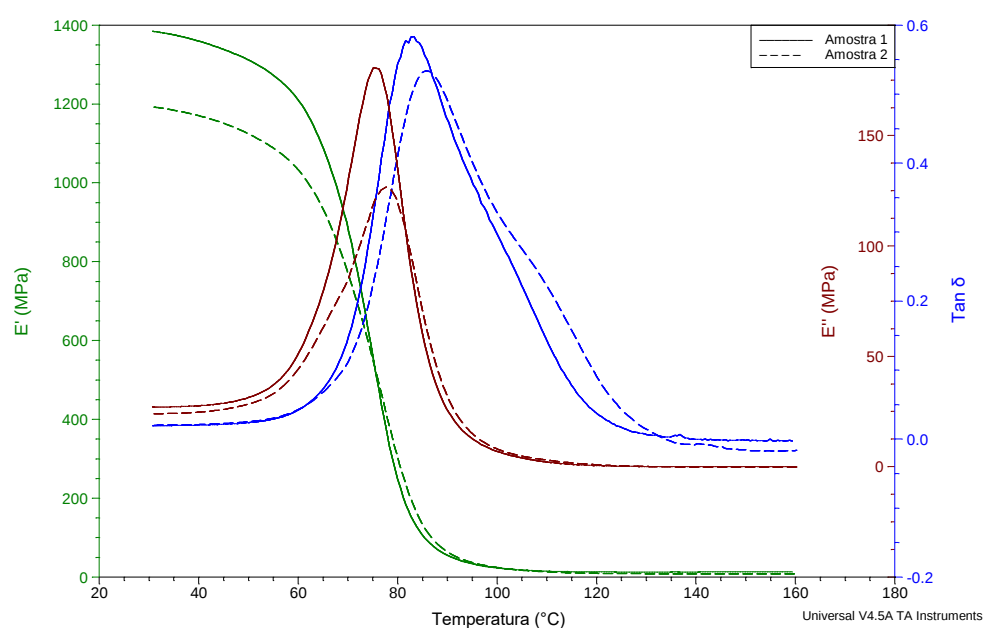


Figura D.6. Resultados de DMA para a mistura da formulação 2 da Tabela 5.

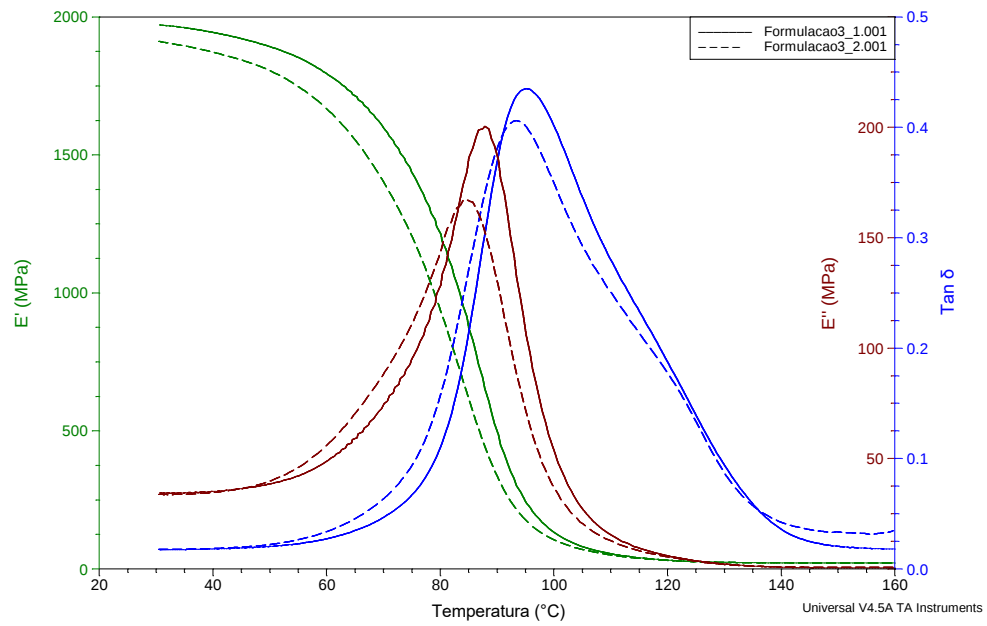


Figura D.7. Resultados de DMA para a mistura da formulação 3 da Tabela 5.

