

Desenvolvimento e caracterização de estruturas sanduíche com núcleo *honeycomb* de cortiça

Francisco de Gouveia Mendes Rede

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. António Torres Marques

Coorientador: Prof. Paulo Nóvoa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro 2019

À minha família

Resumo

A crescente preocupação ambiental e a procura de novas soluções sustentáveis, deu à cortiça a possibilidade de se destacar e poder ser implementada em áreas onde outrora não o era. Trata-se de um material natural usado pela Humanidade há mais de 5000 anos e tem, hoje em dia, uma importância notória nas mais diversas aplicações, que vão desde rolhas à indústria aeronáutica.

Sendo Portugal o maior exportador de cortiça do mundo, o investimento nesse setor traz, não só vantagens diretas através da exportação deste produto, assim como novas indústrias ligadas a este setor, gerando postos de trabalho. Grande parte da cortiça é usada sob a forma de compósitos que, juntamente com outros materiais, podem formar peças com boa resistência mecânica e durabilidade. Esta destaca-se também pelas excelentes propriedades de isolamento térmico, acústico e vibratório e a integração desta como núcleo de compósitos em sanduíche tem-se mostrado interessante do ponto de vista estrutural, uma vez que, devido à baixa massa específica deste material, aliada às propriedades das peles usadas geralmente em compósito, fazem desta combinação um material com propriedades mecânicas próximas de outros compósitos com núcleos poliméricos.

A presente dissertação pretende perceber se poderão resultar benefícios através da modificação da estrutura de um núcleo de uma sanduíche com peles de materiais compósitos de fibra de vidro. O procedimento experimental passa por tornar uma placa de cortiça de baixa massa específica (150 kg/m^3) num *honeycomb* cilíndrico e num hexagonal e compará-la depois, em termos de propriedades mecânicas, com a placa sem *honeycomb* e com outros materiais compósitos.

Palavras chave: cortiça, compósito, favo de abelha, sanduíche, célula, núcleo, peles, fibra de vidro

Abstract

The increasing environmental concern and the systematic search for new and sustainable solutions, allowed the application of cork in fields and areas where once seemed impossible for it to fit. Cork is a natural resource used by Humanity for over 5000 years and it has, currently, a well-noted importance and the most diverse applications from bottling to aeronautical industry.

As Portugal is the world's leading exporter of cork, its investment brings direct economic benefits, as well as the creation of new factories, thus generating higher employment. The majority of the cork is used under the form of composites that added to other materials can become parts and pieces of great mechanical endurance and durability. Cork is also well known for its thermal, acoustic and vibration isolation properties. From the structural point of view, its integration as a core of composite sandwiches has also shown very interesting results. Mainly, due to the combination of the low density of cork, along with the properties of the face-sheets - usually composed by fibers - which confer mechanical characteristics similar to those of structures with polymeric cores.

This dissertation aims to assess which advantages can arise from changes in the core structure of a sandwich construction with fiberglass composite face-sheets. In this study, a low-density cork board (150 kg/m^3) was used to produce both a cylinder honeycomb and a hexagonal honeycomb. The mechanical properties of the obtained composites were compared with other well-known materials and composites.

Keywords: cork, composite, honeycomb, sandwich, cell, core, fiberglass

Agradecimentos

Ao Prof. Doutor António Torres Marques, na qualidade de orientador da dissertação, pela sua disponibilidade, pelo apoio prestado no esclarecimento de dúvidas, pelas sugestões dadas, e na transmissão de conhecimentos e de conselhos.

Ao Dr. Paulo Jorge Nóvoa, na qualidade de Coorientador, pela disponibilidade, esclarecimentos prestados e auxílio nas várias fases práticas e teóricas do projeto.

Aos Prof. Marco Parente e Prof. José Abílio de Jesus pelos conhecimentos transmitidos no uso do Software Abaqus CAE®.

Ao Prof. Lucas Silva e Eng. Ricardo Carbas pela disponibilidade para realização de ensaios de caracterização mecânica.

Ao Fábio Neto, ao José Francisco Teixeira, e à Andreia Durães, do INEGI, pela ajuda prestada na produção por infusão do laminado de fibra de vidro, na maquinaria do *honeycomb* em cortiça, e no facilitar acesso a equipamentos de ensaio, respetivamente.

Aos Eng. Rui Palavra e Eng. Patrick Maravilha da Amorim Cork Composites pela oferta da placa de aglomerado de cortiça Corecork® NL10 para a realização dos núcleos das estruturas sanduíche.

Ao Sr. Domingos Carvalho, coordenador técnico da oficina de maquinaria da Faculdade de Engenharia, pelas sugestões, auxílio e fabrico das peças propostas.

Ao Prof. João Francisco Machado Gomes da Silva, do ISEP, por facilitar acesso ao Laboratório de Materiais Compósitos para realização dos ensaios de calcinação.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela oportunidade dada de nela ter estudado, às suas instalações e todo o equipamento fornecido que facilitou todo este trabalho.

Ao INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, pelo espaço e materiais fornecidos para a conceção do compósito e realização dos ensaios.

À DESCUT - Design Lda. pelo corte e envio das amostras de cortiça a jato de água.

À Doutora Adelaide Telles, dos SASUP, pelo acompanhamento e ajuda prestada, fundamental para o meu sucesso.

À minha família que sempre me acompanhou e ajudou nos momentos bons e nos menos bons e que sem ela não teria chegado a esta fase da minha vida. À minha namorada pelo apoio prestado ao longo deste trabalho. A todos os meus amigos e a todos aqueles que de alguma maneira me ajudaram a concluir esta dissertação e a chegar à fase final do meu curso.

Índice de conteúdos

Resumo	vii
Abstract	viii
Agradecimentos	ix
Índice de conteúdos	xi
Siglas	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xx
1 Preâmbulo	1
1.1 Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2 Objetivos do projeto	1
1.3 Calendarização e metodologia seguida no projeto	2
1.4 Estrutura da dissertação	4
2 Estado da arte	5
2.1 Cortiça	5
2.1.1 Características	5
2.1.2 Transformação Industrial: Granulados e aglomerados	8
2.1.3 Aspetos ecológicos relacionados com os produtos de cortiça	10
2.2 Estruturas celulares	11
2.2.1 Estruturas celulares porosas	11
2.2.2 Estruturas Honeycomb	13
3 Desenvolvimento e caracterização das estruturas sanduíche	23
3.1 Seleção do aglomerado de cortiça	23
3.1.1 Dimensionamento dos favos e espessuras de parede	23
3.1.2 Critério de seleção do aglomerado para o núcleo	25
3.2 Peles a usar na estrutura sanduíche	29
3.2.1 Preparação das peles	29
3.2.2 Propriedades do compósito de fibra de vidro	32
3.3 Preparação do núcleo	37
3.3.1 Puncionamento	38
3.3.2 Furação	40
3.3.3 Fresagem CNC	41
3.3.4 Processos alternativos	43
3.4 Colagem das peles e corte dos provetes para ensaios de flexão	43
3.5 Realização dos ensaios mecânicos	45
3.5.1 Flexão em 3 e 4 pontos	46
3.5.2 Compressão	48
4 Resultados e discussão	51
4.1 Flexão em 3 e 4 pontos	51
4.1.1 Provetes não normalizados	51
4.1.2 Provetes normalizados	59
4.2 Compressão	60
4.3 Análise de materiais concorrentes	63
Conclusões	67
Trabalhos futuros	69
Referências	71
ANEXO A: Catálogo Plascore® - PP; PC; PN1; PN2; PK2.	77

ANEXO B: Catálogo da Amorim Cork Composites® para os aglomerados NL10, 20 e 25.....	83
ANEXO C: Gráficos de força reativa do punção ao longo do tempo e segundo a direção Z para os 3 casos de espessura de parede (Abaqus CAE®).	87
ANEXO D: Propriedades da resina de epóxico - Biresin® CR83.	89
ANEXO E: Punção hexagonal, auxético e respetiva pega.	91
ANEXO F: Desenho dos núcleos de cortiça em <i>honeycomb</i> hexagonal e auxético.	95
ANEXO G: Ficha de produto do adesivo para painéis de sandwich SikaForce®.	97
ANEXO H: Gráficos força vs. deformação obtidos na Instron 5900R®.	99

Siglas

CFRP – *Carbon Fiber-Reinforced Polymer*

CNC – *Computer Numeric Control*

FV – Fibra de Vidro

NBR – Co-polímero do Butadieno e do Acrilonitrilo

PCL – Poli-ε-capro Lactona

PHBV – Poli-hidroxibutirato-co-hidroxivalerato

PLLA – Poliacido L-láctico

PP – Polipropileno

PU – Poliuretano

PVC – Policloreto de Vinil

SCAPs – Polióis Autocatalíticos Baseados em Cardanol

SEM – Scanning Electron Microscope

SNHC – Sanduíche com Núcleo *Honeycomb* Cilíndrico

SNHH – Sanduíche com Núcleo *Honeycomb* Hexagonal

SNR – Sanduíche com Núcleo de Referência

SPCL – Poli-ε-capro Lactona/amido

VARIM – *Vacuum Assisted Resin Infusion*

XPS – Poliuretano Extrudido

Índice de Figuras

Figura 1 - Estrutura macroscópica da cortiça. A) troncos de sobreiro empilhados onde se podem distinguir as quatro camadas (Kassandra 2012); B) vista do tronco de sobreiro em corte transversal (Gil 1998b).	6
Figura 2 - Estrutura microscópica da cortiça. A) casca do sobreiro antes de a cortiça se desenvolver; B) cortiça e diferentes camadas e constituintes; C) célula de cortiça e vários componentes (Gil 1998a).	6
Figura 3 - Observação da cortiça através de microscopia eletrónica: A) direção tangencial; B) direção não tangencial; C) setas indicando a presença de fungos (Miranda, Gominho e Pereira 2013).	7
Figura 4 - Degradação dos constituintes químicos da cortiça com o aumento da temperatura (Pinto-Correia e Mira Potes 2013).	8
Figura 5 – Transformação da cortiça (Gil 1998a).	8
Figura 6 – Fabrico de rolhas através de aglomerado de cortiça (Gil 2009).	9
Figura 7 – A) Célula cúbica; B) Exemplo de peças com células octaédricas obtidas por impressão 3D a laser; C) Exemplo de célula co octaédrica; D) Outros tipos de estruturas complexas (Hedayati et al. 2016c, 2017, 2016a, 2016b).	12
Figura 8 – A) Morfologia de uma espuma PU analisada por SEM (17); B) Curva tensão-deformação de duas espumas de PU de diferente massa específica (espuma 1, $\rho = 122 \text{ kg/m}^3$; espuma 2, $\rho = 116 \text{ kg/m}^3$) (Huo et al. 2018).	12
Figura 9 - Espuma de alumínio (dimensão da foto 60 x 50 mm) (Baumeister, Banhart e Weber 1997).	13
Figura 10 - Exemplos de estruturas <i>honeycomb</i> produzidas (Zhang et al. 2015).	14
Figura 11 – <i>Honeycomb</i> em PC (A) e PP (B) (ANEXO A).	16
Figura 12 – A) <i>Honeycomb</i> em fibra de aramida PN1 e PN2; B) <i>honeycomb</i> de fibra de para-aramida PK2 (ANEXO A).	17
Figura 13 – Evolução da compressão das várias amostras (Duan et al. 2018).	17
Figura 14 - Comportamento de uma sanduíche à flexão (Arteiro e Reis 2011).	18
Figura 15 - Modos de rotura de um compósito em sanduíche (Arteiro e Reis 2011).	19

Figura 16 – Aspeto da estrutura após o ensaio de corpo livre – imagem capturada por raio X (Bonanno et al. 2018).....	20
Figura 17 - Grupos de materiais e respetivo módulo de elasticidade e resistência à compressão por massa específica (Moongkhamklang, Deshpande e Wadley 2010).....	20
Figura 18 - Grupos de materiais e respetivos módulo de resistência ao corte massa específica (Moongkhamklang, Deshpande e Wadley 2010).	20
Figura 19 - Prisma hexagonal obtido através de SolidWorks®.	24
Figura 20 – Projeção do prisma hexagonal: L-lado exterior; I – lado interior.....	24
Figura 21 - Gráfico deslocamento vs. espessura de parede.	26
Figura 22 - Modelos com 1,68, 2,17 e 3,00 mm de espessura de parede, A,B e C, respetivamente.....	27
Figura 23 - Tensão no <i>honeycomb</i> com 1,68 mm de espessura de parede.....	27
Figura 24 - Tensão no <i>honeycomb</i> com 2,17 mm de espessura de parede.....	27
Figura 25 - Tensão no <i>honeycomb</i> com 3,00 mm de espessura de parede.....	28
Figura 26 - Gráficos de tensão e força/espessura de parede.....	28
Figura 27 - Esquema da infusão por VARIM (Lopes 2009).	30
Figura 28 – Bocal para aspiração do ar.	30
Figura 29 - Zonas críticas pela possível entrada de ar durante a criação de vácuo: A) bocal; B) sobreposição do adesivo).	30
Figura 30 - Infusão da resina: A) fase intermédia da infusão; B) impregnação total das peles.	31
Figura 31 – A, B) Aspeto da placa de compósito, depois de retirado o <i>peel ply</i> ; C) Peles após retificação por corte.	31
Figura 32 – A) Cadinhos com resíduos das amostras de compósito em FV; B) Mufla Nabertherm; C) Cadinhos no interior da mufla, após calcinação das amostras de compósito de FV.....	32
Figura 33 – A) Ensaio de tração na Instron® 5900R®; B) Provetes para determinação das propriedades do compósito de fibra de vidro usado; C) Provetes depois de tracionados.....	33

Figura 34 - Defeito de maquinagem no provete T3.	33
Figura 35 – Tensão (MPa) vs. deformação (%) em tração dos provetes de compósito de FV.....	34
Figura 36 – A) Ensaio de tração na máquina de ensaios Instron® 3367; B) Estado do provete em pormenor.	35
Figura 37 – Tensão (MPa) vs. deformação (%) dos provetes do tipo retangular em compósito de FV.....	36
Figura 38 – Microscopia; A) e B) estado superficial das peles; C) visão de topo revelando extensa porosidade (delaminação) e D) visão de topo com boa qualidade de impregnação.....	37
Figura 39 - Placa de cortiça cedida pela Amorim Cork Composites®.....	37
Figura 40 - A) Configuração dos núcleos para os provetes de flexão na placa de cortiça 160 por 500 mm; B) núcleos da sanduíche recortados.	38
Figura 41 - Punção concebido: A) desenho 3D do punção hexagonal e respetiva pega; B) punções hexagonal e auxético depois de concebidos.....	39
Figura 42 - A) Teste de corte com o punção; B) Resultado do corte na placa de teste.	39
Figura 43 – A) Máscara usada para a furação; B) Furação da placa de teste; C) Ajuste da velocidade.....	40
Figura 44 – Furos com broca de 6,5 mm a 275 Rpm: A) - aspeto em <i>honeycomb</i> , B) - rompimento de parede alveolar	40
Figura 45 - Furos de 8 mm de diâmetro, à entrada da broca, realizados a 2700 rpm.....	41
Figura 46 – A) <i>Honeycomb</i> reproduzido sobre a placa de cortiça; B) Após furação.	41
Figura 47 – A) Peça maquinada através de fresagem CNC; B) <i>Honeycomb</i> hexagonal após corte com serra de fita; C) Detalhe do corte com precisão.	42
Figura 48 - Corte executado a jato de água (esquerda - sem agente abrasivo; direita - com agente abrasivo).	43
Figura 49 - Componentes A e B do adesivo: A) antes da mistura; B) razão indicada pelo fornecedor; C) aplicação do adesivo.	44
Figura 50 - Processo de prensagem e cura do adesivo sob a pressão de pesos.....	44
Figura 51 – Pós-cura do adesivo a 50 °C durante 4 h.	45

Figura 52 – A) Corte dos provetes; B) 3 provetes para flexão não normalizada e 1 para flexão normalizada; C) aspeto lateral da sanduíche (proвете SNR).	45
Figura 53 - Instron® 5900R®	46
Figura 54 – A) Posicionamento do provete nos suporte para ensaios de flexão de 3P e 4P segundo a norma ASTM C 393/393M (ASTM 2006, 2000); B) aspeto real do posicionamento do provete na flexão 4P.	48
Figura 55 - Gráfico carga vs. deformação e esquema da metodologia normalizada para determinação do módulo de compressão (ASTM C365).	49
Figura 56 – Ensaio de flexão 4P	52
Figura 57 – Gráfico de carga aplicada vs. flecha para o provete R1, nos ensaios de 3P e 4P	52
Figura 58 – Ensaio de flexão de 4P (A e C) e 3P (B e D).	54
Figura 59 - Gráfico de carga aplicada vs. flecha para o provete C2, nos ensaios de 3P e 4P.	55
Figura 60 – Flexão a 3P (A e C) e 4P (B) do compósito com núcleo <i>honeycomb</i> hexagonal	56
Figura 61 – Gráfico de carga aplicada vs. flecha para o provete H1, nos ensaios de 3P e 4P	57
Figura 62 – Gráficos força vs. deslocamento para ensaios 3P com provetes normalizados.	59
Figura 63 – A) Gráfico tensão (σ_c) vs. deformação (ϵ_c) de R1 a R3 e de C1 a C3 ao longo do ensaio; B) Ampliação do gráfico de tensão (σ_c) vs. deformação (ϵ_c) até 15 % de deformação	60
Figura 64 - Deformação dos provetes R1 e C1 em duas fases distintas (intermédia e final).	62
Figura 65 - Recuperação dos provetes R1 e C1, 24 horas após os ensaios de compressão.	62
Figura 66 - Comparação do módulo de corte dos compósitos desenvolvidos (<i>cork composite</i>) e dos núcleos de <i>honeycomb</i> cilíndrico e hexagonal com outros materiais (CES Edupack).	63
Figura 67 - Gráfico módulo de compressão vs. massa específica para os núcleos do tipo R (cortiça NL10) e núcleo com favos cilíndricos	64
Figura 68 - Comparação da condutividade térmica (W/m°C) dos materiais desenvolvidos	65
Figura 69 - Comparação da pegada ecológica (kg de CO ₂ por kg de material produzido) dos materiais desenvolvidos.	65

Figura 70 - Gráfico tempo / força para o caso de 1,68 mm de espessura de parede.	87
Figura 71 - Gráfico tempo / força para o caso de 2.17 mm de espessura de parede.	87
Figura 72 - Gráfico tempo / força para o caso de 3.00 mm de espessura de parede.	87
Figura 73 – Gráfico de força vs. deformação obtido nos ensaios de 3P e 4P para SNR.	99
Figura 74 - Gráfico de força vs. deformação obtido nos ensaios de 3P e 4P para SNHC.....	99
Figura 75 - Gráfico de força vs. deformação obtido ensaios de 3P e 4P para SNHH.	99

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Mapa de Gantt das tarefas e marcos a realizar ao longo do semestre.	3
Tabela 2 – Composição química da cortiça virgem para diferentes localizações. Local 1: Herdade da Palma (Alcácer do Sal); Local 2: Herdade da Cardzana (Grândola); Local 3: Monte dos Olheiros (Mora); Local 4: Herdade de Gouveia (Montemor-o-Novo); adaptado de (Pereira 1988).	5
Tabela 3 - Valores médios para as características da aglomerados de cortiça disponíveis, adaptado de (Gil 1998b).	10
Tabela 4 - Comportamento mecânico/ modo de rotura de determinados materiais com micro e nano <i>honeycomb</i> sujeitos a vários testes (Zhang et al. 2015).	15
Tabela 5 - Exemplos de <i>honeycomb</i> como núcleos de sanduíches e respetivas aplicações (Zhang et al. 2015).	18
Tabela 6 - Aglomerados de cortiça <i>CoreCork®</i> e respetivas propriedades.....	23
Tabela 7 - Valores calculados para o NL 20 e NL 25.....	25
Tabela 8 - Espessuras de parede obtidas para os diferentes materiais.....	25
Tabela 9 – Valores de tensão e de deslocamento obtidos.	25
Tabela 10 - Resultados de tensão, descritos por espessura de parede.....	28
Tabela 11 - Valores de fração mássica de fibra de vidro e de resina obtidos.....	32
Tabela 12 – Propriedades obtidas para cada um dos provetes do tipo haltere, em compósito de fibra de vidro.....	34
Tabela 13- Dimensões médias dos quatro provetes cortados em duas direções perpendiculares entre si.....	34
Tabela 14 - Propriedades obtidas para cada um dos provetes do tipo 2.	35
Tabela 15 – Comparação dos valores de massa obtidos para os 3 conjuntos de provetes R (referência), C (favos cilíndricos) e H (favos hexagonais).....	42
Tabela 16 – Configuração dos ensaios realizados para os diferentes tipos de sanduíche (SNR, SNHC e SNHH) e regimes testados.....	48

Tabela 17 – Propriedades dos provetes com núcleo de referência.	51
Tabela 18 – Força máxima (P) e deformação (ϵ) para cada ensaio.	52
Tabela 19 - Valores de módulo ao corte do núcleo (G), tensão máxima nas peles (σ), e tensão de corte máxima no núcleo (τ) calculados para a estrutura com o núcleo de referência.....	53
Tabela 20 - Propriedades dos provetes com núcleo <i>honeycomb</i> cilíndrico.....	53
Tabela 21 - Força máxima (P), deformação (ϵ) para cada ensaio de SNHC.....	54
Tabela 22- Valores de módulo ao corte do núcleo (G), tensão máxima nas peles (σ), e tensão de corte máxima no núcleo (τ), calculados para a estrutura com núcleo de favos cilíndricos.	55
Tabela 23 - Propriedades dos provetes com núcleo <i>honeycomb</i> hexagonal.	56
Tabela 24 - Força máxima (P), deformação (ϵ) para cada ensaio.	57
Tabela 25 - Valores de módulo ao corte do núcleo (G), tensão máxima nas peles (σ), e tensão de corte máxima no núcleo (τ) calculados para a estrutura com núcleo de favos hexagonais.	57
Tabela 26 - Comparação de módulo ao corte do núcleo, carga máxima, massa e massa específica entre os núcleos dos compósitos sanduíche.	58
Tabela 27 – Propriedades dos provetes normalizados.	59
Tabela 28 - Força máxima, tensão de flexão, deformação para cada ensaio.	59
Tabela 29 - Provetes e respectivas dimensões.....	60
Tabela 30 - Valores de módulo de compressão e tensões de cedência a 0,2 % e 10 % de deformação para provetes de referência.	61
Tabela 31 - Valores de módulo de compressão e tensões de cedência a 0,2 % a 10 % de deformação para provetes de favos cilíndricos.	61
Tabela 32 - Comparação de valores médios dos provetes do tipo C e R.	61

1 Preâmbulo

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A presente dissertação com o título “Desenvolvimento e caracterização de estruturas sanduíche com núcleo *honeycomb* de cortiça”, foi realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica no ramo de Produção, Conceção e Fabrico. O trabalho académico decorreu nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e do INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, sob a orientação dos Profs. António Torres Marques e Paulo Nóvoa.

A criação de um compósito em sanduíche com núcleo *honeycomb* em cortiça, possibilitou a aplicação de conhecimentos adquiridos no curso, num tema intrínseco aos materiais compósitos e ainda com muito para indagar. Procurou-se caracterizar o compósito e perceber que vantagens oferece relativamente a outros materiais existentes no mercado.

A cortiça é uma matéria proveniente do sobreiro, uma espécie autóctone portuguesa (Gil 1998a). As suas propriedades únicas de isolante sonoro, térmico e vibratório fazem da cortiça um material apetecível para vários setores de mercados, representando em 2013 aproximadamente 30 % do total das exportações portuguesas de produtos florestais, correspondendo a 0,7% do PIB, 2,2 % do valor das exportações totais portuguesas (Pinto-Correia e Mira Potes 2013; Gil 1998a; Gil 1998b). Em 2016, o valor das exportações de cortiça representou 7,5 % do total de exportações portuguesas (Lusa 2017).

Com a problemática das alterações climáticas na ordem do dia e a crescente preocupação com o meio ambiente, a não emissão de poluentes no seu processamento faz deste material uma opção interessante e inovadora do ponto de vista ecológico (Gil 1998a; Silva 2016). Sendo Portugal o maior produtor de cortiça a nível mundial, a implementação de novas tecnologias que impliquem a sua aplicação, pode contribuir para o desenvolvimento da economia nacional, nomeadamente para o setor corticeiro (Silva 2016).

1.2 Objetivos do projeto

O principal objetivo do trabalho é o de desenvolver e caracterizar um compósito sanduíche com núcleo *honeycomb* de cortiça. A seleção dos materiais a utilizar na construção do compósito terá em linha de conta o próprio conceito de sanduíche, onde as peles do compósito desempenham um papel importante no que toca a tensões de tração e compressão. Por sua vez, o núcleo é o principal responsável pela leveza da estrutura, sendo importante nas tensões de corte e principal responsável pelo aumento do momento de inércia da estrutura (Sargianis, Kim e Suhr 2012). A caracterização do núcleo de cortiça em *honeycomb* será alvo de estudo para

perceber qual a espessura de parede, geometria e configuração dos favos a aplicar. Esta otimização será feita com recurso ao software Abaqus CAE® e através de cálculos matemáticos, mantendo constante a massa total do núcleo e variando a espessura de parede dos favos.

Considerando os métodos de fabrico usados para a conceção dos *honeycomb* em cortiça e quais aqueles que se poderiam adequar melhor a uma produção em massa, serão desenvolvidos três tipos de núcleos diferentes. Partindo de placas de cortiça, o primeiro núcleo será uma placa sem *honeycomb* (referência), o segundo uma placa com núcleo *honeycomb* cilíndrico e o terceiro uma placa com núcleo *honeycomb* hexagonal. Será feita uma comparação a nível das propriedades mecânicas para os três compósitos. A análise das características mecânicas passará pela realização de ensaios de flexão em três e quatro pontos sob estruturas sanduíche, e ainda de compressão dos núcleos.

Também se pretende estudar a viabilidade da aplicação deste compósito em indústrias, tais como, a aeronáutica, aeroespacial, transporte naval (comercial e de mercadorias) e transporte terrestre, onde sejam requeridos materiais de baixo peso aliados a boa resistência mecânica e a absorção energética em impactos.

1.3 Calendarização e metodologia seguida no projeto

Com vista a cumprir os objetivos propostos, foram delineadas várias tarefas:

Tarefa 1 - Pesquisa bibliográfica

A primeira fase da dissertação incorre na consulta de bibliografia (sob a forma de artigos, revistas, livros e teses), com o intuito de perceber os conceitos e bases científicas, assim como os problemas encontrados na abordagem do trabalho. Esta pesquisa bibliográfica, conhecida como estado da arte, é determinante não só na qualidade da tese final, assim como leva ao aprofundamento de conhecimentos. Um dos grandes desafios desta tarefa é saber o que pode ser ou não útil no contexto da dissertação, pretendendo-se estruturar o relatório final.

Tarefa 2 – Otimização das dimensões e geometria dos favos

Devido à infinidade de combinações possíveis entre placas de cortiça e geometria e dimensões de favos, será feita uma otimização tendo por base 3 placas de cortiça com massa específica diferente, com recurso ao Abaqus CAE®.

Tarefa 3 - Desenvolvimento do punção de corte

Dada a inexistência de uma ferramenta de corte com as especificações necessárias destinada à furação do núcleo de cortiça, nesta tarefa será desenvolvido um punção na íntegra usando o SolidWorks® 2018.

Tarefa 4 - Preparação das peles

Nesta tarefa serão definidos os materiais a usar nas peles dos compósitos. As peles da sanduíche serão preparadas com recurso à técnica de infusão de resina de epóxido assistida a vácuo no laboratório de compósitos do INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial.

1.4 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 é feito um enquadramento teórico desta dissertação. A cortiça é analisada detalhadamente, desde as suas propriedades mecânicas aos aspetos ecológicos. São também, genericamente, abordadas as estruturas porosas, onde se enquadram estruturas porosas celulares e os *honeycombs*. Percebe-se que existem várias estruturas celulares para além da cortiça, que vão desde as criadas por processos de prototipagem rápida até às existentes em materiais como espumas. Estruturas em forma de favo de abelha ou *honeycomb*, como aqui se preferiu designar por uma questão de simplificação, foram também alvo de estudo, percebendo-se quais os tipos e configurações de *honeycomb* existentes. Neste capítulo definem-se estruturas em sanduíche e são dados alguns exemplos práticos, resultados e conclusões documentados na literatura.

No capítulo 3 é dado enfoque ao procedimento experimental, que vai desde a seleção do aglomerado, até à realização dos ensaios. A seleção do aglomerado assentou no dimensionamento dos favos e espessura de parede. É também detalhada a conceção dos compósitos e mencionados todos os passos inerentes, que vão desde o processo de fabrico dos laminados que constituem as peles, por infusão, até à ligação adesiva entre todos os elementos que formam a sanduíche, passando pela maquinagem do núcleo. No final do capítulo são descritos os ensaios realizados e as normas adotadas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios e a sua discussão. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões resultantes da análise dos resultados dos ensaios, e no 6º, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

2 Estado da arte

2.1 Cortiça

2.1.1 Características

A cortiça não é mais do que o parênquima suberoso originado pelo meristema súbero-felodérmico do sobreiro (*Quercus suber* L.), constituindo assim o revestimento do seu tronco e ramos. Este material é extraído do sobreiro com uma periodicidade legal de 9 anos. A exploração de cortiça apenas começa a ser rentável assim que os ramos atinjam 0,7 m de perímetro a 1,3 m do solo, o que acontece ao fim de 25 anos (Gil 1998a; Gil 1998b).

A cortiça é constituída por aproximadamente: 45 % de suberina (confere elasticidade e compressibilidade); 27 % de lenhina (função estrutural); 12 % de polissacarídeos (função estrutural); 6 % de ceroides (função impermeabilizadora); 6 % de taninos (função protetora e de conservação) e 4 % de cinzas (Gil 1998a; Pereira 1988). De acordo com Pereira, (1988), a localização geográfica do sobreiro condiciona a composição química da cortiça, como se pode ver na tabela 2 (Pereira 1988).

Tabela 2 – Composição química da cortiça virgem para diferentes localizações. Local 1: Herdade da Palma (Alcácer do Sal); Local 2: Herdade da Cardzana (Grândola); Local 3: Monte dos Olheiros (Mora); Local 4: Herdade de Gouveia (Montemor-o-Novo); adaptado de (Pereira 1988).

Componente	% massa seca			
	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
Cinza	0,65	0,72	0,91	0,53
Extrativos (total):	15,7	14,3	16,9	14,1
<i>Diclorometano</i>	7,0	7,9	7,9	6,3
<i>Etanol</i>	5,7	4,5	5,8	4,6
<i>Água</i>	3,0	1,9	3,1	3,2
Suberina	37,8	40,3	35,2	41,2
Lenhina insolúvel	20,1	20,6	21,0	19,5
Lenhina solúvel	1,6	1,4	1,4	1,2
Polissacarídeos	18,5	15,7	21,3	17,2

Do ponto de vista macroscópico, a cortiça é um material leve, elástico e praticamente impermeável a líquidos e gases, isolante térmico, elétrico, acústico e/ou vibratório, sendo também inócuo e com baixo nível de decomposição (Garret 1946; Gil 1998b). Ao analisar a estrutura macroscópica (figura 1), percebe-se que existem várias camadas que compõem a superfície do sobreiro, entre elas: o lenho, que é no fundo a madeira do sobreiro; o entrecasco, que separa a cortiça da raspa; a raspa situada na face exterior da cortiça; e a cortiça, que cresce entre estas duas últimas camadas (Gil 1998b).

