Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Manuel Macedo Pereira

Desenvolvimento de Painéis estruturais e ecosustentáveis tipo sanduíche em compósito

Outubro de 2024

Desenvolvimento de Painéis estruturais e ecosustentáveis tipo sanduíche em compósito

Rui Manuel Macedo Pereira

UMinho | 2024

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Manuel Macedo Pereira

Desenvolvimento de painéis estruturais e ecosustentáveis do tipo sanduíche em materiais compósitos.

Dissertação de mestrado

Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)

Doutor Braian Uribe

Doutor Paulo Antunes

outubro de 2024

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos os que contribuíram para o meu percurso académico de alguma forma. Inicialmente agradeço à minha família por todo o apoio expressado, especialmente ao meu pai que sempre me encorajou a ir mais longe e a não desistir dos meus objetivos, independentemente das adversidades. Um grande agradecimento aos meus orientadores, Paulo Antunes e Braian Uribe, por me confiarem este trabalho e partilharem comigo a sua experiência e sabedoria e a sua colaboração ao longo deste projeto tal como a disponibilidade a ajudar-me sempre que necessário. Também gostaria de agradecer a toda a equipa do PIEP, principalmente à equipa de compósitos, entre estes a Joana Malheiro, por me ensinar os pilares da construção de estruturas sanduiche, ao Rafael Alves por todo o tempo que dispôs comigo e o auxílio prestado em diversas tarefas, igualmente ao Miguel Vasconcelos e Pedro Abreu. Obrigado a todos os meus amigos pela companhia e amizade nestes 5 anos. Um agradecimento à Doutora Teresa Sequeira e ao Doutor António Marinho, por serem incansáveis no tratamento da minha condição clínica. Por último gostaria de expressar os meus agradecimentos ao meu Sensei Cláudio Vilaça, além de professor e amigo sempre representou uma figura importante na minha vida e ensinou-me muito mais do que artes marciais. A todos muito obrigado.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

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

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

RESUMO

Entende-se por painéis sanduiche como um material compósito complexo constituído por duas faces (skins) de elevada rigidez e um núcleo de baixa densidade. A premissa deste tipo de construção é a obtenção uma estrutura de elevada razão entre resistência e peso.

Uma vez que, na visão daqueles com senso de responsabilidade ambiental, tais materiais merecem um futuro melhor do que um aterro. O problema atualmente enfrentado por este tipo de estruturas está enraizado no tipo de materiais utilizados na sua composição. É bastante comum encontrar painéis do tipo sanduíche cuja constituição envolve faces constituídas por matrizes termoendurecíveis com fibras sintéticas e/ou com núcleos de espumas sintéticas. Embora estes materiais confiram a um painel sanduiche tudo aquilo que necessita, desde propriedades mecânicas a baixa densidade, estes não são recicláveis ou emitem substâncias poluentes. Devido à situação ambiental atual e ao aumento da poluição causada pelo excesso de resíduos não recicláveis, a procura de novas soluções que permitam melhorar a circularidade é um tema ativo de grande importância.

Como resposta, neste trabalho estudou-se acerca de estruturas sanduíche em compósito, materiais mais utilizados e ramos de aplicações dos mesmos. Assim foram reunidas informações suficientes para a construção de um número de painéis sanduíche do tipo "favo de mel" ou honeycomb, com matriz termoplástica e fibras naturais como fase de reforço, tendo como aspeto inovador o desenvolvimento do núcleo. Para conceber estes produtos, são utilizados métodos de processamento convencionais, que além do foco na reciclabilidade também apresentam interesse em torno do desempenho mecânico. De tal forma foram levados a cabo ensaios físico-mecânicos para determinar a resistência à compressão, flexão e o comportamento face ao impacto de baixa velocidade. Deste modo é possível comparar as soluções existentes com a resultante deste trabalho. Assim é construído um painel sanduiche com um núcleo em formato *"honeycomb"*. A sua constituição envolveu apenas, a resina termoplástica (Elium ®) de polimetilmetacrilato (PMMA), como matriz e fibras naturais de linho, como reforço. A estrutura desenvolvida apresentou uma massa volúmica de 234 kg/m^3, uma resistência ao corte no nucleo de 0,43 MPa, durante a flexão e uma compressão máxima de 2,49 MPa, verificados no núcleo. Para além da capacidade de absorver uma energia de cerca de 13 J face ao impacto.

Por último é comprovada a possibilidade de reprocessamento do material a partir de processos de reciclagem mecânica e moldação por compressão a quente.

ABSTRACT

Sandwich panels are a complex composite material made up of two highly rigid faces (skins) and a low-density core. The premise of this type of construction is to acquire a structure with a high strength-to-weight ratio.

The problem currently faced by this type of structure is rooted in the type of materials used in its composition. It is quite common to find sandwich panels whose constitution involves faces made up of thermosetting matrices with synthetic fiber and/or foam cores. Although these materials give a sandwich panel, everything they need, from mechanical properties to low density, they're not recyclable or release toxic substances. Due to the current environmental situation and the pollution increased by excessive non-recyclable waste, humans have been looking for new solutions to improve circularity in the field of composite materials.

Since, in the view of those with a strong sense of environmental responsibility, such materials deserve a better future than a landfill. As a result, a study has been carried out on the processing of sandwich structures, the most used materials and their application areas. Sufficient information was gathered to build several honeycomb sandwich panels with a thermoplastic matrix and natural fibers. Conventional processing methods are used to design these products. In addition to focusing on recyclability, there is also a concern and interest in verifying the mechanical properties resulting from this study. Physical and mechanical tests are therefore carried out to determine the density and resistance to compression, bending and impact. In this way it is possible to compare existing solutions with the one resulting from this work. A sandwich panel with a *honeycomb* core was built. Its constitution involves only polymethylmethacrylate (PMMA) thermoplastic resin (Elium ®) as a matrix and natural flax fibers as reinforcement. It has a density of 234 kg/m^3 and a shear strength of 0,43 MPa and a maximum compression of 2,49 MPa, verified in the core. It also has the capacity to absorb an impact energy of around 13 J.

Finally, the possibility of reprocessing the material is proven, which indicates the possibility of mechanical recycling at the end of the product's life. This culminates in the conclusion of this study and the presentation of future work.

ÍNDICE

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho II

1 Introdução 1

1.1 Objetivos 2

1.2 Empresa 2

2 Estado de arte 3

2.1 Materiais compósitos 3

2.2 Painel Sanduíche 5

2.3 Materiais de uso convencional 7

2.4 Principais propriedades dos painéis sanduíche no mercado 8

2.5 Núcleos convencionais vs Núcleos termoplásticos 9

2.6 Métodos de produção das estruturas sanduíche 10

3 Trabalho desenvolvido anteriormente 12

4 Materiais e Métodos 21

4.1 Descrição dos materiais 21

4.2 Metodologia 21

5 Resultados e discussões 40

5.1 Observação morfológica do núcleo 40

5.2 Determinação da massa volúmica. 41

5.3 Ensaios físico-mecânicos 43

5.4 Ensaio de resistência ao impacto 50

5.5 Absorção de água 52

5.6 Reprocessamento do produto final 54

6 Conclusões 56

7 Trabalhos futuros 58

8 Referências 59

SIGLAS

PIEP	Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros
ACC	Amorim Corck Composites
DEP-UM	Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho
IAPMEI	Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação
EP	epóxi
UP	polyester insaturado
PE	polietileno
PP	polipropileno
PS	poliestireno
PMMA	polimetilmetacrilato

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de obtenção de bio-compósitos, (retirado de [7]). 3
Figura 2 - Painel Sanduíche. 6
Figura 3 - Painel sanduíche da ThermHex, retirado de [26]. 11
Figura 4 – Materiais utilizados na construção da estrutura sanduíche. 12
Figura 5 - Primeira conformação em bolsa de vácuo. 13
Figura 6 - Segunda conformação. 14
Figura 7 - Corrugado. 14
Figura 8 - Núcleo honeycomb. 15
Figura 9 - Produção das faces. 16
Figura 10 - Face da estrutura sanduíche. 16
Figura 11 - Fases do processo de montagem do painel estratificado. 17
Figura 12 - Estrutura sanduíche. 17
Figura 13 - Defeito comum na segunda conformação. 17
Figura 14 - Fenómenos observados no núcleo; a) e d) diferença de nível na parede das células; b) distorção das pareces das células; c) desfasamento das paredes das células; e) défice de adesão entre o prepreg e a cortiça; f) zona de soldadura sem defeitos. 18
Figura 15 - Défices de adesão na interface núcleo/faces. 19
Figura 16 - Base de vidro utilizada na infusão. 22
Figura 17 - Sistema de infusão a vácuo. 22
Figura 18 - Panela onde o excesso de resina é armazenado. 23
Figura 19 - Placa resultante da infusão a vácuo. 24
Figura 20 - Placas recortadas (280x200) mm. 24
Figura 21 - Equipamento de processamento por moldação compressão a quente. 25
Figura 22 - Molde de estrutura corrugada. 26
Figura 23 - Primeira tentativa de construção do corrugado. 26
Figura 24 - Corte do corrugado. 27
Figura 25 - Posicionamento das tiras corrugadas para formar a estrutura honeycomb. 27
Figura 26 – Conjunto de ventosas. 28
Figura 27 - Sistema automatizado de soldadura da estrutura honeycomb. 28
Figura 28 - Sistema de montagem com a inclusão do krelos. 29
Figura 29 - Construção do núcleo. 30

Figura 30 - Colagem das faces/skins com o núcleo. 31
Figura 31 - Painéis sanduiche, pós corte. 32
Figura 32 - Provetes redimensionados. 32
Figura 33 - Ensaio de flexão em 3 pontos. 34
Figura 34 - Ensaio de compressão. 35
Figura 35 - Esquema ilustrativo da determinação do módulo secante. 36
Figura 36 - Amostra colocada no equipamento de ensaio ao impacto. 37
Figura 37 - Equipamento utilizado para triturar o material. 39
Figura 38 – Observação, na lupa microscópica, de diversas uniões de paredes de célula de diferentes núcleos. 40
Figura 39 - Núcleo Honeycomb concebido pelo novo método de construção. 41
Figura 40 - Execução da determinação dimensional das amostras. 42
Figura 41 - Gráfico, força vs deslocamento, referente ao ensaio de flexão. 43
Figura 42 - Curva tensão vs deformação de vários materiais, entre eles PMMA, retirado de [32]. 44
Figura 43 - Observação SEM, face de painel sanduíche que sofreu deformação plástica. 45
Figura 44 - Observação SEM, face paralela à contorcida. 46
Figura 45 - Gráfico de força vs deslocamento, referente ao ensaio de compressão. 47
Figura 46 - Gráfico de tensão vs deformação, referente ao ensaio de compressão. 48
Figura 47 - Estado de compressão. 49
Figura 48 - Curva, força vs tempo referente ao ensaio de impacto. 51
Figura 49 - Processo de estabilização da massa. 53
Figura 50 – Procedimento experimental do ensaio de absorção de água. 53
Figura 51 – Evolução da percentagem mássica de absorção de água. 54
Figura 52 - Processamento da placa reciclada. 55
Figura 53 - Comparação de resultados entre material virgem e reprocessado. 55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa entre resinas termoplásticas e termoendurecíveis, adaptado de [8] e [9]. 4

Tabela 2 - Comparação de propriedades mecânicas entre fibras naturais e sintéticas, adaptado de [8] e [9]. 5

Tabela 3 - Propriedades físico-mecânicas de painéis, retirados da literatura em [18]. ... 8

Tabela 4 - Comparação das propriedades dos materiais usados nos núcleos honeycomb, adaptado de [16]. 9

Tabela 5 - Características dos Prepregs da BPREG. 12

Tabela 6 - Características da cortiça da ACC. 12

Tabela 7 - Medições efetuadas para determinar a densidade. 19

Tabela 8 - Propriedades da Resina ELIUM® 188. 21

Tabela 9 - Propriedades da fibra de linho da ampliTex. 21

Tabela 10 - Dimensões dos provetes de ensaio de flexão. 33

Tabela 11 - Dimensões das amostras, ensaio de compressão. 35

Tabela 12 - Cálculo da massa volúmica. 41

Tabela 13 - Ensaio de flexão, resultados. 43

Tabela 14 - Comparação de propriedades com [33]. 46

Tabela 15 - Resultados experimentais referentes ao ensaio de compressão. 48

Tabela 16 - Comparação de resultados, compressão, com [33]. 49

Tabela 17 - Comparação de propriedades físico-mecânicas com [35]. 49

Tabela 18 - Tabela de propriedades físico-mecânicas retiradas de [35], comparativamente ao núcleo desenvolvido neste trabalho. 50

Tabela 19 - Resultados, ensaio de resistência ao impacto. 51

Tabela 20 - Comparação com [37]. 52

Tabela 21 - Processo de estabilização de massa. 52

Tabela 22 - Caracterização da percentagem mássica de absorção de água após 24 horas. 53

1 INTRODUÇÃO

Este estudo consiste no desenvolvimento de um tipo de estrutura sanduíche em material compósito ecosustentável com boas propriedades físicas e mecânicas. O conceito surge da necessidade de incorporar materiais compósitos, recicláveis com elevada relação resistência/peso em diversas áreas industriais. A oferta dos painéis sanduiche estende-se desde aplicações na construção civil a elementos estruturais na indústria automóvel e ferroviária, o uso de materiais de alto desempenho permite às estruturas sanduíche ocupar lugar na indústria naval e aeroespacial inclusive[1], [2], [3]. Atualmente, os materiais mais utilizados na construção destas estruturas são baseados em resinas termoendurecíveis, espumas de Poliuretano, Poliestireno, entre outras. Embora estes materiais apresentem um desempenho adequado em termos mecânicos, facilidade de impregnação das fibras de reforço e simplicidade do processo de cura, estes são acompanhados por limitações severas em questões de circularidade, devido à impossibilidade de reutilização desta tipologia de materiais. A questão ambiental e gestão de recursos, como os combustíveis fósseis, que são a principal fonte de obtenção tanto dos polímeros termoplásticos como termoendurecíveis, promove grande interesse no desenvolvimento de produtos mais sustentáveis. Assim, componentes reaproveitáveis e/ou recicláveis após o fim de vida, ou mesmo produzidos a partir de fontes biológicas adquirem um grande valor, principalmente para o consumidor final com uma visão de responsabilidade ambiental.

Em suma, procura-se explorar o uso de resinas termoplásticas na construção de painéis sanduíche, adotando uma metodologia que consta em produzir painéis aptos para testar e verificar posteriormente através de ensaios físicos e mecânicos. É esperado obter um produto sem defeitos relevantes, com boas propriedades mecânicas e físicas em termos comparativos com um material comercial. Nesta proposta de investigação opta-se pela implementação de núcleos do tipo favo de mel *"honeycomb"* na construção dos painéis sanduíche de matiz termoplástica, sendo a adesão núcleo/faces restrita devido à área de contacto reduzida. Assim este estudo tem como interesse secundário melhorar essa adesão.

1.1 Objetivos

Desenvolver um painel em compósito com estrutura sanduíche com possibilidade de implementar um processo de reciclagem mecânica, após sua vida útil, e que apresente propriedades físico-mecânicas próximas a alguma das soluções comerciais existentes. Como meio de atingir o objetivo principal seguem-se objetivos específicos:

- Desenvolver um núcleo do tipo honeycomb com tecnologia própria que permita a manufatura da estrutura compósita de alta rigidez.;
- Desenvolver um processo de fabrico da estrutura compósita, nomeadamente a região face-núcleo de forma a estabelecer a melhor condição de adesão possível;
- Caracterizar as propriedades mecânicas e físicas da estrutura compósita tipo sanduíche que permita o desenvolvimento de um protótipo viável que possa ser comparado com uma solução já existente no mercado;
- Verificar a viabilidade da obtenção de um novo produto, na forma de placa plana através de processos de reciclagem mecânica do painel previamente desenvolvido e do posterior processamento através e moldação por compressão a quente.

1.2 Empresa

Este trabalho é concebido em comunidade com a empresa, Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP). O PIEP é uma associação de direito privado, de matriz tecnológica e científica, com um modelo de gestão empresarial. Constituído em 13 de dezembro de 2000 por iniciativa da indústria e em estreita colaboração com o Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho (DEP-UM) e com o Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação (IAPMEI), o PIEP pretende dar uma resposta de excelência na entrega de produtos e serviços em tempo oportuno, orientada às necessidades das empresas do sector dos plásticos e afins[4].

A Amorim Cork Composites contribui para o desenvolvimento do trabalho através do fornecimento de matéria-prima, detém uma posição de liderança mundial na indústria da cortiça, atividade que constitui ainda hoje o seu principal negócio, agrupado em 5 áreas: matérias-primas, rolhas, revestimentos, isolamentos e aglomerados compósitos. A ACC (Amorim Cork Composites) tem como missão Valorizar a cortiça, desenvolvendo soluções com compósitos sustentáveis para múltiplas aplicações[5].

2 ESTADO DE ARTE

2.1 Materiais compósitos

Um compósito é definido como um material que constituído por dois ou mais componentes e resulta num material com propriedades, de modo geral, superiores às dos seus constituintes isolados. Por definição os componentes que constituem um material compósito são denominados de matriz, reforço e a região de transição entre estas, denominada de interface [6].

Sendo materiais classificados como anisotrópicos, as suas propriedades físicas e mecânicas variam consoante as direções de aplicação do estímulo, porém há formas de compensar essa anisotropia, como a orientação das fibras na matriz. As suas propriedades também estão dependentes de diversos fatores como as propriedades originais dos seus constituintes e da sua proporção em volume ou massa.

Apesar das limitações deste tipo de matérias, em termos ambientais, é possível aproximá-los a soluções mais amigas do mesmo, nomeadamente os bio-compósitos que são fundamentalmente compósitos constituídos totalmente por componentes de base biológica. A Figura 1 representa esquematicamente o processo de obtenção destes materiais. É importante referir que o conceito de bio-compósito difere de reciclável ou biodegradável.

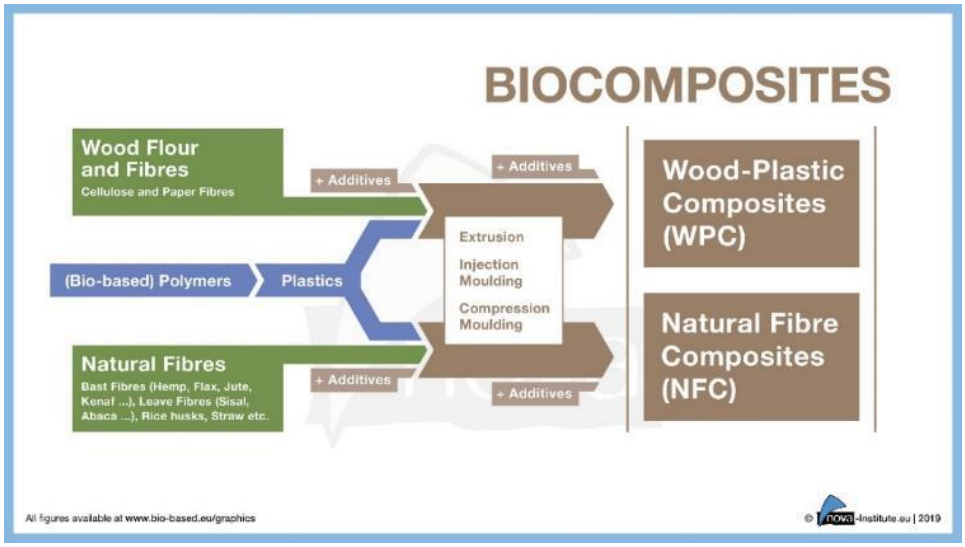


Figura 1 - Esquema de obtenção de bio-compósitos, (retirado de [7]).

Para além dos bio-compósitos existem outras soluções favoráveis ambientalmente, como é o caso dos compósitos bio que podem ter pelo menos uma das fases de origem renovável, podendoser reciclados, mas não biodegradáveis.