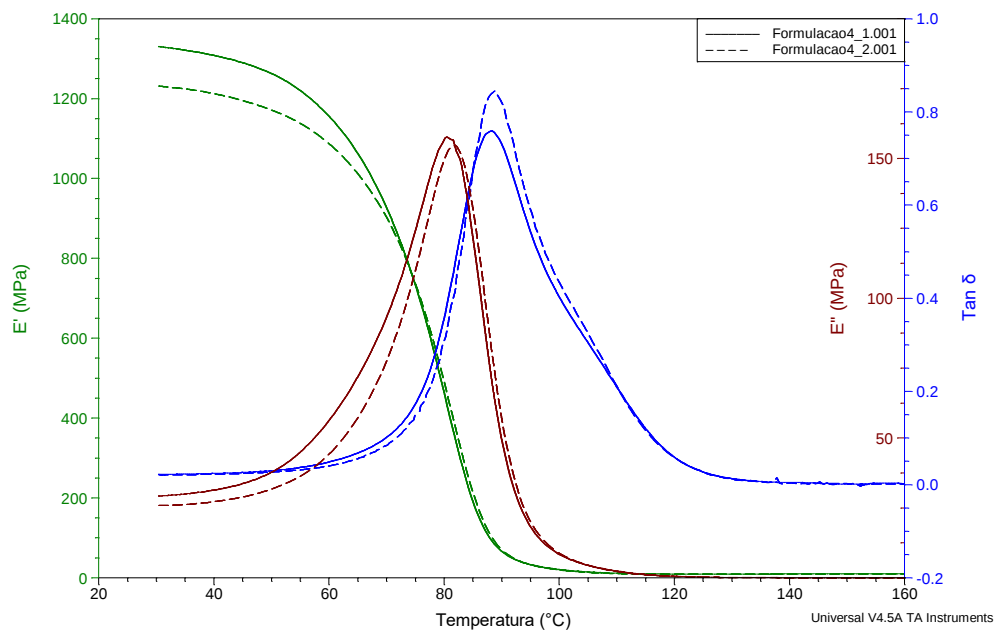


Figura D.8. Resultados de DMA para a mistura da formulação 4 da Tabela 5.

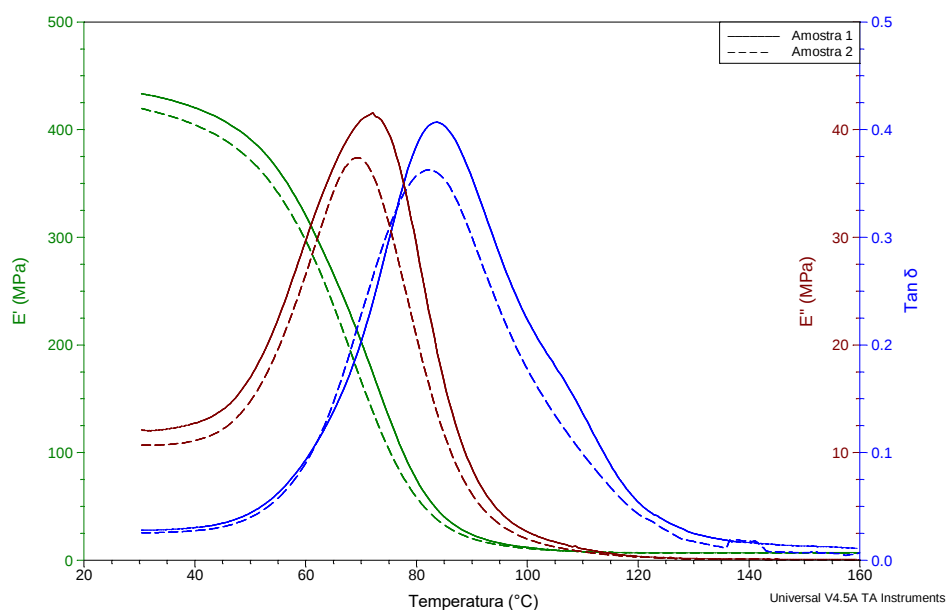


Figura D.9. Resultados de DMA para a mistura da formulação 5 da Tabela 5.

Ensaio de DSC

Da Figura D.10 à Figura D.18 encontram-se apresentadas as representações gráficas do fluxo de calor em função da temperatura, obtidas através de DSC, para as várias misturas de resina e parafina, aerogel de sílica e aerogel de celulose.