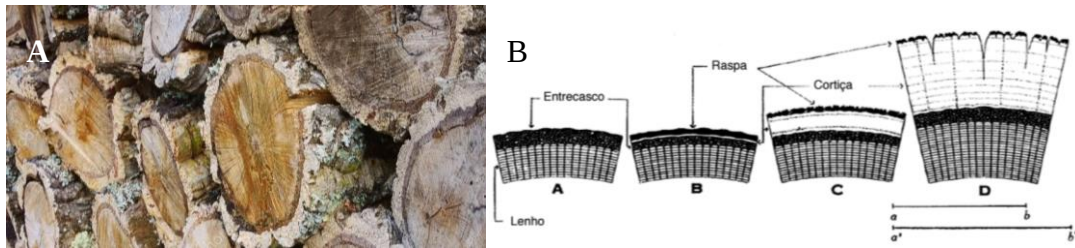


Figura 1 - Estrutura macroscópica da cortiça. A) troncos de sobreiro empilhados onde se podem distinguir as quatro camadas (Kassandra 2012); B) vista do tronco de sobreiro em corte transversal (Gil 1998b).

Microscopicamente, a cortiça é constituída por camadas de células de aspeto alveolar, cujas membranas celulares possuem um certo grau de impermeabilização e estão cheias de um gás, geralmente considerado semelhante ao ar e que ocupa cerca de 90 % do volume (Miranda, Gominho e Pereira 2013; Gil 1998a). Quando a cortiça é comprimida as suas células encurvam e dobram não lhe conferindo praticamente qualquer expansão lateral, havendo uma posterior recuperação devido à ação do gás comprimido no interior das células (Gil 1998a; Gil 1998b). Com recurso ao microscópio, é possível observar estruturas de aspeto semelhante ao representado na figura 2.

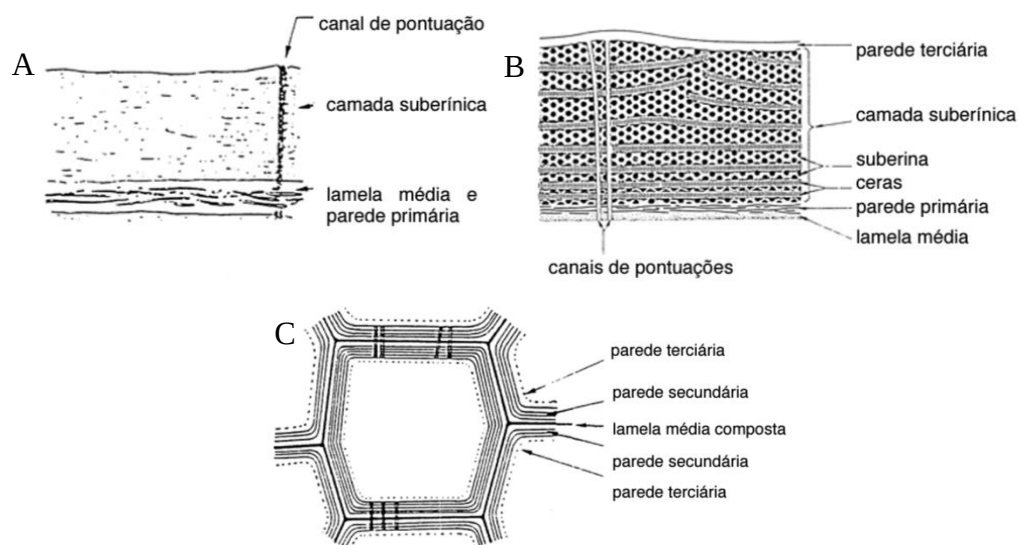


Figura 2 - Estrutura microscópica da cortiça. A) casca do sobreiro antes de a cortiça se desenvolver; B) cortiça e diferentes camadas e constituintes; C) célula de cortiça e vários componentes (Gil 1998a).

A microscopia eletrônica de varrimento (SEM) permite-nos observar com mais detalhe a estrutura de uma amostra de cortiça. Note-se que a estrutura celular da cortiça apresenta uma forma celular hexagonal semelhante à dos favos dos ninhos de abelha, o que se reflete na sua baixa massa específica (figura 2 C, figura 3 A-B). O diâmetro das células situa-se em média entre os 20 e os 30 μm . Com ampliações na ordem dos 30 μm , é possível também observar a presença de depósitos e fungos (figura 3 C), e estes representam um dos principais problemas da cortiça (Miranda, Gominho e Pereira 2013).

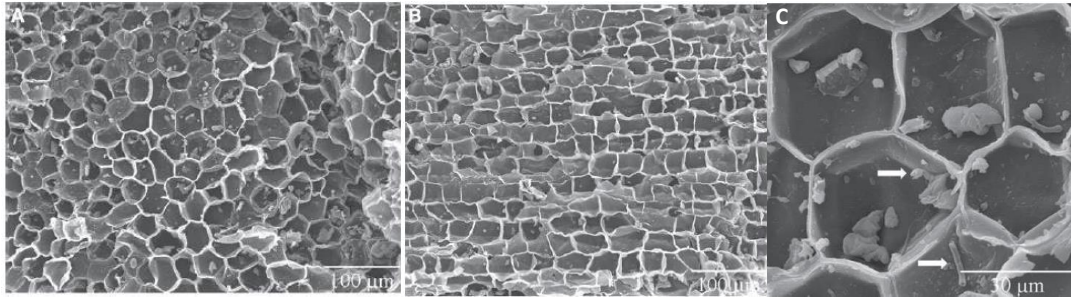


Figura 3 - Observação da cortiça através de microscopia eletrónica: A) direção tangencial; B) direção não tangencial; C) setas indicando a presença de fungos (Miranda, Gominho e Pereira 2013).

A cortiça é também um material que dissipa a energia de deformação. Possui uma massa específica média de cerca de 200 kg/m^3 , e uma baixa condutividade térmica. Possui ainda notáveis estabilidades química e biológica e uma boa resistência ao fogo (Gil 1998b). Quando sujeita a temperaturas superiores a 100°C , as quantidades de lenhina e polissacarídeos sofrem uma diminuição (Pinto-Correia e Mira Potes 2013). Aquecimentos na ordem dos 200°C levam à perda de polissacarídeos e de ceroides e ao aumento do volume em cerca de 10 %. Aquecimentos na ordem dos 300°C provocam um aumento de 70 % do volume e a perdas de massa de 30 %. Para estas temperaturas, a massa específica decresce cerca de 40 %. A mais de 500°C a cortiça é reduzida a cinzas (ver figura 4) (Pinto-Correia e Mira Potes 2013). A luz solar é um dos principais inimigos da cortiça, pelo que a incidência direta na mesma, pode descolorar a superfície (Gil 1998a). O tratamento superficial da cortiça através de cera, verniz ou revestimento com PVC, permite aumentar a durabilidade do material e as suas propriedades (Gil 1998a).

Desde uma simples rolha à indústria aeronáutica, são várias as áreas onde a cortiça pode ser aplicada. Sendo um retardante de fogo natural é aplicada em revestimentos de moldes de baterias, veículos, aeronaves, mísseis e submarinos (Gil 2009). Também é usada em ladrilhos de aglomerado de cortiça, cortiça com elastómero ou cortiça com PVC, *rubbercork*, pavimentos flutuantes com cortiça na camada superior e/ou inferior (Gil 1998a). Na indústria de calçado aumenta o conforto e confere isolamento térmico (Gil 2009). Aplica-se também em tubos, folhas de anti-vibração de máquinas e em tanques de armazenamento. As suas características de bio-absorvente também permitem a sua aplicação no tratamento de águas (Silva et al. 2005).

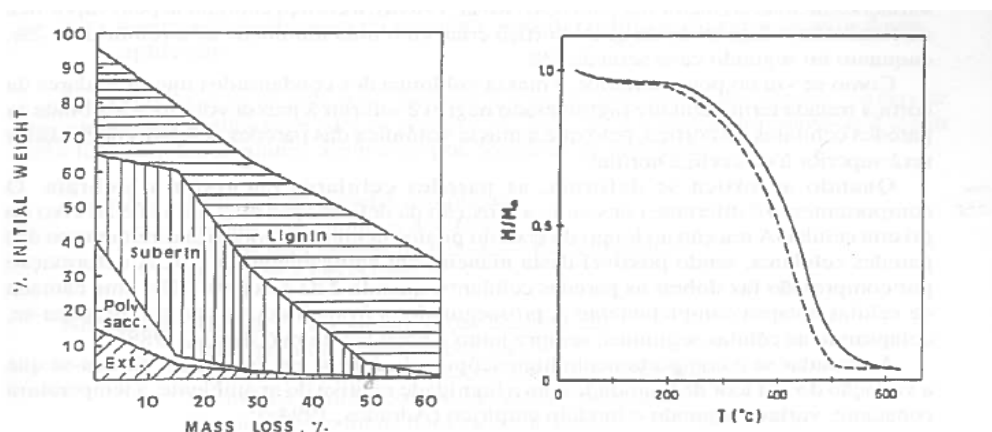


Figura 4 - Degradação dos constituintes químicos da cortiça com o aumento da temperatura (Pinto-Correia e Mira Potes 2013).

2.1.2 Transformação Industrial: Granulados e aglomerados

A indústria corticeira envolve uma sucessão de processos mecânicos e químicos que a tornam ideal para determinadas aplicações (Gil 1998b). Na figura 5 apresenta-se o esquema dos vários caminhos percorridos pelas pranchas de cortiça até à obtenção do produto final.

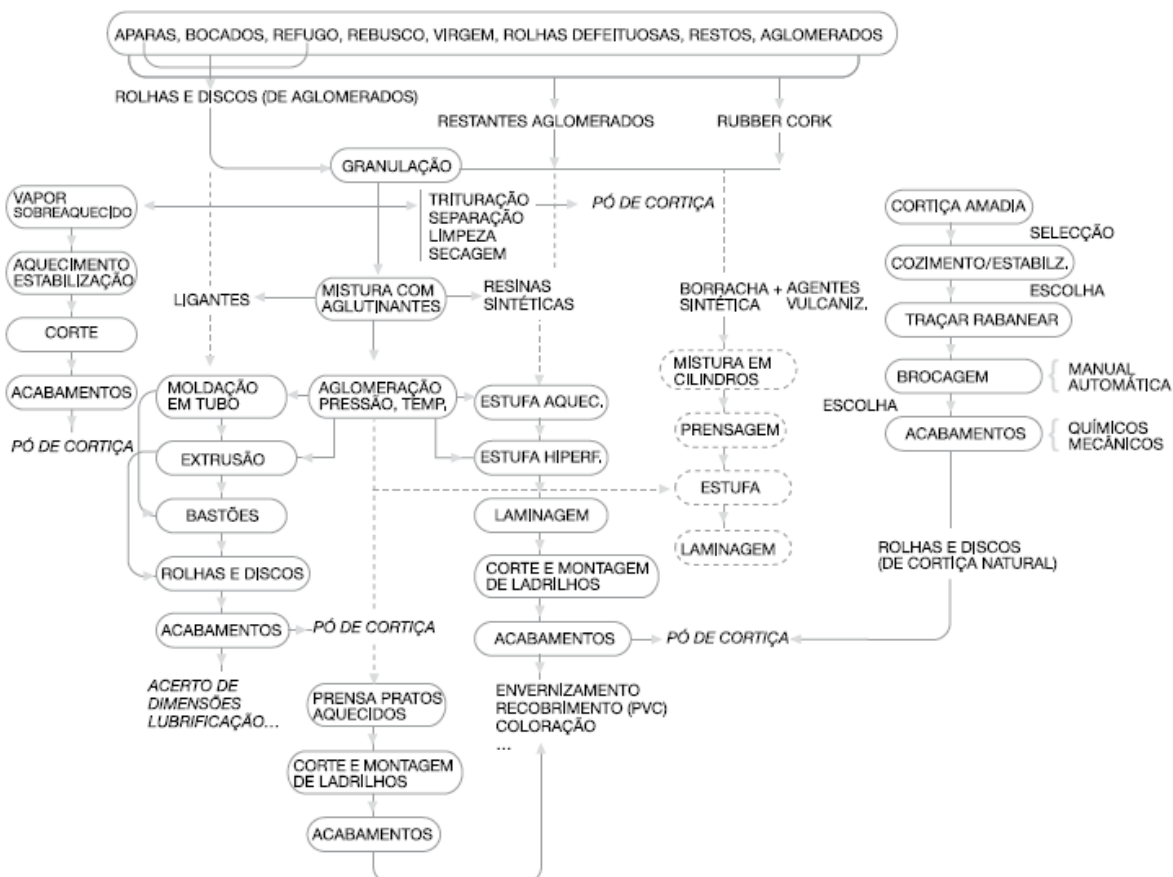


Figura 5 – Transformação da cortiça (Gil 1998a).

A cortiça é maioritariamente usada sob a forma de aglomerados e, por esse motivo, é necessário obter grânulos através de moagem. Os grânulos passam por um processo de secagem com circulação de ar quente forçado para depois serem utilizados (Gil 1998a). Algumas das aplicações dos granulados em construção civil podem ser argamassas mais leves, ladrilhos de cortiça ou produção de aglomerados para os mais diversos fins (Gil 1998a; Crouvisier-Urien et al. 2018).

Relativamente aos aglomerados, existem vários tipos disponíveis no mercado, nomeadamente: os puros de cortiça, os compostos e os de cortiça expandida ou negra. Quer o aglomerado puro, quer o aglomerado composto usam resinas (termoendurecíveis¹ ou de origem vegetal) como agente de aglutinação dos grânulos em ação conjunta com a pressão e com a temperatura (Gil 1998b). O aglomerado composto, trata-se de um material produzido através da aglutinação dos grânulos de cortiça e outros materiais, geralmente polímeros, como por exemplo: borrachas do tipo nitrílico (co-polímero do butadieno e acrilonitrilo - NBR) e do tipo neopreno, poliácido L-láctico (PLLA), poli-hidroxibutirato-co-hidroxivalerato (PHBV), poli-e-capro lactona (PCL), poli-e-caprolactona/amido (SPCL) e polipropileno (PP), entre outros (Fernandes et al. 2015; da Silva, Lima e Oliveira 2016; Gil 1998b). Outra forma muito corrente do uso da cortiça é sob a forma de aglomerado expandido ou aglomerado negro. Este usa a resina natural da cortiça que quando exposta a alta temperatura confere ligação entre os grânulos. (Gil 1998b). Mediante as aplicações, sejam elas isolamento térmico, acústico ou vibratório, o tipo de aglomerado apresenta granulometrias distintas que se identificam essencialmente pela massa específica (Tabela 3) (Gil 1998b). Quando a cortiça é aplicada para fins de isolamento térmico de um dado sistema, existem espessuras calibradas para determinadas temperaturas. Rolhas, discos e revestimentos são exemplos de aglomerados (Gil 1998b).



Figura 6 – Fabrico de rolhas através de aglomerado de cortiça (Gil 2009).

As aparas e produtos defeituosos são reutilizados. Primeiro trituram-se e de seguida podem ser submetidos a vapor sobreaquecido, originando os aglomerados de cortiça expandida (Gil 1998b). Podem também ser misturados com ligantes e/ou borrachas, que depois de submetidos

¹ Resinas de poliuretano, resinas fenólicas, resinas cardólicas, resinas de ureia-formaldeído e resinas melamínicas

a condições de pressão e temperatura constantes, dão origem a aglomerados. Estes são então extrudidos ou moldados (Gil 1998b).

Tabela 3 - Valores médios para as características da aglomerados de cortiça disponíveis, adaptado de (Gil 1998b).

Característica	Valor médio
Massa específica	180 kg m ⁻³
Módulo de Young (compressão)	13 MPa
Módulo de Young (tração)	18 MPa
Coeficiente de Poisson	0,18
Coeficiente de dissipação de energia	0,2
Coeficiente de fricção	0,3
Calor específico (P constante)	350 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Coeficiente de difusão de água (20 °C)	4×10 ⁻¹⁰ m ² ·s ⁻¹
Difusividade térmica	10 ⁻⁶ m ² /s
Condutividade térmica	0,045 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Tensão de rotura (tração)	1,9 MPa
Comportamento à flexão	≥ 130 kPa (EN 12089 método B)

2.1.3 Aspetos ecológicos relacionados com os produtos de cortiça

Na produção de aglomerado expandido de cortiça, apenas é utilizada cortiça triturada e vapor de água sobreaquecido não havendo quaisquer outros produtos adicionados. Está é uma das grandes vantagens da cortiça quando comparada com os seus concorrentes sintéticos para os mesmos fins (Gil 1998a; Sargianis, Kim e Suhr 2012). Para além disso, o aglomerado de cortiça expandida apresenta uma durabilidade considerável não sofrendo alterações nas suas propriedades durante décadas, o que permite a sua reutilização. No caso de placas que se encontrem quebradas ou contaminadas é conveniente triturá-las por forma a obter regranulados que podem ser aplicados em isolamento térmico (Gil 1998a; Gil 1998b).

Já a cortiça pura, caso não tenha contaminantes, pode ser triturada e usada em produtos técnicos. A reciclagem e reutilização de cortiça dá-se, não só em empresas ligadas ao seu processamento, assim como em empresas ligadas à construção civil. O pó gerado no processamento de produtos em cortiça pode também ser aproveitado para produção de energia e/ou vapor nas próprias fábricas (Gil 1998b).

Pode então dizer-se que não existem resíduos industriais na produção de derivados da cortiça que não sejam reaproveitados ou valorizados. A exploração dos sobreiros aumenta a sua produção de cortiça entre 250 e 400 %. A utilização de cortiça promove não só a produtividade, mas também a absorção de a CO₂ (Gil 1998a). “Sabendo que o teor médio de carbono da cortiça é de 57,37 % (Gil 2005), as 36000 toneladas de cortiça correspondem a 20653 toneladas de carbono/ano a que correspondem 75673 toneladas de CO₂/ano sequestrado CO₂/C = 3,664 (...) considerando uma quilometragem média anual de um veículo automóvel de 17500 km e a

produção média de 170 g de CO₂/km, sabemos que num ano esse veículo produz 2,98 toneladas de CO₂. Assim, facilmente chegamos a que as 75673 toneladas CO₂/ano sequestradas pelos produtos de cortiça para a construção civil correspondem à poluição gerada por cerca de 25394 veículos por ano.” (Gil 1998a)

2.2 Estruturas celulares

Como foi referido no ponto 2.1.1, a cortiça é constituída por células com forma aproximadamente hexagonal. Pretende-se agora abordar, de uma forma geral, os vários tipos de estruturas celulares, sejam elas porosas, isto é, com elevado número de células adjacentes com maior ou menor ordenação, ou estruturas com células individuais (geralmente, com arranjo regular) que atravessam a espessura da estrutura - i.e., estruturas com furação.

2.2.1 Estruturas celulares porosas

Podem apresentar diversas formas e nesta secção, fez-se uma abordagem a modelos estruturais de células criadas por técnicas de prototipagem rápida e, também, a exemplos de células presentes em espumas poliméricas e espumas metálicas.

Estruturas criadas por técnicas de prototipagem rápida

As técnicas de prototipagem rápida ou *additive manufacturing* permitem desenvolver estruturas porosas particularmente interessantes para o ramo da bioengenharia, mais concretamente no setor das próteses, uma vez que a microestrutura porosa permite a biocompatibilidade destes materiais (Hedayati et al. 2016c).

Estudos realizados por Hedayati et al. (2016a, 2016b, 2016c, 2017) procuraram relacionar, para cada tipo de célula, a densidade relativa² com o: módulo de Young normalizado, o coeficiente de Poisson e a tensão de cedência normalizada (Hedayati et al. 2016c, 2017, 2016a, 2016b). Foram criados modelos 3D (figura 7), por impressão a laser, e submetidos a ensaios de tração. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados previstos por simulação numérica pelos métodos de Bernoulli-Euler e Timoshenko (Hedayati et al. 2017, 2016a, 2016b, 2016c). Os autores concluíram que para uma densidade relativa acima de 10 %, o modelo de Euler Bernoulli se desvia largamente dos resultados experimentais de tensão limite elástico normalizada e coeficiente de Poisson. É, por isso, a teoria de Timoshenko que melhor aproxima resultados teóricos e experimentais (Hedayati et al. 2016a). Na tentativa de encontrar o efeito dos parâmetros micro-geométricos no módulo elástico, observou-se que as propriedades mecânicas de uma estrutura com uma morfologia particular, dependem apenas do valor de densidade aparente. Notou-se que as morfologias cubo, Weaire-Phelan e Kelvin resultaram em módulos elásticos mais elevados, enquanto a microestrutura diamantada produziu o menor módulo de elasticidade (Hedayati et al. 2016a).

² Razão entre a massa específica aparente da estrutura e a massa específica do material que a compõe.

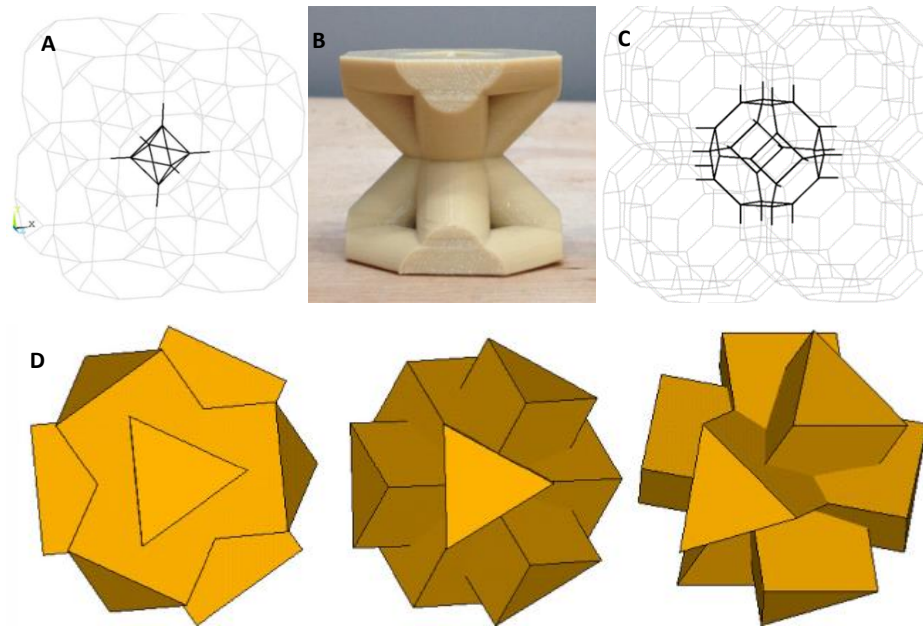


Figura 7 – A) Célula cúbica; B) Exemplo de peças com células octaédricas obtidas por impressão 3D a laser; C) Exemplo de célula co octaédrica; D) Outros tipos de estruturas complexas (Hedayati et al. 2016c, 2017, 2016a, 2016b).

Espumas poliméricas

As espumas poliméricas são materiais, que devido à sua estrutura celular, apresentam baixa massa específica. Podem ser flexíveis (poliuretano (PU) e latex) ou rígidas (PU, poliestireno extrudido (XPS), polimetacrilamida, poli-(cloreto de vinilo) (PVC) (Arteiro et al. 2013). O PU (figura 8 A) e o XPS têm sobretudo funções de isolamento e por isso são largamente usados na construção civil (Huo et al. 2018).

Numa experiência levada a cabo por Shuping Huol, et. al (2018), sintetizaram-se polióis autocatalíticos baseados em cardanol (SCAPs) que se aplicaram em duas espumas de PU. A estrutura única e a maior reatividade dos polióis autocatalíticos conferiram às espumas estabilidade térmica e alta resistência à compressão. A espuma 1, com maior concentração de grupos reativos, apresentava maior massa específica ($\rho = 122 \text{ kg/m}^3$) e uma maior resistência à compressão, como se pode verificar na figura 8 B (Huo et al. 2018).

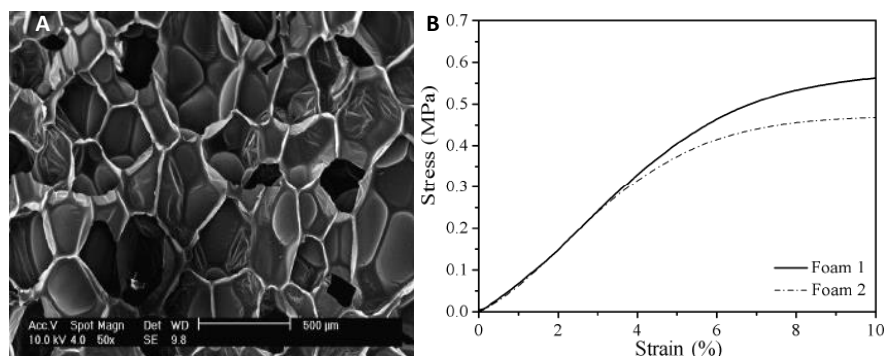


Figura 8 – A) Morfologia de uma espuma PU analisada por SEM (17); B) Curva tensão-deformação de duas espumas de PU de diferente massa específica (espuma 1, $\rho = 122 \text{ kg/m}^3$; espuma 2, $\rho = 116 \text{ kg/m}^3$) (Huo et al. 2018).

Espumas metálicas

A aplicação de espumas metálicas em estruturas ultraleves e em especial no setor dos transportes tem vindo a aumentar (Duarte et al. 2005). A fundição, a fundição por cera perdida, a fundição sobre grânulos solúveis, a deposição metálica e a pulverotecnologia são alguns exemplos dos processos, que permitem a obtenção de espumas metálicas com recurso a ligas de cobre, zinco, alumínio e outras (Davies e Zhen 1983).

As espumas de alumínio (figura 9), sobretudo as de poros fechados, são as mais usadas (Duarte et al. 2005). Um dos métodos usados no seu fabrico é a pulverotecnologia, onde inicialmente é feita a compactação a quente de uma mistura de pós metálicos com um agente expensor, que resulta num material semi-denso. Segue-se a fase de aquecimento da mistura da qual resultam os poros (Duarte 2005).

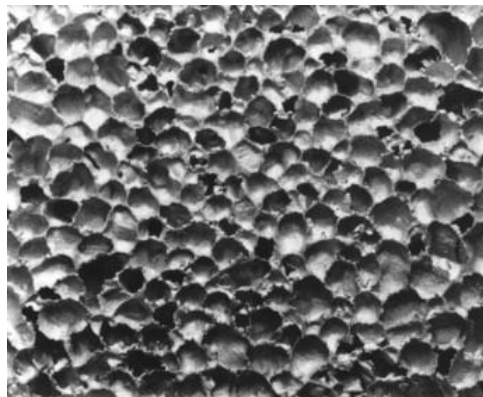


Figura 9 - Espuma de alumínio (dimensão da foto 60 x 50 mm) (Baumeister, Banhart e Weber 1997).

J. Baumeister et al. (1997), debruçaram-se sobre o estudo das propriedades mecânicas de várias espumas de alumínio, realizando ensaios de flexão, tração e impacto (Baumeister, Banhart e Weber 1997). Concluíram que é possível usar espumas integrais ou materiais compósitos com núcleo de espuma de alumínio para melhorar a absorção de energia. Um bom exemplo da aplicação deste tipo de material é a indústria automóvel, nomeadamente na proteção contra os impactos frontal e lateral. O tipo de liga e, possivelmente, também a condição de tratamento térmico, podem influenciar o modo de falha (quebradiço/dúctil) e também a resistência à compressão (Baumeister, Banhart e Weber 1997).

Para o desenvolvimento de absorsores de energia altamente eficientes, as espumas de alumínio representam uma importante base tecnológica com potenciais aplicações na indústria de transportes, ferroviário e aeronáutico, podendo integrar paredes corta fogo, painéis do piso e do teto, amortecedores de absorção de energia, barras de impacto lateral de portas, e componentes de estrutura espacial, entre outros (Duarte 2005; Baumeister, Banhart e Weber 1997; Duarte et al. 2005).

2.2.2 Estruturas *Honeycomb*

As estruturas do tipo favo de abelha ou *honeycomb* hexagonal, estão presentes na composição celular de muitos materiais existentes na natureza (Wu et al. 2017). No entanto, para ir ao encontro das diferentes necessidades práticas, desenvolveram-se outras formas de estrutura

honeycomb (ver figura 10), sendo as mais comuns as triangulares, as quadradas, as hexagonais e as auxéticas. As auxéticas ou formas reentrantes, têm a particularidade de possuírem um coeficiente de Poisson negativo (Hou et al. 2014). O desempenho das estruturas depende, não só da forma, mas também do material que as constitui, e quanto à dimensão do favo podem classificar-se em nano, micro ou macro (Zhang et al. 2015).

Os *honeycomb* permitem diminuir a densidade aparente do material, absorver energia e resistir ao impacto (Zhang et al. 2019; Wu et al. 2017). Os favos podem ainda ser preenchidos com espumas poliméricas, o que aumenta a tensão de cedência, a energia absorvida, assim como a resistência ao impacto (Zhang et al. 2019).