2.1.1 Matriz

A matriz é a fase contínua do material compósito e assegura a coesão da carga/reforço. Possui várias opções de constituição entre elas metálicas, cerâmicas ou poliméricas. O foco deste estudo em concreto encontra-se nas matrizes poliméricas que podem ser divididas em dois tipos, termoendurecíveis e termoplásticas [6]. Na Tabela 1 é possível fazer a comparação das propriedades mecânicas de algumas das resinas poliméricas mais utilizadas como matriz, para ambas as tipologias de material acima alencadas

Tabela 1 - Tabela comparativa entre resinas termoplásticas e termoendurecíveis, adaptado de [8] e [9].

resinas	massa volúmica (kg/m³)	módulo de Young E (GPa)	resistência a tração (MPa)	deformação (%)
termoplásticas				
polimetilmetacrilato (PMMA)	1190	3	74	6
Nylon	1160	2,4	60	90
polietileno (PE)	950	0,7	20 - 30	20 - 100
polipropileno (PP)	900	1,3	27	200 - 700
Poliestireno (PS)	1050	3,4	48	3
PVC	1330	3,4	48	200
termoendurecíveis				
poliéster	1200	4	65	2,5
Epóxi	1200	3	90	8
viniléster	1120	3,5	82	6
fenólica	1240	2,5	40	1,8
poliuretano	varia	2,9	71	5,9

2.1.1.1 Matriz Termoendurecível

Os materiais termoendurecíveis geralmente, antes de processados, encontram-se no estado líquido à temperatura ambiente. É durante o processo de cura que adquirem forma e solidificam no término do procedimento. Este processo é irreversível e os produtos assim obtidos são infusíveis e insolúveis na maioria dos solventes. Na maioria dos casos as matrizes termoendurecíveis são mais rígidas que as termoplásticas [6]. Dentro das resinas termoendurecíveis as aplicadas mais frequentemente são as resinas de poliéster insaturado, fenólicas e epóxi.

2.1.1.2 Matriz Termoplástica

As matrizes termoplásticas caracterizam-se por possuírem cadeias lineares e podem ser transformadas (moldadas) quando o polímero está no estado fundido. A maioria dos métodos de processamento implica o aquecimento do material seguido de manipulação da forma e incluem sempre uma etapa de arrefecimento. Esta última etapa permite que o polímero preserve a forma adquirida no processamento. Ao contrário da cura, o processamento de materiais termoplásticos é reversível, abrindo as portas para a reciclagem [6].

2.1.2 Reforço fibroso

É a fase descontinua da estrutura compósita, podendo ser classificas como fibras longas ou curtas de origem naturais ou sintéticas. Na Tabela 2 é possível visualizar uma comparação das propriedades mecânicas das fibras sintéticas mais utilizadas com as fibras naturais.

Tabela 2 - Comparação de propriedades mecânicas entre fibras naturais e sintéticas, adaptado de [8] e [9].

tipo de fibra	massa volúmica (kg/m^3)	módulo de Young (GPa)	resistência a tração (MPa)	deformação (%)
natural				
linho	1,4–1,5	0,0276–0,08	345–1500	1,2–3,2
Juta	1,3–1,46	0,010–0,030	393–800	1,5–1,8
fibra de urtiga	1,51	0,038	650	1,7
fibra de algodão	1,21	0,0055–0,0126	287–597	3–10
fibra de coco	1,2	0,004–0,006	175–220	15–30
sintética				
vidro tipo E	2,57	41,5	3400	2,5
carbono	1,7	250	3700	2
aramida	1,4	70-190	2800-4100	2,4

2.2 Painel Sanduíche

Um painel sanduíche é um material compósito complexo constituído por duas faces (skins) de elevada rigidez e um núcleo de baixa densidade, ver Figura 2. As estruturas sanduíche usufruem de um acréscimo de espessura e rigidez sem aumento significativo do peso, consequentemente diminuindo o consumo de matéria-prima e assim os custos de produção [10]. Os painéis compósitos do tipo sanduíche apresentam um grande potencial como resposta a inúmeros requisitos onde uma relação entre rigidez e resistência mecânica especificas são imperativas. Por este motivo as estruturas compósitas do tipo sanduíche são o recurso de eleição para várias indústrias como por exemplo, a construção civil, a ferroviária e a indústria automóvel. É averiguável

que apesar de deter praticamente a mesma massa das faces compósitas, um painel sanduíche exibe maior resistência à flexão e rigidez específica [11].

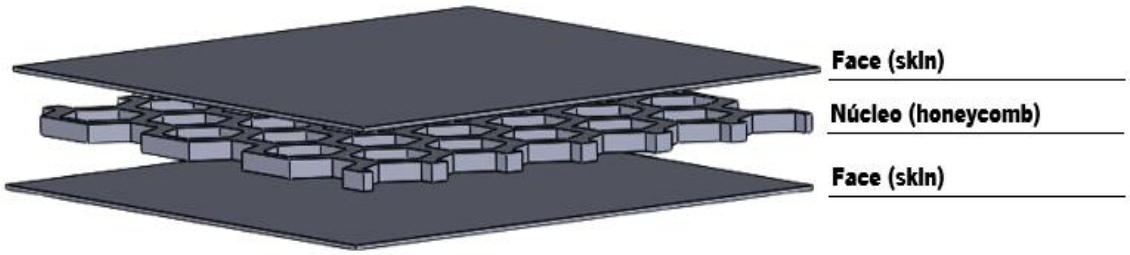


Figura 2 - Painel Sanduíche.

Consoante as diferentes combinações de faces e núcleos é possível obter propriedades e performances distintas, em particular uma elevada razão entre resistência e peso [12]. Ou seja, existem inúmeras opções disponíveis de modo a compor um painel sanduiche, variando a orientação e tipo de fibras e as resinas utilizadas, tal como alternar conformações e materiais, no núcleo.

2.2.1 Faces

As duas faces compósitas, na sua grande maioria, consideram resinas termoendurecíveis, sobretudo pelas suas propriedades mecânicas superiores e baixas viscosidades, durante o processamento, que favorecem a impregnação das fibras assim como os benefícios do processo de cura. Também há compósitos com matriz termoplástica que ultimamente recebem mais importância devido à maior consciencialização ambiental e reaproveitamento da matéria-prima. Pelo mesmo motivo atualmente desenvolvem-se resinas de origem biológica. Quanto aos reforços fibrosos podem enquadrar-se em duas categorias principais, as fibras naturais e as sintéticas. As fibras naturais possuem algumas vantagens quando comparadas com as sintéticas: são mais baratas, possuem menor massa por unidade de área, são reaproveitáveis e biodegradáveis, não provocam irritação cutânea e providenciam boas propriedades de isolamento acústico. Por outro lado, a sua contraparte vence em termos de propriedades mecânicas e resistência à humidade. Mesmo assim as fibras naturais são viáveis em diversas aplicações desde mobília e embalamento a usos mais complexos como materiais de construção e peças estruturais de automóveis [13]. Uma vez que os materiais compósitos são anisotrópicos, a orientação e disposição do reforço fibroso é de extrema importância pois dita as propriedades mecânicas do estratificado nas diferentes direções.

2.2.2 Núcleo

O constituinte central do painel sanduiche denominado de núcleo é uma estrutura celular que apresenta uma vasta gama de materiais e formas a dispor. Classificam-se como celular estocástico e celular periódico. As estruturas celulares estocásticas compreendem todo o tipo de espumas quer de célula aberta ou fechada e os núcleos celulares periódicos consistem na repetição de uma unidade celular de forma periódica a fim de conceber uma estrutura. É neste nicho que os núcleos do tipo honeycomb ou favo de mel se encontram [14].

Os núcleos do tipo honeycomb constam num conjunto de células habitualmente hexagonais regulares e são concebíveis em diversos materiais como por exemplo o cartão, alumínio, até mesmo em materiais compósitos e poliméricos entre os quais, acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), policarbonato (PC), polipropileno (PP) e polietileno (PE). Embora os núcleos honeycomb detenham uma elevada rigidez e sejam extremamente leves, a área de ligação com as faces é bastante reduzida, consequentemente prejudicando a adesão núcleo/faces. Selecionar materiais compatíveis entre si pode minimizar os problemas de adesão[12]. Os núcleos honeycomb permitem a inserção de espumas entre as células de modo a adquirir propriedades extra, entre as quais de isolamento (térmico e acústico) ou adquirir propriedades anti chama com a inserção espumas fenólicas.

2.3 Materiais de uso convencional

Para termos práticos considera-se neste momento que os materiais utilizados na construção das estruturas sanduíche são divididos em materiais reforçados e não reforçados. Os materiais reforçados normalmente utilizados nas faces não diferem dos habitualmente empregues na produção dos materiais compósitos. Entre os quais, as resinas termoendurecíveis predominam, sendo as mais populares, a resina de poliéster insaturado (UP), epóxi (EP) e fenólicas [15], [16], [17].

Na categoria de reforço fibroso, a fibra de vidro, devido à relação preço/propriedades mecânicas, é a mais utilizada. Porém quando o mercado alvo exige melhores propriedades específicas acompanhadas por baixas densidades, as fibras de aramida e de carbono apesar de muito mais caras assumem a liderança. Por vezes também é comum o uso de fibras naturais. Quanto aos materiais, não reforçados, presentes nas faces das estruturas sanduíche, englobam laminas de madeira, polímeros não reforçados, sendo, de longe os mais utilizados nesta categoria, as chapas metálicas, devido à relação preço/propriedades mecânicas [15], [16], [17].

Há diversas soluções para a construção de núcleos. A categoria selecionada influência fortemente o material selecionado. Sendo assim, para núcleos celulares estocásticos as opções mais comuns são espumas de poliestireno expandido (EPS) e poliuretano (PU). No caso de núcleos celulares periódicos os núcleos em favo de mel são os mais dominantes. Estes últimos possuem uma vasta gama de materiais atualmente existentes no mercado, entre os quais: chapas metálicas, polímeros reforçados e não reforçados e, o cartão. As soluções mais comuns são, o alumínio e fibra de aramida, impregnada com resina fenólica, que eventualmente adquiriu a designação comercial de Nomex [15], [16], [17].

Assim as estruturas sanduíche beneficiam de um grande aumento de rigidez e espessura sem a necessidade de aumentar o peso ou a densidade. Embora as faces sejam mais resistentes e suportem as cargas principais de tração e compressão, o núcleo deve apresentar grande resistência à compressão e a tensões de corte pois, em flexão, as tensões de corte são exercidas no núcleo. Pelo facto das faces possuírem maior resistência, na ocorrência de falha a rotura observa-se normalmente no núcleo [18].

2.4 Principais propriedades dos painéis sanduíche no mercado

Para o melhor conhecimento do mercado e das propriedades existentes no ramo verifica-se o exemplo de [19], onde se abordam as propriedades de estruturas sanduiche multicamada com núcleo de cortiça, desenvolvidas para aplicar em interiores de edifícios. O trabalho executado em [20] assemelha-se ao aqui presente, pelo facto de procurar desenvolver painéis sanduiche "verdes". A aplicação dessas estruturas sanduiche, é focada na área da construção e são apresentados dados acerca das propriedades termomecânicas dos painéis. Na Tabela 3 encontram-se propriedades físico-mecânicas de alguns painéis, retirados da revisão literária.

Tabela 3 - Propriedades físico-mecânicas de painéis, retirados da literatura em [18].

Designação	**Massa volúmica(kg/m³)**	**Sp. Resistência à flexão, $[N.m/kg]$**	**Sp. Módulo de flexão, $[N.m/kg]$**
Núcleo de espuma de perlite/silicato de sódio com revestimento compósito de resina epóxi reforçada com fibra de juta	590	$6{,}5\times10^{3}$	$6{,}10 \times 10^{5}$
Placa comercial de celulose	1560	$1{,}224 \times 10^{4}$	$6{,}10 \times 10^{5}$
Painel de perlite/silicato de sódio reforçado com fibra de nylon	410	$2{,}68\times 10^{3}$	$6{,}10 \times 10^{5}$
Painel de gesso	1000	$2{,}26 \times 10^{3}$	$2{,}120 \times 10^{6}$

As propriedades apresentadas na tabela estão apresentadas sob a forma de propriedades especificas (Sp.), isto é, o valor apresentado é referente ao valor da propriedade original dividido pela massa volúmica do material. Esta forma de apresentação de dados permite estabelecer uma relação, por exemplo, da resistência em função da densidade.

2.5 Núcleos convencionais vs Núcleos termoplásticos

Os honeycomb de polipropileno (PP), um termoplástico, possuem baixa massa volúmica excelente resistência a corrosão, contudo menor resistência à compressão e ao corte quando comparados aos metais e às aramidas (ver Tabela 4), porém superiores às espumas e ao cartão. Acima de tudo demonstra boa resistência à fadiga, motivo pelo qual em outras utilizações este material é utilizado para engates rápidos e dobradiças integradas, e ao contrário dos metais aramidas e etc. possui a capacidade de recuperar deformações, porém em certos casos só parcialmente [16].

Tabela 4 - Comparação das propriedades dos materiais usados nos núcleos honeycomb, adaptado de [16].

Propriedades	Alumínio	Fibra de Aramida	Polipropileno (PP)
Resistência à compressão (MPa)	0,9 – 11	0,4 – 15	0,9 – 2,2
Módulo de elasticidade face à compressão (MPa)	165 – 2414	60 – 600	62 – 97
Resistência ao corte (MPa)	0,4 – 5	0,4 – 3,5	0,4 – 0,8
Módulo de distorção (MPa)	55 - 930	14 - 115	13 - 19
Absorção de água (%)	≈ 0	3,4 – 4,4	<0,1
Massa volúmica [kg/m^3]	2600 - 2900	1400	910

Por observação da Tabela 4, é visível que o núcleo termoplástico possui propriedades mecânicas inferiores aos de alumínio e de aramida, porém em certos casos e aplicações podem ser suficientes e justificáveis pelo menor preço, facilidade de processamento e menor densidade. As propriedades mecânicas do PP são afetadas pela temperatura, porém não pela humidade já que a absorção de água é muito reduzida. É de notar que as fibras de aramida possuem uma janela de valores muito ampla no que diz respeito às propriedades mecânicas e possuem o maior valor de absorção de água.

2.6 Métodos de produção das estruturas sanduíche

Uma das formas viáveis para produzir um painel sanduíche é o método de processamento denominado como moldação por compressão a quente. É um método convencional no processamento de materiais, usualmente aplicado no processamento de compósitos. O principal motivo do uso deste método é que permite a incorporação de fibras longas no estratificado [21]. O processamento inicia-se com a inserção do material num molde que é colocado entre dois pratos aquecidos, com capacidade de compressão. O material é então sujeito a condições de pressão e temperatura durante um intervalo de tempo. Tipicamente este método envolve duas fases, uma de aquecimento e outra de arrefecimento [22].

A moldação por compressão a quente embora promova baixos custos de produção e versatilidade no fabrico de materiais compósitos de matriz termoplástica, também é suscetível a defeitos, uma vez que, o ciclo térmico e as cargas mecânicas aplicadas ocasionalmente provocam uma distribuição pobre da resina matriz no reforço fibroso o que gera vazios na peça. O facto de a viscosidade do material apresentar-se baixa às temperaturas que é sujeito durante o processamento ou devido a um excesso de compressão, pode induzir a expulsão de resina comprometendo as propriedades mecânicas finais do laminado. Assim é necessário controlar de forma eficiente as variáveis, nomeadamente a velocidade de arrefecimento e a distribuição do calor, ambos de grande influência no grau de cristalinidade final do termoplástico resultando numa alteração das propriedades finais do laminado [23]. Um exemplo claro de desenvolvimento de um painel compósito termoplástico sem uso de adesivos e onde as variáveis de processo foram otimizadas, foi apresentado por [24]. Segundo [16] e [25] os núcleos honeycomb podem construir-se das seguintes formas:

- expansão – Consiste na união de folhas do material de construção através de faixas de adesivo. Posteriormente expande-se o conjunto adquirindo a forma final;
- Corrugação – Uma folha previamente processada, atravessa um sistema de rolos corrugados providenciam-lhe a conformação de semi-célula, posteriormente unidas;
- Extrusão – Adquire-se o núcleo através do método de processamento de extrusão de uma folha que é corrugada, posteriormente laminada e dobrada;
- Moldação – O material adquire a forma desejada com o auxílio de um molde, despejo de silicone num molde e posteriormente procede-se ao processo de cura;

- Prototipagem rápida – Uso de impressão 3D como por exemplo SLS e do processo de maquiagem;

Um exemplo de painéis sanduíche de matriz termoplástica são os fabricados pela empresa ThermHex [26],o painel é constituído por duas faces de matriz termoplástica de polipropileno com fibra de vidro separadas por um núcleo termoplástico de polipropileno, ver Figura 3. A empresa garante que o produto possui as seguintes vantagens:

- Possibilidade de redução de peso até 80% em comparação com outras soluções;
- Grande redução de custos;
- Elevada rigidez à flexão;
- Elevada resistência à compressão e ao corte;
- Absorve energia/resistente ao impacto;
- Resistente à umidade e a soluções ácidas e básicas;
- Solução ecológica e facilmente reciclável;



Figura 3 - Painel sanduíche da ThermHex, retirado de [26].

3 TRABALHO DESENVOLVIDO ANTERIORMENTE

No decorrer do Projeto individual, que deu início a este tema, desenvolveu-se uma estrutura sanduíche à base de materiais termoplásticos e naturais. Os painéis desenvolvidos para este trabalho resultam da adaptação de painéis em desenvolvimento num projeto dirigido pelo PIEP em conjunto com a ACC [Amorim Cork Composites] que forneceu os materiais utilizados nomeadamente, prepregs de fibra de linho com matriz termoplástica de PP (W50) da BPREG, ver Tabela 5, e uma camada interna de cortiça (P50) da ACC, ver Tabela 6. A estrutura formulada consiste em envolver a cortiça pelo material compósito, como se apresenta na Figura 4.



Figura 4 – Materiais utilizados na construção da estrutura sanduíche.

Tabela 5 - Características dos Prepregs da BPREG.

Referência	Estrutura	Matriz	Gramagem	Massa volúmica	Espessura da lâmina	Conteúdo de fibra
W50	Bidirecional (2*2 – Twil)	PP	$3 \times 10^5 - 4 \times 10^5$ (kg/m^2)	1180 kg/m^3	0,45 mm	50%

Tabela 6 - Características da cortiça da ACC.

Referência	Tamanho das partículas de cortiça	Massa volúmica	Ligar aos substratos
P50	0,5/1 (mm)	448 – 512 kg/m^3	Metálicos e compósitos

3.1.1 Construção do núcleo

O estratificado é constituído por duas camadas processadas por moldação por compressão a quente. A Produção do honeycomb é caracterizada por 3 etapas, 1) primeira

conformação em bolsa de vácuo, 2) segunda conformação (processo de moldação por compressão a quente) e 3) montagem. A etapa final consolida a união de todos os constituintes.

3.1.1.1 Primeira conformação

O passo inicial requer a elaboração prévia de uma bolsa de vácuo, constituído por um filme plástico selado com adesivo em fita incorporado no sistema e uma mangueira de silicone, que o conecta à bomba de vácuo. O material é conformado manualmente contra uma das placas do molde. Esta etapa ocorre no interior da bolsa em simultâneo à aplicação de vácuo. Assim que a pré-forma é adquirida, o conjunto é colocado num forno e aquecido até à temperatura de processamento indicada pelo fabricante (180 °C), durante uma hora. Posteriormente procede-se ao arrefecimento do sistema à temperatura ambiente. É importante esclarecer que todos os materiais que constituem a bolsa de vácuo suportam altas temperaturas e que o vácuo é mantido até ao final do arrefecimento. O conjunto da bolsa de vácuo é representado na Figura 5.



Figura 5 - Primeira conformação em bolsa de vácuo.

3.1.1.2 Segunda conformação

Anteriormente ao início da segunda conformação o corrugado é retirado da bolsa de vácuo. A segunda conformação inicia-se com o aquecimento dos pratos da prensa até à temperatura de 180 °C. Assim que a temperatura é atingida o molde, com o material no interior, é inserido na prensa sem que seja exercida pressão. Neste momento há um decréscimo de temperatura e é necessário aguardar até que a temperatura de processamento seja atingida novamente. O conjunto é sujeito à temperatura de 180 °C durante 5 minutos. Posteriormente durante mais 5 minutos à mesma temperatura exerce-se uma pressão de 2 bar. Por fim o conjunto é arrefecido por um sistema de controlo de temperatura, com água, até atingir 40°C mantendo a pressão. O composto já consolidado é extraído da prensa e desmoldado.