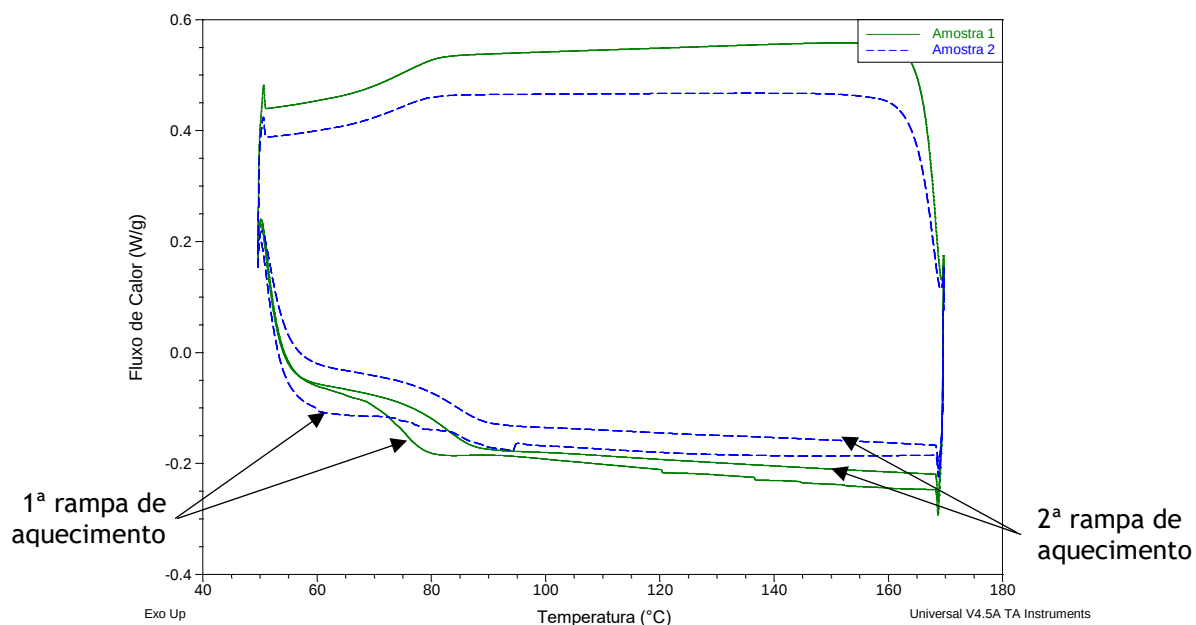


Figura D.10. Resultados de DSC para a mistura da formulação 1 da Tabela 5.