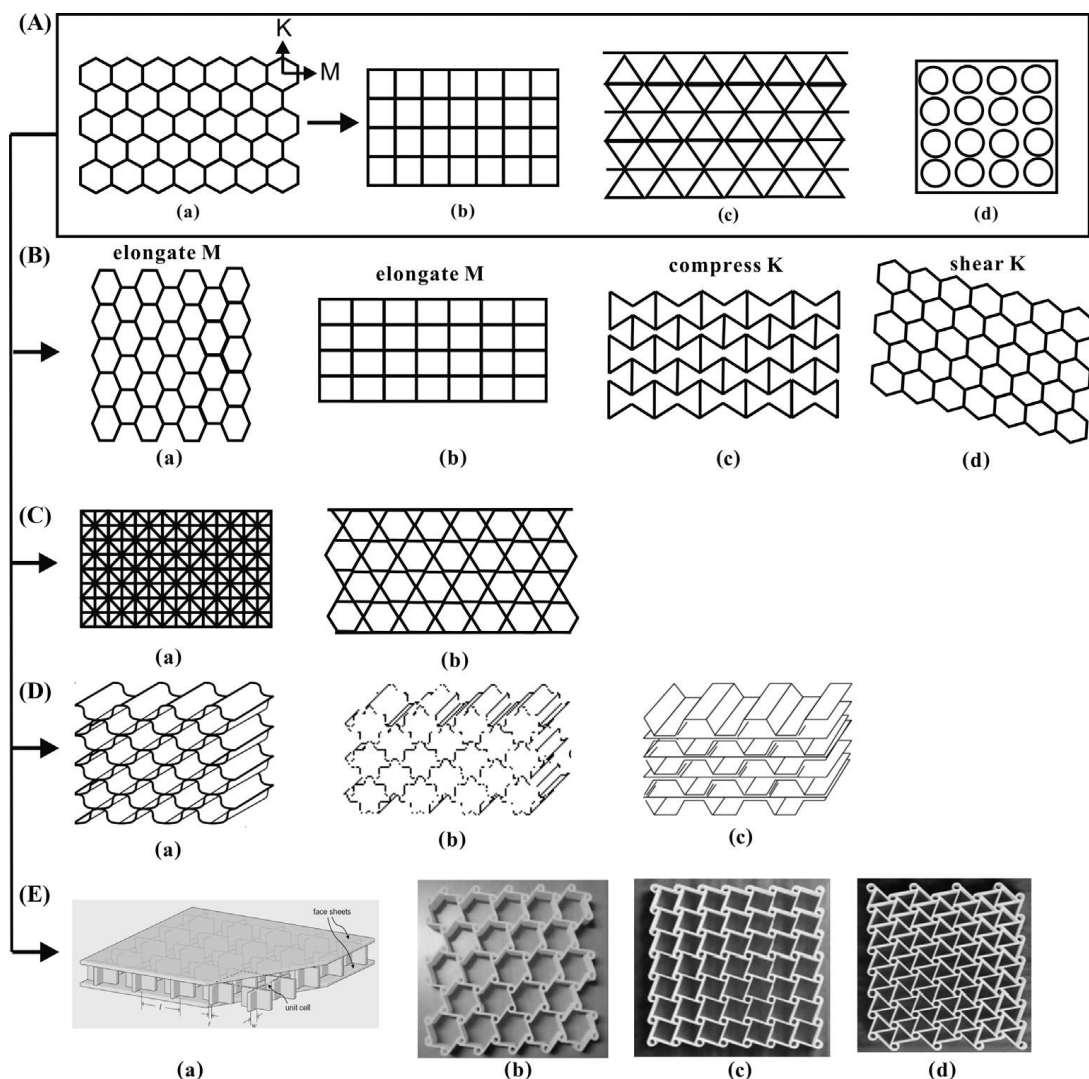


Figura 10 - Exemplos de estruturas *honeycomb* produzidas (Zhang et al. 2015).

Micro e nano *honeycomb*

Este tipo de estrutura com favos na ordem dos micrómetro e nanómetros, apresenta também grande aplicação em transferência de calor. Pode servir de isolante em coletores solares ou no caso de dissipadores de calor, esta forma permite uma eficiente dissipação por convecção forçada (Zhang et al. 2015).

Na indústria aeroespacial, a estrutura *honeycomb* aplicada na camuflagem dos aviões, permite reduzir a transferência de calor que se dá grandemente sob a forma de radiação (Zhang et al.

2015). Uma vez que as propriedades mecânicas se mostram dependentes do tamanho do favo, o comportamento de micro e nano estruturas é diferente. A eficiência do isolamento acústico relaciona o tamanho do favo do material isolante com os comprimentos de onda do som produzido (Zhang et al. 2015).

Como exemplos de materiais com micro *honeycomb* podem salientar-se os seguintes: i) a madeira de balsa que apresenta uma microestrutura hexagonal - esta forma permite-lhe uma elevada capacidade de absorver energia na sua deformação (Zhang et al. 2015); ii) a alumina porosa anódica, apresenta também ela naturalmente uma estrutura porosa tipo *honeycomb* - o mesmo acontece com a sílica nano-porosa e com o carvão ativado em forma, estruturas estas chamadas de *nano-honeycombs* (Zhang et al. 2015); iii) a sílica com meso-poros apresenta rigidez considerável e estabilidade estrutural sob esforços aplicados - essa estabilidade pode ser caracterizada pelo seu módulo de elasticidade. A fim de tornar esta estrutura mais rígida, a hidro sensibilidade termal das superfícies dos poros deve ser eliminada, formando Si-O-Si a partir de Si-OH (Zhang et al. 2015). A Tabela 4 apresenta alguns exemplos destes materiais e os testes a que foram sujeitos até à rotura.

Tabela 4 - Comportamento mecânico/ modo de rotura de determinados materiais com micro e nano *honeycomb* sujeitos a vários testes (Zhang et al. 2015).

Materials	Pore size	Loading methods	Failure mode
Balsa wood	30–70 μm	Compression	Buckling and kink band formation
Balsa wood	30–70 μm	Shear	Cracks
Balsa wood	30–70 μm	Modified Kolsky bar	Buckling and kink band formation
–	–	Bending and shear	–
Anodic porous alumina	31 nm	Tensile test in Nano-UTM and flexural testing in AFM	Elastic modulus
Anodic porous alumina	25–35 nm	Tensile and bending test	Elastic modulus
Anodic porous alumina	70 nm	Compression	Severe layer distortion at the pillar's head
Anodic porous alumina	70 nm, 20–80 nm	Nanoindentation	Bilinear and median cracks
Anodic porous alumina	25–35 nm	Bending fatigue	Rectangular fracture shape
Micelle-templated silicates	35 nm, 80 nm	Compression	Brittle crushing
Nano-structured glass fibers	3 nm	Simulated nanoindentation	–
Mesoporous silica	5 nm	Unilateral external pressure	Destroy
Mesoporous silica	–	Nanoindentation	Elastic modulus, hardness

Macro Honeycomb

Macro honeycomb, tal como próprio nome indica, representa o conjunto de estruturas com células ou favos facilmente distinguíveis a olho nu. Existem no mercado vários tipos de soluções *honeycomb* para fins estruturais.

Começando pelos termoplásticos, a Plascore® fornece atualmente *honeycombs* em policarbonato (PC) e baseados em polipropileno (PP) (ANEXO A). Estes polímeros, quando comparados com *honeycomb* em alumínio, têm propriedades mecânicas muito inferiores. Todavia, são bastante usados dado o seu baixo preço. O PC confere isolamento elétrico e térmico, é resistente ao fogo, à corrosão e a fungos. O *honeycomb* pode ser fundido e colado às peles, podendo o material ser fornecido em várias cores. Para células de diâmetro externo 3,18 mm, a tensão limite à compressão é de cerca de 1,90 MPa e a tensão de corte máxima é de 0,89 MPa (ASTM C273). A massa específica pode variar entre 80 e 320 Kg/m³. O *honeycomb* de PC (figura 11 A) pode ser utilizado em túneis de vento, grades, núcleos de sanduíche, redomas, antenas, claraboias, estruturas de absorção de energia e blindagem EMI/RFI (ANEXO A). Já de PP (figura 11 B) apresenta uma elevada rigidez específica e a massa específica situa-se entre os 35 e os 320 kg/m³. É resistente à corrosão, a fungos, à decomposição, a agentes químicos e humidade. É absorvedor de energia e permite o amortecimento acústico e vibratório. É reciclável e termo-formável a temperaturas superiores a 82 °C. Pode ser utilizado como núcleo de estruturas sanduíche (ANEXO A).

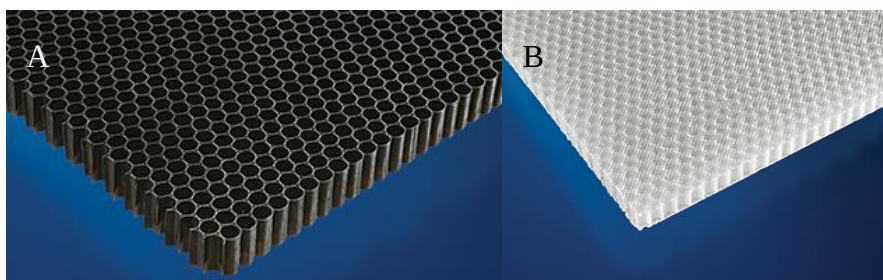


Figura 11 – *Honeycomb* em PC (A) e PP (B) (ANEXO A).

A Plascore® oferece também outras soluções de *honeycomb* como os constituídos por papel de fibra de aramida (figura 12 A) impregnada com resina fenólica, e alumínio (ANEXO A). As aplicações do produto de fibra de aramida da Plascore®, comercialmente conhecido por PN1, incluem cascos de embarcações, carenagens de carros de corrida, painéis de comboios, painéis de navios, estruturas de transporte terrestre, abrigos militares, antenas de solo e painéis para fins especiais. A massa específica deste material pode situar-se entre 32 e os 96 kg/m³ (ANEXO A).

A Plascore® dispõe também de *honeycomb* destinado à indústria aeroespacial sob a designação PN2, com propriedades semelhantes ao PN1, mas com maior resistência ao fogo e com autoextinção. A massa específica pode situar-se entre os 29 e os 144 kg/m³. A tensão máxima admissível à compressão é cerca de 14 MPa e a tensão de corte máxima segundo a direção L³ ronda os 3 MPa (ANEXO A). O papel de fibra de aramida produzido pela Dupont™ sob marca registada Nomex™, é uma meta-aramida impregnada com resina fenólica que apresenta alta resistência ao fogo e com excelentes propriedades dielétricas (ANEXO A). Este material tem alta tenacidade e um excelente desempenho de deformação e fadiga, com massas específicas entre 32 e 96 kg/m³. É compatível com a maioria dos adesivos usados em compósitos sanduíche e as tensões máximas de corte típicas podem variar entre 0,41 e 2,37 MPa, segundo a direção L (ANEXO A). As tensões de compressão máxima podem chegar a 6,1 MPa.

³ Orientada segundo a direção axial das células (Venkataraman et al. 2003).

A Plascore® comercializa também estruturas de papel de fibra de para-aramida, PK2, semelhante ao Kevlar® (figura 12 B) com massa específica igual à do PN1, mas com tensões de corte máximas admissíveis, segundo a direção L, superiores a 3,8 MPa (ANEXO A).

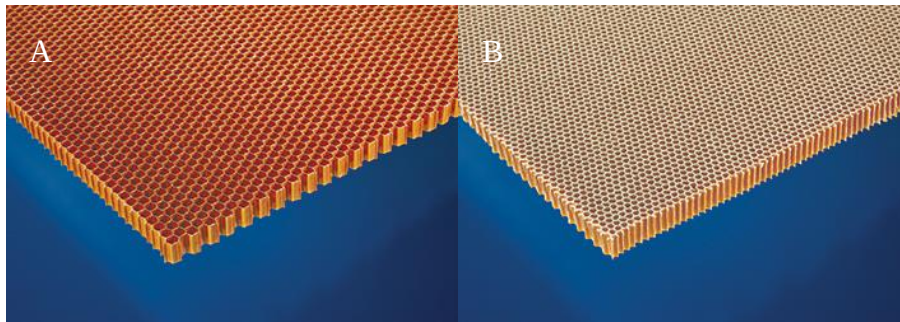


Figura 12 – A) *Honeycomb* em fibra de aramida PN1 e PN2; B) *honeycomb* de fibra de para-aramida PK2 (ANEXO A).

Um estudo do comportamento de uma sanduíche com núcleo em acrilonitrilo-butadieno estireno (ABS) foi levado a cabo por Goodarzi Hosseinabadi et al. (2017). Foram feitos ensaios de impacto e compressão, à semelhança do que acontece em caso de acidentes (Duan et al. 2018). Para melhor caracterizar o núcleo *honeycomb* de ABS, fizeram-se ensaios segundo uma direção tangencial e uma direção perpendicular aos favos (Duan et al. 2018). Na compressão normal à superfície dos favos, foram obtidas tensões de rotura na ordem dos 50 MPa, caso seja usado o FDM (Fused Deposition Modeling) (Hosseinabadi et al. 2017).

S. Duan et al. (2018) estudaram o comportamento à compressão de favos com formas quadrangulares e hexagonais criados por impressão 3D (Duan et al. 2018). Foi usado umacrílico, o *Vero White Plus*, para a impressora 350 Connex 3D (Stratasys Ltd.,USA) (Duan et al. 2018). Para cada uma das geometrias foram feitas 3 amostras e fez-se variar o raio de contacto das paredes (fator geométrico), tornando assim a transição mais suave. O aspeto das amostras ao longo do ensaio de compressão está presente na figura 13. Concluiu-se que as amostras de *honeycomb* com favo hexagonal se deformaram mais plasticamente, isto é, absorveram mais energia até à rotura, ainda que com tensões máximas semelhantes à dos favos quadrangulares (Duan et al. 2018).

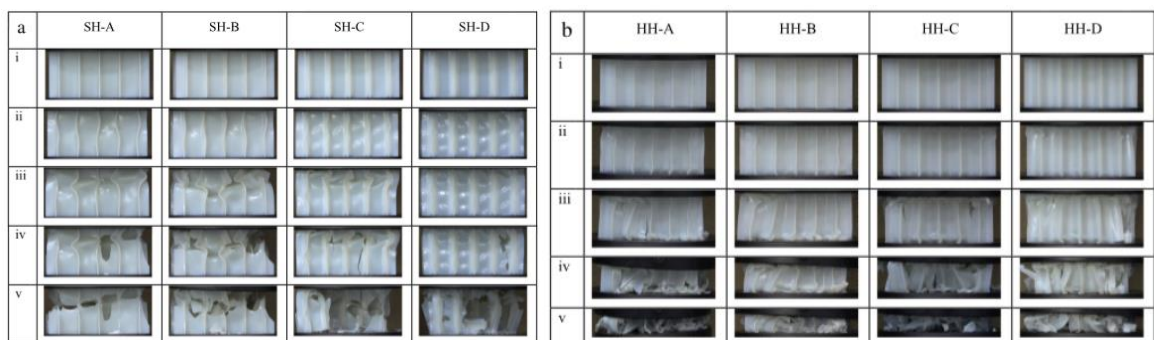


Figura 13 – Evolução da compressão das várias amostras (Duan et al. 2018).

Honeycomb como núcleo em estruturas sanduíche

Os materiais compósitos em sanduíche têm vindo desempenhar funções estruturais de relevante importância. Quando se usam estruturas *honeycomb* como núcleo em sanduíches, podem-se obter materiais interessantes no que toca a absorção de energia e massa específica relativamente baixa (Sargianis, Kim e Suhr 2012). Na indústria automóvel, aeronáutica, aeroespacial, naval e de energia renováveis, o interesse no uso de compósitos em sanduíche com núcleos *honeycomb* tem sido crescente devido à sua ótima relação de peso e resistência (Tabela 5) (Sargianis, Kim e Suhr 2012; Zhang et al. 2019; Zhang et al. 2015).

Tabela 5 - Exemplos de *honeycomb* como núcleos de sanduíches e respetivas aplicações (Zhang et al. 2015).

Material do Núcleo	Aplicação
Aluminium F/A-18	aeronaves
Nomex™ H/C	aeronaves e veículos
Composito de Carbono/epóxico	aeronaves leves
Polipropileno (PP)	veículos
Laminado de Carbono/epóxico	perfis alares

Os compósitos em sanduíche funcionam tal como uma viga em “I”, onde as peles são o equivalente às abas da viga, e o núcleo comporta-se como a alma da mesma. À flexão, as peles suportam esforços de compressão e tração, enquanto o núcleo aumenta o momento de inércia do conjunto e está sujeito a esforços de corte (figura 14), desempenhando um papel importante não só no comportamento estático como no dinâmico (Arteiro et al. 2013). A rotura dá-se geralmente no núcleo pois as peles destas estruturas são mais resistentes (Saha, Kabir e Jeelani 2008). As estruturas *honeycomb* referidas anteriormente, como o caso do polipropileno, da fibra de aramida revestida com resina fenólica e o alumínio, são normalmente usadas como núcleo de um compósito em sanduíche. Na forma mais simples, esta combinação é composta por um núcleo e duas peles que são coladas nas faces do núcleo através de uma resina. Estas peles contribuem para um compósito com características mecânicas superiores e maior estabilidade. Podem também funcionar como protetor térmico e químico do núcleo. Existem vários materiais que podem compor estas peles, sendo comum recorrer a chapas de alumínio, e compósitos de fibra de vidro ou carbono (Sargianis, Kim e Suhr 2012; Sánchez-Sáez, Barbero e Cirne 2011; Bonanno et al. 2018)

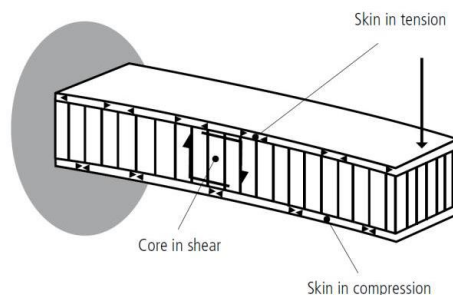


Figura 14 - Comportamento de uma sanduíche à flexão (Arteiro e Reis 2011).

Ao submeter uma sanduíche a vários tipos de esforços, pode dar-se rotura da mesma de várias formas, tais como:

- falha prematura do núcleo devido a tensões de corte (figura 15 A);

- falta de resistência das peles e do núcleo quando sujeitas a uma carga local (figura 15 B);
- encurvadura devido a espessura do núcleo e a tensão de corte admissíveis baixas (figura 15 C);
- a resistência à compressão do núcleo e das peles deve ser tal de modo a evitar enrugamento das peles (figura 15 D);
- enrugamento das peles devido a peles com espessura demasiado baixa em relação ao núcleo (figura 15 E);
- enrugamento das peles devido à sua baixa espessura em relação ao tamanho das células (figura 15 F);
- esmagamento local que ocorre quando a resistência à compressão do material do núcleo é demasiado baixa (figura 15 G) (Arteiro e Reis 2011).

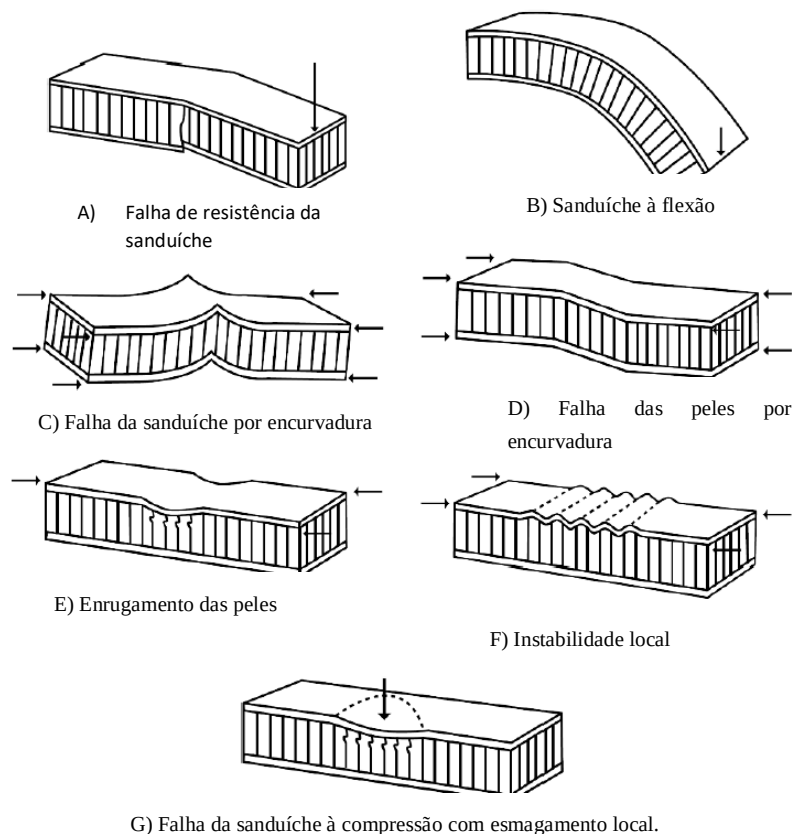


Figura 15 - Modos de rotura de um composto em sanduíche (Arteiro e Reis 2011).

Bonanno et al. (2018), implementaram uma estrutura *honeycomb* de alumínio (figura 16) como constituinte do tejadilho de uma cabine de uma máquina de movimentação de terra (Bonanno et al. 2018). Neste estudo foram realizados dois ensaios de impacto: um de indentação cilíndrica para 5 velocidades diferentes e outro de indentação esférica (queda do corpo a 3,1 m de altura), ambos segundo a ISO 3499. Como conclusão, os autores referem que o *honeycomb* em alumínio é um excelente candidato no que toca a construção de maquinaria pesada, uma vez que se consegue uma excelente absorção de energia aliada a uma baixa massa específica. Este tipo de sanduíche pode ser desenhado de acordo com as necessidades da aplicação recorrendo a peles e geometrias de núcleo diferentes (Bonanno et al. 2018).

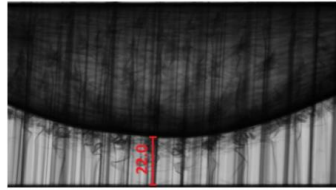


Figura 16 – Aspetto da estrutura após o ensaio de corpo livre – imagem capturada por raio X (Bonanno et al. 2018).

Num outro estudo, M. Giglio, et al. (2012) desenvolveram sanduíches compostas por peles de alumínio Al 2024 – T3 e núcleo *honeycomb* em compósito de fibra de aramida NomexTM, com uma massa específica de cerca 91,5 kg/m³ (Giglio, Gilioli e Manes 2012). Os autores realizaram ensaios de flexão em 3 pontos segundo a norma ASTM C393 (com distância de 150 mm entre suportes) que depois compararam com os resultados obtidos por simulação numérica. A força máxima atingida pelos provetes alcançou em média cerca de 0,4 kN (Giglio, Gilioli e Manes 2012).

Observando as figuras 17 e 18, as sanduíches com peles em compósito de polímero reforçado com fibra de carbono (ou CFRP do inglês *carbon fiber-reinforced polymer*) aliam a baixa massa específica a tensões máximas de corte e tensões máximas de compressão equiparáveis a certos metais (Moongkhamklang, Deshpande e Wadley 2010).

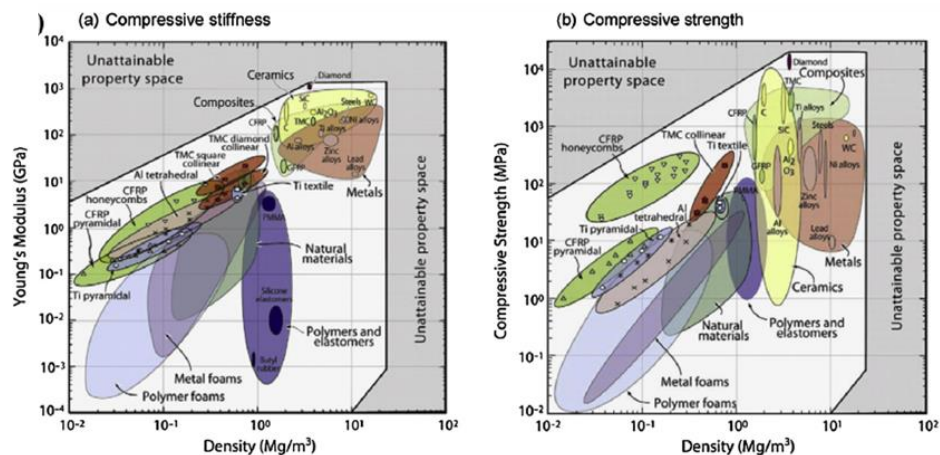


Figura 17 - Grupos de materiais e respetivo módulo de elasticidade e resistência à compressão por massa específica (Moongkhamklang, Deshpande e Wadley 2010).

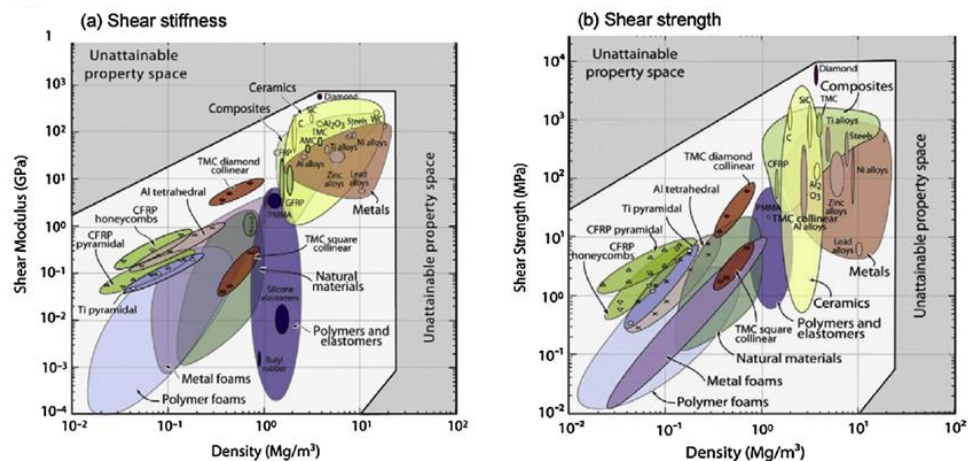


Figura 18 - Grupos de materiais e respetivos módulo de resistência ao corte massa específica (Moongkhamklang, Deshpande e Wadley 2010).

A implementação da cortiça como núcleo em sanduíches tem vindo a ser estudada e trata-se de uma combinação interessante quando se pretende um material capaz de sofrer impactos a baixas velocidades devido à sua flexibilidade, compressibilidade e visco plasticidade (Arteiro et al. 2013; Sargianis, Kim e Suhr 2012). Quando se usam estruturas de cortiça como núcleo em sanduíches, podem-se obter materiais interessantes no que toca a absorção de energia sob a forma de vibrações, isolamento térmico e massa específica relativamente baixa (Sargianis, Kim e Suhr 2012; Gil 2009). Aliando a baixa massa específica da cortiça e a sua transformação num *honeycomb*, é possível obter um compósito ainda mais leve, sendo que as propriedades dum modelo deste tipo foram já estudadas no âmbito da unidade curricular de Sistemas Compósitos por. Gomes et al. (2014) (Gomes, Santos e Gomes 2014). O estudo consistiu na comparação de propriedades mecânicas entre uma sanduíche com núcleo em cortiça com e sem *honeycomb*. Os autores concluíram que com furação do núcleo o compósito diminui o módulo de Young, a rigidez específica e a tensão de rotura. No entanto, em ensaios de impacto, a furação faz o núcleo absorver mais energia. A massa específica dos compósitos criados foi cerca de 440 kg/m³ e 400 kg/m³ para o núcleo sem e com furação, respetivamente. Partindo destas massas específicas e dos resultados obtidos nos diferentes ensaios, conclui-se que devido às suas propriedades mecânicas (boa elasticidade e retorno elástico), a cortiça pode substituir núcleos *honeycomb* em espumas poliméricas tal como o XPS (Gomes, Santos e Gomes 2014).

3 Desenvolvimento e caracterização das estruturas sanduíche

3.1 Seleção do aglomerado de cortiça

Existe uma elevada gama de aglomerados de cortiça com diferentes características mecânicas que, geralmente, se destinam a aplicações distintas. Para escolher o aglomerado ideal selecionaram-se três tipos de aglomerados, o NL10, o NL20 e o NL25, da gama *CoreCork*[®] do catálogo (ANEXO B) da empresa Amorim Cork Composites, S.A.(ACC), uma holding nacional, líder de mercado no seu segmento. Na tabela 6 apresentam-se as características dos aglomerados selecionados para o estudo.

Tabela 6 - Aglomerados de cortiça *CoreCork*[®] e respetivas propriedades.

Aglomerado <i>CoreCork</i>[®]	NL10	NL20	NL25
Massa específica (kg/m³)	150	200	250
Módulo de compressão (MPa)	5,10	6,00	6,90

3.1.1 Dimensionamento dos favos e espessuras de parede

Como se sabe estruturas comuns em forma de favo de abelha apresentam favos com geometrias uniformes e espessura de parede constantes. O estudo realizado por Duan et al. (2018) conclui que comparativamente aos favos quadrangulares, os hexagonais conseguem absorver mais energia (absoluta) e a capacidade de deformação em regime plástico também é superior (Duan et al. 2018). Assim, optou-se por favos de forma hexagonal.

Arbitrou-se um diâmetro de 8,00 mm de forma a possibilitar a comparação geométrica quase direta com os seus possíveis concorrentes *honeycomb* comerciais, nomeadamente: papel fibra de aramida/resina fenólica, polipropileno (ANEXO A) e alumínio. De acordo com a norma ASTM C393 - *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure* (ASTM 2000), para uma largura standard de 75 mm, o diâmetro da célula não deve ultrapassar os 25 mm. As dimensões do favo cumprem assim os requisitos desta norma para a realização de ensaios de flexão.

Um aglomerado de cortiça é composto por grãos de forma irregular e, devido à previsível perda de rigidez e possibilidade desagregação do aglomerado após produção dos alvéolos, evitaram-

se espessuras de parede inferiores a 1 mm. A combinação entre espessura de parede do alvéolo e densidade do aglomerado de partida foram relacionadas para manter constante a massa total (ou densidade aparente) do núcleo *honeycomb* resultante, variando a densidade e a espessura da parede de forma inversa. Para o aglomerado de menor densidade, o NL10, criou-se em SolidWorks® uma célula do núcleo com a geometria de um prisma hexagonal (figura 19) com: valor arbitrado de 1,50 mm de espessura de parede; 15 mm de altura; 8,00 mm de distância entre faces; resultando a massa de 0,111 g.

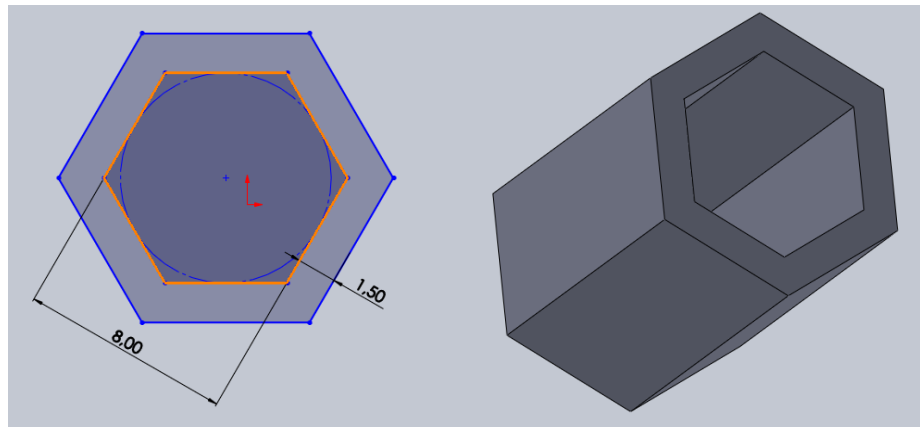


Figura 19 - Prisma hexagonal obtido através de SolidWorks®.

Para os materiais NL 20 e NL 25 (de massa específicas de 200 e 250 kg/m³, respetivamente), a determinação de espessura, lado interior do prisma e área projetada de cortiça (A_{azul}), foi feita através de um sistema de 4 incógnitas e 4 equações (eq. 1 - 4), cujos resultados obtidos se encontram na tabela 7. Partindo do aglomerado NL 10, ao manter a massa da célula (m), a altura (h) e o perímetro exterior (P), é de esperar uma redução da espessura da parede (e) e um aumento da área interior da célula ($A_{hex interior}$), pelo que a estrutura poderá sair fragilizada. Na figura 20, ilustra-se a projeção do prisma hexagonal.