O molde usado para o corrugado é de alumínio maciço, neste caso o sensor da prensa não é capaz de medir a temperatura no interior do molde, devido à sua espessura, portanto é necessário acompanhá-la através de um termopar como vizualizado na Figura 6.



Figura 6 - Segunda conformação.

A peça resultante da segunda conformação é revelada na Figura 7 e denomina-se por corrugado.



Figura 7 - Corrugado.

3.1.1.3 Montagem

Antes de prosseguir com a montagem, as peças são inspecionadas e aprovadas ou rejeitadas, conforme a existência ou não de defeitos relevantes para a integridade do estratificado. As peças aceites são encaminhadas para o corte. A peça é cortada em tiras de 19 mm de largura com o uso de uma serra.

A montagem dos corrugados ocorre por soldadura através do aquecimento de duas tiras do corrugado em contacto com uma chapa aquecida, acima da temperatura de processamento, e mantidos em contacto com a chapa aquecida aproximadamente entre 8 a 10 segundos. Imediatamente após o cessar de contacto entre a chapa e a tira, juntam-se as duas tiras de corrugado e aplica-se pressão manualmente, nos pontos de união. Durante o arrefecimento do conjunto usam se molas nos pontos de união para que o sistema permaneça estável.

Num processo por soldadura assistida por placa quente, a chapa é aquecida por um aparelho que controla a quantidade de calor através da percentagem de voltagem transferida, sendo o acompanhamento da temperatura realizado através de um termopar.

O esquema de montagem consiste em juntar as tiras duas a duas e posteriormente unir as peças sequencialmente, obtendo o núcleo honeycomb como o ilustrado na Figura 8.



Figura 8 - Núcleo honeycomb.

3.1.2 Produção das faces

O procedimento é idêntico à segunda conformação do corrugado, diferenciando unicamente no tipo de molde utilizado. Na produção das faces são usadas duas placas de aço finas como molde, ver Figura 9, acompanhadas com folhas de teflon entre o molde e o material, o que futuramente permite desmoldar o conjunto. O resultado da produção das faces observa-se na Figura 10.

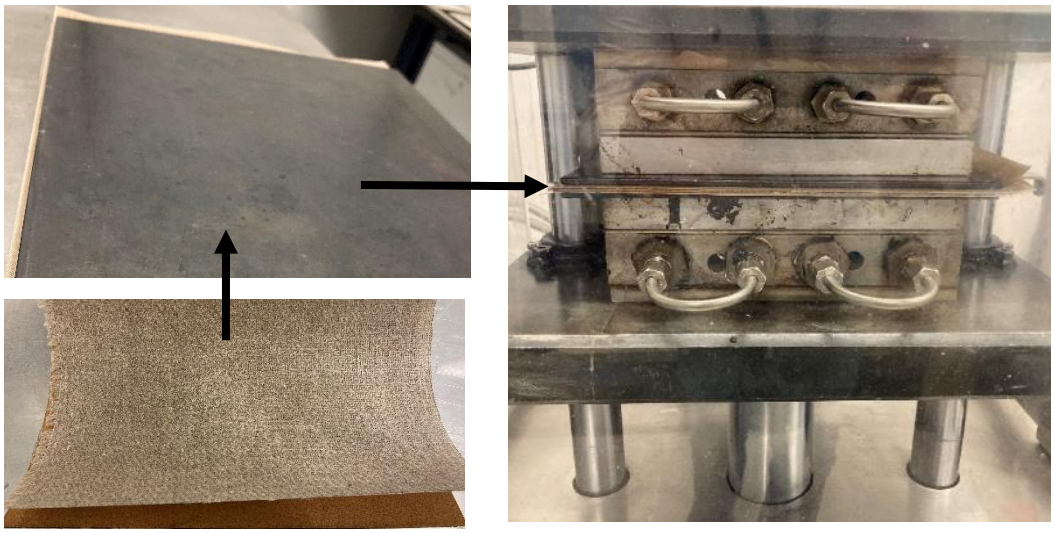


Figura 9 - Produção das faces.



Figura 10 - Face da estrutura sanduíche.

3.1.3 Construção do estratificado

A etapa de construção do estratificado fundamenta-se no mesmo pressuposto da soldadura dos corrugados, com o objetivo de unir as faces ao núcleo. Uma chapa do formulado é dividida, a fim de adquirir duas skins de dimensões 115x225 mm. O prato inferior da prensa é utilizado para aquecer uma das faces da skin e do núcleo, simultaneamente. O aquecimento dá-se durante aproximadamente 8 segundos a 200 °C (superior à temperatura de processamento), de modo a acelerar o procedimento. Imediatamente após retirar a primeira skin e o núcleo da prensa é aplicada pressão manualmente durante algum tempo para assegurar que o conjunto é bem fixado. O processo é repetido para montar a outra face. Assim é concluída a montagem do estratificado, ver a Figura 11 que esquematiza as fases do procedimento.

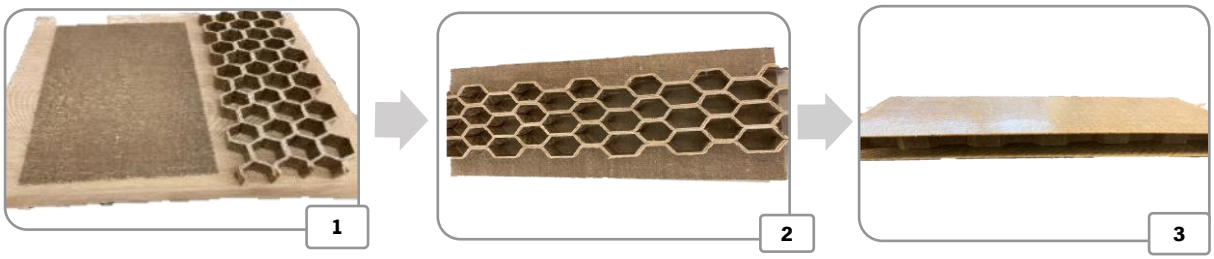


Figura 11 - Fases do processo de montagem do painel estratificado.

Quando montado o painel é submetido a um processo de corte. O resultado final é uma estrutura sanduíche, ver Figura 12, de dimensões 200x75 mm.



Figura 12 - Estrutura sanduíche.

3.1.4 Conclusões retiradas da primeira abordagem

A conformação do corrugado ocorre sem constrangimentos e sem defeitos que resultem no descarte da peça. Um dos mais comuns é o aparecimento de fissuras, ver Figura 13, após a segunda conformação do corrugado em moldação por compressão.



Figura 13 - Defeito comum na segunda conformação.

O defeito neste exemplo pode ser oriundo de uma aplicação súbita de pressão a altas temperaturas que resulta no corte da cortiça.

No passo seguinte, montagem, o núcleo é construído, porém o método de corte das tiras de corrugado e o procedimento de construção utilizado, proporcionam o surgimento de defeitos detalhados na Figura 14.

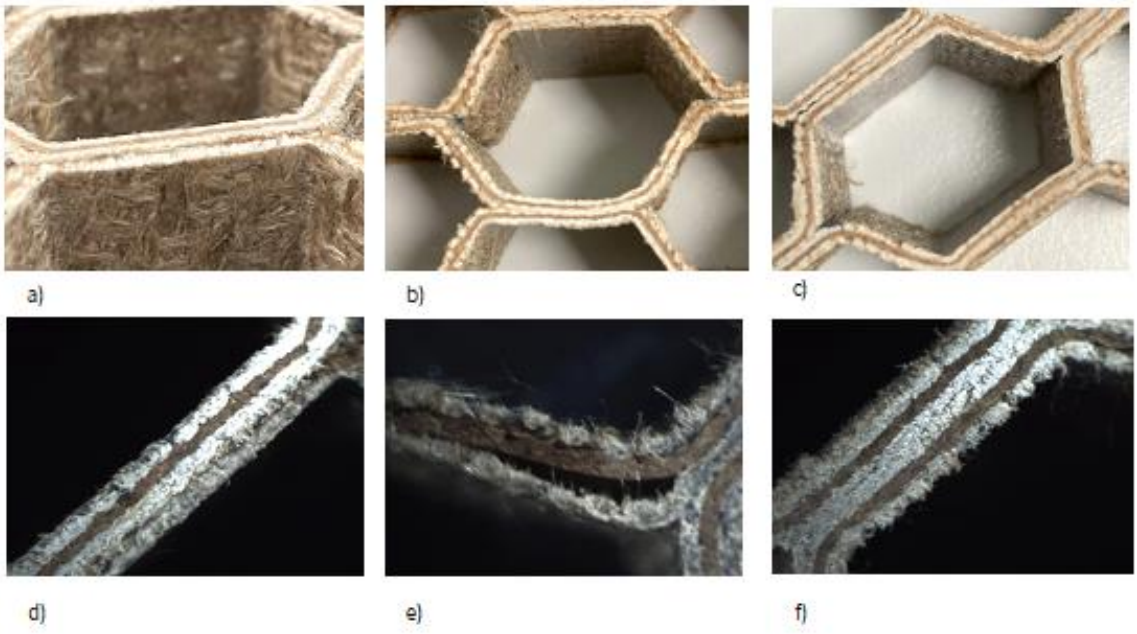


Figura 14 - Fenómenos observados no núcleo; a) e d) diferença de nível na parede das células; b) distorção das pareces das células; c) desfasamento das paredes das células; e) défice de adesão entre o prepreg e a cortiça; f) zona de soldadura sem defeitos.

Os defeitos observados na Figura 14 a) e d) são provenientes de dois fatores, o primeiro deve-se aos métodos de corte com serra elétrica, propicio a gerar irregularidades na superfície onde se deu o corte, o outro fator é a soldadura por placa quente embutida num processo manual. Cada quadrado referente às imagens ampliadas possui 14,18 x 18,9 cm.

O problema na soldadura das tiras de corrugado deve-se ao facto de o arrefecimento ocorrer muito rapidamente o que torna o alinhamento das células complicado. Como resultado ocorrem desníveis como os previamente observados e desfasamentos de células como em c) também são bastante comuns. Devido à necessidade de aplicar pressão, a fim de consolidar a união das tiras corrugadas, distorções da parede da célula como observado em b são bastante comuns. O facto do material se encontrar mais maleável, devido à aplicação de calor, também favorece a distorção da forma.

A ocorrência do defeito representado em e) apenas surge nas extremidades da construção. Este defeito é eliminado após o corte da estrutura em regiões internas a estas extremidades. A ocorrência é oriunda de uma falta de aplicação de pressão que se deve ao facto das dimensões

da prensa serem inferiores às do molde do corrugado, portanto a aplicação de pressão na extremidade é inferior e de menor qualidade.

De modo a minimizar o impacto dos defeitos ocorrentes na construção do núcleo realizou-se um desbaste da superfície do mesmo, diminuindo drasticamente as diferenças de nível entre paredes de células. Porém não foi o suficiente para assegurar a adesão perfeita da interface núcleo/face, ver Figura 15.

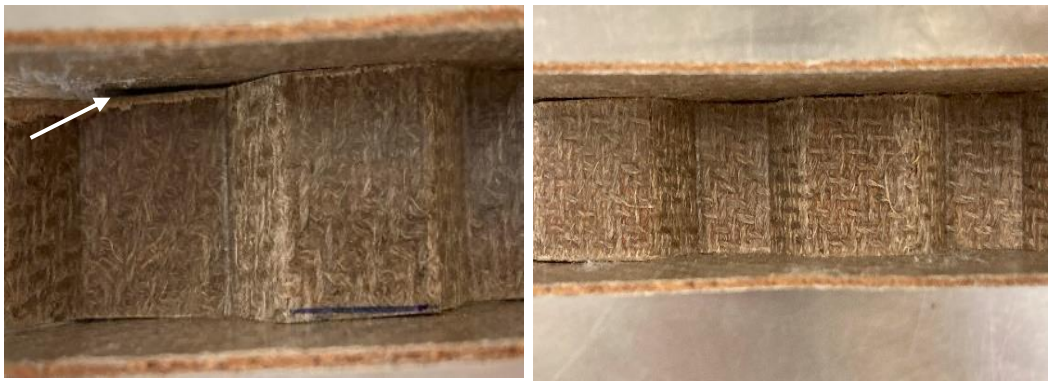


Figura 15 - Défices de adesão na interface núcleo/faces.

Embora não seja ocorrente em toda a estrutura, há diversas zonas em que a adesão na interface é precária. Tais defeitos podem condicionar o desempenho da peça ou falha em serviço, sendo prioritária a sua resolução.

É executado um estudo para avaliar a massa volúmica do estratificado, recorrendo a uma adaptação da metodologia presente na norma **ISO 845** [27]. Na Tabela 7, seguem-se as medições efetuadas para tal, efetuadas a mais de 72 horas após o processamento e a condições atmosféricas ambiente, (23 ± 2) °C, (50 ± 10)%.

Tabela 7 - Medições efetuadas para determinar a densidade.

medição	massa (g)	comprimento (mm)	largura (mm)	espessura (mm)
1	58,6	200	75	19,55
2	58,6	190	77	19,29
3	58,6	190	77	19,8
média	58,6	193,33	76,33	19,55
Desvio padrão	0	4,71	0,94	0,21

O volume do estratificado, 288465 milímetros cúbicos, calculado utilizando os valores de comprimento, largura e espessura médios.

A massa volúmica aparente do estratificado, 203 kg/m^3, foi calculada pela Equação 1:

$$\rho = \frac{m}{V} \times 10^6 \quad \text{(Eq.1)}$$

- m - massa do estratificado em (g);
- V - volume do estratificado em (mm^3);
- ρ - massa volúmica do estratificado (kg/m^3).

O estratificado apresenta uma massa volúmica inferior à apresentada pelos núcleos de PP e de Aramida, representando uma redução de 78 e 86%, respetivamente.

Ao avaliar de forma qualitativa a adesão entre as faces e o núcleo, é inferível que devido a desfasamentos de altura das células e apesar de todos os esforços para minimizar os seus efeitos, continuam a influenciar a adesão entre as faces e o núcleo de forma negativa. No leque de opções procura-se um método de corte diferente do corte manual em serra pela dificuldade de obter tiras de corrugado homogéneas, assim como outro método de montagem. Após o cálculo da massa volúmica do estratificado consta-se que este valor é relativamente baixo, logo sugere como solução viável ponderar a adição de adesivos termoplásticos na montagem do corrugado, com o intuito de, melhorar o alinhamento das paredes das células, evitar deformações e minimizar a heterogeneidade da altura do núcleo. Este ajuste pode providenciar uma melhoria da adesão entre o núcleo e as faces, incrementando a resistência mecânica geral do estratificado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição dos materiais

Na execução do projeto, a resina acrílica de polimetilmetacrilato de metilo (PMMA) Eliium®-188 é utilizada na construção das faces e núcleo da estrutura. As propriedades relevantes encontram-se sumarizadas na Tabela 8. Juntamente à resina que desempenha o papel de matriz, as fibras de linho, da ampliTex, desempenham o papel de reforço, ver propriedades na Tabela 9. O iniciador referido para a resina em questão é o peróxido de dibenzoílo.

Tabela 8 - Propriedades da Resina ELIUM® 188.

Massa volúmica no estado líquido	Tempo de gel a 25 °C	Viscosidade a 25 °C	% mássica de iniciador	Duração da cura à temperatura ambiente
1010 kg/m^3	60-90 min	100 m.Pas	3	24 h

Tabela 9 - Propriedades da fibra de linho da ampliTex.

Tipo de fibra	Gramagem	Massa volúmica da da fibra	Módulo aparente	Deformação de rotura
Twill 2/2 0º/90º	200 g/m^2 ± 5%	1470 kg/m^3 ± 20	62 ± 1GPa	1,3 – 1,4%

4.2 Metodologia

4.2.1 Construção dos Painéis

A metodologia concentra-se na construção de um núcleo celular periódico do tipo honeycomb, partino de placas processadas por infusão de resina assistida a vácuo.

A construção de estruturas sanduiche com núcleo do tipo honeycomb inicia-se com o processo de infusão a vácuo. Através deste método de processamento são construídas placas compósitas constituídas por fibras de linho como material de reforço e resina acrílica como matriz.

De modo a iniciar o processo de infusão, o molde, ver Figura 16, deve ser devidamente limpo. Após a limpeza da base é aplicado desmoldante, Mikon®, impedindo-se desta forma que a resina adira fortemente à base moldante, inviabilizando a remoção da peça.



Figura 16 - Base de vidro utilizada na infusão.

A aplicação do desmoldante é dividida em três aplicações de camadas, após a aplicação da primeira camada aguardam-se 15 minutos para aplicar a segunda, o mesmo intervalo de tempo é aplicado na terceira camada, porém após a aplicação desta o tempo de espera antes de iniciar a infusão é de 30 minutos.

O próximo passo é colocar os componentes na base, uma "moldura" de tackie tape (fita de fecho do sistema de vácuo) é colocada na base. A fibra de linho previamente cortada com 800x350 mm é colocada no centro da moldura, sobre a mesma com dimensões superiores é colocado o peelply, sobreposto por uma malha (flow mesh) cobrindo apenas parte das dimensões da fibra. A mangueira e os tubos são incorporados no sistema para viabilizar a entrada e saída de reina. O último passo antes de iniciar a infusão é selar o sistema com um filme plástico, como apresentado na Figura 17.

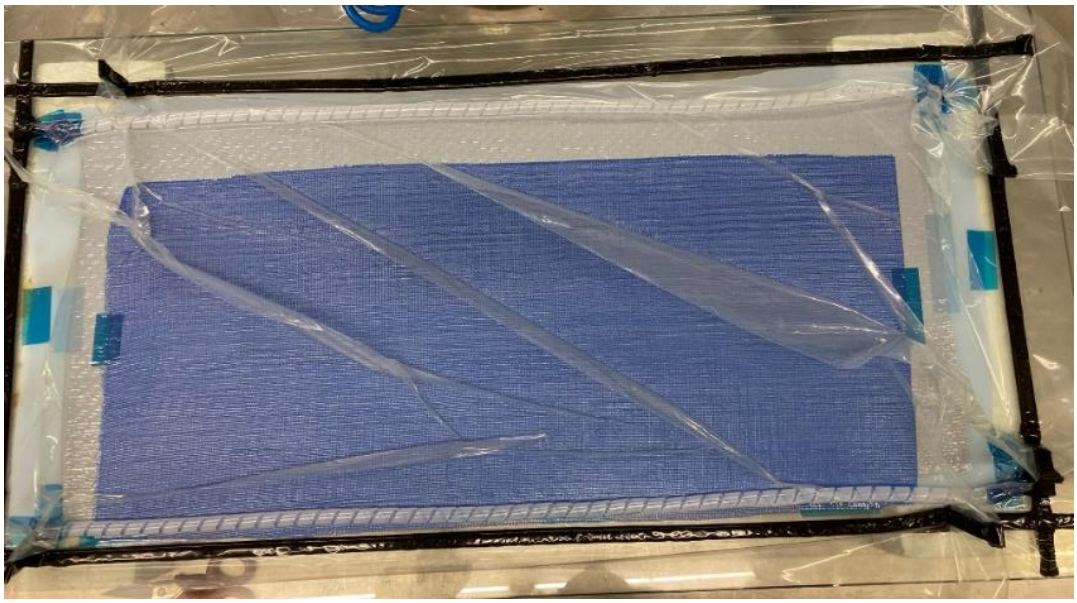


Figura 17 - Sistema de infusão a vácuo.

Os componentes devem ser ajustados durante a aplicação de vácuo que se segue após a selagem do sistema. A mangueira de saída de resina é ligada à panela, ver Figura 18, que está conectada à bomba de vácuo. O vácuo é aplicado e após atingir uma pressão interna suficiente mente baixa, no máximo 15 mbar. Aguarda-se 10 minutos para verificar a existência de fugas, a mangueira que conecta o sistema à bomba de vácuo é momentaneamente fechada durante 10 minutos. Assim e se durante estes tempos se a pressão medida se mantiver constante, então assume-se que não há fugas no sistema.