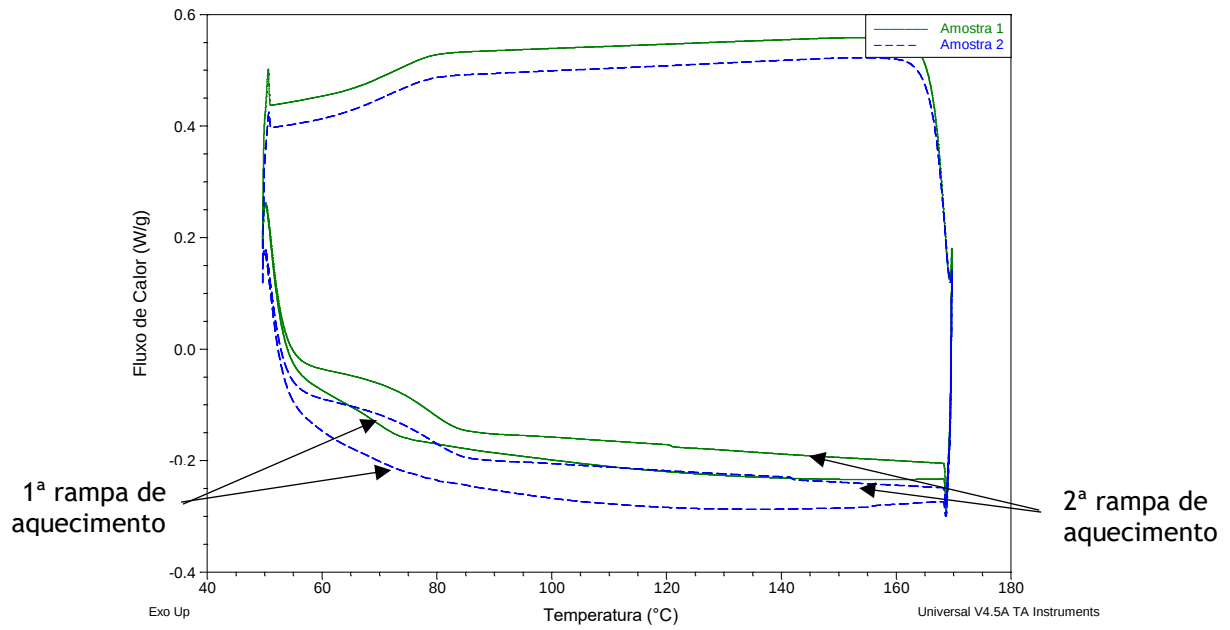


Figura D.11. Resultados de DSC para a mistura da formulação 2 da Tabela 5.

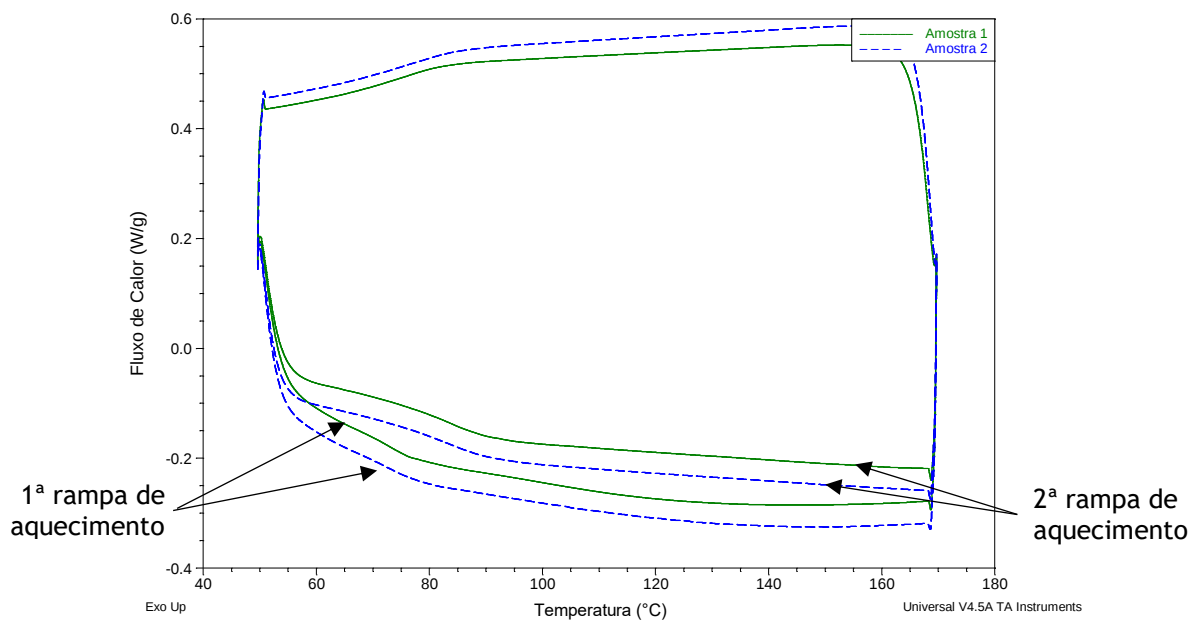


Figura D.12. Resultados de DSC para a mistura da formulação 3 da Tabela 5.