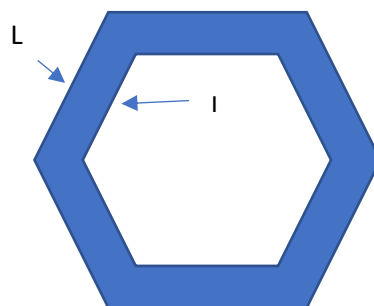


Figura 20 – Projeção do prisma hexagonal: L-lado exterior; l – lado interior

$$A_{azul} = 6 \left(\frac{L+l}{2} e \right) \quad (\text{eq. 1})$$

onde $P = 6L = 3.8 \times 10^{-2} (m)$, se mantém constante

$$m = V\rho \quad (\text{eq. 2})$$

$$V = Ah \quad (\text{eq. 3})$$

$$A_{\text{azul}} = A_{\text{hex exterior}} - A_{\text{hex interior}} = \frac{6L^2\sqrt{3}}{4} - \frac{6l^2\sqrt{3}}{4} \quad (\text{eq. 4})$$

Tabela 7 - Valores calculados para o NL 20 e NL 25.

	NL 20	NL 25
V (mm³)	$5,7 \times 10^2$	$4,44 \times 10^2$
A (mm²)	36,2	27,6
e (mm)	1,08	0,84
l (mm)	5,11	5,44

Note-se que a espessura de parede duplica quando existem várias células adjacentes compondo o núcleo em *honeycomb*, como se pode verificar na tabela seguinte:

Tabela 8 - Espessuras de parede obtidas para os diferentes materiais.

Aglomerado	Massa específica (kg/m³)	Espessura de parede no <i>honeycomb</i> (mm)
NL10	250	1,68
NL20	200	2,17
NL25	150	3,00

3.1.2 Critério de seleção do aglomerado para o núcleo

Fez-se uma análise à deformação, tendo por base a compressão de um núcleo para determinar a combinação aglomerado/espessura de parede ideal para compor o núcleo do compósito. Usando os conhecimentos intrínsecos do comportamento à compressão, foi possível obter os resultados descritos na tabela 9 e construir o gráfico da figura 21. Arbitrando-se uma força de 1 N, para os valores de espessura obtidos (tabela 7), determinou-se a tensão resultante (MPa) e a deslocação (m).

Tabela 9 – Valores de tensão e de deslocação obtidos.

	NL10	NL20	NL25
e (mm)	1,500	1,080	0,840
$\varepsilon = \sigma/E$	$3,97 \times 10^{-3}$	$4,49 \times 10^{-3}$	$4,90 \times 10^{-3}$
$\sigma = F/A$ (MPa)	0,0203	0,027	0,034

Para perceber qual a influência da espessura da parede na deformação de cada material, partindo da tabela 9 criou-se o gráfico da figura 21, onde consta a deslocamento obtido no núcleo em função da espessura da parede.

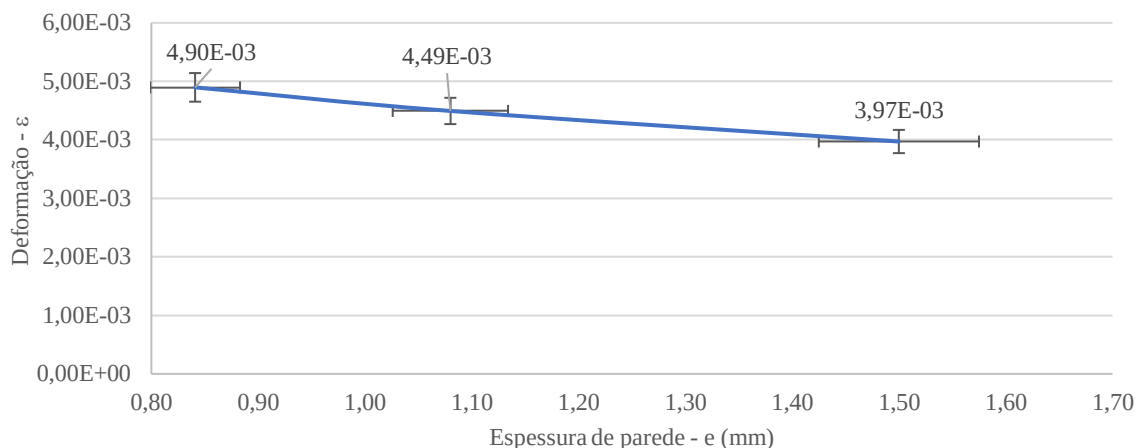


Figura 21 - Gráfico deslocamento vs. espessura de parede.

Ao observar o gráfico da figura anterior, percebe-se que à medida que a espessura da parede aumenta com diminuição da densidade, a deformação tende a diminuir, mas não de forma linear, devido à contribuição da diferente densidade para cada aglomerado. A diminuição é mais acentuada de 1,08 para 0,84 mm. A espessura de 1,50 mm (numa célula) que corresponde a 3,00 mm no *honeycomb*, apesar de estar associada à cortiça NL10 com propriedades mecânicas inferiores, é ainda assim a que conduz a uma maior resistência à compressão, indicando que para a gama de massas específicas disponíveis, prevalece a contribuição da espessura de parede. Desta forma, a cortiça NL10, com uma espessura de 3,00 mm de parede entre células foi considerada a ideal para formar o núcleo do compósito.

Recorrendo ao Abaqus CAE®, que tem como base de funcionamento o método de elementos finitos, validaram-se os resultados obtidos na análise anterior, através de ensaios à flexão por 3 pontos (respeitando a norma ASTM C393 (ASTM 2000)).

Com recurso ao SolidWorks®, criaram-se 3 partes diferentes de *honeycomb* para cada uma das espessuras de parede referidas na tabela 9. O facto de o núcleo apresentar dois planos de simetria, permitiu simplificar as partes e reduzir os tempos de simulação, concebendo-se apenas ¼ do núcleo (figuras 22). Após a conversão destas partes para formato STEP, importaram-se os mesmos para o Abaqus CAE®, que permitiu construir modelos de flexão seguindo a norma ASTM C393 (flexão em 3 pontos). Para a simulação foi imposta uma flecha de 10 mm e determinou-se a força resultante no punção móvel. Refinou-se a malha dos *honeycombs* por forma a que o elemento fosse cerca de metade da espessura da parede. Isto permite, não só obter uma baixa disparidade de valores resultante do refinamento de malha reduzido, assim como conduzir a tempos de simulação razoáveis.

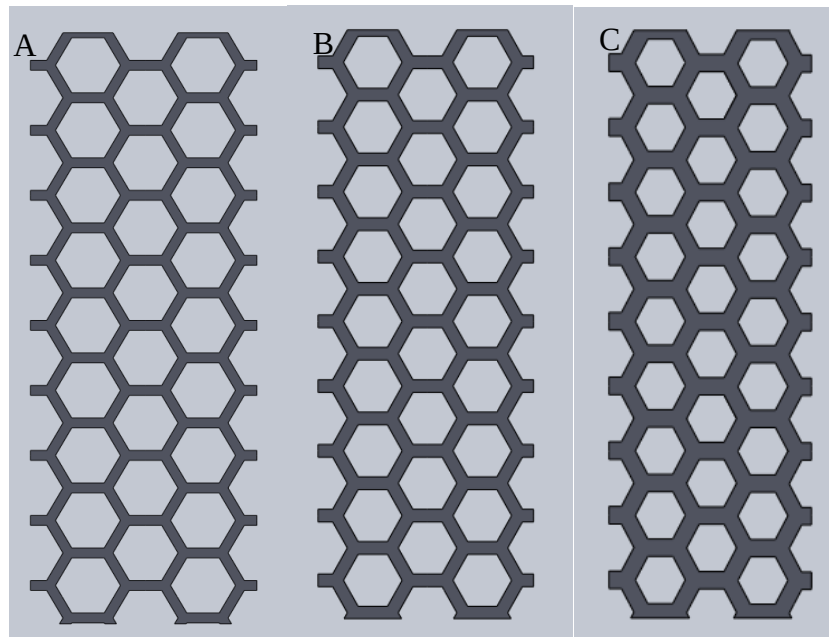


Figura 22 - Modelos com 1,68, 2,17 e 3,00 mm de espessura de parede, A,B e C, respectivamente.

A flecha de 10 mm imposta às peças cria uma deformação extra do *honeycomb* na zona onde o punção contacta e por isso a flecha resultante é superior a 10 mm. As tensões a que se chegaram nos modelos para as três espessuras de parede diferentes estão representados nas figuras 23 a 25. Os valores de tensão máxima resultante para cada espessura encontram-se na tabela 10.

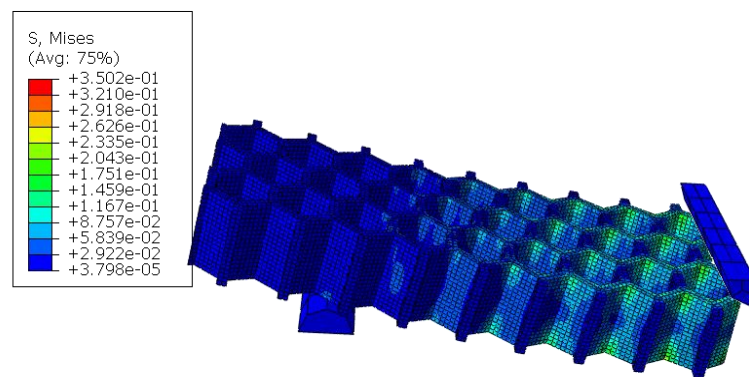


Figura 23 - Tensão no *honeycomb* com 1,68 mm de espessura de parede.

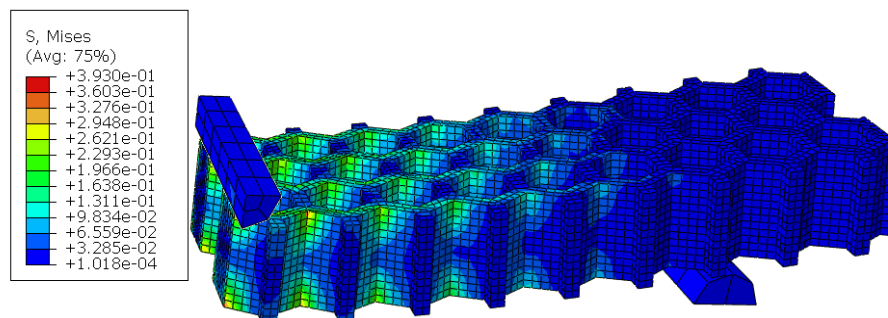


Figura 24 - Tensão no *honeycomb* com 2,17 mm de espessura de parede.

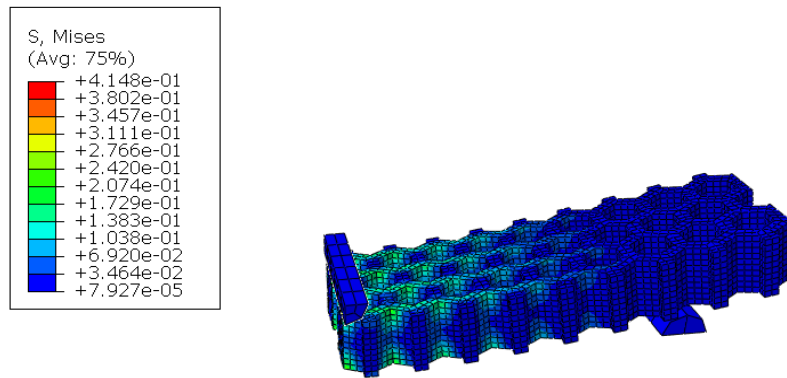


Figura 25 - Tensão no *honeycomb* com 3,00 mm de espessura de parede.

Através do comando *Field Output*, obtiveram-se os gráficos de força reativa do punção ao longo do tempo e segundo a direção Z para os 3 casos. De seguida, determinou-se o somatório das forças de todos os pontos do punção e construíram-se novos gráficos de força (ver ANEXO C). Os resultados estão descritos na tabela 10 e gráfico correspondente na figura 26.

Tabela 10 - Resultados de tensão, descritos por espessura de parede.

Espessura (mm)	Tensão (MPa)	Força (N)
3,00	$4,15 \times 10^{-1}$	0,73
2,17	$3,93 \times 10^{-1}$	0,62
1,68	$3,50 \times 10^{-1}$	0,23

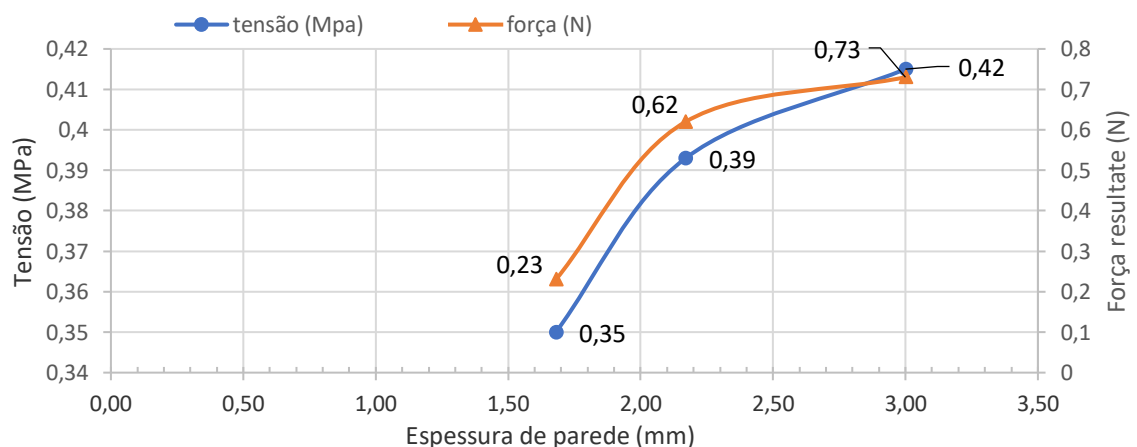


Figura 26 - Gráficos de tensão e força/espessura de parede.

Pela análise do gráfico da figura 26, percebe-se que a tensão tem tendência crescente com o aumento da espessura da parede. A força apresenta tendência semelhante. Para uma espessura

de 3,00 mm, e impondo uma flecha de 10 mm, é necessária uma força superior à que é precisa para outras espessuras de parede em materiais aglomerados de massa específica superior.

Na transição de 2,17 mm para 3,00 mm, o aumento percentual da força (17,7 %) foi superior ao da tensão (7,6 %), o que é vantajoso, ainda que seja inferior à transição de 1,68 para 2,17 mm (169,6 %). Portanto com base nos resultados de simulação do comportamento de flexão, a combinação de *honeycomb* com parede de 3,00 mm e aglomerado é a indicada corroborando a conclusão obtida com base no comportamento à compressão.

3.2 Peles a usar na estrutura sanduíche

A fibra de vidro (FV) e resina de epóxico foram os materiais selecionados para produzir as peles. Por um lado, é um material que permite obter peles com boa resistência mecânica associados a um custo relativamente baixo (Horrocks e Anand 2000; Gomes, Santos e Gomes 2014). Por outro lado, o facto de já ter sido utilizada em trabalhos anteriores desenvolvidos no âmbito de teses ou trabalhos da unidade curricular de Sistemas Compósitos, facilita a comparação de desempenho das estruturas, pondo em evidência a contribuição de modificações introduzidas no componente núcleo (Gomes, Santos e Gomes 2014).

A resina usada na infusão foi um sistema de resina de epóxico, de muito baixa viscosidade (170 mPa·s), Sika® Biresin® CR83/CH83-6, usado também em trabalhos anteriores (Gomes, Santos e Gomes 2014) (ver ANEXO D).

Foi usado o tecido de FV Multifab® (Lintex®, R. P. China) E BX 600, com duas camadas de tecido unidireccionais ($\pm 45^\circ$) e com uma gramagem de 612 g/m².

3.2.1 Preparação das peles

As peles em compósito de fibra de vidro foram fabricadas por injeção de resina assistida por vácuo (Vacuum Assisted Resin Infusion - VARIM ou VRIM). É um processo moroso e requer cuidado no manuseamento dos materiais uma vez que alguns se rasgam ou desfazem facilmente. A VARIM tem várias vantagens, como economizar tempo de processamento, uniformização da resina, contato íntimo entre cada camada de fibra de vidro e substratos, boa capacidade de eliminar vazios ou pontos secos, e maior e melhor molhabilidade da fibra. A VARIM utiliza uma tecnologia de moldagem de única face para fazer infusão de resina sobre o tecido e pode ser aplicada em grandes estruturas, como pilares de pontes (Uddin et al. 2004).

Inicialmente, fez-se a preparação do saco de vácuo e do molde. Uma chapa de alumínio usada como molde foi limpa com acetona para retirar eventuais resíduos de outras utilizações. A zona de trabalho foi delimitada com fita de pintor numa área suficiente para criar 4 estruturas (8 peles). Aplicaram-se 3 camadas de cera desmoldante (*Mirror Glaze 87*) sobre a chapa e entre cada aplicação deixou-se secar durante 10 min. Colocaram-se então sobre a chapa duas camadas de fibra de vidro (1300 mm de comprimento por 610 mm de largura) com o empilhamento [+45°, -45°]_s, seguidas de: uma camada do tecido *peel ply*; uma camada de filme perfurado (para facilitar a saída de ar, impedir que a rede de nylon adira ao *peel ply* e melhorar a permeabilidade das fibras de vidro); uma camada de rede para facilitar o escoamento de resina.

Terminou-se com um filme plástico, que se uniu ao molde usando fita adesiva de dupla face, de forma a formar uma bolsa de vácuo.

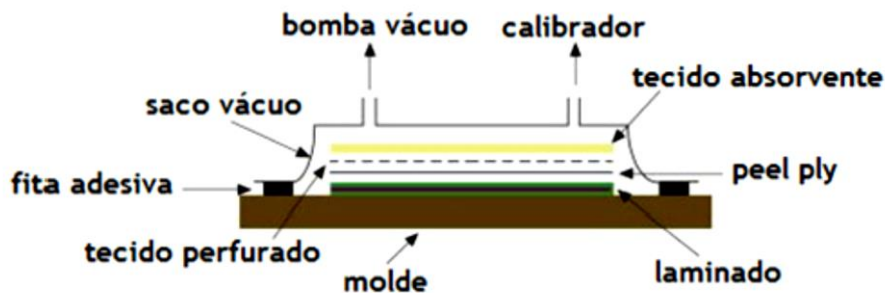


Figura 27 - Esquema da infusão por VARIM (Lopes 2009).

Para se proceder se à infusão a vácuo da resina sobre o perímetro do empilhamento de tecido de fibra de vidro, colocaram-se os tubos em espiral para distribuir a resina sobre todo o seu comprimento. A estes tubos, foram ligados quatro bocais em “T” (figura 28), dois para cada um dos lados das peles. Por fim ligaram-se aos bocais, os tubos exteriores à bolsa de vácuo.



Figura 28 – Bocal para aspiração do ar.

Retirou-se a fita de pintor e colou-se o saco ao molde, pressionando bem o adesivo e tendo especial cuidado com as zonas críticas de entrada de ar. As zonas críticas (figura 29): são cantos onde há sobreposição de adesivo, riscos na chapa e zonas de colagem dos bocais. É importante assegurar que o saco fique o mais estanque possível, pois a entrada de ar durante a infusão pode introduzir defeitos na peça.



Figura 29 - Zonas críticas pela possível entrada de ar durante a criação de vácuo: A) bocal; B) sobreposição do adesivo).

Misturou-se a resina de epóxico Sika® Biresin® CR83 com o endurecedor Biresin® CH 83-6 na razão mássica de 100 para 30, perfazendo o total de cerca 1,5 kg, para ter em conta algum excesso e garantir que o tubo de entrada da resina permanece sempre imerso, prevenindo a entrada de ar. De seguida, fez-se a montagem dos tubos de saída até à armadilha de resina, e desta à bomba de vácuo. A armadilha de resina impede a passagem de resina para a bomba de vácuo. Instalou-se o seccionador na entrada de ar do tubo por onde é aspirada a resina. Com todos os acessórios montados, extraiu-se o ar, para verificar a qualidade do saco de vácuo, inspecionando-se as zonas críticas. Inseriu-se o tubo na resina e abriu-se cuidadosamente o seccionador. Na figura seguinte é possível observar a progressão da resina.

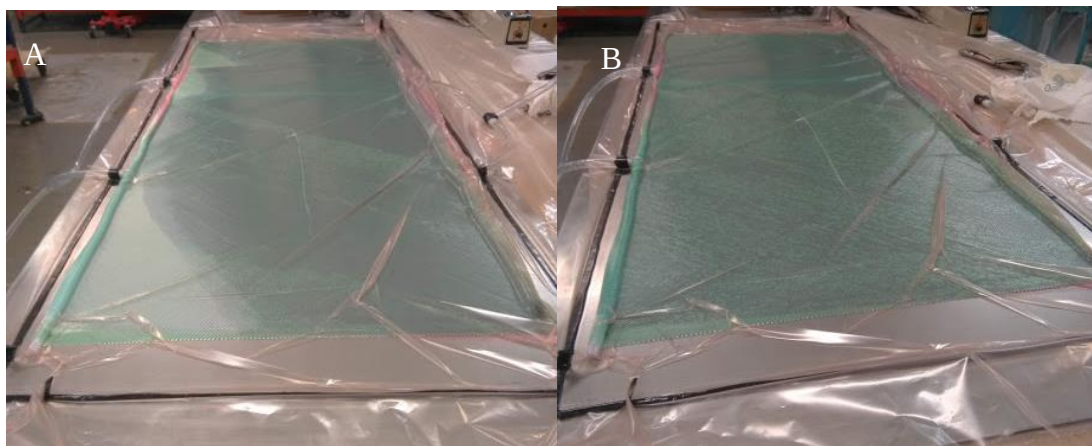


Figura 30 - Infusão da resina: A) fase intermédia da infusão; B) impregnação total das peles.

Pela figura anterior observam-se bolhas (zonas mais claras) criadas pela turbulência que permaneceram maioritariamente à superfície (na zona da rede). A presença de pequenas porosidades pode afetar a resistência das peles.

Verificou-se a pele, desmoldou-se, retirando todos os acessórios, incluindo o *peel ply*, que por aderir à superfície, requer um cuidado especial. Com a peça desmoldada e recorrendo a uma máquina de corte, efetuou-se a retificação da mesma em duas partes aproximadamente iguais.

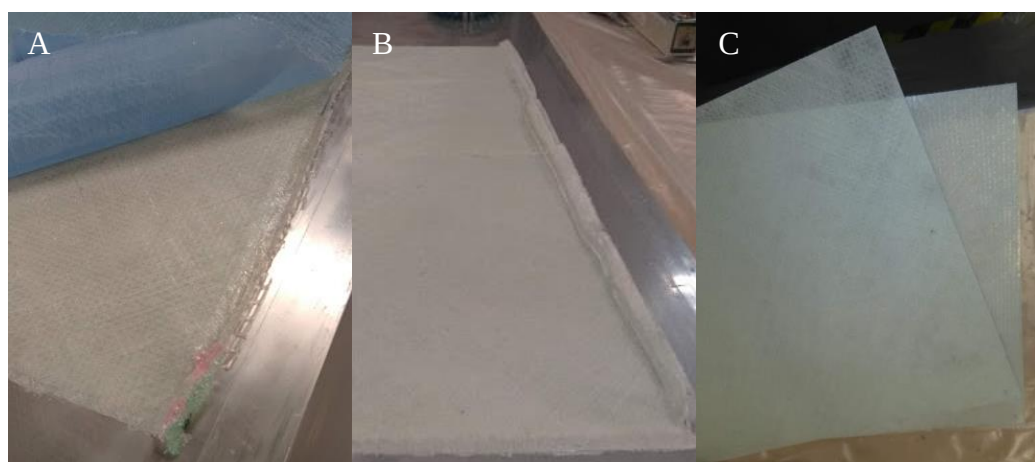


Figura 31 – A, B) Aspeto da placa de compósito, depois de retirado o *peel ply*; C) Peles após retificação por corte.

3.2.2 Propriedades do compósito de fibra de vidro

Foram efetuados 5 ensaios de calcinação segundo a norma ISO 1172 para a determinação dos teores de FV e resina no compósito (figura 32) (ISO 1996). Sabe-se que $\rho_{\text{resina}}=1,14 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{\text{fibra de vidro}}=2,56 \text{ g/cm}^3$.



Figura 32 – A) Cadinhos com resíduos das amostras de compósito em FV; B) Mufla Nabertherm; C) Cadinhos no interior da mufla, após calcinação das amostras de compósito de FV.

A tabela 11 indica os valores obtidos de fração mássica de fibra (f_f) e da fração mássica da matriz ou resina no compósito (f_m). A fração mássica média de fibra ($f_{f \text{ médio}}$) foi de $0,701 \pm 0,0165$.

Tabela 11 - Valores de fração mássica de fibra de vidro e de resina obtidos.

Cadinho	f_f	f_m
1	0,6847	0,3153
2	0,7285	0,2715
3	0,6997	0,3003
4	0,6930	0,3070
5	0,6992	0,3008
Média	0,7010	0,2990
DP	0,0165	0,0165

$$v_f = \frac{\frac{f_f}{\rho_f}}{\frac{f_f}{\rho_f} + \frac{f_m}{\rho_m}} \quad (\text{eq. 5}) \text{ (ISO 1996)}$$

Recorrendo à equação 5, para $f_f \text{ médio} = 0,701 \pm 0,0165$, considerando $\rho_{\text{resina}} = 1,14 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{\text{FV}} = 2,56 \text{ g/cm}^3$ pode-se calcular a fração volúmica média de fibra: $v_f \text{ médio} = 0,5110 \pm 0,0199$. Este teor de fibra de vidro foi superior àquele ao máximo aceitável, entre 30 a 60 % (CES Edupack®).

As peles em compósito de FV foram também caracterizadas mecanicamente através de ensaios de tração usando máquina Instron® 5900R® (figura 33 A) com uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de 1 mm/min (norma ISO 527) (ISO 2012). Usaram-se 6 provetes normalizados (T1 a T6 na figura 33 B e C), todos eles com geometria tipo 1B (em osso de cão), referida na norma de ensaio. A espessura média registada foi de $1,17 \pm 0,02 \text{ mm}$ e a largura de $8,60 \pm 0,22 \text{ mm}$.



Figura 33 – A) Ensaio de tração na Instron® 5900R®; B) Provetes para determinação das propriedades do compósito de fibra de vidro usado; C) Provetes depois de tracionados.

Foram calculados valores de módulo de Young entre 0,05 e 0,25 % (normalizado) e entre 0,005 e 0,0025 (alternativa num intervalo mais próximo da origem) e ao analisar a tabela 12, percebe-se que o provete T3 foi o que apresentou uma maior divergência face aos restantes provetes. Observando-o detalhadamente (figura 34), reparou-se que este apresentava alguns defeitos resultantes da maquinagem, provocando diminuição da tensão de rotura e do módulo de Young, motivos que levaram a que fosse excluído do estudo.



Figura 34 - Defeito de maquinagem no provete T3.

Tabela 12 – Propriedades obtidas para cada um dos provetes do tipo haltere, em compósito de fibra de vidro.

Provete	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\varepsilon_{\sigma,\max}$ (%)	σ_{rot} (MPa)	ε_{rot} (%)	E_{st} (GPa) (0.05- 0.25 %)	$E_{\text{não-st}}$ (GPa) (0.005-0.025 %)
T1	52,49	2,45	50,50	2,72	7,57	9,70
T2	48,08	2,21	47,24	2,43	8,00	9,80
T3	38,71	1,68	38,48	1,68	6,54	7,25
T4	43,91	1,59	42,46	1,76	6,99	8,45
T5	50,28	2,09	50,02	2,11	7,61	7,56
T6	50,57	1,70	48,59	1,78	7,89	7,94
Média	47,34	1,95	46,22	2,08	7,43	8,45
DP	4,70	0,32	4,35	0,38	0,51	0,99
Média s/ T3	49,07	2,01	47,76	2,16	7,61	8,69
DP s/ T3	2,93	0,32	2,89	0,37	0,35	0,91

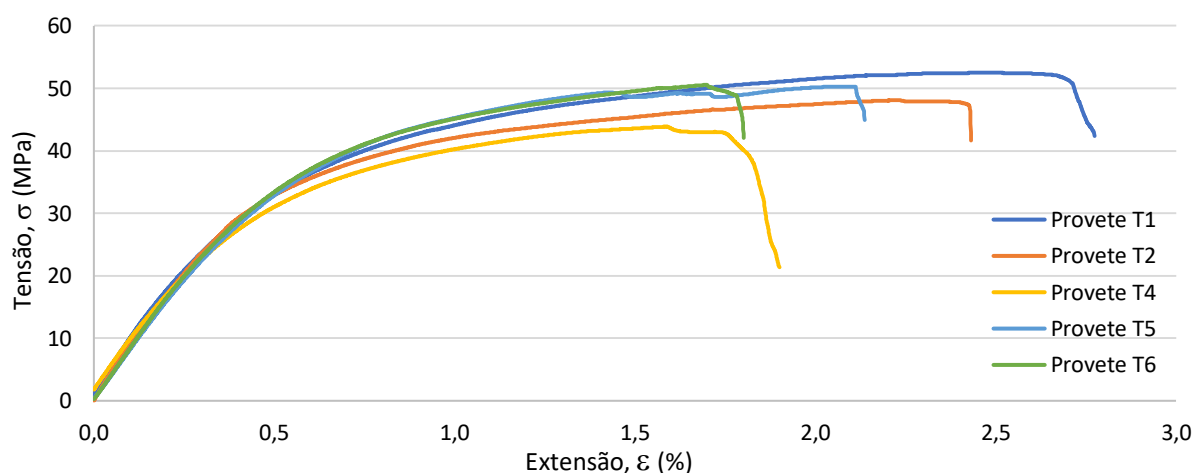


Figura 35 – Tensão (MPa) vs. deformação (%) em tração dos provetes de compósito de FV.

Efetuarão-se ainda ensaios de tração para 4 provetes de geometria distinta, do tipo 2, de acordo com a norma ISO 527-4.

Tabela 13- Dimensões médias dos quatro provetes cortados em duas direções perpendiculares entre si.

Tabela 1	Direção 1				Direção 2			
	P 01		P 02		P 03		P 04	
largura (mm)	24,00		24,75		24,75		24,80	
	24,00	24,05	24,85	24,80	24,85	24,83	25,00	24,93
	24,15	0,09	24,80	0,05	24,90	0,08	25,00	0,12
espessura (mm)	1,16		1,16		1,18		1,16	
	1,20	1,18	1,12	1,14	1,12	1,15	1,12	1,14
	1,18	0,02	1,14	0,02	1,14	0,03	1,14	0,02

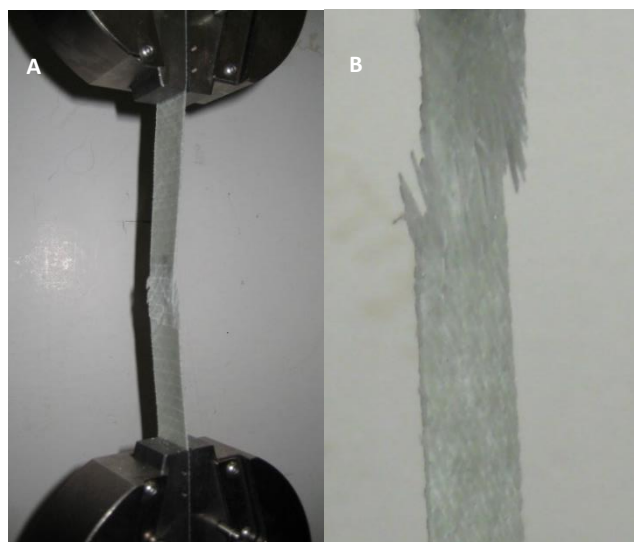


Figura 36 – A) Ensaio de tração na máquina de ensaios Instron® 3367; B) Estado do provete em pormenor.