Figura 18 - Panela onde o excesso de resina é armazenado.

Na etapa de preparação da resina, medem-se 640g de resina aos quais se adicionam 19,2g de iniciador correspondentes a 3% da massa de resina. Após a homogeneização da mistura o ar é retirado pela inserção numa camara de vácuo. O sistema de alimentação do sistema é conectado ao recipiente onde se encontra a resina termoplástica e a infusão é iniciada. A dado momento quando a resina atinge o canal de saída, é necessário aplicar um equilíbrio de pressões, impedindo variações de espessura. Após 24h a resina está curada e o resultado presente na Figura 19.



Figura 19 - Placa resultante da infusão a vácuo.

O procedimento é estabelecido para obter uma percentagem volúmica de fibra de 50%. São produzidas 7 placas iguais e estima-se que esta quantia permite produzir 14 provetes. Após definidas as dimensões de corte (280x200 mm), de acordo com as dimensões do molde corrugado, as placas são recortadas, ver Figura 20.



Figura 20 - Placas recortadas (280x200) mm.

As placas cortadas são introduzidas no molde, onde são processadas por moldação compressão a quente, o procedimento ocorre segundo os passos seguintes:

I. Aquecer a prensa, ver Figura 21, até atingir a temperatura de 200 °C;
II. O molde, ver Figura 22 juntamente com a placa a moldar e aquecer (com os pratos encostados ao molde) durante 5 minutos, nesta fase não é exercida qualquer pressão;
III. Passado o tempo de aquecimento, é aplicada uma pressão de fecho de 50 bar;
IV. O conteúdo é removido da prensa e arrefecido à temperatura ambiente por 12 minutos antes de desmoldar.



Figura 21 - Equipamento de processamento por moldação compressão a quente.

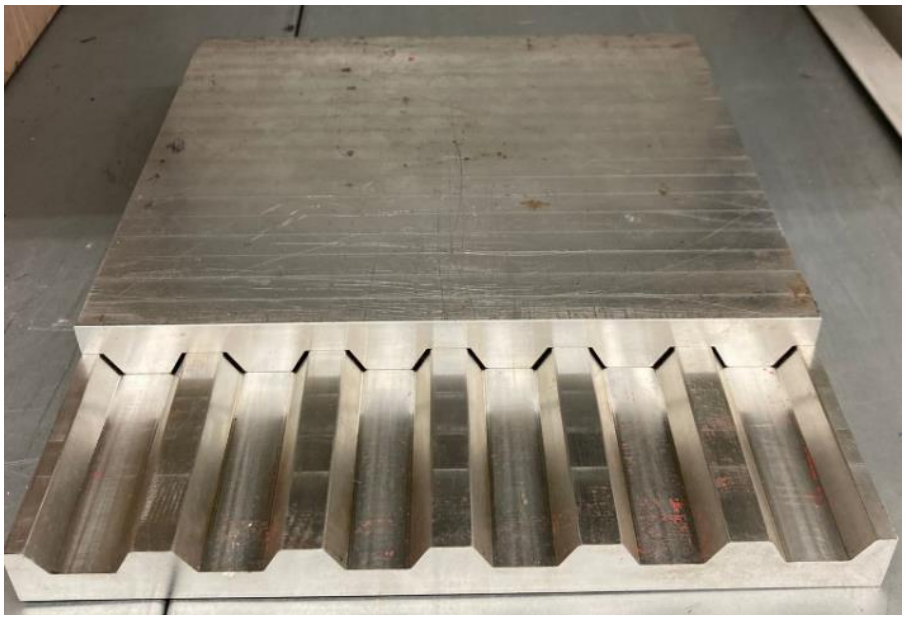


Figura 22 - Molde de estrutura corrugada.

As variáveis de processamento obtidas surgiram por metodologia experimental, isto é, o processo inicialmente realizou-se com uma pressão de 30 bar e uma temperatura de 150 °C, pelo facto da transição vítrea (Tg) da matriz ser aproximadamente igual a 90 °C. No entanto a temperatura não foi suficiente para conformar o compósito corretamente, como pode ser observado na Figura 23. Numa segunda aproximação, a uma temperatura de 200 °C e uma pressão de 50 bar verificou-se uma melhor conformação da forma e ângulos mais detalhados.



Figura 23 - Primeira tentativa de construção do corrugado.

Após que a geometria desejada é obtida procede-se ao corte em tiras de 20 mm de largura cada, como ilustrado na Figura 24



Figura 24 - Corte do corrugado.

Posteriormente, as tiras, são soldadas para conformar a estrutura do tipo honeycomb, ver Figura 25. São necessárias 8 tiras para alcançar esta forma com as dimensões pretendidas.

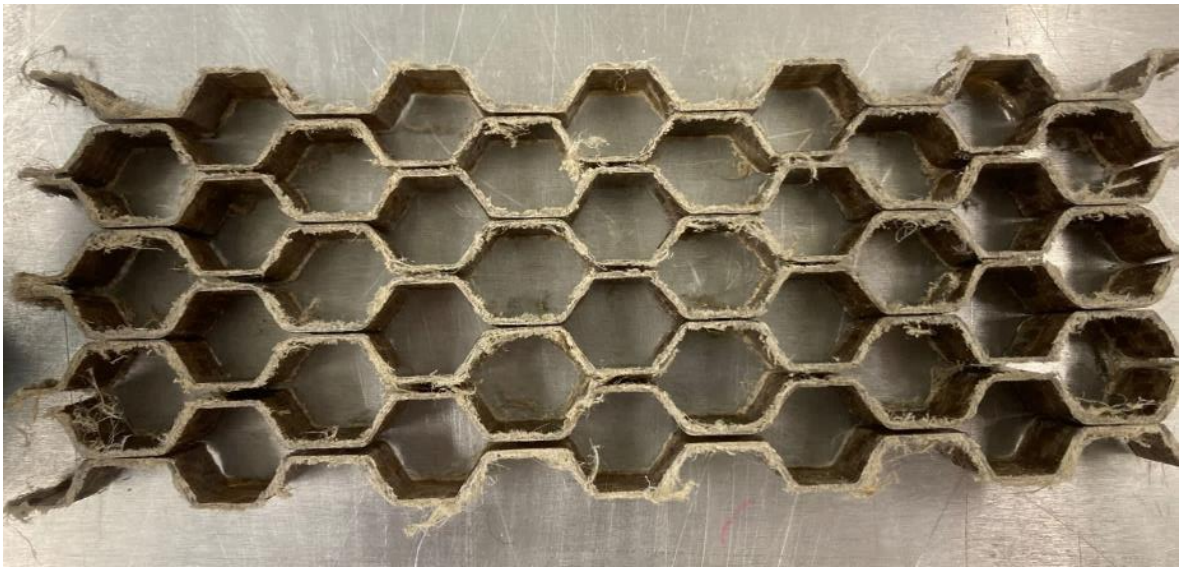


Figura 25 - Posicionamento das tiras corrugadas para formar a estrutura honeycomb.

De modo a alcançar esse objetivo de forma pratica e intuitiva é montada uma estrutura com ventosas, ver Figura 26, para agarrar as tiras. Este sistema é implementado num braço robótico, assim constrói-se uma linha de montagem automática, ver Figura 27.



Figura 26 – Conjunto de ventosas.



Figura 27 - Sistema automatizado de soldadura da estrutura honeycomb.

Durante o processo de soldadura verificou-se ineficiência na adesão entre tiras, possivelmente devido a um défice de matriz comparativamente ao necessário. Por esse motivo são implementados uns filmes de PVC, compatível com o PMMA [28]. Nas tentativas seguintes verifica-se a necessidade de pré-aquecer os filmes, por esse motivo um sistema de aquecimento por radiação denominado de Krelos, é inserido no sistema, ver Figura 28.

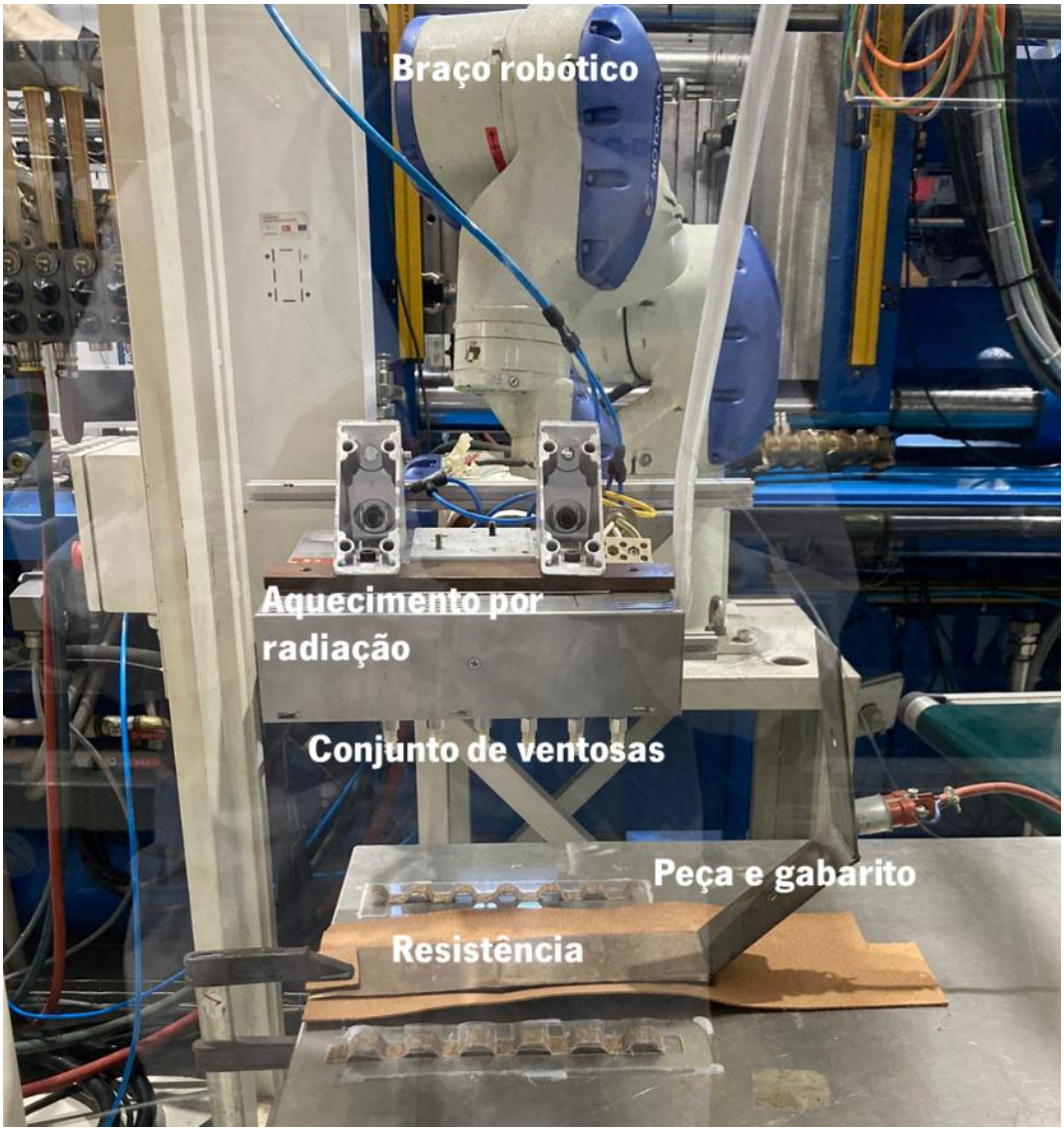


Figura 28 - Sistema de montagem com a inclusão do krelos.

A resistência e o aquecimento por radiação, encontram-se a uma temperatura de 200 °C antes do início do ciclo, que dura cerca de 50 s. O braço robótico usa as ventosas que através do vácuo exercido por uma bomba eletromagnética, transportam a peça do gabarito para a resistência onde permanece por 25 s. Simultaneamente o krelos aquece os filmes de PVC sobrepostos à peça. Posteriormente a peça é encaixada no sistema de sujeição e exercida uma pressão por 10 s.

O tempo de aquecimento é resultado de iterações, como resultado o tempo de aquecimento otimizado é de 25 s foram definidos como tempo de aquecimento. A temperatura utlizada é coincidente com a do processo de compressão e convenientemente o ponto de fusão do PVC varia entre os 100 e os 260 °C [29]. A soldadura de duas parcelas, após os ajustes aplicados revela resultados satisfatórios, sendo limitantes para a adição de mais parcelas o que resultou no empeno do material devido ao excesso de carga aplicada. Já, com valores inferiores de carga, esta não foi suficiente para soldar as parcelas.

Deste modo, após várias tentativas e iterações decidiu-se soldar manualmente as peças com o uso da resina acrílica, a mesma utilizada na produção dos corrugados. A resina atua como adesivo nas parcelas de corrugado. Assim é possível agregar as peças e formar o núcleo honeycomb. os pontos de resina forma aplicados com auxílio de uma pipeta para realizar a junção das tiras corrugadas em grupos de 2. Depois de concluída a etapa de adesão do primeiro grupo, o processo é repetido sequencialmente para 4 agregações de duas tiras, atingindo um total de 8 tiras por honeycomb, ver Figura 29.

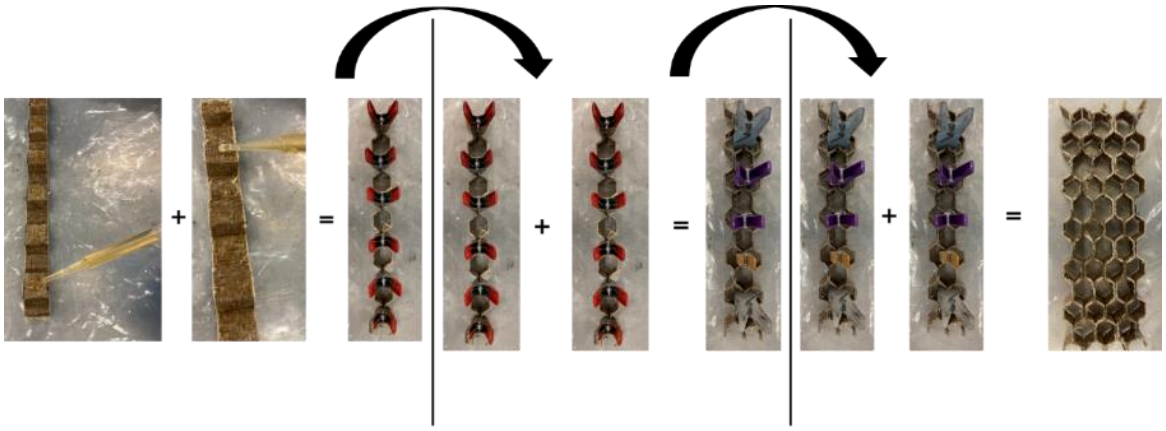


Figura 29 - Construção do núcleo.

Os núcleos produzidos apresentam diferenças entre alturas de células, o que é normal considerando o facto de que o corte é executado manualmente. Para minimizar o impacto deste fator os núcleos passam por um processo de devastação que na maioria dos casos é o suficiente para gerar uniformidade da estrutura. Após o desbaste é necessário limpar os núcleos para remover as partículas geradas pelo processo. A montagem dos núcleos é seguida por uma análise morfológica posterior dos mesmos.

A metodologia de associação das faces aos núcleos, não difere do processo ilustrado para a construção do corrugado, ver Figura 30. O agente de adesão é igualmente a resina Elium®, utilizada para conceber toda a estrutura.

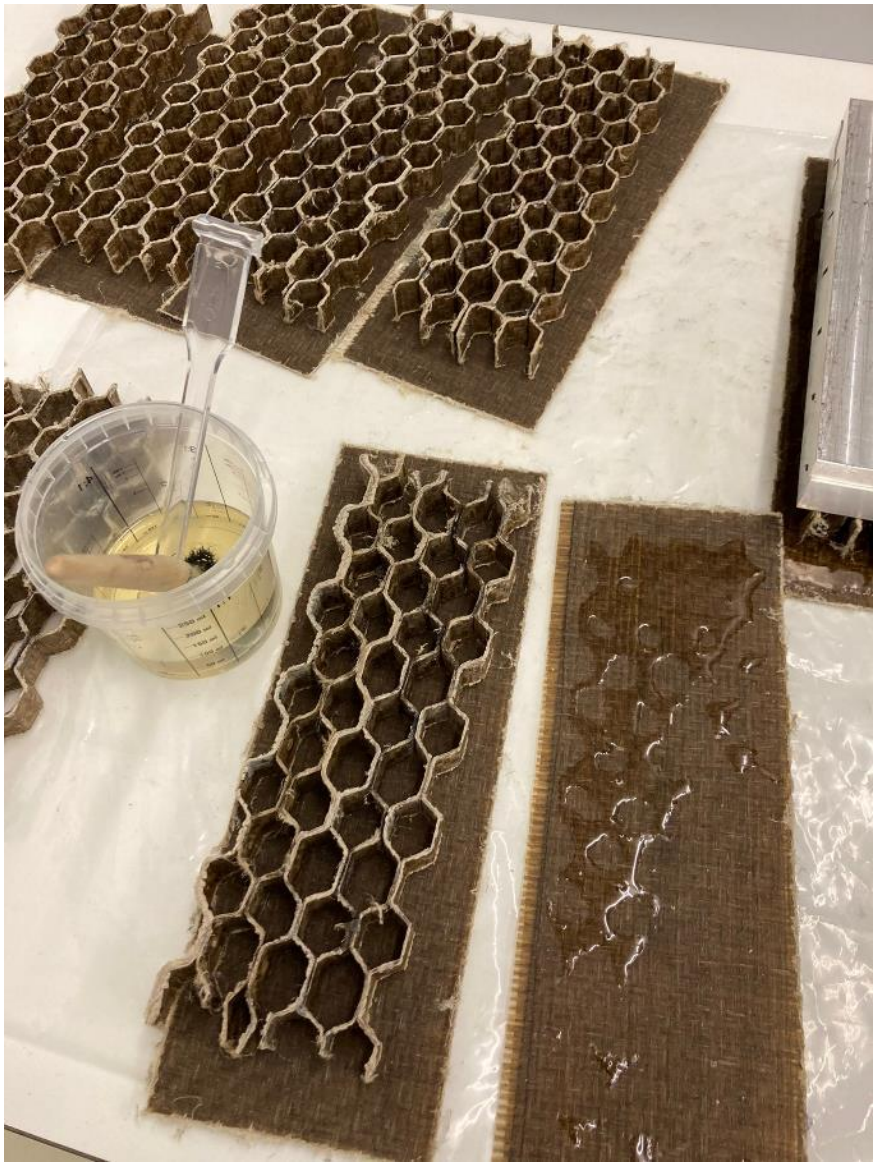


Figura 30 - Colagem das faces/skins com o núcleo.

A resina é aplicada em ambas as faces e nos núcleos, de modo a assegurar uma adesão eficiente. Pesos são colocados sobre os painéis de modo a comprimir o conjunto, deste modo não há deslocamento de peças durante a colagem e assegura-se que o máximo de área permanece em contacto. Passado o tempo de cura a 24 h os painéis são marcados e cortados com as dimensões 200x80 mm. Na Figura 31, estão representados os 10 provetes obtidos por esta metodologia.