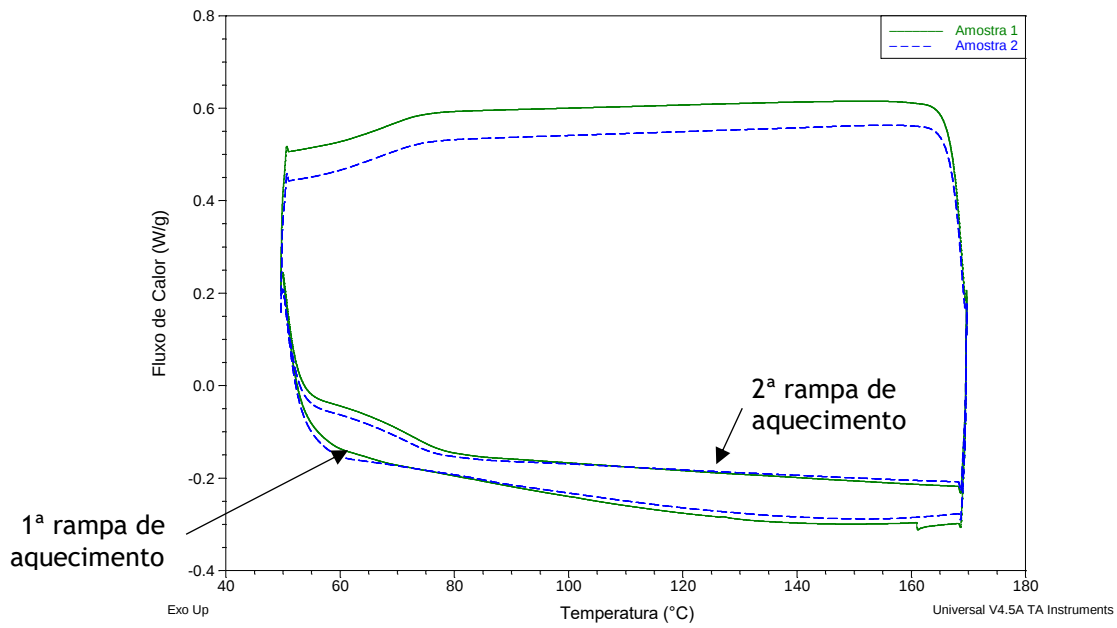


Figura D.13. Resultados de DSC para a mistura da formulação 4 da Tabela 5.

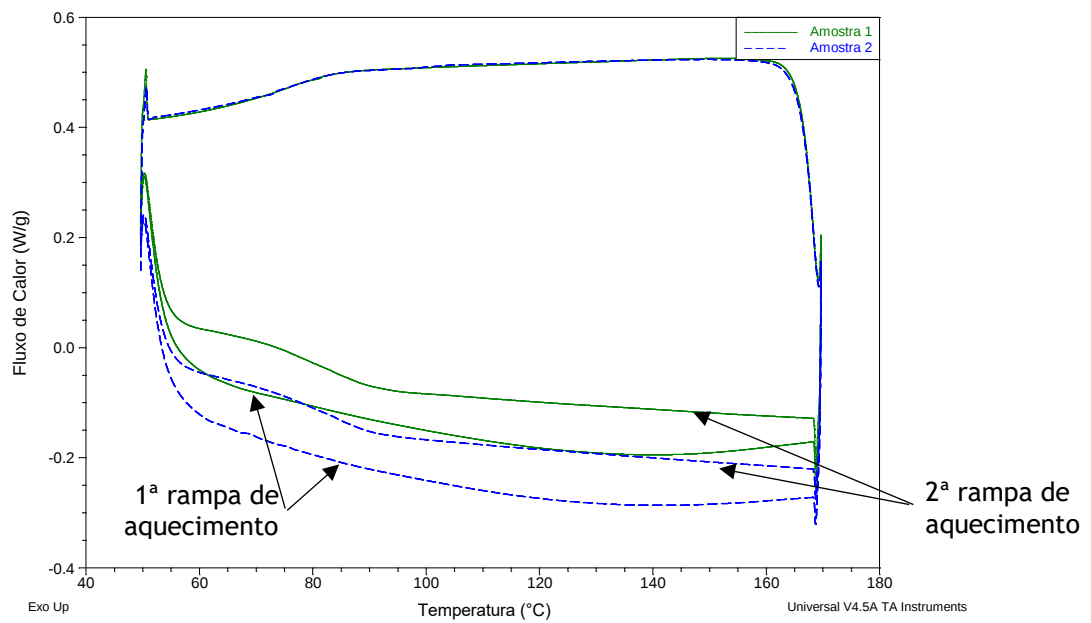


Figura D.14. Resultados de DSC para a mistura da formulação 5 da Tabela 5.