A análise da figura 36 B, permite aferir que houve deslizamento entre as fibras, especialmente facilitado pelo ângulo de $\pm 45^\circ$ que estas apresentam em relação à direção da solicitação do ensaio. Os ensaios permitiram obter a tabela 14 onde são resumidos os valores de tensão máxima, deformação, tensão de rotura e ainda módulo de Young normalizado e módulo de Young num intervalo mais próximo da origem (entre 0,005 % e 0,025 %).

Tabela 14 - Propriedades obtidas para cada um dos provetes do tipo 2.

Proвете	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\varepsilon_{\sigma, \max}$ (%)	σ_{rot} (MPa)	ε_{rot} (%)	E_{st} (GPa) (0.05- 0.25 %)	$E_{\text{non-st}}$ (GPa) (0.005- 0.025 %)
T7	56,00	3,68	54,72	3,90	7,70	8,13
T8	54,66	4,15	53,36	4,52	7,28	8,37
T9	57,91	5,63	55,64	6,17	7,66	8,50
T10	48,58	2,25	46,51	2,60	7,00	8,48
Média	54,28	3,93	52,56	4,30	7,41	8,37
DP	3,49	1,20	3,58	1,28	0,29	0,15
Média s/ T10	56,19	4,49	54,57	4,86	7,55	8,33
DP s/ T10	1,34	0,83	0,94	0,96	0,19	0,15

O provete desta série com rotura prematura (T10) não foi considerado pois apresentava um defeito inerente ao material de reforço, no entanto, poderia ser avaliada a taxa de incidência deste tipo de defeito com um número superior de provetes.

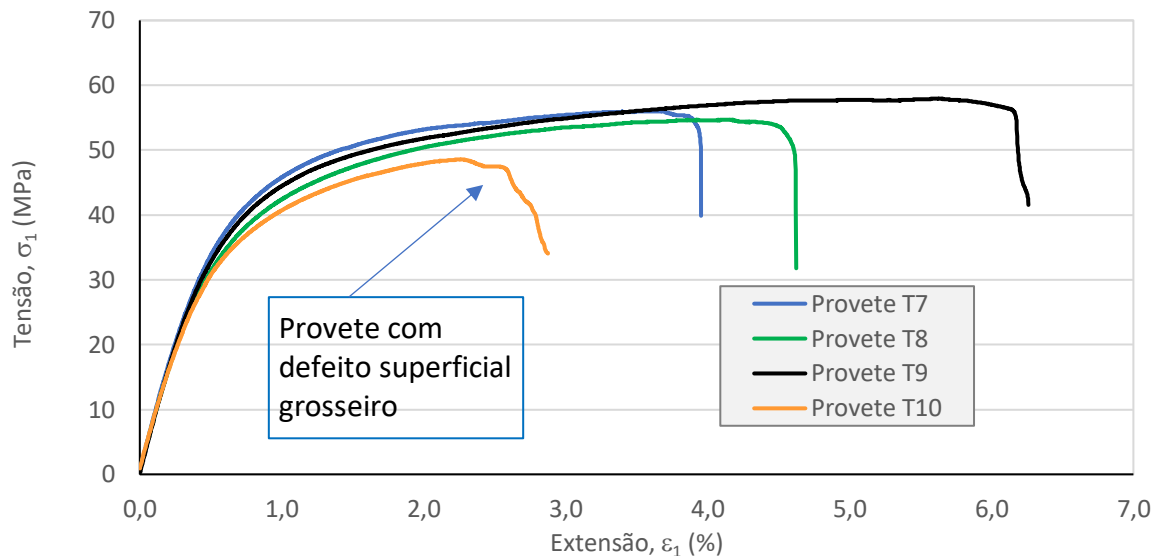


Figura 37 – Tensão (MPa) vs. deformação (%) dos provetes do tipo retangular em compósito de FV.

Na comparação com os provetes do tipo 1B, de T1 a T6 (tabela 12), percebeu-se que para esta série (T6 a T9), os valores de módulo de elasticidade são semelhantes: $7,61 \pm 0,35$ GPa e $7,55 \pm 0,19$ GPa - caso *standard*.

Os valores de tensão máxima destes provetes aumentaram cerca de 15 %, de $49,07 \pm 2,93$ GPa para $56,19 \pm 1,34$ GPa. Este aumento de resistência pode traduzir-se numa melhor maquinagem dos novos provetes faces aos anteriores. Na nova série de provetes, a tensão evolui lentamente após os 1,5 - 2,0 % de deformação de uma forma geral, enquanto na série anterior para esse intervalo de deformação, os provetes T4 e T6 já atingiram a tensão máxima, o que mais uma vez se pode justificar pela afetação da maquinagem na qualidade destes.

Os valores máximos de tensão obtidos de 56,29 MPa afastaram-se bastante daquilo que seria espetável para um compósito deste tipo com cerca de 70 % de FV (207 a 267 MPa – CES Edupack®). O facto de a superfície das peles apresentar uma rugosidade elevada e perceptível ao tato, levou a colocar em causa o processo de infusão de resina. Para compreender melhor o resultado da impregnação, observaram-se 2 amostras por microscopia ótica.

A resina é representada pelas zonas escuras onde o *peel ply* deixou decalcado um padrão facilmente perceptível (figura 38 A e B). Depreende-se que as fibras não ficaram totalmente cobertas por resina. Uma vez que a resina impregnou parcialmente as fibras, estas adquiriram baixa ou pouca adesão, levando à baixa resistência mecânica entre elas, quer à tração, quer ao corte.

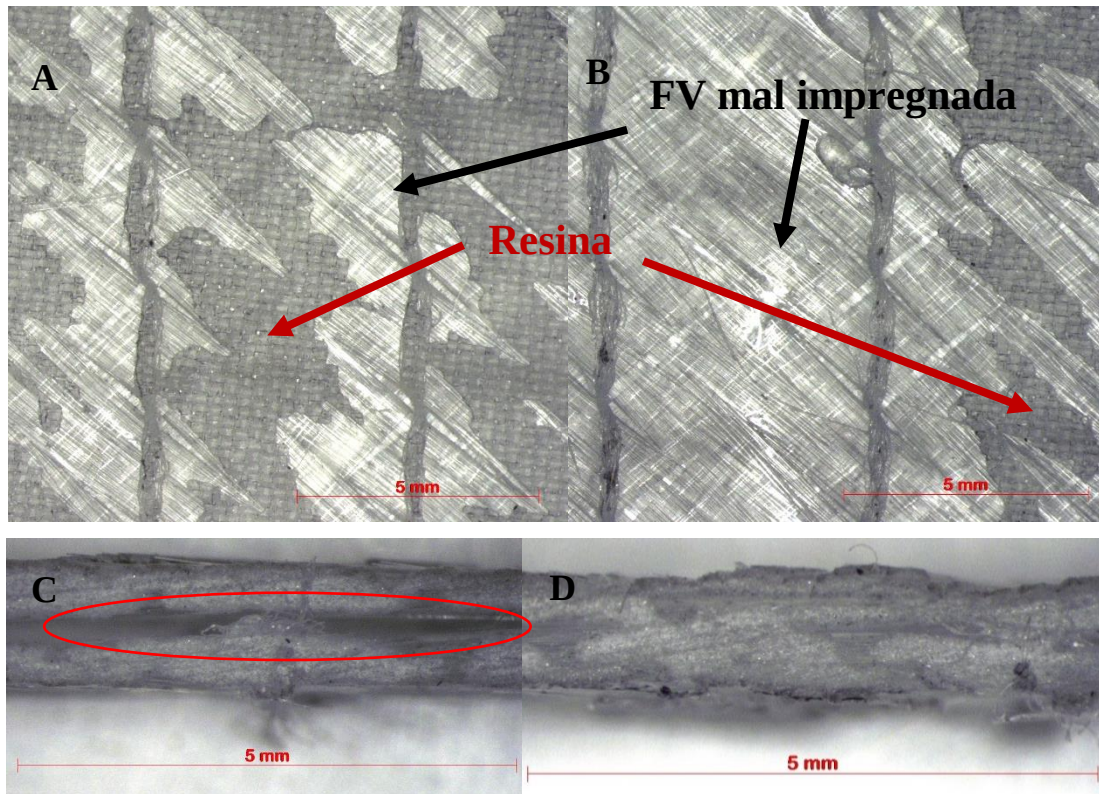


Figura 38 – Microscopia; A) e B) estado superficial das peles; C) visão de topo revelando extensa porosidade (delaminação) e D) visão de topo com boa qualidade de impregnação.

3.3 Preparação do núcleo

A placa de cortiça cedida pela Amorim Cork Composites, S.A (figura 39) foi inspecionada à chegada, mediram-se as suas dimensões, determinou-se a sua massa e calculou-se a sua massa específica média. As dimensões registadas foram de 500 mm de largura por 998 mm de comprimento, com uma espessura média de 15,94 mm. A massa foi de 1158 g, o que permitiu chegar a uma massa específica cerca de 145 kg/m^3 , ligeiramente inferior à nominal (150 kg/m^3).



Figura 39 - Placa de cortiça cedida pela Amorim Cork Composites®.

Devido ao interesse em estudar a influência da furação no núcleo, decidiu-se criar três grupos distintos de provetes, partindo de estruturas sanduíche com dimensões de $500 \times 160 \text{ mm}^2$ (figura 40 A), sendo eles:

- sanduíche com núcleo de referência ou não perfurado – SNR;
- sanduíche com núcleo *honeycomb* cilíndrico – SNHC;
- sanduíche com núcleo *honeycomb* hexagonal – SNHH.

Cada grupo era composto por 4 provetes em que 3 foram usados em ensaios de flexão não normalizada (3 e 4 pontos), 1 para flexão normalizada.

Para os provetes de compressão, cortou-se um conjunto de 6 prismas quadrangulares de 50 mm de lado, (assinalado a vermelho na figura 40 B)

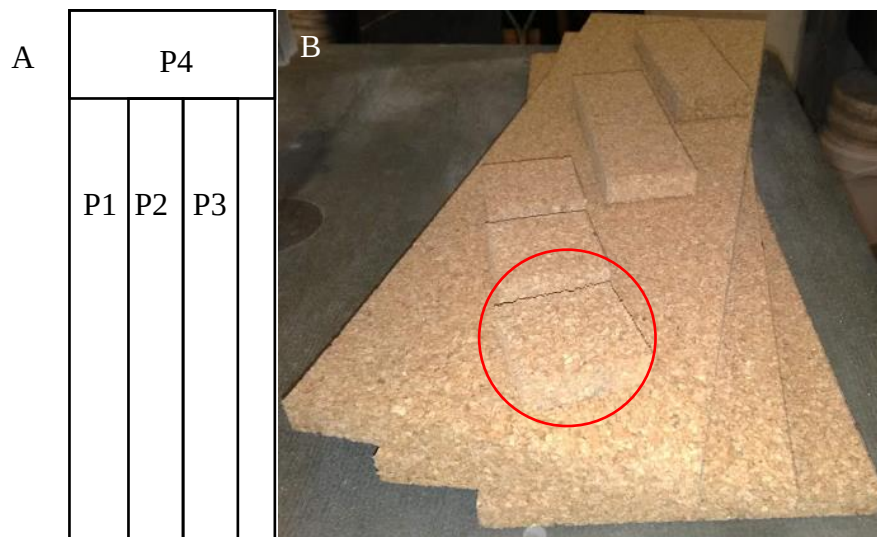


Figura 40 - A) Configuração dos núcleos para os provetes de flexão na placa de cortiça 160 por 500 mm; B) núcleos da sanduíche recortados.

3.3.1 Puncionamento

Dada a necessidade de criar furos hexagonais no aglomerado de cortiça por forma a torná-lo num *honeycomb*, percebeu-se que seria necessária uma ferramenta de corte funcional e com as dimensões pretendidas. Uma vez que os laboratórios não dispõem de uma ferramenta que responda a estas especificações, decidiu-se conceber uma na íntegra. Pelas conclusões que se tiraram com a otimização do *honeycomb*, o favo hexagonal deveria ter 8,00 mm entre lados para o aglomerado selecionado (NL10).

A ferramenta criada possui dois punções, de formas hexagonal e auxética. A ferramenta auxética surgiu na possibilidade de poderem ser estudadas sanduíches com núcleos de favos em forma auxética. Esta foi criada segundo dimensões que permitissem gerar um *honeycomb* com a mesma massa e favos com um perímetro igual do favo hexagonal.

Requisitos da ferramenta de corte (por ordem de relevância):

- Corte o mais regular possível para as formas hexagonal e auxética;

- Permitir a extração do material da ferramenta de forma simples e segura para o utilizador;
- Punção destacável da pega, que permita a sua substituição ou a sua utilização numa prensa no caso de materiais difíceis de furar manualmente;
- Possuir uma pega minimamente ergonómica.

Após o desenvolvimento de dois modelos em SolidWorks®, optou-se pela conceção do representado na figura 41. A ferramenta foi concebida nas oficinas de mecânica da FEUP segundo o desenho do ANEXO E. De notar que para o punção auxético, estudaram-se vários modelos que permitissem poder extrair o material cortado, aliado a um fabrico viável do mesmo. Concluiu-se que este deveria ter uma geometria aberta, tal como mostra a figura 41 B.

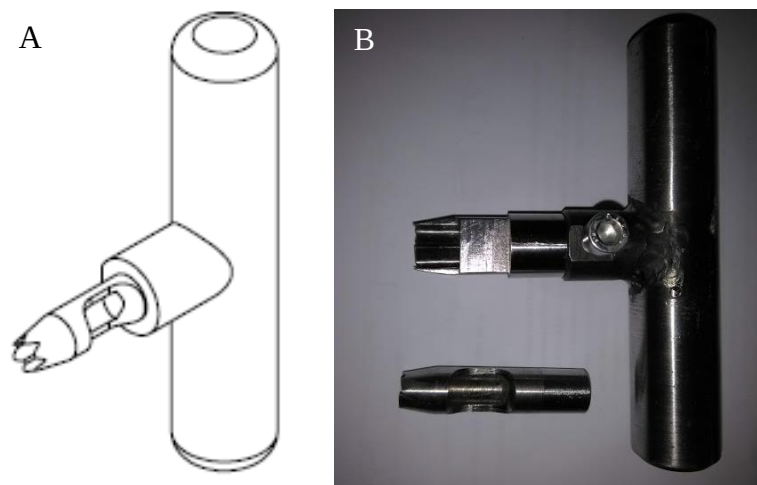


Figura 41 - Punção concebido: A) desenho 3D do punção hexagonal e respetiva pega; B) punções hexagonal e auxético depois de concebidos.

Fez-se um teste de corte (figura 42), alinhando o punção e a placa de cortiça o mais perpendicularmente possível. Reparou-se que para este tipo de cortiça de baixa massa específica e com grânulos na ordem dos 3 mm, os punções são ineficientes, pelo que teve de se recorrer a processos alternativos.

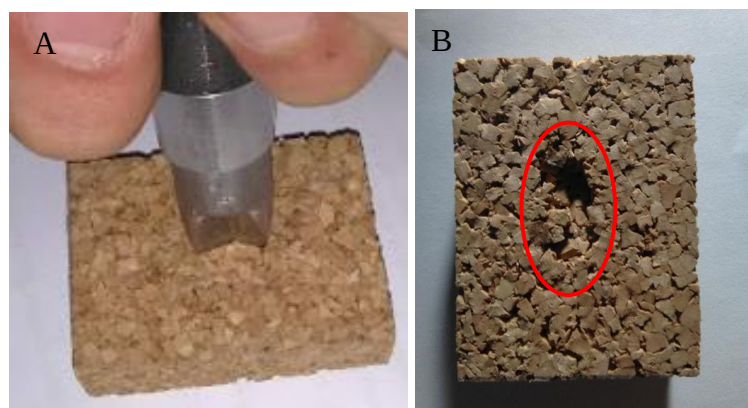


Figura 42 - A) Teste de corte com o punção; B) Resultado do corte na placa de teste.

3.3.2 Furação

A furação foi o segundo método testado usando-se uma nova placa de cortiça de dimensões 150 × 60 mm² (figura 43 A). Imprimiu-se um padrão de *honeycomb* hexagonal criado em SolidWorks® à escala real (ver ANEXO F). Esta folha foi recortada e colada na placa, servindo de máscara para a pintura com tinta de spray (figura 43 A). Reproduziu-se o padrão sobre a placa de teste e furou-se a placa segundo duas velocidades de rotação bem distintas, 275 rpm e de seguida a 2700 rpm, o máximo que a furadora disponível permite (figura 43 B e C).



Figura 43 – A) Máscara usada para a furação; B) Furação da placa de teste; C) Ajuste da velocidade.

A furação a 275 rpm apresentou baixa qualidade, com arranque de aparas grosseiras juntamente com grânulos de forma irregular. Esta velocidade também compromete a resistência das paredes entre furos. A broca de 6,5 mm de diâmetro foi a que permitiu manter uma parede entre alvéolos consistente (figura 44 A). A zona circundada a vermelho (figura 44 B), corresponde ao rompimento da parede no lado de saída da broca, não só devido à baixa velocidade, assim como a uma aproximação entre furos inferior a 11,0 mm (distância estipulada entre furos aquando da criação do *honeycomb* hexagonal e que garante 3,0 mm de espessura de parede).

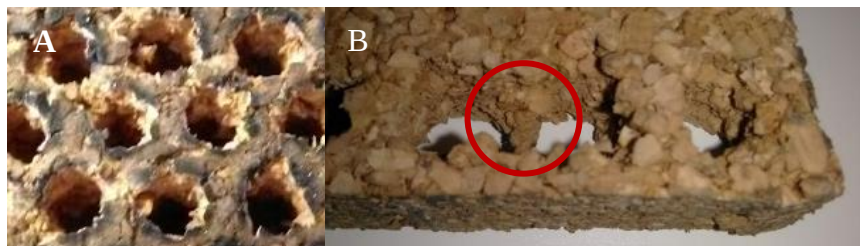


Figura 44 – Furos com broca de 6,5 mm a 275 Rpm: A) - aspeto em *honeycomb*, B) - rompimento de parede alveolar

De seguida, aumentou-se a velocidade para 2700 rpm. Observou-se um aspeto dos furos consideravelmente melhor, comparativamente ao obtido a 275 rpm (figura 45).



Figura 45 - Furos de 8 mm de diâmetro, à entrada da broca, realizados a 2700 rpm.

Estes furos, com espessura de parede com cerca de 2 mm, foram feitos com recurso a uma broca de 8,0 mm. Verificou-se o rompimento de parede celular no lado de saída da broca, o que inviabilizou o uso desta. Recorreu-se então a uma broca de 7,0 mm, que ao aumentar a espessura da parede, permitiu diminuir o rompimento à saída da broca. Furou-se então o padrão de *honeycomb* hexagonal pintado na placa (figura 46 A). É de salientar que a furação manual conduz à imprecisão do posicionamento da broca.

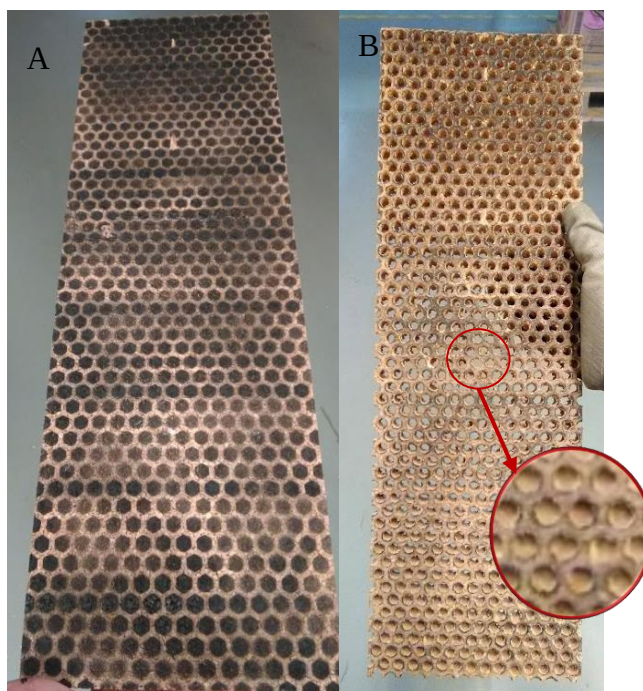


Figura 46 – A) *Honeycomb* reproduzido sobre a placa de cortiça; B) Após furação.

O processo de furação manual permitiu uma qualidade razoável dos furos (figura 46 B), no entanto algum arranque de grânulos no lado de saída da broca poderia ser evitado com uma velocidade de rotação mais elevada. A massa obtida para a placa com favos cilíndricos foi de 116,1 g.

3.3.3 Fresagem CNC

Outra forma de se conseguir o *honeycomb* hexagonal passou pela fresagem CNC e optou-se por fazê-la no INEGI. Fez-se o desenho do núcleo em SolidWorks® (ANEXO F) e o ficheiro em DWG foi posteriormente enviado à equipa do INEGI responsável.

A fresagem foi inicialmente executada com fresa de 3,0 mm a 10000 rpm. Retificaram-se os cantos do hexágono com uma fresa de 1,0 mm e assim se obteve uma transição entre faces com

raio de 0,5 mm (figura 47 A). Uma vez que o corte final do contorno iria deixar a placa solta na mesa da fresadora, esse corte foi efetuado depois na serra de fita, obtendo-se a peça da figura 47 B.

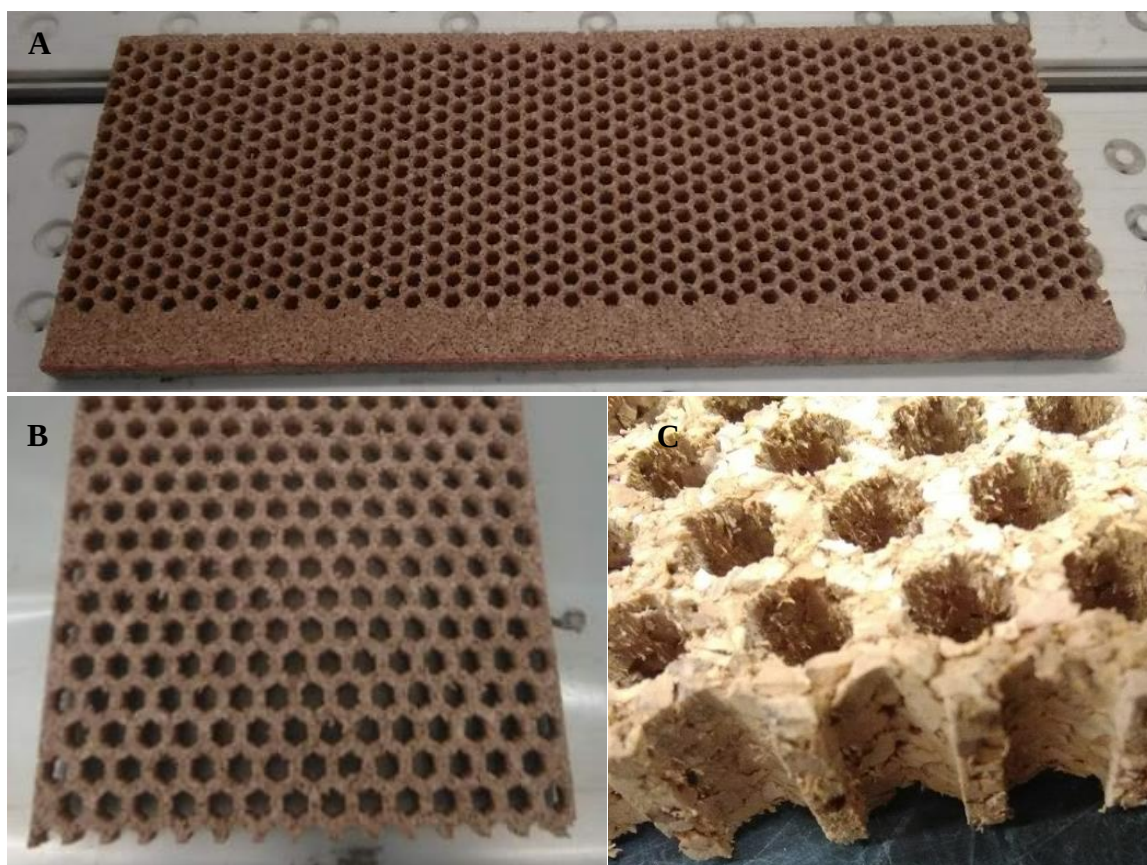


Figura 47 – A) Peça maquinada através de fresagem CNC; B) *Honeycomb* hexagonal após corte com serra de fita; C) Detalhe do corte com precisão.

A fresagem CNC permitiu uma excelente precisão no corte ($\pm 5 \mu\text{m}$), mantendo a parede entre células com 3,00 mm e sem arranque de grânulos, tal como era desejado. Outra grande vantagem deste processo esteve na velocidade de rotação da fresa (10000 rpm), que quanto mais elevada for, mais limpo é o corte da peça. Apesar destas vantagens, o aparecimento de pequenas aparas (2 a 4 mm de comprimento) agarradas ao *honeycomb* foi inevitável, uma vez que em certas zonas, a fresa não atingiu o lado oposto da placa devido à irregularidade da espessura da placa, todavia, isso não constituiu um problema na colagem das peles uma vez que estas apareceram no interior das células.

Fez-se a pesagem da estrutura de favo hexagonal, e partindo dos valores de massa obtidos para os outros conjuntos de provetes, obteve-se a tabela 15. Os furos cilíndricos permitiram uma redução de massa de 37,7 % e para o caso dos furos hexagonais essa diminuição foi de 48,7 %.

Tabela 15 – Comparação dos valores de massa obtidos para os 3 conjuntos de provetes R (referência), C (favos cilíndricos) e H (favos hexagonais).

Conjunto	m (g)	$\Delta m_{\text{rel. R}} (\%)$
R	186,5	0
C	116,1	-37,7
H	95,6	-48,7

3.3.4 Processos alternativos

Outro processo que poderia reproduzir com detalhe a geometria hexagonal seria o corte a laser e assim contactaram-se algumas empresas para estudar a viabilidade da aplicação deste método. Conclui-se que o corte a laser, apesar de ser efetuado com boa precisão (± 0.2 mm), deixaria a cortiça demasiado queimada dada a espessura de 16 mm. Portanto, descartou-se esta hipótese.

O corte a jato de água CNC, foi também considerado para perceber se em termos de custos e propriedades mecânicas seria vantajoso. Enviou-se uma amostra de cortiça NL10, assim como o desenho em formato DWG, para a empresa DESCUT – Design Lda. Foram realizados ensaios de corte para *honeycomb* hexagonal com e sem agente abrasivo. Verificou-se que embora o corte a jato de água seja mais rápido e apresente um acabamento melhor do que a fresagem CNC, a precisão é muito inferior, variando entre $\pm 0,762$ mm e $\pm 0,127$ mm. Devido à pequena dimensão das peças, não foi possível manter um corte perpendicular às faces. O resultado final pode observar-se na figura 48.

Solicitou-se à DESCUT o corte de um *honeycomb* auxético, devido ao interesse em abordar essa geometria em trabalhos futuros.



Figura 48 - Corte executado a jato de água (esquerda - sem agente abrasivo; direita - com agente abrasivo).

3.4 Colagem das peles e corte dos provetes para ensaios de flexão

A colagem envolveu o uso de uma mistura de um adesivo, o SikaForce[®]-7710 L100 (componente A) com o endurecedor SikaForce[®] - 7010 (componente B), cujas características podem ser consultadas no ANEXO G. O rácio da mistura em peso dada pelo fabricante é de 100 g de componente A para 19 g de componente B (84 % e 16 % da mistura, respetivamente). A área das peles para os 3 casos (referência, furação circular e hexagonal) é igual, pelo que a quantidade de adesivo a usar é a mesma.

O fabricante indica que o consumo máximo de adesivo é de cerca 350 g/m², o que para uma densidade de cerca 1,5, dará uma espessura média (e) que ronda 0,23 mm (eq. 5). Devido à porosidade da cortiça que traz um maior consumo de adesivo, usou-se um coeficiente de excesso de 30 %, correspondendo a uma espessura média hipotética de 0,30 mm (eq. 6).

$$e_{adesivo\ te\acute{o}rico} = \frac{0,350}{1500} = 0,00023\ m = 0,23\ mm \quad (eq. 5)$$

$$e_{adesivo\ pr\acute{a}tico} = 0.23 \times 1.3 = 0,30\ mm \quad (eq. 6)$$

$$A_{peles} = 500 \times 160 \times 2 = 160000\ mm^2 = 0,16\ m^2 \quad (eq. 7)$$

$$M_{adesivo} = A_{peles} \times 0,0003 \times 1500 = 0,072\ kg = 72g \quad (eq. 8)$$

Através da área das duas peles (eq. 7), e para uma espessura de 0,03 mm, a massa de adesivo é cerca de 72 g (eq. 8), (componente A e B – figura 49 A e B). Usando a razão de componentes do fornecedor, a massa de componentes A e de B são de aproximadamente 60 g e 12 g, respetivamente (figura 49 B).

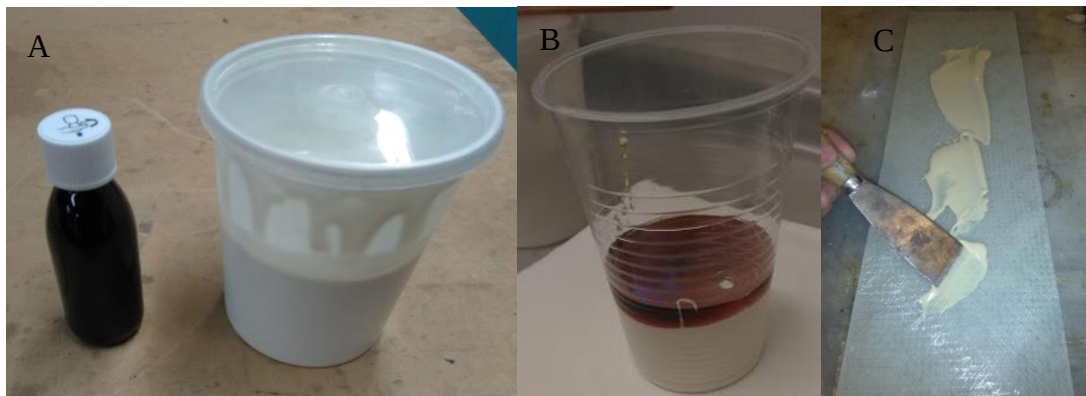


Figura 49 - Componentes A e B do adesivo: A) antes da mistura; B) razão indicada pelo fornecedor; C) aplicação do adesivo.