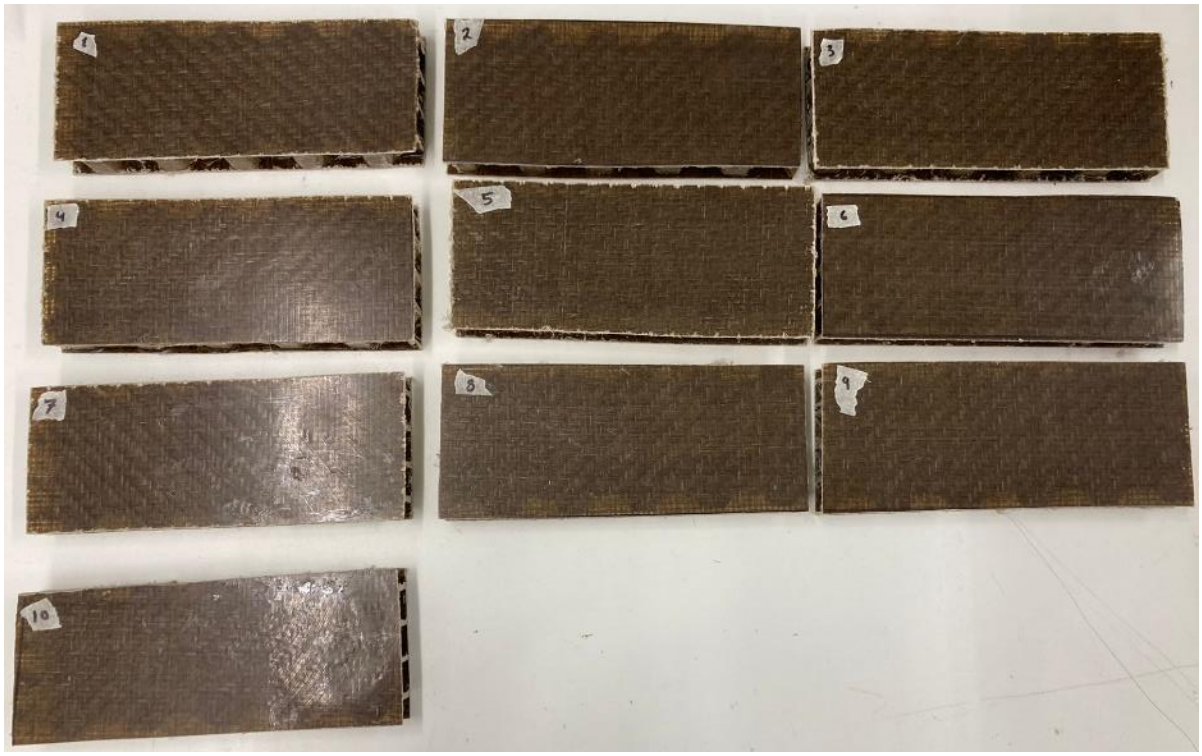


Figura 31 - Painéis sanduiche, pós corte.

Após 72 horas, como sugere a norma ISO 845 [27], a densidade aparente é calculada. Posteriormente os painéis sanduiche são redimensionados, ver Figura 32, de acordo com os requisitos necessários para os ensaios a realizar. Adicionalmente, como sugerem as normas **ASTM C393**, **ASTM C365**, **ISO 6603** e **ISO 62** os ensaios de flexão, compressão, impacto e absorção de água são realizados[30], [31].

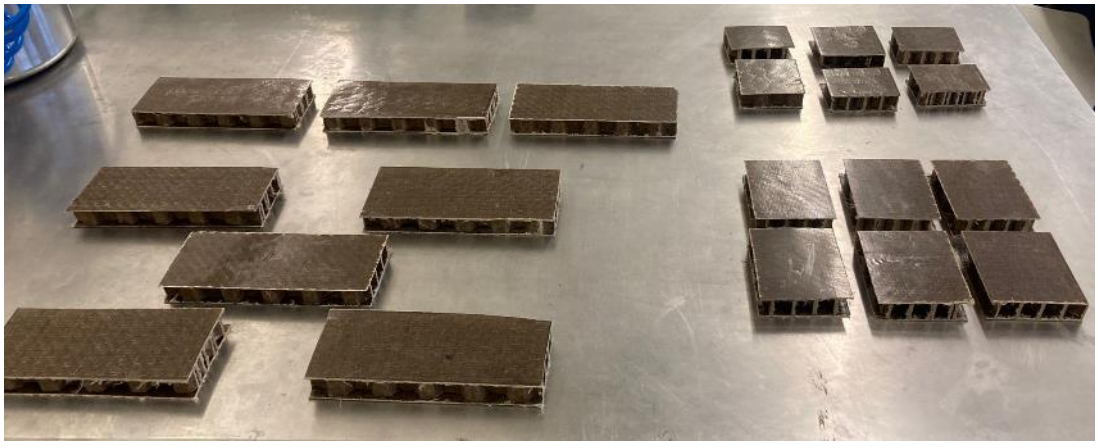


Figura 32 - Provetes redimensionados.

Dos provetes de maior dimensão (80x200) mm, 5 são submetidos ao ensaio de flexão e 3 ao de resistência ao impacto, os 6 provetes de dimensões médias (75x100) mm aos ensaios de compressão e os 6 de menores dimensões ao ensaio de absorção de humidade.

4.2.2 Ensaios físicos e mecânicos

4.2.2.1 Determinação da massa volúmica

São selecionados 10 provetes, devidamente medidos e pesados, o procedimento do ensaio e os cálculos efetuados respeitam a norma **ISSO 845** de 2006.

4.2.2.2 Ensaio de Flexão em 3 pontos

O ensaio de flexão em 3 pontos, ocorreu segundo especificado na norma **ASTM C393 – 2022**, sem variações da metodologia de teste a reportar e uma pré-carga de 1 N. São utilizados dois cilindros de apoio e um de carga, todos com 30 mm de diâmetro. O ensaio considerou 5 amostras, dos painéis sanduíche fabricados pelos métodos apresentados no capítulo **3.3.2** deste documento e cujas dimensões são registadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensões dos provetes de ensaio de flexão.

Provete	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
t [mm]	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
d [mm]	22	22,4	23,5	21,14	21
c [mm]	19,9	20,3	21,4	19,04	18,9
b [mm]	79,13	78	79,3	79,5	82,12

Em que:

- t, é a espessura da face;
- d, é a espessura de toda a estrutura sanduíche;
- c, é a espessura do núcleo;
- b, é a largura dos provetes.

As dimensões são determinadas pela média de 3 medições em zonas diferentes da amostra e cada provete é atribuído um número de amostra marcado a caneta de tinta permanente.

O ensaio de flexão em 3 ponto decorreu com um spam (S) de 150 mm, ver Figura 33, de acordo com o recomendado pela norma e a uma velocidade de teste de 6 mm/min para o primeiro provete, também recomendada pela norma. Os restantes ensaios ocorreram a uma velocidade de 2 mm/min.

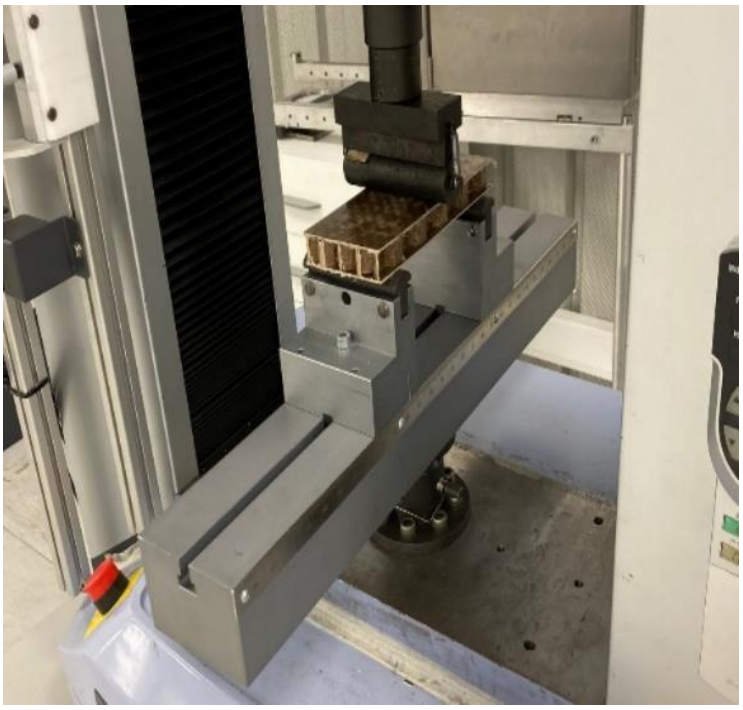


Figura 33 - Ensaio de flexão em 3 pontos.

As propriedades mecânicas determinadas pelo ensaio e calculadas como requerido na norma, no caso da resistência ao corte máxima aplicada no núcleo, esta é calculada pela Equação 2. A tensão exercida na face, calculada pela Equação 3:

$$F_s^{ult} = \frac{P_{Max}}{(d+c)b} \quad \text{(Eq.2)}$$

$$\sigma = \frac{P_{Max}S}{2t(d+c)b} \quad \text{(Eq.3)}$$

4.2.2.3 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão, realizado segundo as indicações explicitas na norma **ASTM C365 – 22**, com uma velocidade de ensaio 0,5 mm/min. Sem variações do método de ensaio a reportar, com uma pré-carga de 1 N. São testadas 6 amostras processadas pelos materiais e métodos apresentados no capítulo **3.3.2** deste documento. Os provetes enquadram-se na área mínima especificada pela norma, verTabela 11, para informações sobre as dimensões especificas dos provetes. No ensaio de compressão é utilizado um disco com 200 mm de diâmetro, Figura.

Tabela 11 - Dimensões das amostras, ensaio de compressão.

Provete	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
A [mm²]	7894	8396	7919	8141	8317	8260
t [mm]	21,50	21,50	22,84	21,56	22,23	22,40

Em que:

- A, é a área da secção transversal do provete;
- t, é a espessura da estrutura sanduíche, medida antes da compressão.

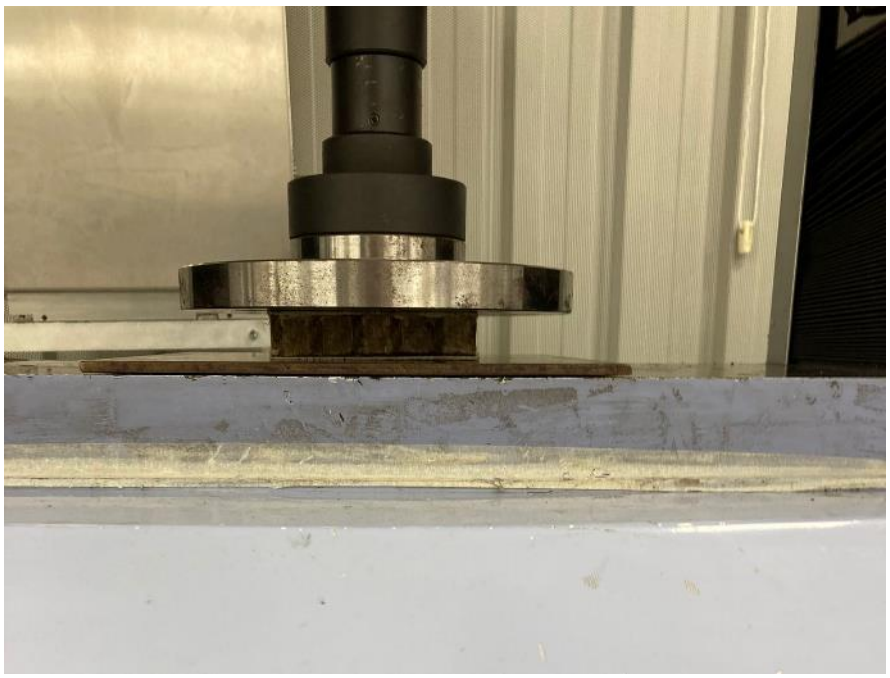


Figura 34 - Ensaio de compressão.

De acordo com a norma são procedidos os cálculos de:

Resistência à compressão máxima aplicada no núcleo calculada pela Equação 4:

$$F_z^{fct} = \frac{P_{Max}}{A} \quad \text{(Eq.4)}$$

Segundo requisitado na norma, caso seja atingida uma deformação de 2% antes da interrupção do teste, a tensão para 2% de deformação deve ser calculada, ver Equação 5:

$$\sigma_{zc0,02}^{f} = \frac{P_{0,02}}{A} \quad \text{(Eq.5)}$$

Módulo de compressão secante referente ao núcleo deve ser calculado, ver Equação 6:

$$E_{zc}^{f} = \frac{(P_{0,003} - P_{0,001})t}{(d_{0,003} - d_{0,001})A} \quad \text{(Eq.6)}$$

Em que:

- P (0,003) é a força aplicada correspondentemente a um deslocamento de 0.00.3;
- P (0,001) é a força aplicada correspondentemente a um deslocamento de 0.00.1;
- d (0,003), é referente ao valor do deslocamento cujo δ/t é o mais próximo de 0,003;
- d (0,001), é referente ao valor do deslocamento cujo δ/t é o mais próximo de 0,001;

O módulo secante é definido como o declive da reta secante, traçada a partir da origem do gráfico de tensão/deformação e que interceta a curva no ponto de interesse, o modulo secante é obtido nesse ponto[34], ver Figura 35. O valor do módulo secante é utilizado para descrever a rigidez de um material na sua zona inelástica e é normalmente designado como E_c.

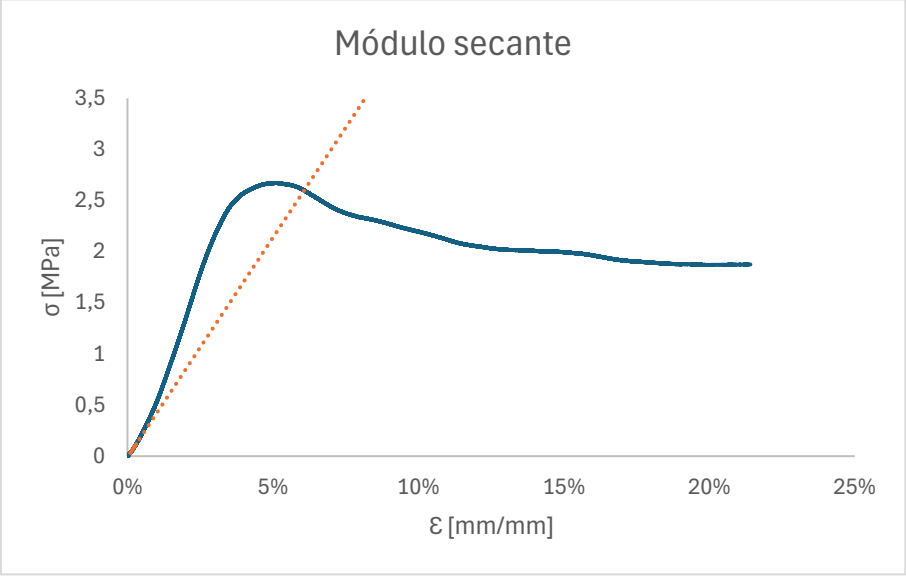


Figura 35 - Esquema ilustrativo da determinação do módulo secante.

4.2.2.4 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto segue os princípios indicados pela norma **ISO 6603-2:2000**, com um disco de suporte de 90 mm de diâmetro externo e 40 mm de diâmetro interno, e um dardo hemisférico de 20 mm. A amostra com área superficial retangular de 80x80 mm. É inserida numa camara fechada antes da realização do ensaio, ver Figura 36. Para o ensaio são utilizadas 6

amostras, de aproximadamente 22 mm de espessura, mais uma de teste para definir as condições do ensaio (esta amostra não possui a mesma área que as outras, logo não é analisada). O ensaio ocorre a uma velocidade de impacto de 4,4 m/s, a uma altura de 1m com uma massa de 10 kg, correspondendo a um impacto de aproximadamente 98,5 J.

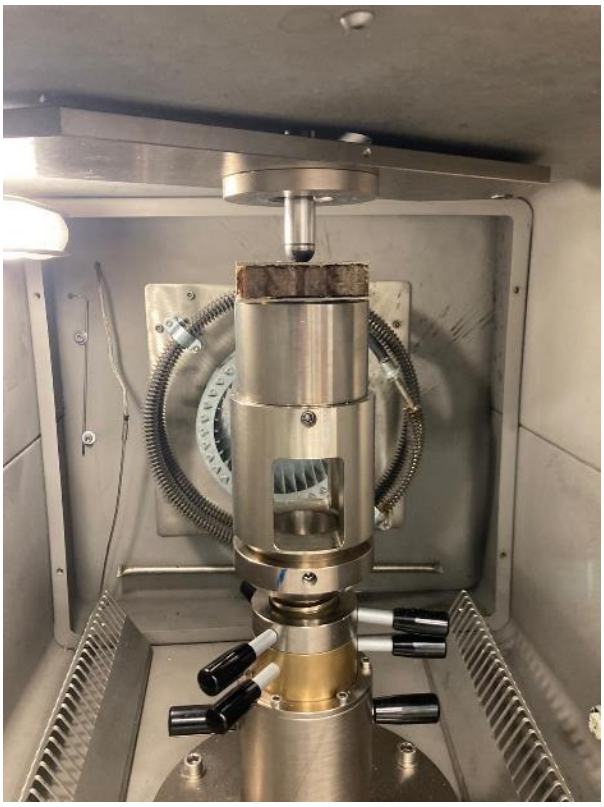


Figura 36 - Amostra colocada no equipamento de ensaio ao impacto.

Embora impercetível na figura, o disco que se encontra na parte superior da camara, desce e fixa a amostra no local.

A norma estipula a determinação do deslocamento e da energia pela Equação 7 e 8 respetivamente.

$$\ell(t) = v_0 - \frac{1}{m_c}.\int_0^t \left[\int_0^{t1} F(t)dt1\right]dt + \frac{1}{2}gt^2 \qquad \text{Eq.7}$$

Em que:

- ℓ(t), é o deslocamento em m;
- mc, é a massa em queda em kg;
- v_0 é a velocidade de impacto expressa em m/s;
- F(t), é a força, em função do tempo (t) expressa em N;

- g, é a aceleração da gravidade.

$$E_i = \int_0^{\ell i} F(\ell)\, d\ell \qquad \text{Eq.8}$$

Em que:

- F(ℓ) é a força em função do deslocamento, expressa em N;
- ℓ, é o deslocamento;
- i é um dos pontos seguintes:
  - M, correspondente à força máxima;
  - P, correspondente à força de perfuração, utilizada para determinar a energia absorvida;
- E, é a energia em J.

4.2.2.5 Ensaio de absorção de água

O ensaio que permite determinar a absorção de água é definido pela norma **ISO 62:2008**, pelo método de ensaio 1. Após o procedimento experimental deve se determinar a percentagem mássica e água absorvida, ver Equação 9.

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \qquad \text{(Eq.9)}$$

Em que:

- c, é a percentagem mássica de água absorvida;
- m1, é a massa da amostra após a estabilização da massa;
- m2, é a massa passadas 24 horas da imersão da amostra.

4.2.2.6 Procedimento de reciclagem mecânica

Os restos provenientes dos provetes são triturados, ver Figura 37, e utilizados para processar uma placa, através de moldação por compressão.

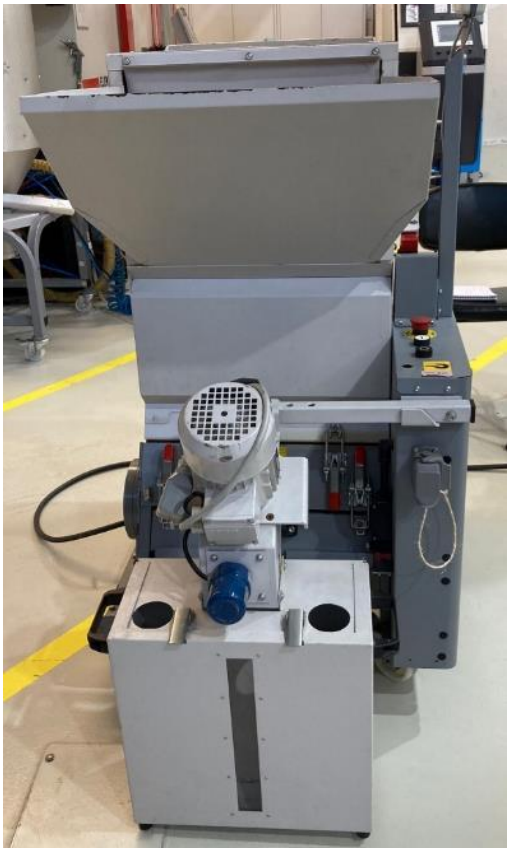


Figura 37 - Equipamento utilizado para triturar o material.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Observação morfológica do núcleo

Numa observação pormenorizada com o uso da lupa, observa-se a união entre as paredes de célula de diversos núcleos do tipo honeycomb, ver Figura 38.