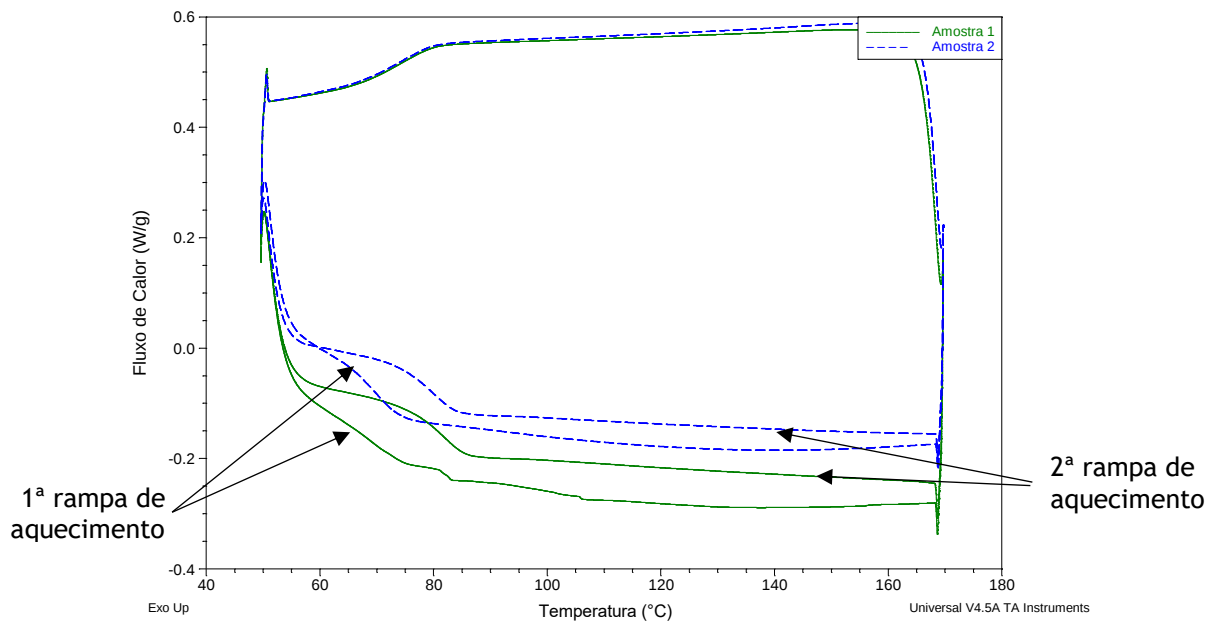


Figura D.15. Resultados de DSC para a mistura da formulação 6 da Tabela 5.

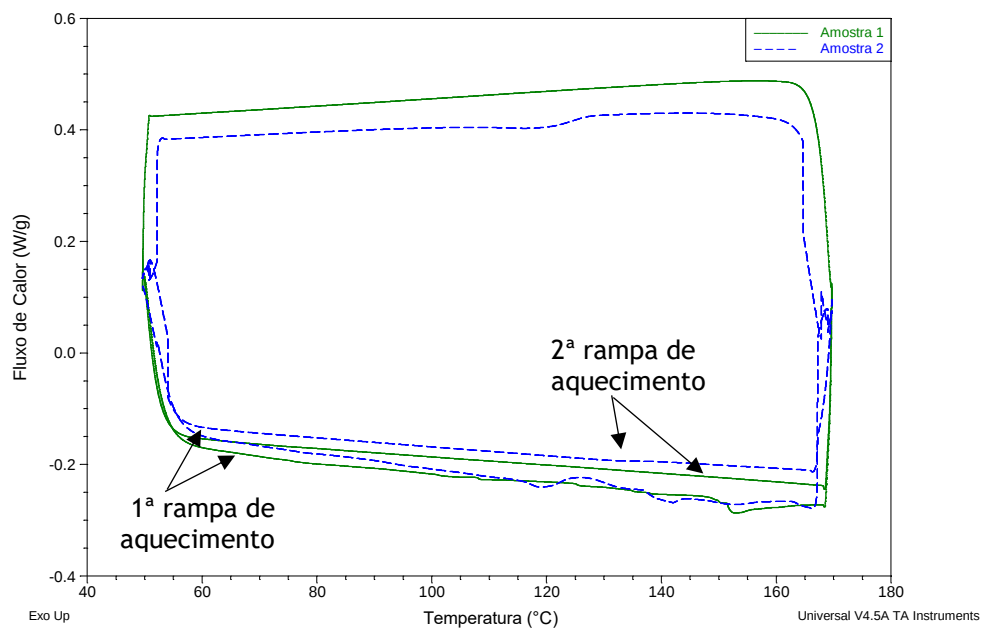


Figura D.16. Resultados de DSC para a mistura da formulação 7 da Tabela 5.