Os componentes foram misturados até se obter uma cor bege. De seguida, foi espalhado adesivo sobre as peles até se obter uma película o mais homogênea possível (figura 49 B). As peles foram colocadas sobre o núcleo, e o conjunto posteriormente colocado sobre uma mesa com pesos na face superior, de forma a pressionar a sanduíche e a obter uma maior aderência do adesivo. Devido à influência do escorrimento de adesivo no interior dos favos, o procedimento de colagem e prensagem para os *honeycombs* é feito individualmente para cada face que deve encontrar-se no lado inferior.

Segundo o fabricante, a prensagem (figura 50) deve ser feita durante cerca de 250 minutos a uma temperatura ambiente não inferior cerca de 17 °C (ANEXO G).



Figura 50 - Processo de prensagem e cura do adesivo sob a pressão de pesos.

A consistência da colagem do adesivo foi garantida com uma pós-cura à temperatura média de 50 °C durante 4 h (figura 51).



Figura 51 – Pós-cura do adesivo a 50 °C durante 4 h.

Depois de curado o adesivo, a sanduíche foi cortada em provetes com as dimensões definidas no ponto 3.3 (figura 40 A). Para isso usou-se uma serra circular disponível no laboratório de compósitos do INEGI (figura 52 A). Este procedimento foi efetuado para a SNR, SNHC e SNHH.

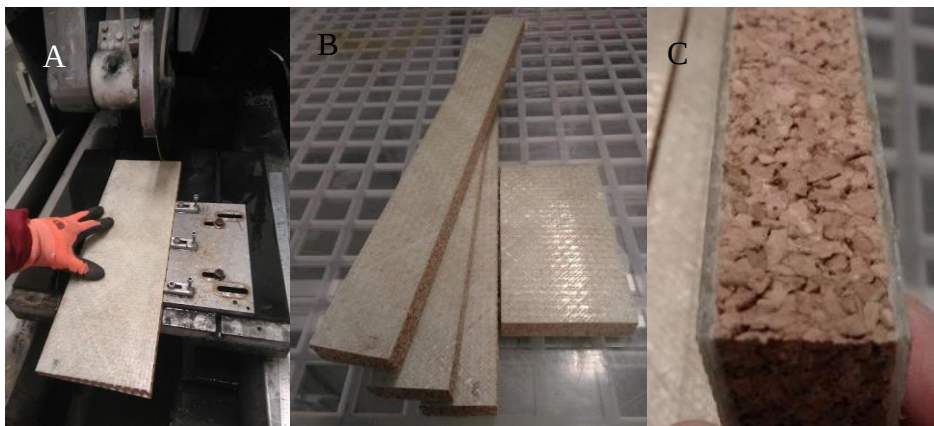


Figura 52 – A) Corte dos provetes; B) 3 provetes para flexão não normalizada e 1 para flexão normalizada; C) aspecto lateral da sanduíche (proвете SNR).

3.5 Realização dos ensaios mecânicos

A caracterização dos 3 tipos de compósitos em sanduíche desenvolvidos passou pela determinação das suas propriedades mecânicas. Para isso foram realizados ensaios de flexão de 3 e 4 pontos (futuramente apenas designados como 3P e 4P, respetivamente) para as três diferentes configurações de sanduíche no sentido de estudar o seu comportamento em flexão e estimar propriedades de corte do núcleo de acordo com um método normalizado descrito nas secções seguintes. Foram ainda levados a cabo ensaios de compressão para os núcleos de referência e *honeycomb* cilíndrico que permitiram determinar os módulos e tensão de cedência à compressão. As propriedades calculadas permitem fazer comparações com outros materiais existentes no mercado.

3.5.1 Flexão em 3 e 4 pontos

Os ensaios de flexão são pertinentes no caso de estruturas sanduíche, isto porque o objetivo deste tipo de construção é precisamente obter uma estrutura de elevada rigidez à flexão com reduzido acréscimo de massa.

Estes ensaios decorreram no laboratório de ensaios mecânicos do INEGI e foi usada uma Instron® 5900R® (figura 53). Seguiu-se o método da norma de ensaio ASTM C393/393M (ASTM 2000), e usaram-se configurações com distâncias de 260 e 390 mm entre os centros dos roletes inferiores para o ensaio 3P e 4P respetivamente (ASTM 2000, 2006). Esta norma salienta ainda a importância da presença de pequenas peças que permitem distribuir a carga evitando indentação, colocadas entre os roletes da máquina e os provetes. Essas peças devem ser num material polimérico com dureza *Shore A* de aproximadamente 60, largura de 25 mm, espessura de 3 mm e comprimento no mínimo igual à largura do provete (ASTM 2006).



Figura 53 - Instron® 5900R®.

As flechas a meio vão para a flexão a 3P e 4P, são dadas pela equação 9 (ASTM 2006).

$$\Delta = \frac{P(S^3 - 3SL^2 + L^3)}{96D} + \frac{P(S-L)}{4U} \quad (\text{eq. 9})$$

Resolvendo a equação anterior para as duas cargas diferentes dos ensaios 3P e 4P, obtêm-se as duas equações seguintes que permitem determinar a rigidez à flexão (D) (eq. 10) e rigidez de corte à flexão (U) (eq. 11) (ASTM 2006).

$$D = \frac{P_1 S_1^3 \left(1 - \frac{23S_2^2}{18S_1^2}\right)}{48\Delta_1 \left(1 - \frac{3P_1\Delta_2}{2P_2S_2\Delta_1}\right)} \quad (\text{eq. 10})$$

$$U = \frac{P_1 S_1 \left(\frac{18S_1^2}{23S_2^2} - 1\right)}{4\Delta_1 \left(\frac{27P_1S_1^3\Delta_2}{23P_2S_2^3\Delta_1} - 1\right)} \quad (\text{eq. 11})$$

Através da equação 12, determina-se o módulo ao corte.

$$G = \frac{U(d-2t)}{(d-t)^2 b} \quad (\text{eq. 12})$$

É possível ainda através dos ensaios determinar a tensões de corte máxima (τ) presentes no núcleo e a tensão máxima longitudinal nas peles (σ) (ASTM 2000), atingidas durante o ensaio, a partir da carga máxima observada. A tensão de corte é calculada segundo a mesma expressão para os ensaios de 3P e 4P.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{(d+c) \cdot b} \quad (\text{eq. 13})$$

A tensão nas peles deve ser calculada de forma independente para o ensaio 3P e 4P.

$$\sigma_{peles\ 3P} = \frac{P_{m\acute{a}x} \cdot S}{2t(d+c)b} \quad (\text{eq. 14})$$

$$\sigma_{peles\ 4P} = \frac{P_{m\acute{a}x} \cdot S}{3t(d+c)b} \quad (\text{eq. 15})$$

onde:

- P_1 - carga máxima aplicada a 3P (N);
- P_2 - carga máxima aplicada a 4P (N);
- S_1 - comprimento entre apoios para 3P (mm);
- S_2 - comprimento entre apoios para 4P (mm);
- Δ_1 - flecha a meio vão para 3P (mm);
- Δ_2 - flecha a meio vão para 4P (mm);
- d - espessura da sanduíche (mm);
- t - espessura das peles (mm);
- c - espessura do núcleo (mm)
- b - largura dos provetes (mm)
- σ_{peles} - tensão longitudinal máxima nas peles (MPa)
- $\tau_{m\acute{a}x}$ - tensão de corte máxima no núcleo (MPa) (ASTM 2006).

Os provetes normalizados, depois de cortados apresentavam dimensões aproximadas de $75 \times 150 \times 16\text{ mm}^3$ e os não normalizados de $50 \times 45 \times 19\text{ mm}^3$. Efetuaram-se ensaios de flexão 3P e 4P de forma alternada. Os provetes que foram levados à rotura num ensaio XP, também tiveram o comportamento elástico caracterizado nessa mesma configuração. O motivo da metodologia usada foi permitir 3 conjuntos de ensaios no regime elástico em 3P e 4P, usando apenas 3 provetes (ver tabela 13). A sequência de ensaios foi escolhida de modo a observar uma rotura em ensaios de 3P e duas em ensaios de 4P e pode justificar-se com a relativa pouca resistência do núcleo à compressão. Assim, é natural que no ensaio em 3P, dada a maior concentração de carga na zona de carregamento, seja mais provável a ocorrência de esmagamento do núcleo a menores valores de carga e deslocamento. No caso de flexão em 4P, são de esperar maiores valores de deslocamentos, podendo, com maior probabilidade, ser observada a rotura do núcleo por corte com uma carga inferior à necessária para provocar o seu esmagamento.

O procedimento dos ensaios consistiu em colocar o provete na zona de carga, posicionando-o simetricamente nos apoios (figura 54 A) (ASTM 2000). O rolete superior foi encostado à face

superior do provete, colocou-se o comparador na face inferior do provete e fez-se o zero deslocamento do aparelho (figura 54 B).

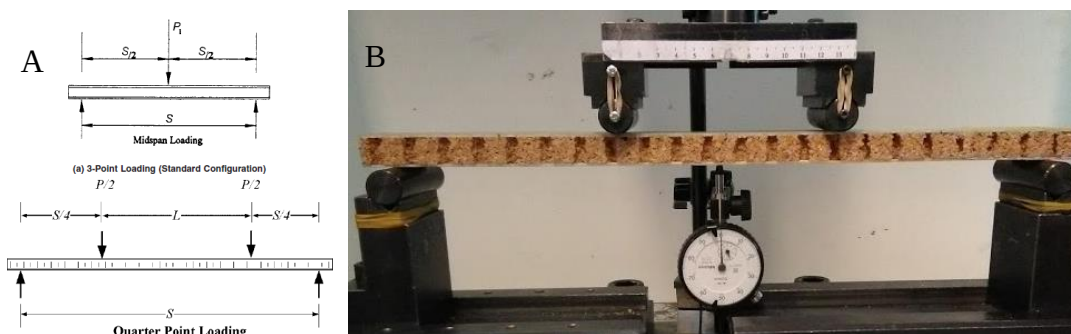


Figura 54 – A) Posicionamento do provete nos suporte para ensaios de flexão de 3P e 4P segundo a norma ASTM C 393/393M (ASTM 2006, 2000); B) aspeto real do posicionamento do provete na flexão 4P.

Realizaram-se 6 ensaios para cada um dos 3 grupos de provetes (SNR, SNHC e SNHH), a uma velocidade de 5 mm/min até uma flecha entre 5 e 6 mm em 3P ou 4P para caracterizar a região elástica, sendo seguidamente descarregados. De seguida, foram carregados até à rotura na outra configuração – 4P ou 3P (tabela 16) (ASTM 2000).

Tabela 16 – Configuração dos ensaios realizados para os diferentes tipos de sanduíche (SNR, SNHC e SNHH) e regimes testados.

Ensaio nº:	Provette	Regime testado	Designação do ensaio
1	R1, C1, H1	Elástico	3P
2	R3, C3, H3	Elástico	3P
3	R2, C2, H2	Elástico	4P
4	R1, C1, H1	Até rotura	4P -R
5	R3, C3, H3	Até rotura	4P -R
6	R2, C2, H2	Até rotura	3P -R

3.5.2 Compressão

Os ensaios de compressão foram realizados para dois dos tipos de núcleo em cortiça, usando para o efeito a máquina TIRATest 2705 (5 kN), disponível no laboratório de ensaios do INEGI. Este tipo de ensaio permite determinar o módulo de compressão E_c , a tensão de cedência e/ou a resistência à compressão. A figura 55, apresenta um excerto de uma curva típica, onde P representa a carga (N), A a área do provete (mm^2), t a espessura do provete (mm) e δ a deformação (mm) (eq. 16) (ASTM 2000). A limitação de material não permitiu fazer ensaios sobre o núcleo *honeycomb* hexagonal, por isso os ensaios incidiram apenas no núcleo de referência e no núcleo *honeycomb* cilíndrico.

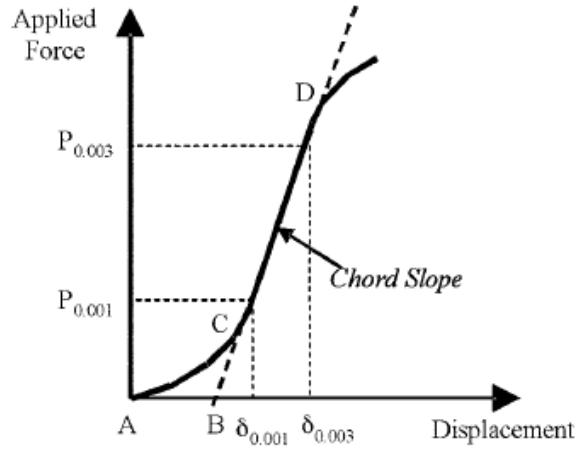


Figura 55 - Gráfico carga vs. deformação e esquema da metodologia normalizada para determinação do módulo de compressão (ASTM C365).

$$E_z^{fc} = \frac{(P_{0.003} - P_{0.001}) \cdot t}{(\delta_{0.003} - \delta_{0.001}) \cdot A} \quad (\text{eq. 16})$$

A norma ASTM C365 indica uma velocidade de avanço de 0,5 mm/min e provetes com área de 2500 mm² para materiais alveolares com células até 6,0 mm de diâmetro (ASTM 1994). Devido às limitações do material, foram usados provetes quadrangulares com cerca de 50 mm de lado ($A = 2500 \text{ mm}^2$), para células com cerca de 7,0 mm de diâmetro, incorrendo-se num ligeiro desvio de 16,7 %.

4 Resultados e discussão

4.1 Flexão em 3 e 4 pontos

De seguida apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de flexão dos provetes dos 3 tipos de sanduíche, SNR, SNHC e SNHH. Primeiro são tratados os não normalizados, cuja ordem seguida é a da tabela 16, e depois os normalizados, onde apenas se testou um provete para cada tipo de sanduíche. Devido às diferenças geométricas, o tratamento de resultados deve ser efetuado em separado.

4.1.1 Provetes não normalizados

Sanduíche com núcleo de referência

As dimensões médias (espessura, largura, volume e massa) dos provetes da sanduíche com núcleo de referência (SNR) foram inseridas na máquina de ensaios (tabela 17). A massa específica dos provetes foi calculada, obtendo-se uma média de $376,2 \pm 4 \text{ kg/m}^3$, representativa das respetivas estruturas sanduíche.

Tabela 17 – Propriedades dos provetes com núcleo de referência.

Proвете	Espessura (mm)	Largura (mm)	Volume (m³)	Massa (g)	Massa específica (kg/m³)
R1	18,80	39,41	3,112E-04	115,3	371
R2	18,78	39,11	3,085E-04	116,3	377
R3	18,73	39,10	3,076E-04	117,2	381
Média	18,77	39,21	3,091E-04	-	376
DP	0,029	0,144	1,528E-06	-	4

A uma flecha cerca de 37 mm, a flexão em regime plástico 3P e 4P, causou indentação dos provetes R1 e R3, fazendo com que a superfície do provete não estivesse totalmente em contacto com as placas dos roletes da máquina (figura 56). Essa indentação causou também rotura nas peles.



Figura 56 – Ensaio de flexão 4P.

Para os 3 primeiros ensaios no domínio elástico, fizeram-se medições de deformação até valores entre os 5 e os 6 mm para não causar uma deformação permanente nos provetes. Na tabela 18 apresentam-se os resultados obtidos para a força máxima e deformação. O gráfico de força em função do deslocamento obtido na Instron® 5900R® pode ser consultado no ANEXO H.

Tabela 18 – Força máxima (P) e deformação (ϵ) para cada ensaio.

Provete	P _{máx.} (N)	ϵ (%)
R1 (3P)	92,36	0,96
R3 (3P)	84,80	0,96
R2 (4P)	80,61	0,87
R1 (4P - R)	169,25	4,09
R3 (4P - R)	153,62	4,02
R2 (3P -R)	143,94	3,28

A disparidade de valores de força máxima entre os ensaios 4º e 5º, (R1 e R3 ambos a 4P-R), pode estar relacionada com as diferenças geométricas existentes entre os provetes R1 e R3.

No sentido de aplicar o método de cálculo descrito nas equações 10 a 12 (ponto 3.5.1), construíram-se gráficos de força e deformação para cada um dos provetes (figura 57: exemplo para R1). Estes gráficos tiveram em consideração um coeficiente de correlação mínimo de 0,995 para valores de carga próximos em 3P e 4P.

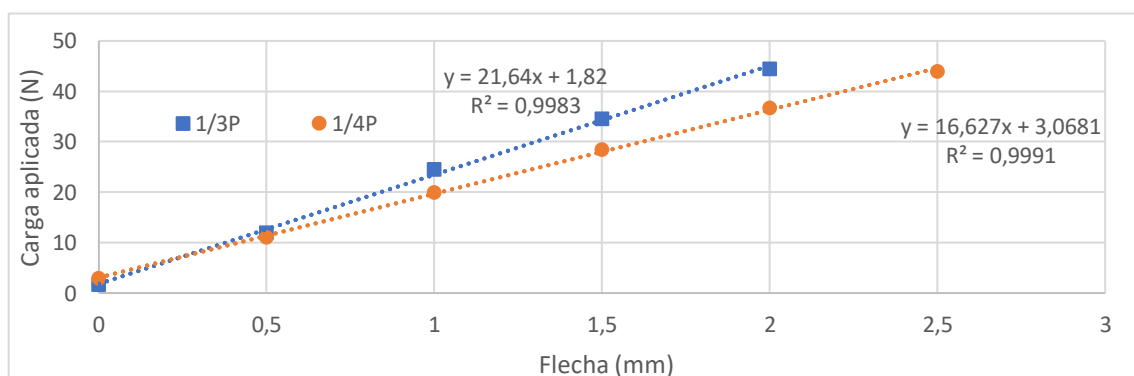


Figura 57 – Gráfico de carga aplicada vs. flecha para o provete R1, nos ensaios de 3P e 4P.

Os valores do declive das retas obtidas permitiram simplificar o termo P/Δ nas equações 10 e 11, e assim, obter os valores de rigidez da estrutura e módulo ao corte do núcleo (tabela 19). Recorrendo às equações de 13 a 15, determinaram-se as tensões máximas observadas de corte do núcleo (τ) e as nas peles (σ).

Tabela 19 - Valores de módulo ao corte do núcleo (G), tensão máxima nas peles (σ), e tensão de corte máxima no núcleo (τ) calculados para a estrutura com o núcleo de referência.

Provete	$D \times 10^{-4}$ (Nmm ²)	G (MPa)	$\tau_{\text{núcleo 3P}}$ (kPa)	$\tau_{\text{núcleo 4P}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{peles 3P}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{peles 4P}}$ (MPa)
R1 (4P-R)	2,93	1,239	-	123	-	13,71
R2 (3P-R)	3,09	1,222	106	-	11,76	-
R3 (4P-R)	2,69	1,154	-	113	-	12,57
Média	2,93	1,205	106	118	11,76	13,14
DP	0,168	0,037	-	5,14	-	0,57

A tensão de corte do núcleo para o ensaio 3P-R foi inferior à do ensaio 4P-R podendo dever-se à forma de rotura da sanduíche. Observando os provetes detalhadamente, reparou-se que tanto no caso de 3P-R como a 4P-R houve esmagamento, contudo, este foi mais acentuado no caso de 3P-R, o que pode justificar o menor valor de tensão de corte – isto é, em 4P com a carga mais distribuída a estrutura atingiu tensões de corte no núcleo superiores às atingidas em 3P, antes de colapsar por compressão. Assim, o valor obtido em 4P, pode ser interpretado como uma melhor aproximação da resistência ao corte do núcleo.

As tensões máximas obtidas nas peles também foram superiores no caso de 4P-R, e representam cerca de 28% da sua resistência, o que significa que os ensaios de flexão não comprometeram a integridade das peles em tração/compressão.

Sanduíche com núcleo *honeycomb* cilíndrico

Na tabela 20 apresentam-se os resultados dos ensaios de flexão dos provetes do tipo SNHC. Tal como era de esperar, os valores de massa são naturalmente inferiores aos SNR, registando-se uma massa específica média de 313 ± 2 kg/m³.

Tabela 20 - Propriedades dos provetes com núcleo *honeycomb* cilíndrico.

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Volume (m ³)	Massa (kg)	Massa específica (kg/m ³)
C1	18,44	38,71	2,998E-04	92,8	310
C2	18,39	39,47	3,049E-04	96,1	315
C3	18,40	38,60	2,983E-04	93,3	313
Média	18,41	38,93	3,010E-04	-	313
DP	0,022	0,387	2,805E-06	-	2

Pela figura 58 C, pode-se observar não só o aspeto final após a flexão a 4P-R, como também as zonas onde se deu o rompimento de grânulos. A irregularidade da superfície da placa de cortiça na zona de saída da broca, tornou a colagem dessa face à pele mais débil, levando à sua separação. No caso da flexão a 3P, também se observou rompimento da cortiça devido às tensões de corte (assinalado com elipses na figura 58 D) e as peles cederam por compressão na face superior (assinalado com seta na figura 58 D).

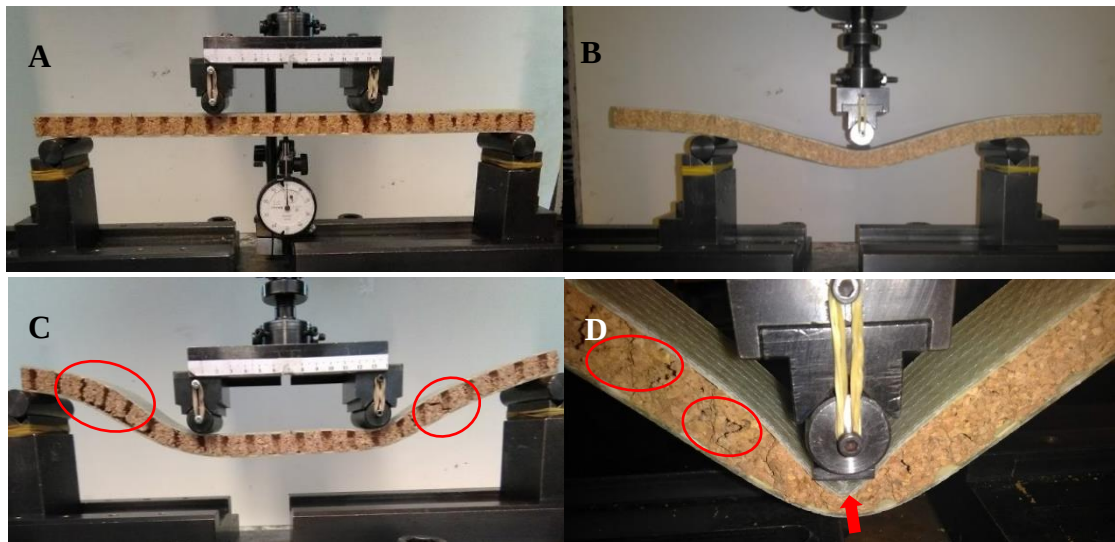


Figura 58 – Ensaio de flexão de 4P (A e C) e 3P (B e D).

Ao observar a tabela 21, pode-se concluir que os provetes C1 e C3, quando levados à rotura à flexão a 4 pontos (4P-R), apresentaram valores de força máxima muito próximos entre si (132,47 e 128,42 N, respetivamente), o que se pode justificar pelas dimensões e massa específica semelhantes. O gráfico de força em função da deformação obtido na Instron® 5900R® pode ser consultado no ANEXO H.

Tabela 21 - Força máxima (P), deformação (ϵ) para cada ensaio de SNHC.

Provete	P _{máx.} (N)	ϵ (%)
C1 (3P)	73,61	0,95
C3 (3P)	69,62	0,96
C2 (4P)	61,20	0,85
C1 (4P - R)	132,47	4,77
C3 (4P - R)	128,42	4,86
C2 (3P -R)	126,79	4,39

Seguindo o mesmo raciocínio do caso das sanduíches de referência, construiu-se o gráfico da figura 59, que permitiu determinar propriedades da estrutura e núcleo através da simplificação do termo P/Δ , nas equações 10 - 11.

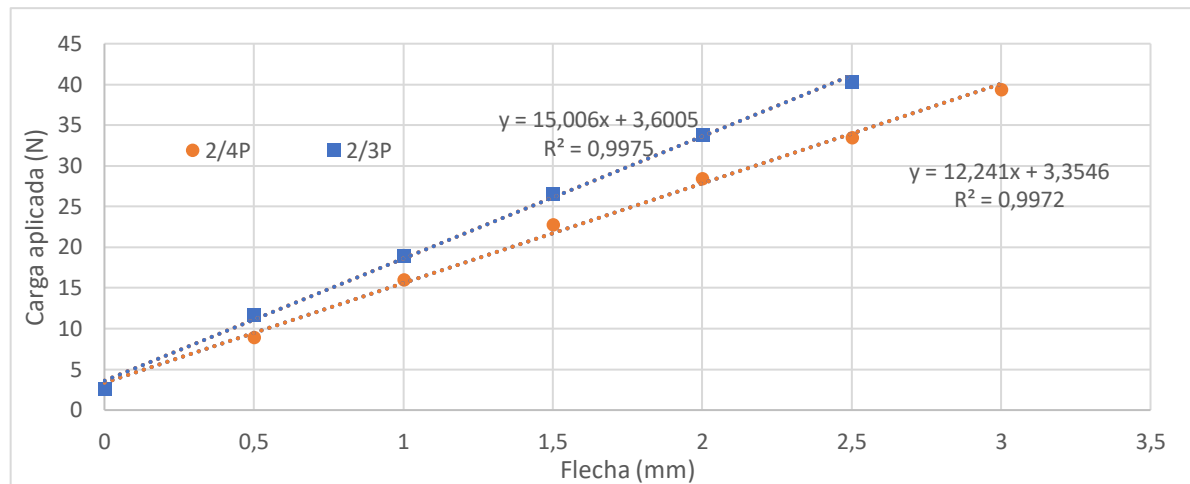


Figura 59 - Gráfico de carga aplicada vs. flecha para o provete C2, nos ensaios de 3P e 4P.

Recorrendo às equações 13 a 15, determinaram-se as tensões de corte máximas do núcleo (τ) e as tensões longitudinais (σ) nas peles (tabela 22).

Tabela 22- Valores de módulo ao corte do núcleo (G), tensão máxima nas peles (σ), e tensão de corte máxima no núcleo (τ), calculados para a estrutura com núcleo de favos cilíndricos.

Provete	$D \times 10^{-4}$ (Nmm ²)	G (MPa)	$\tau_{\text{núcleo 3P}}$ (kPa)	$\tau_{\text{núcleo 4P}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{peles 3P}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{peles 4P}}$ (MPa)
C1 (4P-R)	2,02	0,925	-	99	-	11,04
C2 (3P-R)	2,16	0,872	93	-	10,38	-
C3 (4P-R)	2,01	0,845	-	97	-	10,75
Média	2,02	0,881	93	98	10,38	10,89
DP	0,07	0,033	-	1,3	-	0,15

Relativamente ao módulo de corte médio ($0,881 \pm 0,033$ MPa), observou-se uma diminuição deste quando comparado com SNR ($1,205 \pm 0,037$ MPa), o que pode dever-se à redução da área no plano de corte.

A tensão de corte máxima registada no núcleo foi superior no ensaio 4P-R, pois tal como no caso anterior, o 3P-R levou ao seu esmagamento prematuro a meio vão devido à menor distribuição de carga. Observando as figura 58 A e C em 4P-R, devido a terem sido registadas tensões de corte superiores, resultou em desprendimento das peles do núcleo acompanhada de uma zona (figura 58 C) onde se observou efetivamente rotura do núcleo por esforços de corte. Para o descolamento, terá seguramente contribuído a menor área de colagem comparada com a do núcleo de referência.

As tensões longitudinais presentes nas peles mostram que estas representam, no caso 4P-R, cerca de 23 % da tensão máxima das peles, não comprometendo novamente, a integridade das mesmas.

Sanduiche com núcleo *honeycomb* hexagonal

Foram registadas as dimensões dos provetes do tipo SNHH e obteve-se uma massa específica médio de $297 \pm 1 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 23 - Propriedades dos provetes com núcleo *honeycomb* hexagonal.

Proвете	Espessura (mm)	Largura (mm)	Volume (m ³)	Massa (g)	Massa específica (kg/m ³)
H1	18,61	39,97	3,124E-04	93,1	298
H2	18,53	39,78	3,096E-04	91,5	296
H3	18,52	39,75	3,092E-04	91,5	296
Média	18,55	39,83	3,104E-04	-	297
DP	0,040	0,097	1,430E-06	-	1

A flexão a 3P-R e 4P-R causaram, tal como em SNHC, o aparecimento de fendas resultantes dos esforços de corte (figura 60 A e B). No caso dos provetes H1 e H3 (4P-R) verificou-se a separação das peles ao núcleo quando as forças aplicadas foram de 123,76 e 127,42 N, respetivamente (tabela 21). Esta proximidade entre forças manteve-se até cerca de 60 % da deformação e talvez se possa justificar pela precisão geométrica e dimensional dos favos do núcleo, assim como pelas dimensões muito semelhantes entre os provetes (ver ANEXO H). Relativamente a H2 (3P-R), não ocorreu descolagem das peles quando sujeitas a 120,18 N (tabela 24). O gráfico de força em função da deformação obtido na Instron[®] 5900R[®] pode ser consultado no ANEXO H.

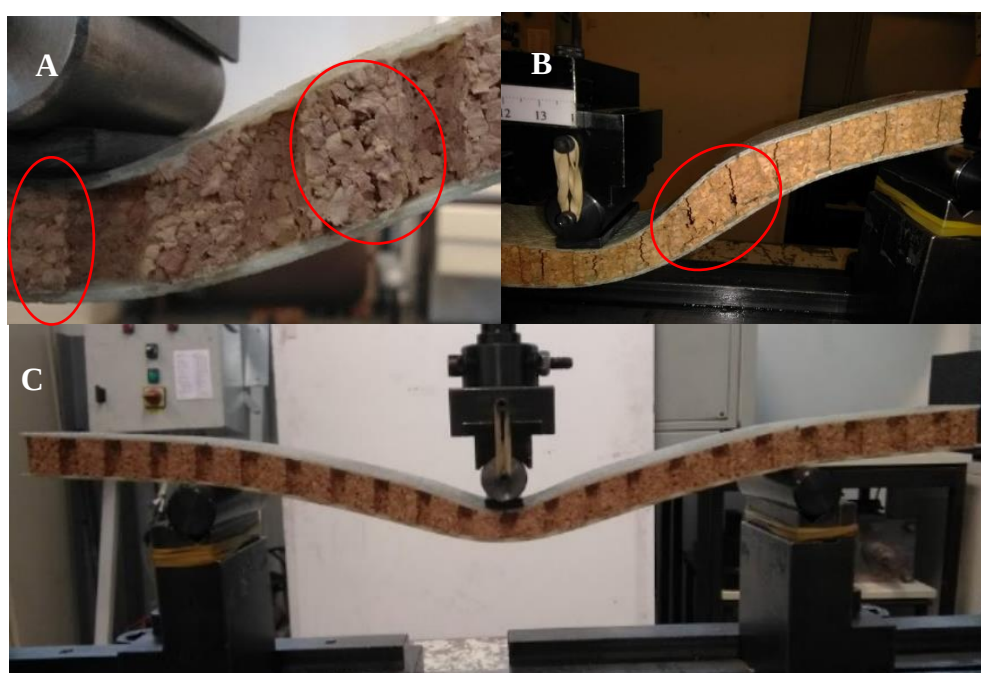
Figura 60 – Flexão a 3P (A e C) e 4P (B) do composto com núcleo *honeycomb* hexagonal.