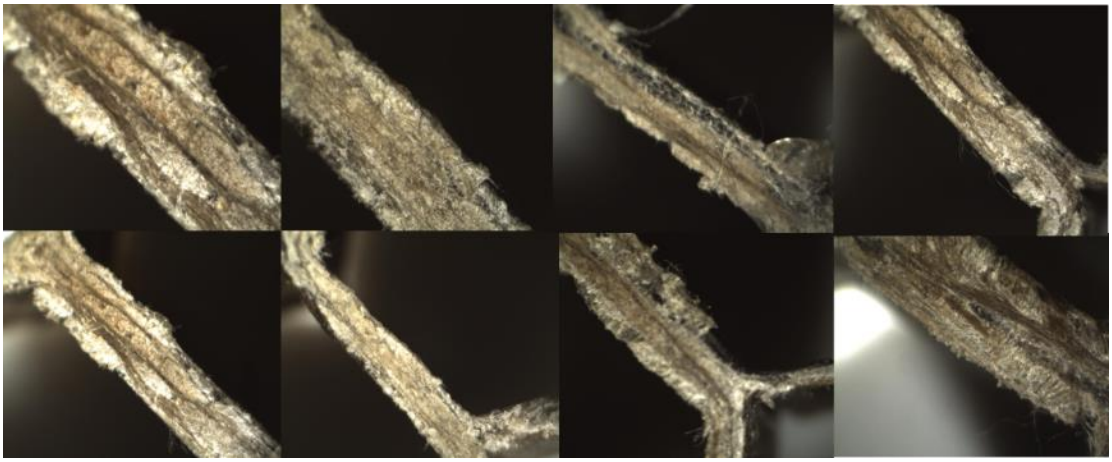


Figura 38 – Observação, na lupa microscópica, de diversas uniões de paredes de célula de diferentes núcleos.

As imagens acima apresentadas pertencem ao grupo de células eficientemente desbastadas, onde é observável a união entre as paredes das células do núcleo honeycomb, diferenças de espessura podem ser derivadas da existência de rebarbas resultantes do desbaste. De modo a compreender a escala de ampliação, cada quadrado referente às imagens ampliadas possui dimensões reais de 14,18 x 18,9 cm.

A união entre paredes de célula executada por este método supera o método anteriormente utilizado, consultar Figura 14, grande parte dos defeitos observados pelo método de soldadura por placa quente, não estão presentes aqui, como a descontinuidade da adesão interfacial entre células e desfasamento e deformação das células.

Embora a maioria dos defeitos tenha sido corrigido com o novo método de construção do honeycomb, há um que prevalece, nomeadamente o desnível de paredes celulares. Este tipo de defeito é originado pelo erro humano desde a marcação até o corte das tiras de corrugado, porém como este método permite melhor alinhamento das células, é mais fácil de contornar do que anteriormente, ver Figura 39.

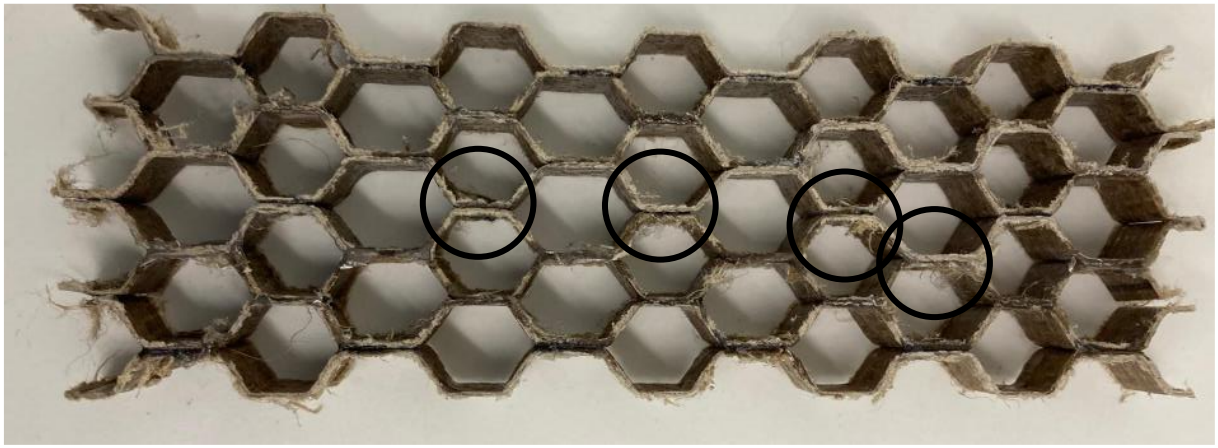


Figura 39 - Núcleo Honeycomb concebido pelo novo método de construção.

As áreas rodeadas na imagem representam as zonas de desnível entre paredes celulares, sendo que neste caso deve-se unicamente à sua diferença de altura do núcleo e não a problemas de alinhamento. Embora o desbaste ajude a minimizar o problema, é incapaz de o solucionar.

5.2 Resultados da determinação da massa volúmica.

A massa volúmica aparente é calculada segundo as especificações estipuladas pela norma **ISSO 845** de 2006. Dos 14 painéis processados separam-se 10 amostras, cujas dimensões e massa são verificadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Cálculo da massa volúmica.

provete	comprimento (L) [mm]	largura (W) [mm]	espessura (t) [mm]	volume (mm^3)	massa (g)	Massa volúmica (kg/m^3)
1	199	79	22	345862	76,1	220,03
2	198	82	22	357192	75,1	210,25
3	198	80	21	332640	83,3	250,42
4	199	80	21	334320	80,4	240,49
5	200	83	21	348600	79,3	227,48
6	200	81	21	340200	83,9	246,62
7	199	79	22	345862	83,3	240,85
8	198	83	22	361548	82,1	227,08
9	198	81	21	336798	81,6	242,28
10	199	79	21	330141	77,8	235,66

média = 234 kg/m^3

desvio padrão = 12

Resultado = 234 ± 12 kg/m^3

Os resultados apresentados pelo ensaio de determinação da massa volúmica ocorreram segundo a norma ISO 845, à temperatura ambiente com 40% de humidade. O espécime foi caracterizado na integra, isto é, o núcleo com as faces integradas de espessura média de 1.05 mm. As das dimensões das amostras são determinadas do modo apresentado na Figura 40.

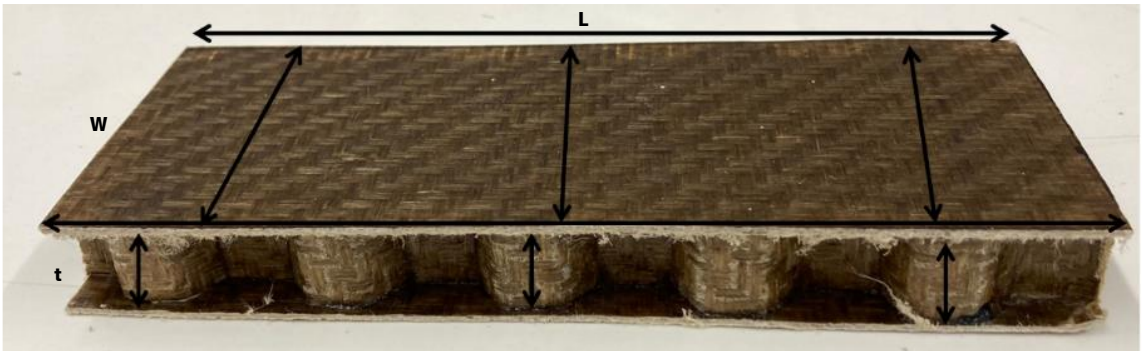


Figura 40 - Execução da determinação dimensional das amostras.

A espessura, comprimento e largura das amostras são medidas em diferentes zonas da amostra e determinada a media das medidas, esta média é o que define a dimensão utilizada nos cálculos do volume da amostra. Comparativamente ao painel desenvolvido anteriormente verifica-se um aumento da densidade de 13% e comparativamente aos núcleos de PP e aramida, apresentados na Tabela 4 , apresenta uma redução de 74 e 83%, respetivamente.

5.3 Resultados, Ensaios físico-mecânicos

5.3.1 Resultados, Ensaio de Flexão

A partir dos resultados obtidos pelo método experimental, a curva que relaciona a força e o deslocamento é construída e apresentada na Figura 41.

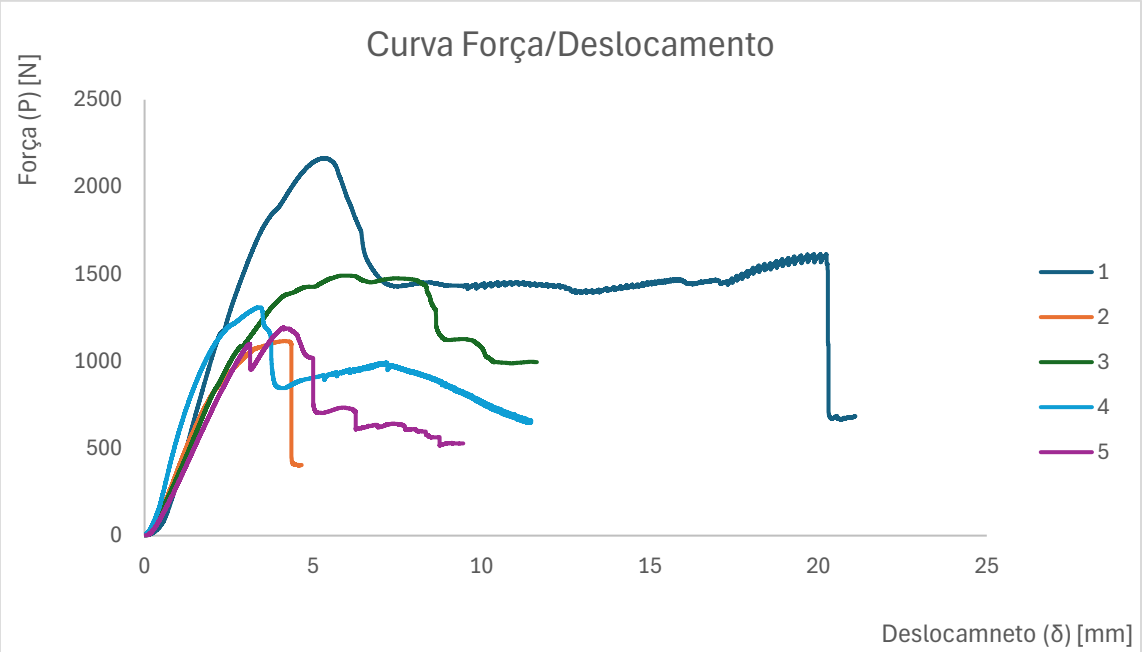


Figura 41 - Gráfico, força vs deslocamento, referente ao ensaio de flexão.

A partir do gráfico é retirada a força máxima exercida na estrutura (P_{max}), esta correspondente ao ponto de cedência e não o pico máximo no gráfico calculadas as propriedades de resistência ao corte máxima aplicada no núcleo (F_s^{Ult}) e a tensão exercida nas faces (σ). Os resultados individuais para cada provete, podem ser verificados na Tabela 13.

Tabela 13 - Ensaio de flexão, resultados.

Provete	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
P_{max} [N]	2165	1116	1492	1310	1095	1435	392,3
F_s^{Ult} [MPa]	0,653	0,335	0,419	0,410	0,334	0,430	0,1170
σ [MPa]	46,64	23,93	29,93	29,29	23,87	30,70	8,357

Durante os ensaios o comportamento mais comum observado pelos provetes é a formação de uma ruga, na zona onde é aplicada a carga. A ruga surge no momento correspondente à cedência da estrutura, não é observada unicamente nas amostras 2 e 5. No caso da segunda amostra, curva a cor de laranja no gráfico, ocorre falha referente à ligação da face superior ao núcleo da estrutura. Acrescenta-se ainda a esta discussão que a curva que representa os

resultados obtidos referentes à primeira amostra assimilam-se muito ao comportamento da curva tensão/deformação referente ao PMMA, ver Figura 42, polímero este que é utilizado como matriz.

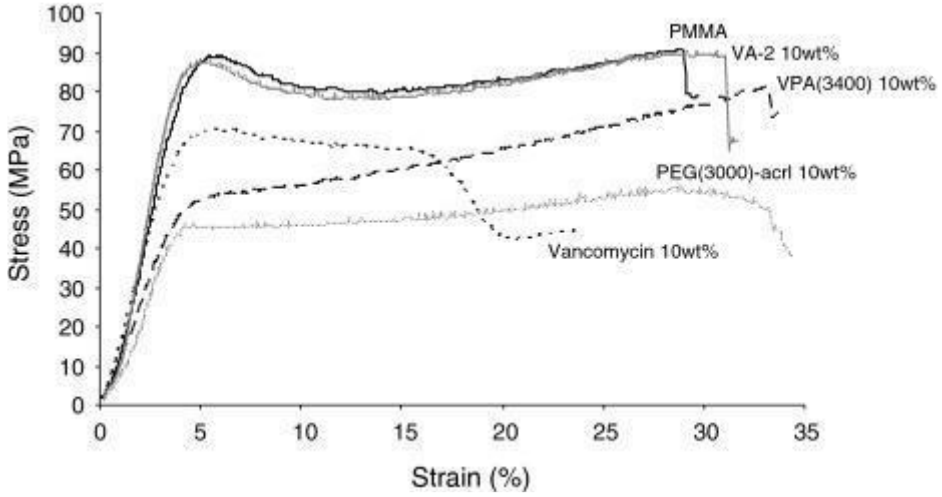


Figura 42 - Curva tensão vs deformação de vários materiais, entre eles PMMA, retirado de [32].

É realizada uma análise SEM, nas faces do núcleo,1, testado no ensaio de flexão para determinar as características da fratura do compósito depois de ser submetido ao ensaio de flexão em 3 pontos. A Figura 43 é referente à deformação ocorrida na face superior onde é aplicada a carga, (Figura 43 a, d) mostra a região delaminada devido a falha por esforços de corte durante o teste de flexão. Também há uma clara presença de deformação plástica (Figura 43 a, d). Este comportamento vai de encontro ao comportamento dúctil observado na curva força vs deslocamento dos compósitos testados. Também é possível observar uma boa impregnação das fibras com polímero e adesão entre fibra-matriz (Figura 43 c, e, f). A fratura observada na superfície, Figura 43 b, é devida a cargas de tração que originam a rotura do material na face inferior do compósito.

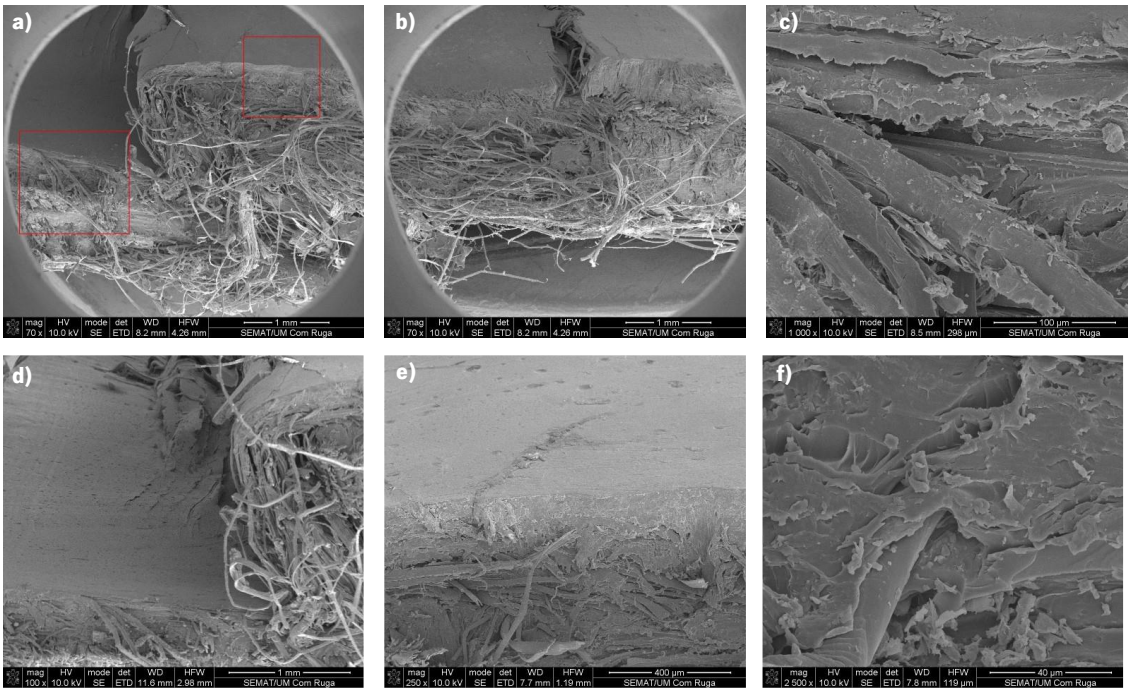


Figura 43 - Observação SEM, face de painel sanduíche que sofreu deformação plástica.

Na Figura 44 é observada a face paralela à anterior, (Figura 44 a, d, e, f) observa-se uma boa impregnação de fibra e a presença de rompimento de fibra como um dos mecanismos de falha possíveis. Na Figura 44 (b,c) é observada a superfície de fratura de uma face paralela à célula anterior onde se observa um dos principais mecanismos de rotura de materiais compósitos, chamado de arrancamento de fibra ou pull-out. Isto tem relação com a tolerância ao dano apresentada pela estrutura durante o processo de fratura, mostrando resistência ao dano catastrófico.

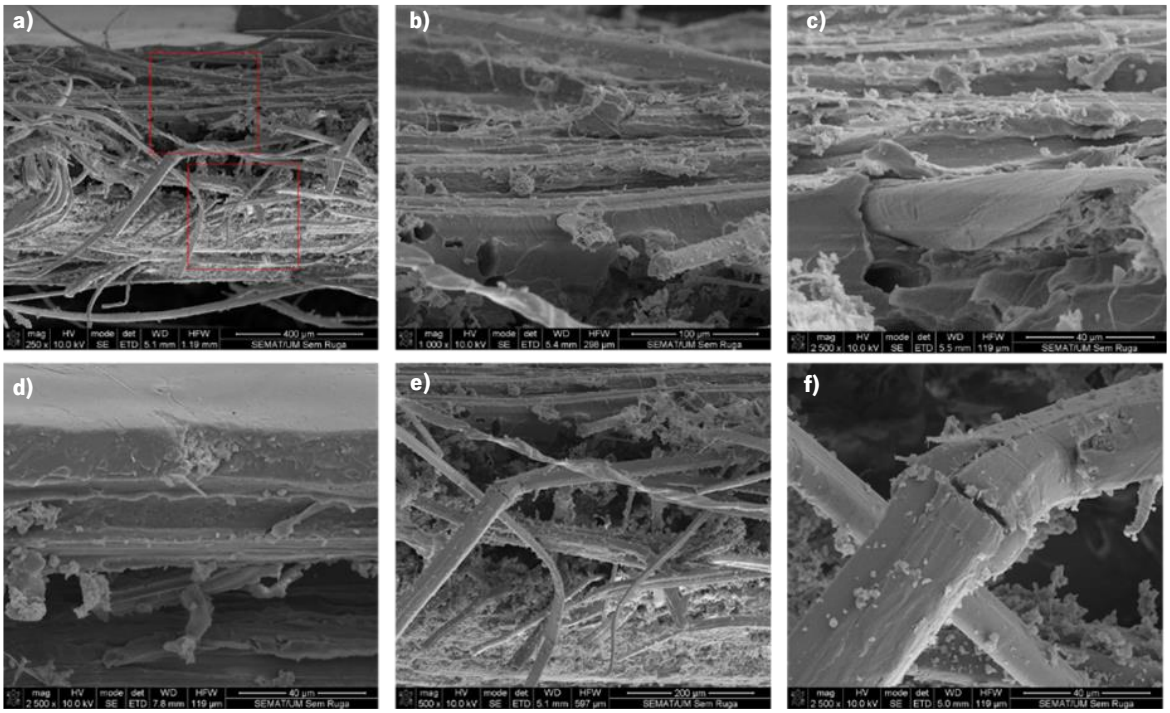


Figura 44 - Observação SEM, face paralela à contorcida.