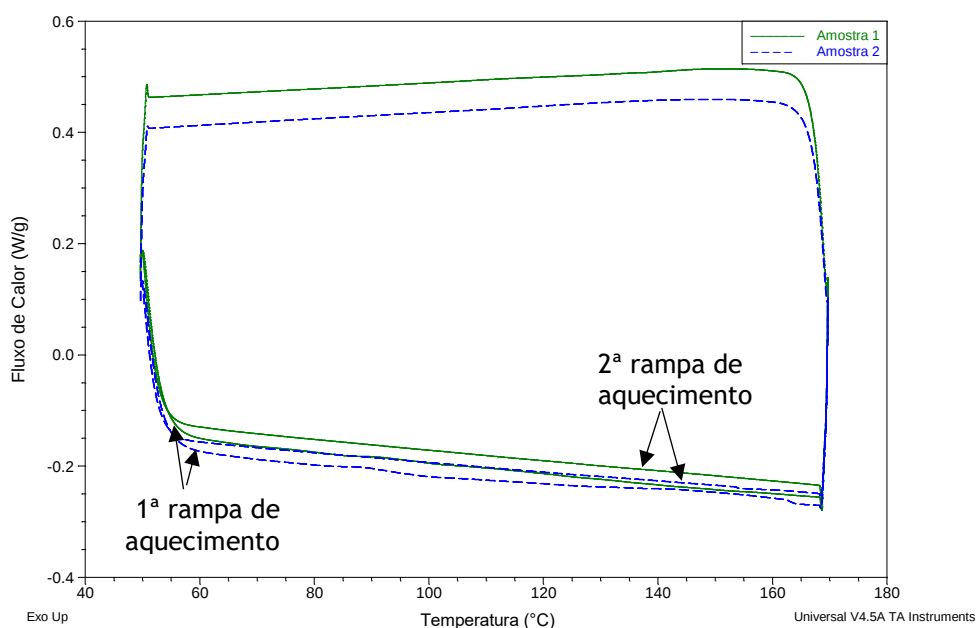


Figura D.17. Resultados de DSC para a mistura da formulação 8 da Tabela 5.

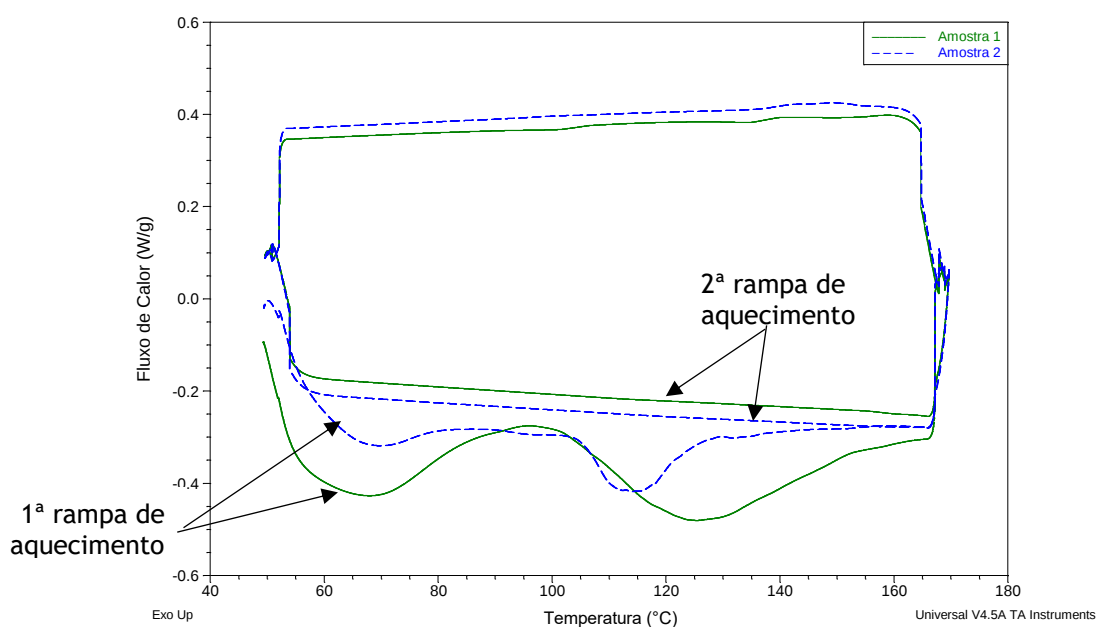


Figura D.18. Resultados de DSC para a mistura da formulação 9 da Tabela 5.