Tabela 24 - Força máxima (P), deformação (ϵ) para cada ensaio.

Provete	P _{máx.} (N)	ϵ (%)
H1 (3P)	69,02	0,92
H3 (3P)	64,26	0,89
H2 (4P)	64,79	0,83
H1 (4P - R)	127,42	4,28
H3 (4P - R)	123,76	4,49
H2 (3P -R)	120,18	3,75

Usando novamente as equações 10 e 11, simplificou-se o termo P/Δ , estimado até um mesmo valor de força limite, para estimar D e U (figura 61). Recorrendo à equação 12, determinou-se o módulo ao corte do núcleo (G).

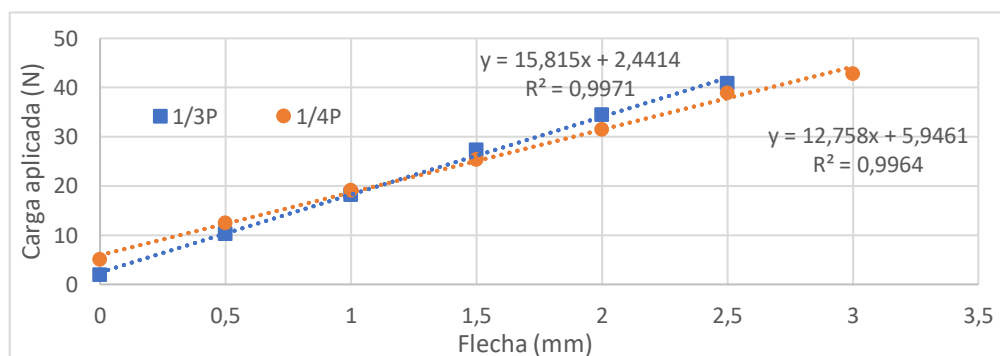


Figura 61 – Gráfico de carga aplicada vs. flecha para o provete H1, nos ensaios de 3P e 4P

Pelas equações 13 a 15 calcularam-se as tensões máximas de corte no núcleo (τ) e as longitudinais (σ) nas peles.

Tabela 25 - Valores de módulo ao corte do núcleo (G), tensão máxima nas peles (σ), e tensão de corte máxima no núcleo (τ) calculados para a estrutura com núcleo de favos hexagonais.

Provete	$D \times 10^{-4}$ (Nmm ²)	G (MPa)	$\tau_{\text{núcleo 3P}}$ (kPa)	$\tau_{\text{núcleo 4P}}$ (kPa)	$\sigma_{\text{peles 3P}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{peles 4P}}$ (MPa)
H1 (4P-R)	2,25	0,897	-	92	-	10,23
H2 (3P-R)	2,31	0,923	87	-	9,72	-
H3 (4P-R)	2,03	0,821	-	90	-	10,02
Média	2,25	0,880	87	91	9,72	10,13
DP	0,12	0,043	-	1,0	-	0,11

Pela análise da tabela anterior verificou-se uma diminuição do módulo de corte médio para o núcleo ($0,882 \pm 0,044$ MPa) comparativamente a SNR ($1,205 \pm 0,037$ MPa). Relativamente a SNHC, os valores médios não apresentam diferença significativa entre si.

No que toca a tensões máximas de corte no núcleo é possível concluir que as tensões presentes nos ensaios 4P-R foram superiores a 3P-R. Pela figura. 60 A, observa-se esmagamento do núcleo na zona do rolete central juntamente com o colapso da pele da face superior. Já no ensaio 4P-R ao invés do esmagamento, observou-se falha por corte no núcleo de forma mais acentuada do que em 3P-R. Assim, no ensaio 4P-R, o ensaio prolongou-se até valores de tensões de corte no núcleo superiores antes de ocorrer colapso do núcleo por compressão.

A tensão longitudinal nas peles (σ_{peles}) para 3P-R e 4P-R, representam apenas cerca de 20% da resistência obtida nos ensaios de tração das peles, e permite afirmar que os ensaios de flexão foram feitos dentro da tensão admissível das peles.

Análise comparativa entre núcleos

Pretende-se agora perceber qual a influência que a massa exerce no módulo ao corte (G) do núcleo. Para isso, fez-se uma análise comparativa entre os núcleos *honeycomb* (cilíndrico, C e hexagonal; H) e o de referência (R) (tabela 26).

Tabela 26 - Comparação de módulo ao corte do núcleo, carga máxima, massa e massa específica entre os núcleos dos compósitos sanduíche.

Núcleo	G (MPa)	ρ (kg/m ³)	Δm rel. R (%)	ΔG rel. R (%)	$P_{\text{máx.média (4P-R)}}$ (N) ⁴	$\Delta P_{\text{média rel.}}$ R (4R-R) (%)
R	1,205 ± 0,037	145,5	0	0	161,435 ± 7,815	0
C	0,883 ± 0,034	90,27	-37,70	-26,72	130,445 ± 2,025	-19,20
H	0,882 ± 0,044	74,33	-48,70	-26,77	125,59 ± 1,83	-22,20

A força máxima média em 4P-R foi de 130,44 ± 2,025 N para o núcleo C e de 125,59 ± 1,83 N para o núcleo H, correspondendo a uma diminuição de 19 e 22 % relativamente ao núcleo de referência (161,435 ± 7,815 N). Considerando o núcleo *honeycomb* cilíndrico, observou-se que a redução de massa que ocorreu com a extração de material foi de 37,7 % e a redução de módulo ao corte foi de 26,72 %. Para o núcleo *honeycomb* hexagonal, a redução foi de 48,7 % para a massa e de 26,77 % para o módulo ao corte. Como a diminuição de massa foi significativamente maior do que a redução de resistência ao corte, pode-se assumir que ambas as configurações em *honeycomb* são vantajosas, quando comparadas com o núcleo de referência sem favos.

Comparando os núcleos de favos cilíndricos e o de favos hexagonais entre si e com o de referência, a redução de massa foi de 11 %. No entanto, a diminuição de módulo (G) ficou em cerca de 0,05 %. Esta pequena diferença do módulo ao corte pode-se justificar com a precisão dimensional e geométrica dos favos hexagonais obtidos por fresagem CNC. Em determinadas aplicações, poderá compensar fresar o *honeycomb* para favorecer a redução de massa e a precisão em detrimento dos custos associados a esse processo.

⁴ Foram considerados para efeitos estatísticos valores máximos de força para ensaios do tipo 4P-R, uma vez que apenas se fez 1 ensaio de 3P-R para cada sanduíche, devido à limitação de material.

4.1.2 Provete normalizados

Estes provetes foram ensaiados à flexão a 3P, segundo a norma ASTM C 393 e com uma diminuição no suporte de 150 para 140 mm, equivalente a um desvio de 6,67 % (ASTM 2000). Na tabela 27 apresentam-se as propriedades obtidas para estes provetes.

Tabela 27 – Propriedades dos provetes normalizados.

Provete	Espessura (mm)	Largura (mm)	Volume (m ³)	Massa (g)	Massa específica (kg/m ³)	Δ massa específica rel. a R (%)
R4	18,60	74,90	2,083E-04	76,4	366,8	0
C4	18,40	73,94	2,046E-04	64,1	313,4	-14,6
H4	18,45	74,22	2,052E-04	61,5	299,7	-18,3

De seguida, analisou-se a força e tensão à força máxima envolvidos nos ensaios a 3P (tabela 28). Os núcleos de furos cilíndricos e hexagonais apresentaram menor capacidade de suportar esforços de compressão, uma vez que a redução da força máxima suportada por estes foi de 56,7 e 61,2 % respetivamente, em relação ao núcleo de referência (tabela 28 e figura 62). Pela análise das propriedades das sanduíches, vê-se que a redução de massa específica de C4 e de H4 em relação a R4 foi de 14,6 % e de 18,3 %, respetivamente. A sanduíche com *honeycomb* hexagonal foi comparada com uma estudada por Giglio, Gilioli e Manes (2012), esta com 19,75 mm espessura composta por peles alumínio e núcleo em NomexTM usadas para fins estruturais tais como fuselagens de aeronaves. Notou-se que essa sanduíche apresenta uma capacidade de suportar cargas semelhantes à dos provetes C4 e H4 (0,3 a 0,4 kN), no entanto, a sua massa específica (91,5 kg/m³) é menor ($\approx 3x$) que a massa específica obtida no *honeycomb* hexagonal desenvolvido (cerca de 300 kg/m³).

Tabela 28 - Força máxima, tensão de flexão, deformação para cada ensaio.

Provete	P _{max} (N)	$\Delta P_{\text{máx}}$ rel. a R (%)	$\sigma_{P \text{ máx.}}$ (MPa)	$\Delta \sigma_{P \text{ máx.}}$ rel. a R (%)
R4	828,6	0,0	6,72	0,0
C4	346,7	-58,2	2,91	-56,7
H4	313,7	-62,1	2,61	-61,2

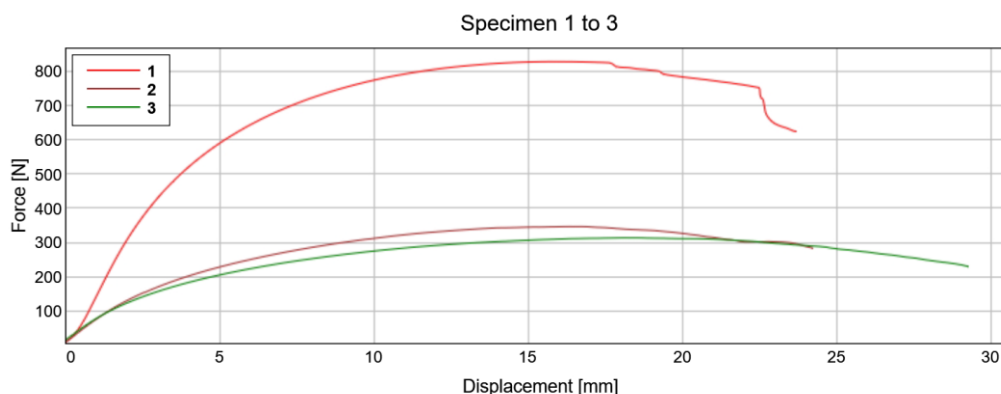


Figura 62 – Gráficos força vs. deslocamento para ensaios 3P com provetes normalizados.

4.2 Compressão

Como foi referido no ponto 3.5.2, os ensaios foram realizados para 3 provetes de núcleo de referência (R) e 3 provetes de núcleo de favos cilíndricos (C), cujas áreas e espessuras estão descritas na tabela 29. Os ensaios realizaram-se até se atingir um deslocamento cerca de 12 mm, correspondendo a 75 % de deformação.

Tabela 29 - Provetes e respetivas dimensões.

Ensaio n°:	Provette	Área (mm ²)	Espessura (mm)
1	R1	51,69 × 49,41	15,90
2	R2	51,52 × 49,87	15,77
3	R3	51,58 × 50,13	15,83
4	C1	50,96 × 49,41	16,02
5	C2	51,12 × 49,36	15,76
6	C3	51,54 × 48,36	15,75

Observou-se uma menor resistência dos provetes do tipo C, comparativamente aos do tipo R, devido à sua menor secção resistente (figura 63 A e B).

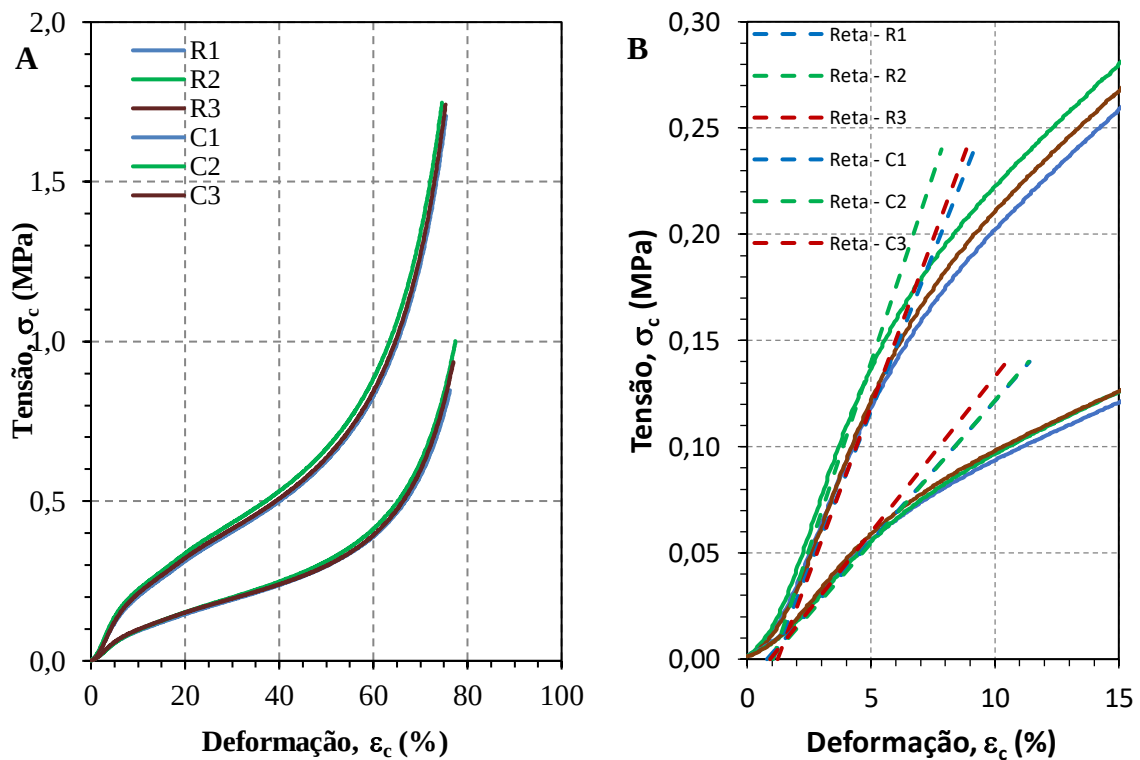


Figura 63 – A) Gráfico tensão (σ_c) vs. deformação (ϵ_c) de R1 a R3 e de C1 a C3 ao longo do ensaio; B) Ampliação do gráfico de tensão (σ_c) vs. deformação (ϵ_c) até 15 % de deformação.

Calcularam-se valores de módulo de compressão (E_c) para os dois tipos de provetes, estando as retas utilizadas para a sua determinação assinaladas no gráfico da figura 63 B. O módulo de elasticidade à compressão foi estimado para gamas de deformação de 1,5 – 2,5 %, 2,5 – 3,5 % e 3,5 – 4,5 %. Na gama 2,5 - 3,5 %, obtiveram-se os valores máximos utilizados como representativos de E_c (tabela 30). A tensão de cedência definida a 10 % de deformação ($\sigma_{10\%}$), um valor geralmente determinado para esta classe de materiais, foi também calculada, e os resultados obtidos estão incluídos nas tabelas seguintes (tabela 30 e 31).

Tabela 30 - Valores de módulo de compressão e tensões de cedência a 0,2 % e 10 % de deformação para provetes de referência.

Proвете	R1	R2	R3	Média	DP
E_c (MPa)	2,95	3,52	3,15	3,21	0,29
$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)	126	128	134	129	4
$\sigma_{10\%}$ (kPa)	202	223	210	212	10

Tabela 31 - Valores de módulo de compressão e tensões de cedência a 0,2 % a 10 % de deformação para provetes de favos cilíndricos.

Proвете	C1	C2	C3	Média	DP
E_c (MPa)	1,32	1,34	1,47	1,38	0,08
$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)	58	58	56	57	1
$\sigma_{10\%}$ (kPa)	93	97	98	96	2

Analisando a tabela 32, percebeu-se que, para os valores médios do núcleo cilíndrico (provetes do tipo C), houve uma redução do módulo de compressão de 54,1 %, acompanhada com por uma redução de massa de 37,8 %, comparativamente a R. A diminuição significativa de módulo sendo superior à diminuição em massa, pode explicar a introdução de danos e instabilidade das paredes. Em termos de tensão a 10 % de deformação, essa redução foi de 54,3 %, muito semelhante à redução de E_c , que se pode dever à diminuição da massa dos provetes que levou à encurvadura e instabilidade das paredes (assinalado a vermelho na figura 64). No caso da tensão média a 0,2 %, verificou-se uma diminuição de 55,7 % do núcleo de favos cilíndricos (57 ± 1 MPa), relativamente ao núcleo de referência (129 ± 4 MPa). Esta diminuição é muito próxima daquela que se observou a 10 %, o que confirmou a consistência dos resultados.

Tabela 32 - Comparação de valores médios dos provetes do tipo C e R.

Valores médios do tipo de provete	E_c (MPa)	$\Delta E_{c \text{ rel. R}}$ (%)	$\sigma_{10\%}$ (kPa)	$\Delta \sigma_{10\% \text{ rel. R}}$ (%)	$\Delta m_{\text{rel. R}}$ (%)
R	$3,21 \pm 0,29$	0,00	212 ± 10	0,00	0,00
C	$1,47 \pm 0,08$	-54,1	96 ± 2	-54,6	-37,8

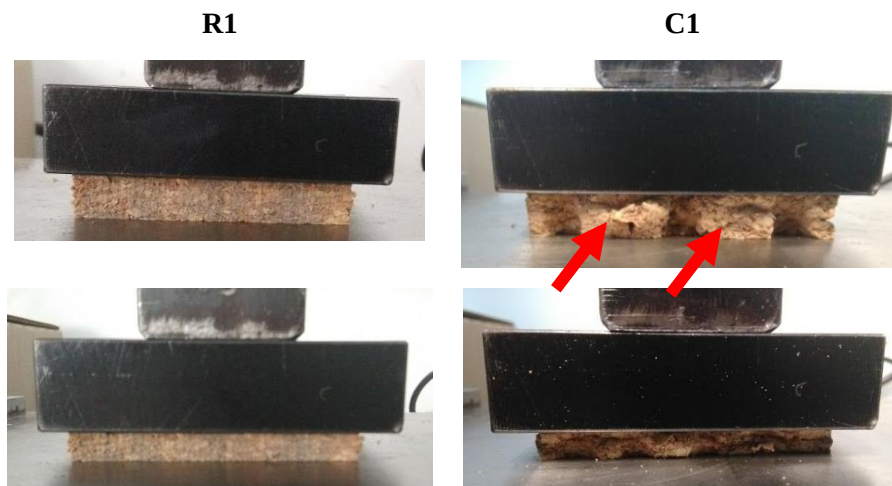


Figura 64 - Deformação dos provetes R1 e C1 em duas fases distintas (intermédia e final).

No final do ensaio, registou-se a variação da espessura dos provetes R1 e C1, durante as 24 horas seguintes (figura 65), com o objetivo de avaliar diferenças na recuperação das duas estruturas. As espessuras iniciais dos provetes eram de 15,90 mm e 16,02 mm (R1 e C1, respetivamente).

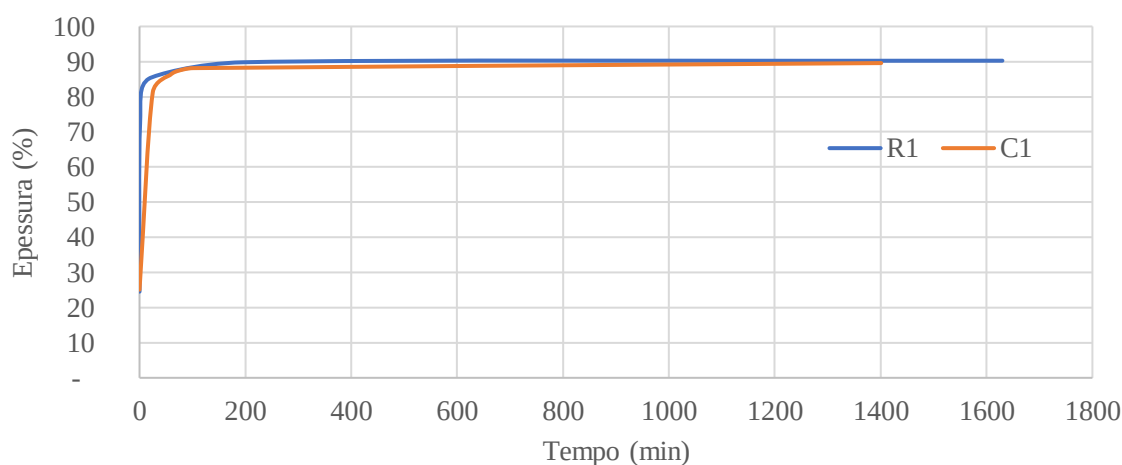


Figura 65 - Recuperação dos provetes R1 e C1, 24 horas após os ensaios de compressão.

O R1 apresenta uma recuperação mais rápida da espessura comparativamente ao C1, o que se pode justificar com a menor ocorrência de dano.

Ao fim de 24 horas, os provetes R1 e C1 apresentavam uma deformação de 9,7 e 10,4 %, respetivamente. A introdução de dano em C1, com rotura de paredes entre favos, que pode explicar a maior deformação permanente quando comparado com R1.

4.3 Análise de materiais concorrentes

Como já foi referido, a cortiça trata-se de um material natural com crescente implementação em vários setores devido às suas características e às crescentes preocupações ambientais (Gil 1998a). Pretende-se agora perceber e comparar com outros materiais, as sanduíches e os núcleos de cortiça desenvolvidos.

Os ensaios de flexão e compressão permitiram determinar o módulo ao corte (G) e o módulo de compressão (E_c), para os 3 tipos de núcleo. Estes valores, juntamente com a massa específica, foram inseridos no software CES Edupack[®] pelo comando *add record*. Criaram-se vários gráficos com várias propriedades gerais (módulo ao corte, módulo de compressão, condutividade térmica e pegada de CO₂) em função da massa específica. A redução de peso é uma das preocupações em aplicações de máquinas ou componentes em movimento. Dessa forma, a massa específica foi a base de comparação dos materiais desenvolvidos (SNR, SNHC, SNHH), que nos gráficos obtidos pelo CES Edupack[®], se inserem no conjunto designado por *cork composite*, cujos valores se situam entre 296 a 376 kg/m³. Os núcleos *honeycomb* considerados para efeitos de comparação designaram-se como *cork hexagonal honeycomb core* e *cork cylindrical honeycomb core*.

Observou-se que, os 3 compósitos em cortiça apresentam valores de massa específica próximos de espumas poliméricas rígidas de alta densidade e de espumas metálicas, tais como, as de alumínio (figura 66). Já no que toca a módulo de corte, os compósitos situam-se próximos de espumas poliméricas flexíveis de baixa densidade. Já os núcleos de favos hexagonais e cilíndricos (74 e 93 kg/m³) são equiparáveis a espumas poliméricas flexíveis e rígidas de média densidade, respetivamente (figura 66).

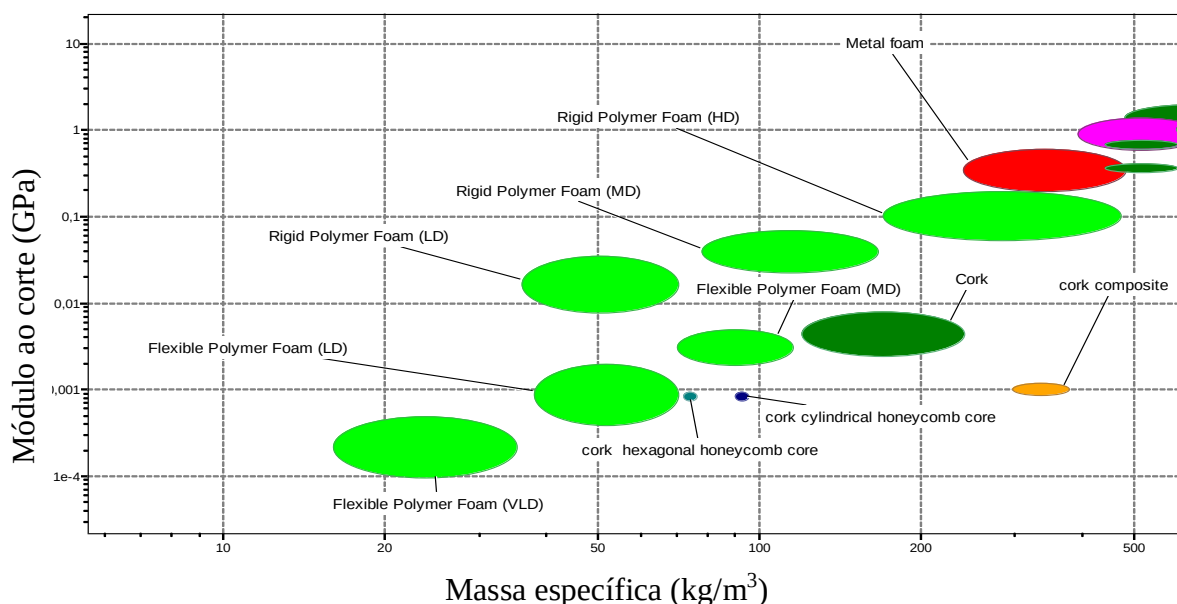


Figura 66 - Comparação do módulo de corte dos compósitos desenvolvidos (*cork composite*) e dos núcleos de *honeycomb* cilíndrico e hexagonal com outros materiais (CES Edupack).

Pela análise da figura 67, percebe-se que, o núcleo de referência - aglomerado de cortiça NL10, apresenta massas específicas próximas das espumas poliméricas rígidas de média densidade e valores de módulo de compressão ($3,21 \pm 0,29$ MPa) equiparáveis a: espumas metálicas,

poliméricas rígidas de média e alta densidade e ainda pinho. O módulo de compressão calculado para o NL10, encontra-se ligeiramente acima comparativamente ao da cortiça (*cork*). Já o núcleo de favos cilíndricos apresenta módulo de compressão de $1,47 \pm 0,08$ MPa, próximo do de espumas metálicas, cerâmicas e poliméricas rígidas de baixa densidade e ainda do couro.

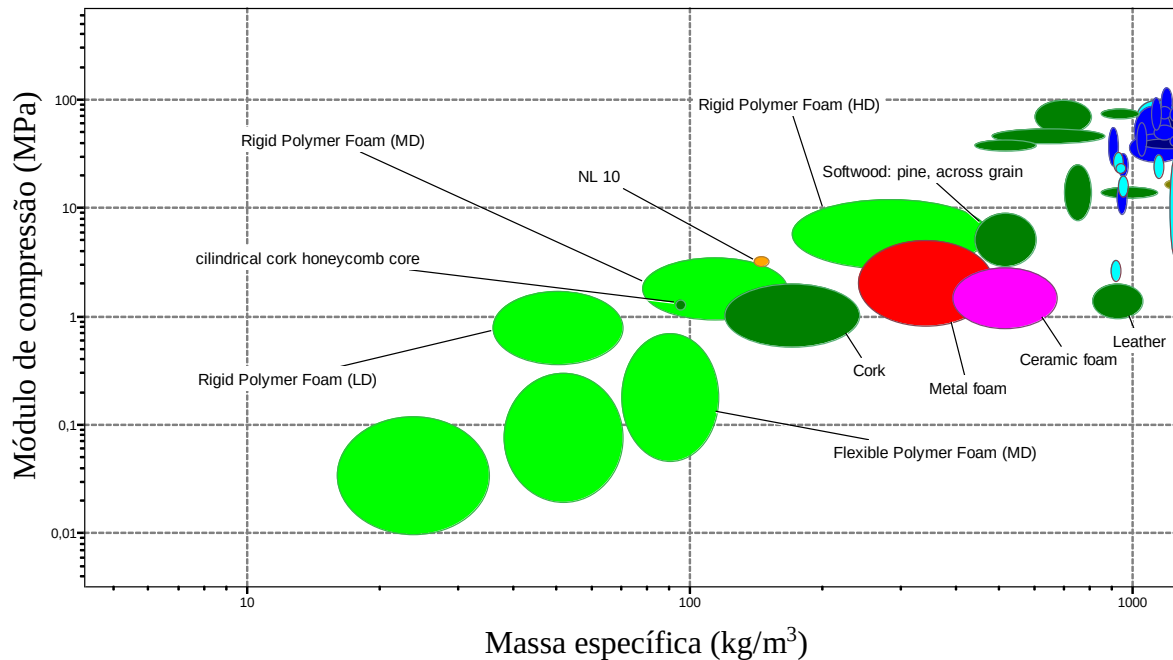


Figura 67 - Gráfico módulo de compressão vs. massa específica para os núcleos do tipo R (cortiça NL10) e núcleo com favos cilíndricos.

As características de isolamento do núcleo de favos hexagonais, permitem que este tenha uma condutividade térmica inferior à da cortiça (NL10), o que aliado à sua baixa densidade, pode representar uma solução onde, isolamento, baixa pegada ecológica e baixa massa específica sejam atributos chave. No caso do *honeycomb* hexagonal, como cerca de 49 % do mesmo é composto por ar ($0,023 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), a condutividade térmica do material reduz cerca de 20 % (de $0,044$ para $0,035 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), colocando-o no topo dos materiais isolantes, juntamente com espumas poliméricas rígidas de baixa densidade (figura 68).

Uma das grandes vantagens da produção de cortiça está na grande capacidade de absorção de CO_2 por parte do sobreiro (Gil 1998b). Este facto faz da cortiça um material natural com impacto ambiental reduzido. A sanduíche desenvolvida tem na sua constituição peles em compósito de FV, estas representam cerca de 42 % do compósito (em massa) e, assim, no que toca a quilogramas de CO_2 produzidos por quilograma de compósito, colocam este material numa posição intermédia entre materiais naturais como o bambu e papel, e os derivados de petróleo (ver figura 69). Pode dizer-se que as peles aumentam a pegada ecológica da sanduíche.

Já no caso dos *honeycombs* de cortiça, a sua pegada ecológica pode depender do processo usado no seu fabrico. Caso esse *honeycomb* seja realizado por um processo semelhante ao do aglomerado de cortiça, o seu impacto pode ser menor do que quando é usada a maquinaria que acarreta gastos energéticos superiores.