5.3.2 Comparação de resultados

Em [33] são produzidos e avaliados quanto às suas propriedades, painéis de núcleo de cortiça, com skins de um material compósito com fibras de vidro, com núcleos de referência e estruturas celulares periódicas cilíndricas. Sendo que os núcleos de referência são designados por R, os cilíndricos por C e os hexagonais por H, respetivamente. Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos, utilizando a mesma norma são apresentados na Tabela 14, juntamente com os dados deste ensaio representados por A.

Tabela 14 - Comparação de propriedades com [33].

Painel	P_{max} [N]	F_s^{ult} [MPa]	σ [MPa]	Massa volúmica [kg/m³]
R	107	0,106	11,76	376
C	89,67	0,093	10,38	313
H	120,18	0,087	9,72	297
A	1435	0,430	30,70	234

Os valores indicados na tabela referem-se, a um valor médio das propriedades que apresentam, resultado de vários ensaios. O painel desenvolvido, neste trabalho, comparativamente aos painéis com núcleo de cortiça, quer com de referência ou o alveolado, possui menor massa volúmica e valores superiores de carga máxima, resistência a flexão na face e tensão de corte no

núcleo superiores, sendo que o núcleo de referência está mais próximo. Comparativamente ao núcleo com uma estrutura geométrica semelhante H (hexagonal), a resistência ao corte máxima no núcleo verifica um aumento de 80%, a tensão exercida na face aumenta 68% e há uma redução de densidade de 21%.

5.3.2.1 Ensaio de compressão

Os dados de força vs deslocamento retirados do ensaio são apresentados na Figura 45.

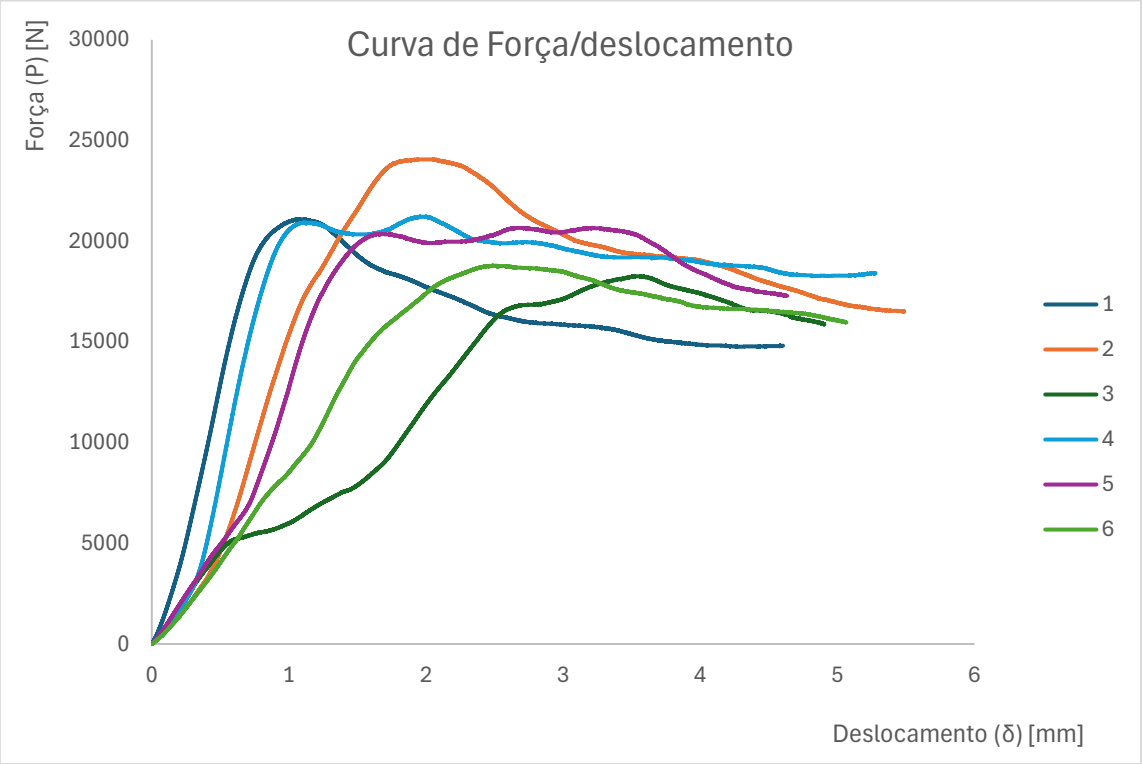


Figura 45 - Gráfico de força vs deslocamento, referente ao ensaio de compressão.

Ao considerar a altura inicial como t, procedendo-se ao cálculo da deformação é construída a curva de tensão deformação, sendo esta P/A, ver Figura 46.

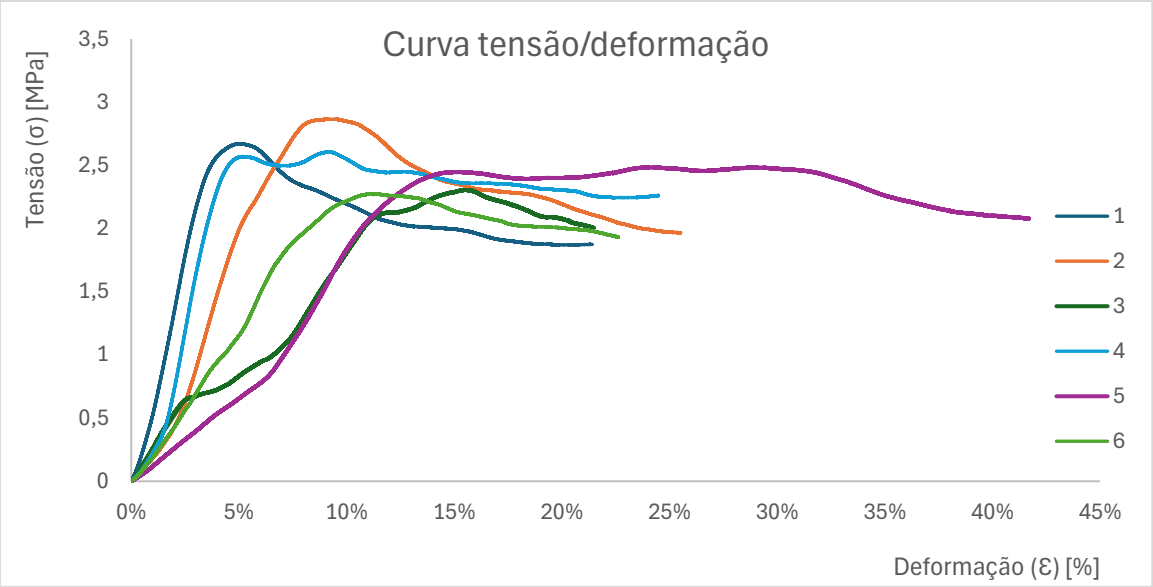


Figura 46 - Gráfico de tensão vs deformação, referente ao ensaio de compressão.

.

A partir do gráfico (força/ deslocamento) é retirada a força máxima exercida na estrutura (P_{Max}), correspondendo esta ao ponto de cedência e não o pico máximo no gráfico. Consultar todos os resultados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados experimentais referentes ao ensaio de compressão.

Provete	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Média**	**Desvio padrão**
Pmax [N]	21089	24062	16719	20901	20349	18780	20316,6	2246,14
$F_{z^{fct}}$ [MPa]	2,67	2,87	2,11	2,57	2,45	2,27	2,49	0,250
σ (2%) [MPa]	0,462	0,165	0,232	0,196	0,247	0,167	0,274	0,117
$E^{fc}{}_{ult}$ [MPa]	43,0	19,2	21,6	16,6	22,5	15,4	23,1	9,26

Através da observação da curva de tensão vs deformação é possível determinar 3 zonas diferentes representantes do comportamento do material. A primeira zona caracteriza-se por um aumento linear da tensão até a ocorrência do ponto de cedência. Após a ocorrência da cedência há uma queda de tensão, seguida de uma tensão quase constante (stress plateau), onde ocorre a distorção das células, ver Figura 47. A deformação da parede das células ocorre de forma conjunta, isto é, a adesão entre paredes de célula é suficiente para que estas deformem em conjunto sem que se separem. A terceira zona corresponde à densificação do núcleo onde ocorre um aumento de tensão.

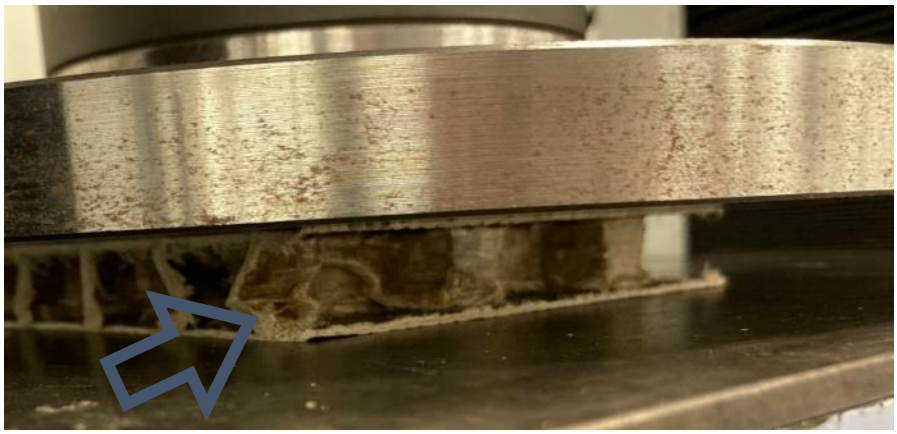


Figura 47 - Estado de compressão.

5.3.3 Comparação de resultados

Ainda em [33] são realizados ensaios de compressão para os núcleos R e C, cujos resultado são comparados na Tabela 16.

Tabela 16 - Comparação de resultados, compressão, com [33].

Painel	R	C	A
E^{fc}_{ult} [MPa]	3,21	1,38	23,1
F_z^{fct} [MPa]	0,212	0,096	2,49
σ (2%) [MPa]	0,129	0,057	0,274

Neste caso o painel desenvolvido apresenta valores bastante superiores em comparação com as propriedades dos outros núcleos de cortiça R e C. Em relação ao núcleo alveolado verifica-se um aumento de 94% em relação ao módulo de corte, 96% referente à resistência à compressão máxima aplicada no núcleo e 79% comparativamente à tensão para 2% de deformação.

Em [35] é desenvolvido um núcleo em resina de viniléster (matriz termoendurecível) com fibras de juta(fibras naturais). O núcleo é estudado, isto é, são realizados ensaios para determinar as suas propriedades. Ainda apresenta uma comparação com outros tipos de núcleo, comparativamente a este trabalho, dos dados presentes na Tabela 17, A corresponde a este trabalho enquanto J corresponde ao documento referenciado.

Tabela 17 - Comparação de propriedades físico-mecânicas com [35].

Núcleo	J (6 mm-cell)	J (10 mm-cell)	A
F_z^{fct} [MPa]	15,5	13,5	2,49
Massa volúmica [kg/m³]	290	157	234

O estudo, avalia o núcleo produzido em dois tamanhos de célula distintos e em ambos as propriedades de resistência à compressão são superiores ao desenvolvido neste trabalho. O autor não apresenta informação sobre o modulo de compressão, porém a densidade do núcleo com menores dimensões de célula é superior à do desenvolvido neste trabalho, contrariamente ao de tamanho de célula de 10 mm. Este autor também observou diferentes comportamentos na curva tensão deformação destes materiais e identificou-os como fases. Na Tabela 18, encontram-se comparações com materiais comerciais, retirada deste documento, com a inserção das propriedades do núcleo desenvolvido neste trabalho.

Tabela 18 - Tabela de propriedades físico-mecânicas retiradas de [35], comparativamente ao núcleo desenvolvido neste trabalho.

Núcleo	massa volúmica [kg/m³]	resistência a compressão [MPa]
J_10	290	14,99
J_10	157	13,48
A	234	2,49
Alumínio	126	9,37
Aço inoxidável	92	2,41
Euro compósito (fibra especial)	42	1,4
Nomex	32	0,9

O método de processamento mais industrializado e o facto de utilizar resina termoendurecível acrescentam vantagens significantes para este produto, o que lhe confere melhores propriedades. A estrutura compósita desenvolvida neste trabalho apresenta propriedades inferiores em relação às de [35], nomeadamente uma redução de 84% referente a J_6 e 82% em relação a J_10, no entanto a densidade é 19% menor em relação a J_6 e um aumento de 33% em relação a J_10. Comparativamente com o Nomex a densidade é 86% superior e a resistência à compressão é 64% superior.

5.4 Ensaio de resistência ao impacto

A partir dos dados resultantes do ensaio é construída a curva força vs tempo, ver Figura 48 e determinados os dados presentes na Tabela 19.

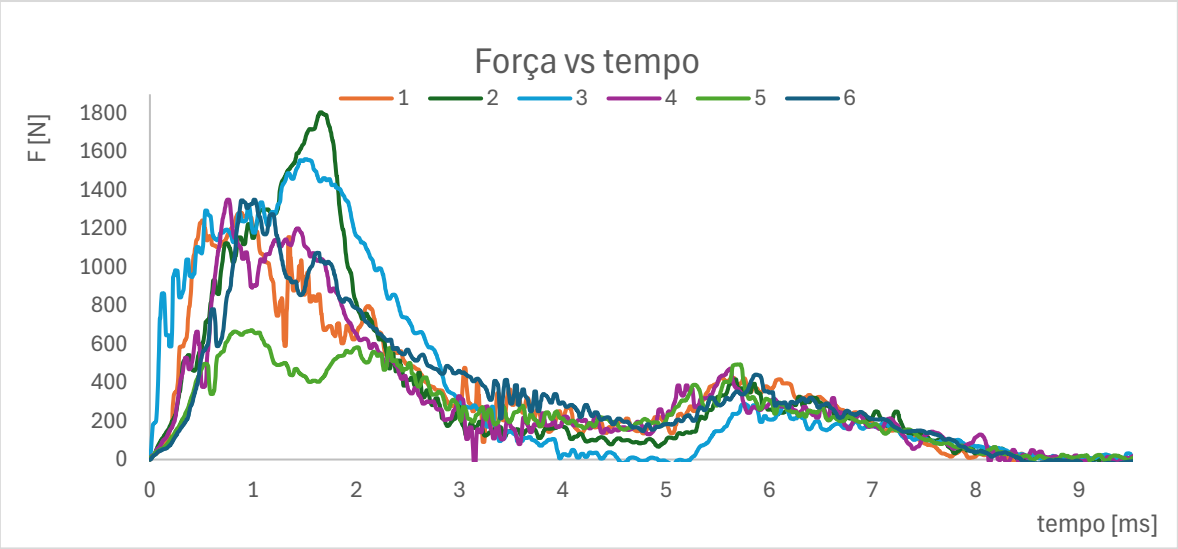


Figura 48 - Curva, força vs tempo referente ao ensaio de impacto.

Os picos de força existentes no gráfico correspondem à força máxima do impacto. No caso presente pode-se constatar a presença de dois picos correspondentes ao impacto na primeira e segunda face, e no caso da existência de 3 ou mais picos, ocorre impacto numa ou mais paredes de célula.

Tabela 19 - Resultados, ensaio de resistência ao impacto.

amostra	1	2	3	4	5	6	MÉDIA	Desvio padrão
F_{MAX} [N]	1283	1806	1562	1352	673	1351	1338	345
E_M [J]	2,89	6,92	7,27	1,61	1,54	2,39	3,77	2,40
ℓ_M [mm]	3,83	7,19	6,53	3,32	4,30	4,42	4,93	1,42
Ea [J]	14,30	14,78	14,05	13,37	10,52	14,54	13,59	1,44
ℓa [mm]	35,34	35,36	19,18	34,58	36,74	35,63	32,81	6,13

Em que:

- F_{MAX}, é correspondente à força máxima;
- E_M, é correspondente à energia cuja força é máxima;
- ℓ_M, é correspondente ao deslocamento referente à força máxima;
- Ea é a energia absorvida pelo material;
- ℓa é o deslocamento correspondente à energia absorvida.

5.4.1 Comparação de resultados

Em [36] é estudado o comportamento de estruturas sanduíche, face ao impacto de acordo com a norma **ISSO 6603**. Neste documento são testados painéis com faces de alumínio e

núcleos de espuma de poliuretano (PUR) e poliestireno (PS). O ensaio utiliza um dardo hemisférico de 20 mm de diâmetro e uma massa total de impacto de 13,15 kg. A uma velocidade de teste de 3,5 m/s, o autor observa para o núcleo de PUR, que a força do impacto reduz subitamente de 11790 N para 4450 N. Segundo o autor, este fenómeno ocorre devido à perfuração da face de alumínio. A velocidades superiores (4 m/ e 4,5 m/s) a força máxima é menor, porém não especificada pelo autor. O núcleo de PS apresenta um comportamento diferente, não ocorrendo perfuração das faces e apresenta uma força máxima um pouco superior à do PUR.

Em [37] são levados a cabo ensaios de caracterização de estruturas sanduiche, na Tabela 20 encontra-se uma comparação desses resultados com os obtidos neste documento.

Tabela 20 - Comparação com [37].

Material	**HC Nomex**			**Espuma de PET**		**HC_PMMA c/fibras de linho**
construção	A	B	C	A	B	Tipo único
F_{Max} [N]	3674,8	4755	5171,9	4390,8	6427,3	1338
Ea [J]	18,8	31,05	32,05	22,42	32,12	13,59

Na tabela a designação HC significa honeycomb. E estão representados os valores referentes à força máxima de impacto é à energia absorvida.

5.5 Absorção de água

O ensaio que permite determinar a absorção de água é definido pela norma **ISO 62:2008**, pelo método de ensaio 1. Conforme estipulado na norma, as amostras devem ter a sua massa estabilizada. Para este procedimento, as amostras são colocadas numa estufa a 50 °C, a massa das amostras é determinada antes de serem colocadas na estufa, m(t0) e de 24 em 24 horas sequencialmente, o resultado da estabilização da massa é descrito na Tabela 21 e Figura 49. A diminuição continua da massa é esperada, pois a umidade retida é retirada.

Tabela 21 - Processo de estabilização de massa.

Amostra	**m(t0) [g]**	**m(t1) [g]**	**m(t2) [g]**	**m(t3) [g]**	**m(t4) [g]**	**m(t5) [g]**	**m(t6) [g]**
1	28,96	28,41	28,27	28,22	28,11	28,1	28,11
2	24,75	24,25	24,14	24,09	23,99	23,97	23,98
3	23,7	23,26	23,17	23,14	23,06	23,057	23,07
4	25,52	25,01	24,88	24,83	24,72	24,71	24,71
5	30,07	29,47	29,34	29,29	29,18	29,16	29,18

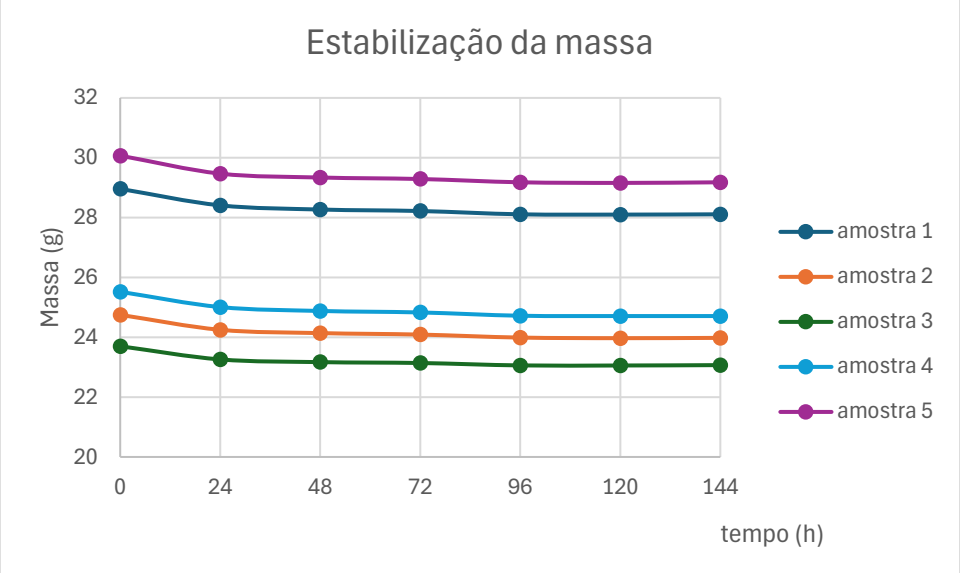


Figura 49 - Processo de estabilização da massa.