Método de Taguchi e ANOVA

Para obtenção das melhores condições a nível térmico das misturas das formulações apresentadas na Tabela 5 recorreu-se ao método de Taguchi e à análise estatística ANOVA. A Figura D.19 apresenta o gráfico de resposta para a temperatura de transição vítrea da segunda rampa de aquecimento dos ensaios de DSC.

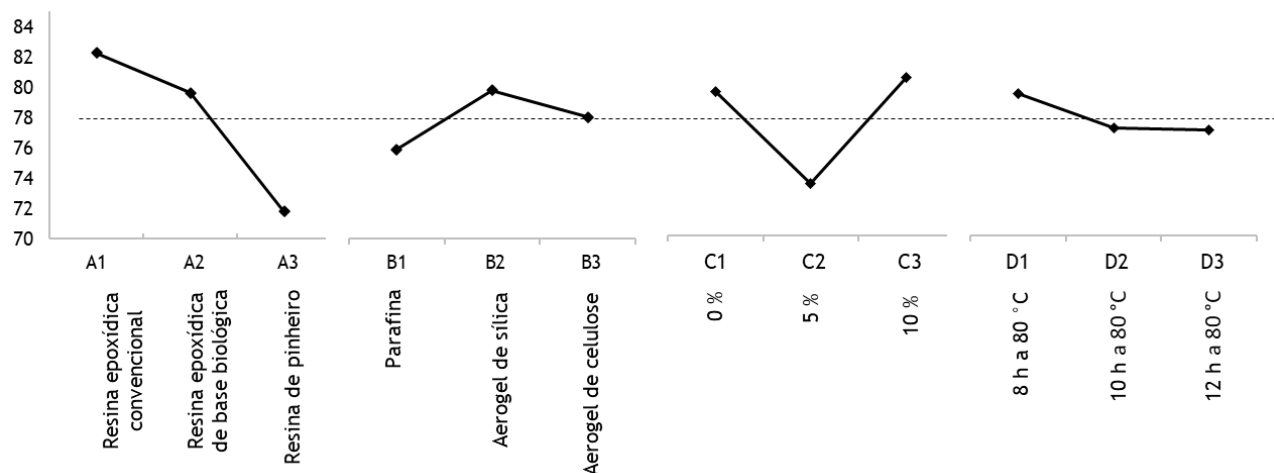


Figura D.19. Gráfico de resposta para o parâmetro temperatura de transição vítrea.

A Tabela D.1 apresenta os valores obtidos através da análise de variância do parâmetro relativos temperatura de transição vítrea.

Tabela D.1. Valores obtidos através da ANOVA para o parâmetro temperatura de transição vítrea.

Parâmetro	Fatores	Graus de Liberdade	Somatório dos quadrados	Desvio Médio Quadrático	Valor do Rácio do F-Teste	Porcentagem de Contribuição Para a Variação Global
Temperatura de Transição Vítrea	A: Tipologia Resina	2	356,13	178,06	52,48	55,27
	B: Tipologia Adição	2	45,69	22,84	6,73	6,15
	C: % Adição	2	177,25	88,63	26,12	26,97
	D: Cura	2	22,43	11,22	3,31	2,48

Apêndice E - Análise de Sustentabilidade

A Tabela E.1 apresenta as condições utilizadas no estudo da análise de sustentabilidade.

Tabela E.1. Condições utilizadas no estudo da análise de sustentabilidade dos laminados com as condições apresentadas na Tabela 4.

Formulação	m_{total} / g	$m_{\text{aproveitada}}$ / g	W_{resina} / %	W_{fibra} / %
1	213,6	132,7	30,5	69,5
2	217,3	155,3	26,9	73,1
3	215,2	150,0	28,0	72,0
4	205,0	152,2	28,0	72,0
5	215,3	154,1	24,7	75,3
6	209,8	132,5	24,2	75,8
7	216,9	120,4	28,4	71,6
8	205,0	168,9	25,5	74,5
9	214,2	126,2	27,1	72,9