Conforme o observado, a massa das amostras estabiliza passado 144 horas. Após este processo de estabilização da massa, as amostras são individualmente submersas num recipiente com água destilada, sem tocar nas paredes do recipiente, ver Figura 50. A pesagem das amostras é executada passadas 24 horas. Os resultados referentes a este cálculo encontram-se na Tabela 22.



Figura 50 – Procedimento experimental do ensaio de absorção de água.

Tabela 22 - Caracterização da percentagem mássica de absorção de água após 24 horas.

amostra	m1 [g]	m2 [g]	c [%]
1	28,11	31,38	10%
2	23,98	26,65	10%
3	23,07	26,09	12%
4	24,71	26,443	7%
5	29,18	32,86	11%

O Valor médio calculado para a percentagem mássica de água absorvida é 10% e o correspondente desvio padrão é 0,018.

O processo de imersão é repetido, de modo a observar o comportamento da absorção de água, ver Figura 51

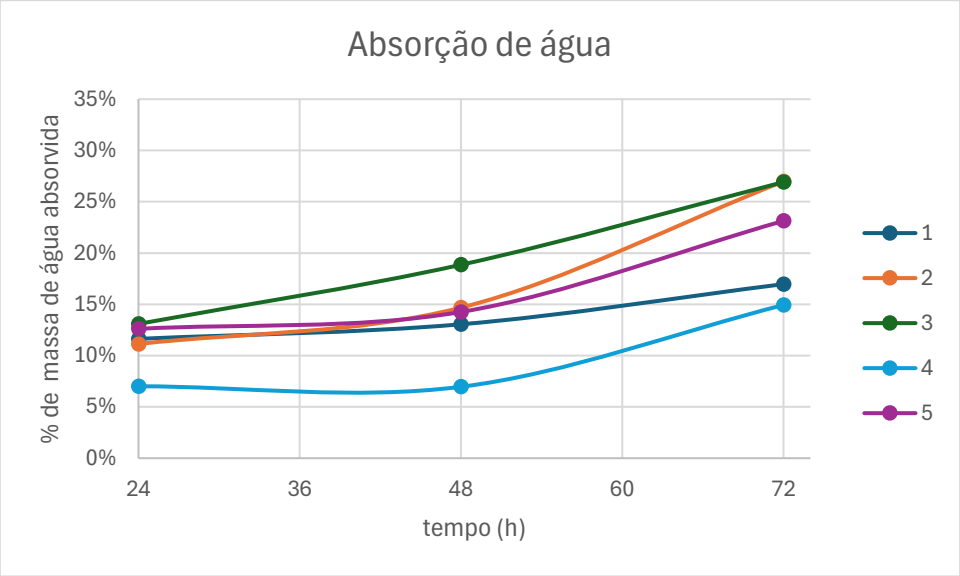


Figura 51 – Evolução da percentagem mássica de absorção de água.

5.6 Reprocessamento do produto final

O material triturado e granulado é disposto numa prensa a 200°C por 10 minutos e a uma pressão de 50 bar. Com um tempo de arrefecimento de 200 minutos.

É utilizado um molde(caixilho) de dimensões 180x180x4 mm, isto é, com um volume de 129600 mm^3 que corresponde a 0,0001296 m^3. Depois é calculada a massa volúmica do estratificado tendo em conta que a massa volúmica da fibra é de 1320 kg/m^3 e a da resina 1010 kg/m^3, e visto que o teor de fibra é de 50%, segundo a lei das misturas $\rho = \rho_f \times w_f + \rho_p \times (1 - w_f)$, a massa volúmica calculada para o estratificado é de 1240 kg/m^3. Assim, é necessária uma massa correspondente a 0.1607 kg do material em questão. Assim que o material é devidamente pesado numa balança, alcançando 0,1697 kg, este é colocado e ajustado no caixilho onde se dá o processamento da placa reciclada, ver Figura 52.

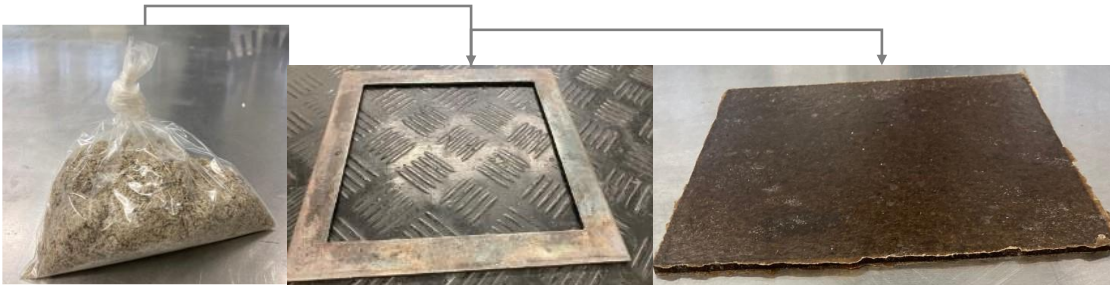


Figura 52 - Processamento da placa reciclada.

Após o processamento a placa é pesada e determina-se a sua massa volúmica, e verifica-se uma redução na massa, agora de 0,159 kg e na massa volúmica do produto 1226,8 kg/m^3. Além da compactação observam-se perdas de material, sob a forma de rebarba, neste tipo de processamento.

Para fins comparativos, é processada uma placa com as mesmas dimensões que a placa anterior, a partir do material virgem utilizando o processo de infusão a vácuo. Nesta experiência, devido ao efeito de sucção do vácuo no processo de infusão. A espessura final do laminado resultou em 3,25 mm. Os provetes são recortados por uma serra em forma retangular e os resultados comparativos da resistência à tração de ambos materiais são apresentados na Figura 53.

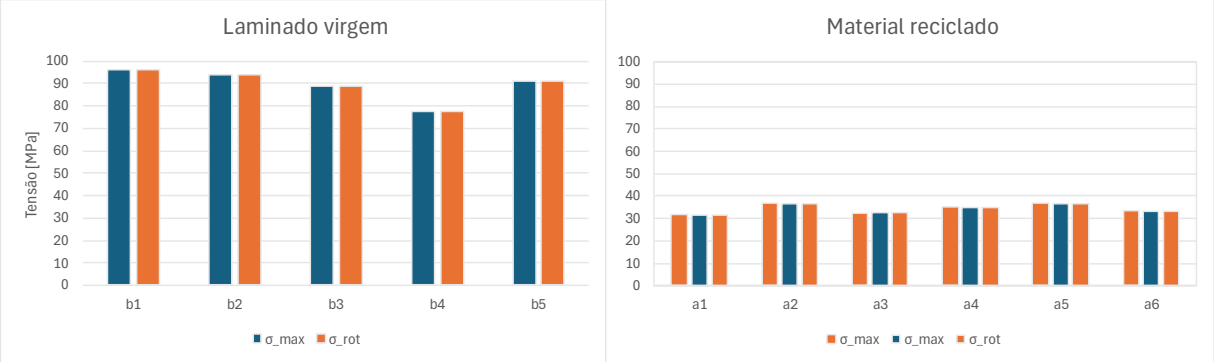


Figura 53 - Comparação de resultados entre material virgem e reprocessado.

Através da observação do gráfico, é visível que a tensão suportada pelo material virgem é superior àquela apresentada pelo material reciclado, conforme esperado devido à redução do comprimento das fibras resultante do processo de reciclagem. Os valores médios da resistência máxima à tração e da tensão de rutura do laminado virgem foram de **89,42 ± 6,42 MPa**, em comparação com **34,4 ± 1,9 MPa** para as mesmas propriedades medidas no material reciclado. Os valores de deformação à rotura do material virgem e do reciclado foram 3,44 ± 0,42 % e 1,32± 0,22 %, respetivamente.

6 CONCLUSÕES

Este projeto seguiu o objetivo de criar uma estrutura compósita do tipo sanduíche reciclável. A estrutura selecionada para tal efeito é uma construção em sanduíche com um núcleo em forma de favo de mel (honeycomb). Este tipo de estrutura permite um aumento do momento de inércia da geometria (através do aumento da espessura) e a redução da densidade comparativamente a um material monolítico.

Como resultado dos conhecimentos obtidos sobre painéis sanduíche e a implementação de uma resina termoplástica (PMMA) em conjunto com fibras de linho, é apresentado um painel termoplástico. Esta estrutura é exclusivamente constituída pelo compósito de fibras de linho infundidas a vácuo com a resina termoplástica de PMMA, favorecendo a reciclagem do produto.

O painel resultante foi totalmente processado por métodos convencionais e manuais, entre os quais o corte do corrugado e construção do núcleo, e associação posterior das faces. Como forma de caracterização foi medida a massa especifica do material, 234 kg/m^3, e avaliados os comportamentos em flexão (em 3 pontos), compressão e impacto de baixa velocidade, adicionalmente foi determinada a capacidade de absorção de água do painel após 24 h de imersão.

Os ensaios realizados permitiram caracterizar o material e viabilizaram a comparação com outras estruturas sanduíche, apresentadas em publicações científicas. O teste de flexão da estrutura sanduiche, permitiu conhecer a resistência máxima do núcleo ao corte e a tensão suportada pelas faces. O ensaio de compressão avaliou a resistência à compressão pelo cálculo do módulo secante e a resistência máxima à compressão do núcleo. O ensaio de impacto providenciou informações referentes à força máxima exercida no impacto energia absorvida pelo painel.

Pela comparação com outras estruturas sanduíche desenvolvidas por outros autores, pode concluir-se que que, apesar do painel desenvolvido neste trabalho apresentar propriedades mecânicas interessantes e de superar e até mesmo igualar certos materiais, no que diz respeito a propriedades mecânicas, não consegue competir com as resinas termoendurecíveis. Comparativamente à resistência à flexão, o painel desenvolvido, comprovou ser superior e revelou um comportamento bastante positivo em comparação com outros estudos relativos a painéis com

geometrias semelhantes. Em solicitação ao impacto, as características do material desenvolvido são inferiores a núcleos de Nomex e de espumas de PET.

A possibilidade de reciclagem do material do painel sanduiche desenvolvido apresenta uma vantagem em relação aos restantes. Por trituração foi executada a reciclagem mecânica dos painéis, e por moldação por compressão a quente deu-se o seu reprocessamento. Como resultado obteve-se uma placa compósita de fibras curtas e distribuídas aleatoriamente, que diminuem drasticamente as propriedades mecânicas do material em comparação a um laminado virgem do mesmo material. Tal foi comprovado por ensaios de tração aos mesmos.

Em suma, é possível concluir que a elaboração de estruturas sanduiche com reduzida pegada ambiental, não é um sonho distante, mas sim uma realidade presente. Apesar de não não se enquadrarem em aplicações semelhantes às dos materiais de alta performance, os painéis aqui desenvolvidos podem substituir muitas soluções comerciais em aplicações que não exijam altas propriedades mecânicas, tais como: como mobiliário, elementos decorativos, pavimentações, divisórias entre outras. Embora a construção da estrutura sanduíche tenha sido bem sucedida, há aspetos que podem ser melhorados, nomeadamente os métodos de processamento, aplicando um sistema mais industrializado. Para além do referido uma melhoria da uniformidade do núcleo evitaria problemas de adesão, este objetivo seria facilmente alcançado com um método de corte dos corrugados com maior nível de precisão. Além disso, uma solução que permita aumentar a viscosidade da resina que funciona como adesivo, impedindo o escoamento excessivo, o que permite que maior quantidade de resina sofra o processo de cura na interface núcleo/faces.

7 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho desenvolvido possui diversas possibilidades de continuação como:

- Desenvolvimento de um núcleo celular estocástico pela expansão da resina (ELIUM®);
- Elaboração de métodos que melhorem a adesão interfacial entre o núcleo e a face de estruturas honeycomb, sem a implementação de adesivos adicionais, e estudo e caracterização da adesão resultante;
- Exploração de outros tipos de fibras que possam ser implementadas no material de modo a melhorar a sua performance sem tornar a reciclagem inviável.

8 REFERÊNCIAS

[1] K. F. Karlsson e B. TomasÅström, «Manufacturing and applications of structural sandwich components», *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, n.º 2, pp. 97–111, jan. 1997, doi: 10.1016/S1359-835X(96)00098-X.

[2] Ma, S., Zhu, J., Zhang, S., Wang, S., & Wang, B. (2015). Research progress on bio-based thermosetting resins. Polymer International, 64(9), 1247–1258.

[3] «Chen e Das - 2022 - A review on manufacture of polymeric foam cores fo.pdf».

[4] «O PIEP | PIEP». Acedido: 6 de novembro de 2023. [Online]. Disponível em: https://www.piep.pt/sobre-o-piep/

[5] F. Amorim Cork Composites, «Amorim Cork Composites», Amorim Cork Composites. Acedido: 6 de novembro de 2023. [Online]. Disponível em: https://amorimcorkcomposites.com/pt/sobre-n%25C3%25B3s/amorim-cork-composites/

[6] «Hsissou et al. - 2021 - Polymer composite materials A comprehensive revie.pdf».

[7] «Renewable Carbon Publications», Renewable Carbon Publications. Acedido: 27 de fevereiro de 2024. [Online]. Disponível em: https://renewable-carbon.eu/publications/page/2/

[8] «Properties of fibres and thermosetting polymer resins [1,2].», ResearchGate. Acedido: 28 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Properties-of-fibres-and-thermosetting-polymer-resins-1-2_tbl1_359114234

[9] «physical-and-mechanical-properties-of-flax-fiber-and-its-composites.pdf».

[10] I. Kreja, «A literature review on computational models for laminated composite and sandwich panels», *Open Eng.*, vol. 1, n.º 1, jan. 2011, doi: 10.2478/s13531-011-0005-x.

[11] Veras, M. A. N. (2013). Estudo, fabrico e caracterização de painéis sanduíche com núcleos em materiais compósitos de cortiça

[12] M. He e W. Hu, A study on composite honeycomb sandwich panel structure», *Mater. Des.*, vol. 29, n.º 3, pp. 709–713, jan. 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.03.003.

[13] A. Stocchi, L. Colabella, A. Cisilino, e V. Álvarez, «Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics», *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 394–403, mar. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.054.

[14] Q. Ma, M. Rejab, J. Siregar, e Z. Guan, «A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels», *J. Compos. Mater.*, vol. 55, n.º 18, pp. 2513–2555, ago. 2021, doi: 10.1177/0021998321990734.

[15] K. F. Karlsson e B. TomasÅström, «Manufacturing and applications of structural sandwich components», *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, n.º 2, pp. 97–111, 1997, doi: 10.1016/S1359-835X(96)00098-X.

[16] M. ALMEIDA, «Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção. 2009. 185p», PhD Thesis, Tese (Mestrado)–Instituto Superior Técnico, Universidade técnica de Lisboa ..., 2009.

[17] B. Vijaya Ramnath, K. Alagarraja, e C. Elanchezhian, «Review on Sandwich Composite and their Applications», *Mater. Today Proc.*, vol. 16, pp. 859–864, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.169.

[18] F. de G. M. Rede, «Desenvolvimento e caracterização de estruturas sanduíche com núcleo honeycomb de cortiça», p. 121, 2019.

[19] N. Lakreb, S. Knapic, J. S. Machado, B. Bezzazi, e H. Pereira, «Properties of multilayered sandwich panels with an agglomerated cork core for interior applications in buildings», *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 76, n.º 1, pp. 143–153, jan. 2018, doi: 10.1007/s00107-017-1198-3.

[20] F. Hossain, M. Arifuzzaman, M. S. Islam, e M. M. Islam, «Thermo-Mechanical Behavior of Green Sandwich Structures for Building and Construction Applications», *Processes*, vol. 11, n.º 8, p. 2456, ago. 2023, doi: 10.3390/pr11082456.
[21] A. L. Isayev, *Injection and Compression Molding Fundamentals*. Routledge, 2017.
[22] «Moldação por Compressão», Fibrenamics Green. Acedido: 16 de outubro de 2023. [Online]. Disponível em: https://green.fibrenamics.com/moldacao-por-compressao
[23] F. de A. Santana e E. L. Nohara, «ESTUDO DO PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS A PARTIR DE PRÉ-IMPREGNADOS PEEK/FIBRA DE CARBONO POR MOLDAGEM POR COMPRESSÃO A QUENTE», vol. 16, n.º 2, 2010.
[24] M. R. Yellur, H. Seidlitz, F. Kuke, K. Wartig, e N. Tsombanis, «A low velocity impact study on press formed thermoplastic honeycomb sandwich panels», *Compos. Struct.*, vol. 225, p. 111061, out. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111061.
[25] B. P. Santos, «MODELAGEM DE NÚCLEOS EM COLMEIA NA ANÁLISE MECÂNICA DE PAINÉIS-SANDUÍCHE».
[26] J. Ziegler, «Organosandwich - Thermoplastic sandwich panel with PP honeycomb core and glass fiber/PP-skins». Acedido: 16 de outubro de 2023. [Online]. Disponível em: https://thermhex.com/products/organosandwich/
[27] *Cellular plastics and rubbers. Determination of apparent density:* doi: 10.3403/30199505.
[28] -, «TABELAS COM VALORES PARA APLICAÇÕES DE TERMOPLÁSTICOS», Molde Injeção Plásticos. Acedido: 8 de julho de 2024. [Online]. Disponível em: http://moldesinjecaoplasticos.com.br/tabelas-com-valores-para-aplicacoes-de-plasticos/
[29] «How PVC Melting Temp Influences Its Properties and Applications», FOW Mould. Acedido: 9 de julho de 2024. [Online]. Disponível em: https://www.immould.com/influence-of-pvc-melting-temp-on-properities-and-applications/
[30] «12_ASTM C365 - 94 = Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores[35725].pdf».
[31] D30 Committee, *Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. doi: 10.1520/C0393_C0393M-11.
[32] M. C. Lawson, K. C. Hoth, C. A. DeForest, C. N. Bowman, e K. S. Anseth, «Inhibition of Staphylococcus epidermidis Biofilms Using Polymerizable Vancomycin Derivatives», *Clin. Orthop.*, vol. 468, n.º 8, pp. 2081–2091, ago. 2010, doi: 10.1007/s11999-010-1266-z.
[33]«Desenvolvimento_e_caracterizacao_de_estruturas_sanduiche_com_nucleo_honeycomb_de_cortica_-_Francisco_Rede.pdf».
[34] «Properties of Materials». Acedido: 8 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: https://www.ae.msstate.edu/vlsm/materials/strength_chars/secant.htm
[35] A. Stocchi, L. Colabella, A. Cisilino, e V. Álvarez, «Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics», *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 394–403, mar. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.054.
[36] Military Technical Academy, Bulevardul George Coşbuc nr. 39-49, Bucharest, Romania, O. A. Mocian, D. M. Constantinescu, University POLITEHNICA of Bucharest, M. Sandu, e University POLITEHNICA of Bucharest, «Low-velocity impact testing of foam core sandwich panels», *J. Eng. Sci. Innov.*, vol. 3, n.º 2, pp. 93–106, mai. 2018, doi: 10.56958/jesi.2018.3.2.93.
[37] P. Koštial, Z. Koštialová Jančíková, I. Ružiak, e M. Gajtanska, «Case Study of Chosen Sandwich-Structured Composite Materials for Means of Transport», *Coatings*, vol. 10, n.º 8, p. 750, jul. 2020, doi: 10.3390/coatings10080750.