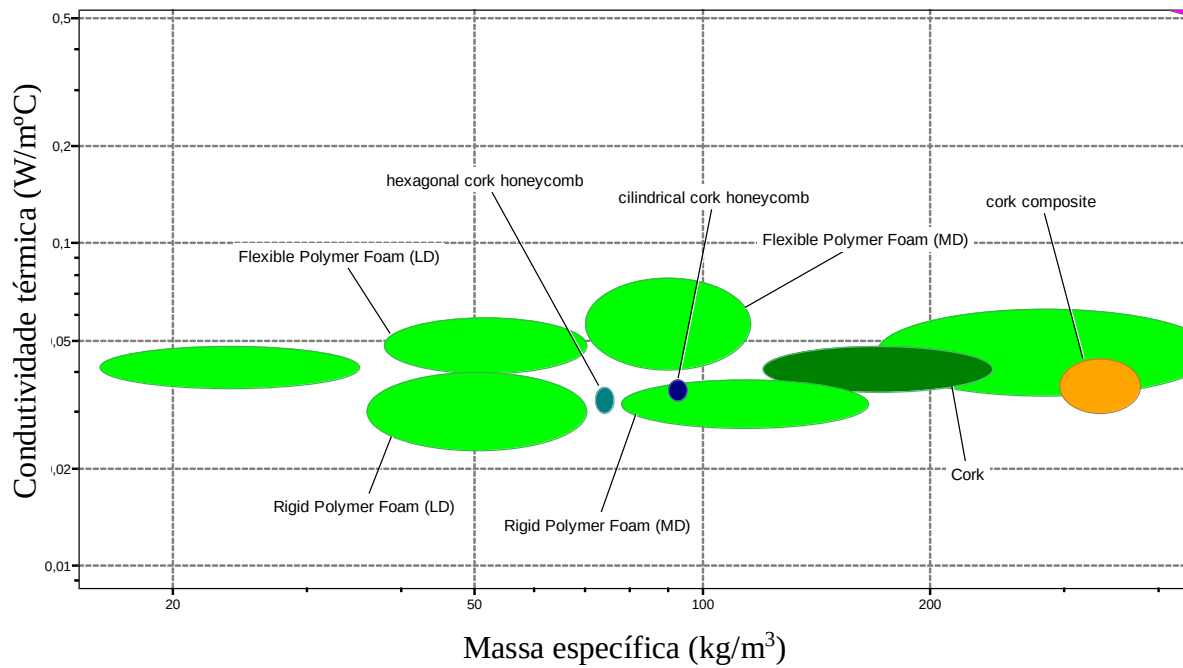


Figura 68 - Comparação da condutividade térmica (W/m°C) dos materiais desenvolvidos.

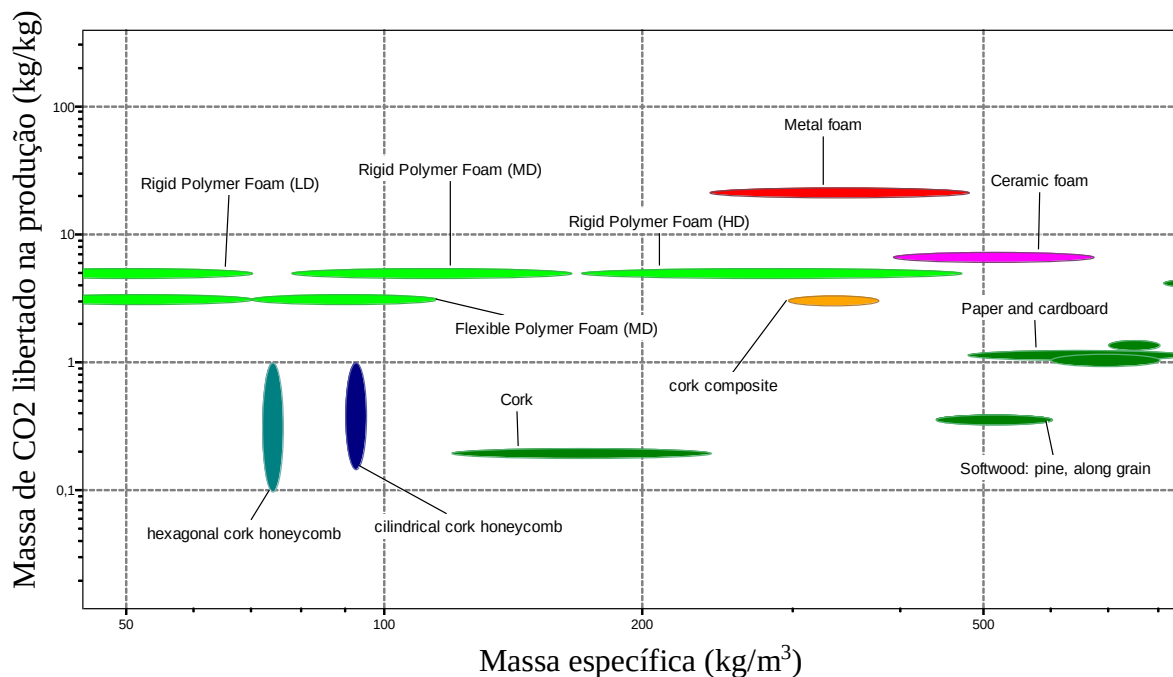


Figura 69 - Comparação da pegada ecológica (kg de CO₂ por kg de material produzido) dos materiais desenvolvidos.

O principal entrave à maior difusão do uso da cortiça é o seu custo que a torna num dos materiais naturais mais caros. Os custos estão naturalmente associados à limitação de produtividade do sobreiro, cuja extração tem periodicidade de 9 anos, e à mão de obra usada no próprio processo de extração (Gil 1998a). Para além disso, a fibra de vidro, o processo de obtenção do núcleo *honeycomb* em cortiça e os processos de colagem com adesivo contribuem para o encarecimento deste compósito.

Conclusões

A elaboração deste trabalho teve como objetivo a criação de um compósito em sanduíche com núcleo *honeycomb* em cortiça e a sua caracterização. A cortiça é um material natural que provém do sobreiro (*Quercus suber* L.) e é extraída com uma periodicidade legal de 9 anos. Portugal é um dos maiores produtores e exportadores de cortiça do mundo, pelo que, o desenvolvimento de tecnologias que envolvam a cortiça poderá trazer vantagens para a economia do país. Para além disso, a não emissão de poluentes na sua obtenção, faz deste material uma opção interessante e inovadora do ponto de vista do desenvolvimento sustentável.

Macroscopicamente, a cortiça é um material leve, elástico praticamente impermeável a líquidos e gases, e com baixo nível de decomposição. Do ponto de vista microscópico, a cortiça é constituída por camadas de células de aspeto alveolar, com forma aproximadamente hexagonal, cheias de um gás, que ocupa cerca de 90 % do volume. Quando sujeitas a compressão, as células encurvam e dobram, não conferindo à cortiça praticamente qualquer expansão lateral. O gás comprimido existente no interior das células promove a restituição da forma (cerca de 90 a 99,9 %)⁵. As propriedades únicas fazem deste material uma opção apetecível para vários setores de mercado, nomeadamente: indústria automóvel, indústria de calçado, indústria aeronáutica, construção civil, entre outras.

As estruturas em forma de favo de abelha ou *honeycomb* são porosas e têm como objetivo, diminuir a densidade de um dado material, contribuindo para o seu baixo peso. Os *honeycombs* são importantes, não só do ponto de vista da redução de peso, como de isolamento e absorção energética. Estes são geralmente usados sob a forma de núcleos de sanduíches e permitem aumentar significativamente a inércia da estrutura sem acréscimo significativo de peso. As sanduíches são vulgarmente compostas por duas peles finas coladas nas faces do núcleo, e que apresentam comparativamente a esse, muito maior resistência. Numa sanduíche sujeita à flexão, o núcleo tende a suportar sobretudo esforços de corte e as peles são sujeitas a esforços de tração e compressão. Mediante as propriedades do *honeycomb* este pode ser usado nas mais diversas aplicações, nomeadamente em camuflagem de aeronaves, partes estruturais de automóveis, entre outros.

Nas sanduíches criadas usaram-se peles em compósito de resina de epóxico reforçada com fibra de vidro e núcleos em aglomerado de cortiça – simples contínuo, com favos cilíndricos e com favos hexagonais). Entre os três tipos de aglomerados, comercializados pela Amorim Cork Composites, (NL10, NL 20 e NL 25) selecionou-se o NL10 após estudo de otimização envolvendo cálculos com auxílio do software Abaqus CAE® e de uma análise matemática. Esse estudo consistiu em manter igual a massa final de três combinações de *honeycomb* de diferentes espessuras de parede com os três tipos de aglomerado. A combinação ótima foi obtida para o aglomerado NL10 com favos de 8,0 mm de lado e 3,0 mm de espessura de parede.

Relativamente aos processos de criação do *honeycomb*, a furação da cortiça NL10 não foi possível através do punção devido à sua baixa massa específica e grão na ordem dos 3 mm, dando origem a desagregação prematura de grânulos. A furação manual a 2700 rpm apresentou, não só o inconveniente da imprecisão manual, mas também uma velocidade de rotação

⁵ Valores baseados no ensaio de compressão efetuado e para as deformações aplicadas. Baixos níveis de compressão permitem restituir na totalidade as dimensões iniciais.

relativamente baixa, traduzindo-se no arranque de grânulos e irregularidade da superfície na saída da broca. A fresagem CNC do *honeycomb* deu origem a uma peça de elevada precisão ($\pm 5\mu\text{m}$) e acabamento. No entanto, este processo é bastante moroso chegando a demorar, para as dimensões referidas, cerca de 8h. A SNHH, ao ter uma grande precisão dimensional permitiu uma melhor distribuição dos esforços com um atenuamento da concentração de tensões durante os ensaios de flexão. Quando se pretende um núcleo em cortiça eficiente em termos de resistência e redução de massa, este método pode ser usado. O corte a jato de água CNC, apesar de mais rápido em cerca de 3h do que a fresagem CNC, dá origem a imprecisões dimensionais superiores, e corte pouco perpendicular às faces. Contudo, atendendo às aplicações dadas à sanduíche poderia ser uma opção para fabrico dos núcleos em *honeycomb*.

As peles da sanduíche foram sujeitas a ensaios de tração para determinar o seu módulo de elasticidade e tensões máximas obtidas. Os valores de médios de 8,69 GPa para o módulo de elasticidade e a tensão máxima de 56,19 MPa, permitiram concluir, após observação ao microscópio, que a qualidade da impregnação da resina terá que ser melhorada.

A caracterização dos núcleos criados passou pela realização de ensaios de flexão de 3 e 4 pontos e, ainda, de compressão.

No que concerne aos ensaios de flexão a 3P e 4P, estes permitiram determinar propriedades mecânicas como módulo ao corte dos núcleo (G), forças máximas (P) em jogo, tensões nas peles (σ) e ainda tensões máximas de corte nos núcleos (τ). Os resultados permitiram concluir que ao passar a cortiça NL10 a *honeycomb* cilíndrico, reduziu-se a sua massa em 37,8 % com uma redução do módulo ao corte de 26,77 %. No caso do núcleo de forma hexagonal, essa a redução de massa chegou a 48,7 % com uma redução de módulo de corte de 26,72 %. A alteração de favo cilíndrico para hexagonal levou a uma redução massa de 37,7 % para 48,7 % com uma redução de apenas 0,05 % no módulo de corte. A introdução de furos no núcleo de cortiça fez, de uma forma geral, reduzir a massa de forma mais significativa do que o módulo de corte. Daqui se conclui, que a introdução de favos no núcleo de cortiça se traduz numa vantagem, mostrando que pode ser uma alternativa em solicitações a flexão. Mediante as aplicações e a relação custo benefício, pode optar-se por núcleos com favos do tipo cilíndrico ou do tipo hexagonal.

Os ensaios de compressão efetuados para o núcleo de SNR e para o de SNHC mostraram que a introdução de furos pode reduzir a massa em 37,7 %, causando uma redução do módulo de compressão de 54 %. Na comparação entre uma solicitação à compressão ou à flexão, percebeu-se que é mais vantajoso aplicar os compósitos com *honeycomb* à flexão, uma vez que a redução de massa se mostrou mais acentuada do que a diminuição do módulo de corte.

No que toca à análise de materiais efetuada pelo CES Edupack[®], conclui-se que os núcleos desenvolvidos apresentam massa específica equiparáveis a espumas poliméricas flexíveis (PU) e rígidas de média densidade. Já as sanduíches com peles em compósito de resina de epóxido reforçada com fibra de vidro, têm massa específica e módulos de compressão próximas das espumas metálicas. A introdução de favos pode fazer diminuir até cerca de 20 % a condutividade térmica do núcleo de cortiça de referência.

A introdução de reforços, como por exemplo tubos de um material mais resistente no interior dos favos, poderia trazer vantagens em termos de resistência mecânica à compressão e ao corte em detrimento do aumento de peso.

Trabalhos futuros

O desenvolvimento de *honeycomb* em cortiça é ainda algo com alguns pontos a explorar, não só no que toca a propriedades do mesmo, assim como aos processos adequados para a sua conceção.

A fresagem CNC tem a desvantagem do tempo de fabrico, para conceber o *honeycomb* numa placa de dimensões 500 por 160 mm, ascender a 10 horas. Um método que poderia ser estudado para o desenvolvimento de um *honeycomb* de cortiça, seria a criação de um molde com uma cavidade em *honeycomb*, onde fossem inseridos grânulos ou pó de cortiça, juntamente com um aglomerante. Esses grânulos seriam prensados por um macho *honeycomb* reproduzindo o aglomerado de cortiça com favos. As grandes vantagens de um processo que envolvesse um molde seriam: a diminuição do tempo de processamento, a boa precisão dimensional e o bom acabamento garantido pelo molde. No entanto, os custos ligados à conceção de um molde para este fim podem, dependendo da série, constituir uma desvantagem. O corte a jato de água poderia também ser mais explorado, uma vez que traz vantagens na rapidez de corte e na recolha do material extraído em detrimento da precisão dimensional.

Seria também interessante fazer um estudo aprofundado das propriedades térmicas, acústicas e vibratórias das sanduíches desenvolvidas neste trabalho, em especial as SNHH e SNHC, de forma a perceber que vantagens ou desvantagens oferece, relativamente a outros materiais.

Poderia ainda ser realizado um estudo de propriedades mecânicas de sanduíches com núcleo *honeycomb* de cortiça com peles constituídas com outros materiais, tais como, por exemplo, compósito de fibra de carbono ou alumínio. A introdução de peles em compósito de fibra de vidro faz aumentar a pegada ecológica da sanduíche, pelo que se poderiam encontrar alternativas a este tipo de peles.

A criação de uma sanduíche com núcleo de favos auxéticos em cortiça poderia ser explorada, percebendo de que forma o seu coeficiente de Poisson negativo traria vantagens em termos de resistência mecânica em diferentes tipos de solicitação.

Referências

- Arteiro, Albertino, Ana LMA Reis, Paulo JRO Nóvoa, Lucas FM Silva, Marc Zupan e António T Marques. 2013. "Low velocity impact and flexural performance of sandwich structures with cork and polymer foam cores". *Ciência & Tecnologia dos Materiais* 25, no. 2: 79-84.
- Arteiro, Albertino e Ana Luisa Reis. 2011. *Cork Cored Sandwich Structures, Damage Tolerance Evaluation*.
- ASTM. 1994. "C365, Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores". *ASTM* 94.
- . 2000. "C393-00, Standard test method for flexural properties of sandwich constructions". *American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA*.
- . 2006. "D7250, Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness. ASTM International". *ASTM* 18: 68.
- Baumeister, J, J Banhart e M1 Weber. 1997. "Aluminium foams for transport industry". *Materials & design* 18, no. 4-6: 217-20.
- Bonanno, A, V Crupi, G Epasto, E Guglielmino e G Palomba. 2018. "Aluminum honeycomb sandwich for protective structures of earth moving machines". *Procedia Structural Integrity* 8: 332-44.
- Crouvisier-Urien, Kevin, Jean-Pierre Bellat, Régis D Gougeon e Thomas Karbowiak. 2018. "Mechanical properties of agglomerated cork stoppers for sparkling wines: Influence of adhesive and cork particle size". *Composite Structures* 203: 789-96.
- da Silva, Sara P Magalhães, Paulo Silva Lima e José Martinho Oliveira. 2016. "Rheological behaviour of cork-polymer composites for injection moulding". *Composites Part B: Engineering* 90: 172-78.
- Davies, GJ e Shu Zhen. 1983. "Metallic foams: their production, properties and applications". *Journal of Materials science* 18, no. 7: 1899-911.
- Duan, Shengyu, Yong Tao, Hongshuai Lei, Weibin Wen, Jun Liang e Daining Fang. 2018. "Enhanced out-of-plane compressive strength and energy absorption of 3D printed square and hexagonal honeycombs with variable-thickness cell edges". *Extreme Mechanics Letters* 18: 9-18.
- Duarte, IMA, AJM Ferreira, MJG Santos e J Banhart. 2005. "Aplicações de Espumas de Ligas de Alumínio no Sector de Transportes". Comunicação apresentada em 6º Congresso Nacional em Mecânica Experimental.
- Duarte, Isabel Maria Alexandrino. 2005. "Espumas metálicas: processo de fabrico, caracterização e simulação numérica". Tese de Doutoramento, Repositório Aberto da Universidade do Porto, Universidade do Porto.
- Fernandes, Emanuel M, Vitor M Correlo, João F Mano e Rui L Reis. 2015. "Cork–polymer biocomposites: Mechanical, structural and thermal properties". *Materials & Design* 82: 282-89.
- Garret, A. 1946. "Cortiça aplicada, Ed". *Altura, Porto*.
- Giglio, Marco, Andrea Gilioli e Andrea Manes. 2012. "Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core". *Computational Materials Science* 56: 69-78.
- Gil, Luis. 1998b. Cortiça, Produção, Tecnologia e Aplicação, INETI. Lisboa.
- . 2005. "Rev. Indústria & Ambiente". 10-11.
- Gil, Luís. 1998a. "A cortiça como material de construção-Manual Técnico". *APCOR–Associação Portuguesa de Cortiça, Santa Maria de Lamas*.
- . 2009. "Cork composites: a review". *Materials* 2, no. 3: 776-89.
- Gomes, Frederico Alpoim, João Santos e Danielle Gomes. 2014. *Compósitos com núcleos de cortiça, Estrutura Honeycomb*. Sistemas Compósitos, MIEM: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Hedayati, R, M Sadighi, M Mohammadi-Aghdam e AA Zadpoor. 2016a. "Effect of mass multiple counting on the elastic properties of open-cell regular porous biomaterials". *Materials & Design* 89: 9-20.
- . 2016b. "Mechanical behavior of additively manufactured porous biomaterials made from truncated cuboctahedron unit cells". *International Journal of Mechanical Sciences* 106: 19-38.

- . 2016c. "Mechanical properties of regular porous biomaterials made from truncated cube repeating unit cells: Analytical solutions and computational models". *Materials Science and Engineering: C* 60: 163-83.
- . 2017. "Analytical relationships for the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials based on octahedral unit cells". *Applied Mathematical Modelling* 46: 408-22.
- Horrocks, A Richard e Subhash C Anand. 2000. *Handbook of technical textiles*. Elsevier.
- Hosseiniabadi, H Goodarzi, R Bagheri, L Avila Gray, V Altstädt e K Drechsler. 2017. "Plasticity in polymeric honeycombs made by photo-polymerization and nozzle based 3D-printing". *Polymer Testing* 63: 163-67.
- Hou, Y, R Neville, F Scarpa, C Remillat, B Gu e M Ruzzene. 2014. "Graded conventional-auxetic Kirigami sandwich structures: Flatwise compression and edgewise loading". *Composites Part B: Engineering* 59: 33-42.
- Huo, Shuping, Can Jin, Guifeng Liu, Jian Chen, Guomin Wu e Zhenwu Kong. 2018. "Preparation and properties of biobased autocatalytic polyols and their polyurethane foams". *Polymer Degradation and Stability*.
- ISO. 1996. "ISO 1172, Textile-glass-reinforced plastics-Prepregs, moulding compounds and laminates-Determination of the textile-glass and mineral-filler content-Calcination methods".
- . 2012. "ISO 527-2, Plastiques-Détermination des propriétés en traction-Partie". 2.
- Kassandra. 2012. <https://pt.depositphotos.com/>.
https://st.depositphotos.com/1542879/1310/i/950/depositphotos_13106517-stock-photo-holzstapel-korkeiche-stack-of-wood.jpg.
- Lopes, Inês Abreu Freire. 2009. "Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos: produção de tampa de bagageira para autocarro". Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto. <http://hdl.handle.net/10216/58809>.
- Lusa. 2017. "Indústria Exportações de cortiça sobem 4% para 748 milhões até Setembro". *Jornal de Negócios*, 25/11/2017.
<https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/industria/detalhe/exportacoes-de-cortica-sobem-4-para-748-milhoes-ate-setembro>.
- Miranda, Isabel, Jorge Gominho e Helena Pereira. 2013. "Cellular structure and chemical composition of cork from the Chinese cork oak (*Quercus variabilis*)". *Journal of wood science* 59, no. 1: 1-9.
- Moongkhamklang, P, VS Deshpande e HNG Wadley. 2010. "The compressive and shear response of titanium matrix composite lattice structures". *Acta Materialia* 58, no. 8: 2822-35.
- Pereira, H. 1988. "Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L". *Wood science and technology* 22, no. 3: 211-18.
- Pinto-Correia, Teresa e José Mira Potes. 2013. "Livro verde dos montados".
- Saha, MC, E Kabir e S Jeelani. 2008. "Study of debond fracture toughness of sandwich composites with nanophased core". *Materials Letters* 62, no. 4-5: 567-70.
- Sánchez-Sáez, Sonia, Enrique Barbero e J Cirne. 2011. "Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts". *Materials Letters* 65, no. 14: 2152-54.
- Sargianis, James, Hyung-ick Kim e Jonghwan Suhr. 2012. "Natural cork agglomerate employed as an environmentally friendly solution for quiet sandwich composites". *Scientific reports* 2: 403.
- Silva, Laura da. 2016. "A PAC e os apoios públicos à renovação e expansão da área do sobreiro: o caso português: o caso português". Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Economia e Gestão.
- Silva, SP, MA Sabino, EM Fernandes, VM Correlo, LF Boesel e RL Reis. 2005. "Cork: properties, capabilities and applications". *International Materials Reviews* 50, no. 6: 345-65.
- Uddin, Nasim, Uday Vaidya, Muhammad Shohel e JC Serrano-Perez. 2004. "Cost-effective bridge girder strengthening using vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM)". *Advanced Composite Materials* 13, no. 3-4: 255-81.
- Venkataraman, Satchi, Luciano Lamberti, Raphael T Haftka, Theodore F %J Journal of spacecraft Johnson e rockets. 2003. "Challenges in comparing numerical solutions for optimum weights of stiffened shells". 40, no. 2: 183-92.

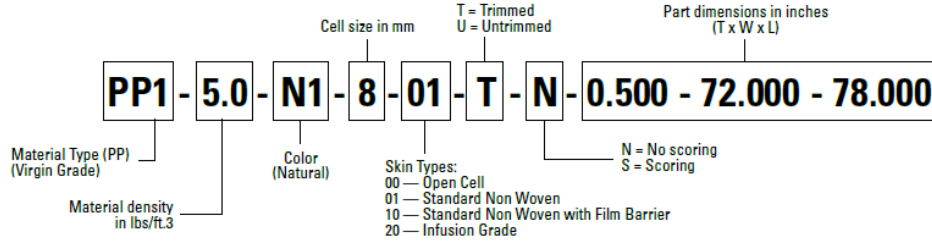
- Wu, Yinghan, Qiang Liu, Jie Fu, Qing Li e David Hui. 2017. "Dynamic crash responses of bio-inspired aluminum honeycomb sandwich structures with CFRP panels". *Composites Part B: Engineering* 121: 122-33.
- Zhang, Qiancheng, Xiaohu Yang, Peng Li, Guoyou Huang, Shangsheng Feng, Cheng Shen, Bin Han, et al. 2015. "Bioinspired engineering of honeycomb structure—Using nature to inspire human innovation". *Progress in Materials Science* 74: 332-400.
- Zhang, Yanqin, Qiang Liu, Zhaohe He, Zhijian Zong e Jianguang Fang. 2019. "Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with Expanded Polypropylene foam". *Composites Part B: Engineering* 156: 17-27.

ANEXOS

ANEXO A: Catálogo Plascore® - PP; PC; PN1; PN2; PK2.

PP polypropylene honeycomb is specified as follows:

Material - Cell Size - Color - Thickness



PP Honeycomb Core Mechanical Properties

CORE	CELL SIZE		DENSITY		FLATWISE TENSILE ¹		BARE COMPRESSION ²						PLATE SHEAR ³											
							STRENGTH				MODULUS		STRENGTH				MODULUS							
	(in)	(mm)	TYPICAL	MINIMUM	STRENGTH		TYPICAL	MINIMUM	PSI	MPa	PSI	MPa	TYPICAL	MINIMUM	PSI	MPa	TYPICAL	MINIMUM	PSI	MPa	TYPICAL	MINIMUM		
PP1-5.0-N1-8	0.315	8	5	80.0	4.75	75.0	130	0.89	275	1.89	255	1.55	11.5	79.2	9.5	65.4	85	0.58	75	0.52	2.2	15.2	1.7	11.7
PP1-4.0-N1-10	0.395	10	4	64.0	3.8	60.0	120	0.83	180	1.24	140	0.96	10.5	72.3	8.5	58.5	60	0.41	55	0.38	2.0	13.8	1.5	10.3

The data provided is based on the testing of -01 (veil only) version of each core type.

¹ Flatwise Tensile
Tested per ASTM C 297



² Bare Compression
Tested per ASTM C 365



³ Plate Shear
Tested per ASTM C 273



Plascore, Inc., employs a quality management system that is Nadcap, AS9100, ISO 9001 and ISO 14001 certified.

IMPORTANT NOTICE: The information contained in these materials regarding Plascore's products, processes, or equipment, is intended to be up to date, accurate, and complete. However, Plascore cannot warrant that this is always the case. Accordingly, it is a purchaser's or user's responsibility to perform sufficient testing and evaluation to determine the suitability of Plascore's products for a particular purpose. Information in these materials and product specifications does not constitute an offer to sell. Your submission of an order to Plascore constitutes an offer to purchase which, if accepted by Plascore, shall be subject to Plascore's terms and conditions of sale. PLASCORE MAKES NO WARRANTIES OF ANY KIND REGARDING THESE MATERIALS OR INFORMATION, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Plascore owns and shall retain all worldwide rights in its intellectual property, and any other trademarks used in these materials are the property of their respective owners. The information in these materials shall not be construed as an inducement, permission, or recommendation to infringe any patent or other intellectual property rights of any third parties.



PLASCORE®

© 2018 Plascore, Inc. All Rights Reserved. Rev 3.6.18

Corporate Headquarters

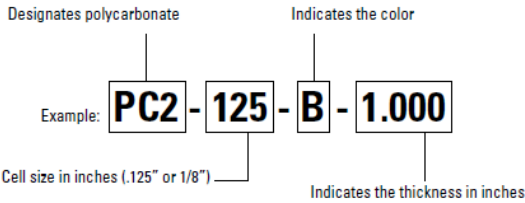
Plascore Incorporated
615 N. Fairview St.
Zeeland, MI 49464-0170
Phone (616) 772-1220
Toll Free (800) 630-9257
Fax (616) 772-1289
Email sales@plascore.com
Web www.plascore.com

Europe

Plascore GmbH & Co KG
Feldborn 6
D-55444 Waldlaubersheim
Germany
Phone +49(0) 6707-9143 0
Fax +49(0) 6707-9143 40
Email sales.europe@plascore.com
Web www.plascore.de

PC2 polycarbonate honeycomb is specified as follows:

Material - Cell Size - Color - Thickness



PC2 Polycarbonate Mechanical Properties					
PLASCORE® Honeycomb Designation			Typical Bare Compressive	Typical Plate Shear	
CORE TYPE	CELL SIZE	DENSITY PCF	STRENGTH PSI	STRENGTH PSI	MODULUS KSI
PC2	1/8	5.0	275	130	3.8
PC2	1/4	4.0	165	80	3.0

Tested per MIL-STD-401 at room temperature.



Plascore, Inc., employs a quality management system that is Nadcap, AS9100, ISO 9001 and ISO 14001 certified.

IMPORTANT NOTICE: The information contained in these materials regarding Plascore's products, processes, or equipment, is intended to be up to date, accurate, and complete. However, Plascore cannot warrant that this is always the case. Accordingly, it is a purchaser's or user's responsibility to perform sufficient testing and evaluation to determine the suitability of Plascore's products for a particular purpose. Information in these materials and product specifications does not constitute an offer to sell. Your submission of an order to Plascore constitutes an offer to purchase which, if accepted by Plascore, shall be subject to Plascore's terms and conditions of sale. PLASCORE MAKES NO WARRANTIES OF ANY KIND REGARDING THESE MATERIALS OR INFORMATION, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Plascore owns and shall retain all worldwide rights in its intellectual property, and any other trademarks used in these materials are the property of their respective owners. The information in these materials shall not be construed as an inducement, permission, or recommendation to infringe any patent or other intellectual property rights of any third parties.



Corporate Headquarters
Plascore Incorporated
615 N. Fairview St.
Zeeland, MI 49464-0170

Europe
Plascore GmbH&CoKG
Feldborn 6
D-55444 Walddraufersheim

PN1 commercial grade aramid fiber honeycomb is specified as follows:

Material - Cell Size - Density - Cell Configuration

Note: 1/8" OV core can be over expanded only to a maximum of 20% over nominal cell size.
 ©Nomex is a registered trademark of E.I. DuPont de Nemours, Wilmington, Delaware.

Designates commercial
grade aramid fiberThe nominal density in
pounds per cubic foot

Example:

PN1 - 3/16 - 3.0 - OV

Cell size in inches

Over expanded cells

PN1 Mechanical Properties

PLASCORE® Honeycomb Designation	DENSITY		COMPRESSIVE (BARE)				PLATE SHEAR "L" DIRECTION						PLATE SHEAR "W" DIRECTION					
			STRENGTH (psi/MPa)				STRENGTH (psi/MPa)				MODULUS (psi/GPa)		STRENGTH (psi/MPa)				MODULUS (psi/GPa)	
			TYP		MIN		TYP		MIN		TYP		TYP		MIN		TYP	
	lb/ft ³	kg/m ³	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	ksi	GPa	psi	MPa	psi	MPa	ksi	GPa
PN1-1/8-3.0	3.0	48	280	1.93	190	1.31	195	1.34	133	0.92	6.4	0.044	95	0.66	70	0.48	3.3	0.023
PN1-1/8-4.0	4.0	64	490	3.38	333	2.29	265	1.83	204	1.41	8.2	0.056	145	1.00	130	0.71	4.5	0.031
PN1-1/8-5.0	5.0	80	670	4.62	513	3.54	310	2.14	252	1.74	10.3	0.071	205	1.41	124	0.85	5.8	0.040
PN1-1/8-6.0	6.0	96	880	6.07	665	4.59	340	2.34	304	2.10	12.3	0.084	235	1.62	143	0.98	7.1	0.049
PN1-3/16-2.0	2.0	32	120	0.83	88	0.61	90	0.62	68	0.47	4.3	0.030	50	0.34	38	0.26	2.4	0.016
PN1-3/16-3.0	3.0	48	290	2.00	190	1.31	175	1.21	133	0.92	5.8	0.040	105	0.72	64	0.44	3.9	0.027
PN1-3/16-4.0	4.0	64	490	3.38	333	2.29	220	1.52	204	1.41	7.8	0.054	160	1.10	106	0.73	5.2	0.036
PN1-3/16-6.0	6.0	96	935	6.45	665	4.59	285	1.97	275	1.90	9.8	0.068	245	1.69	143	0.98	6.7	0.046
PN1-1/4-3.0*	3.0	48	270	1.86	190	1.31	170	1.17	133	0.92	5.4	0.037	105	0.72	64	0.44	4.8	0.033
PN1-1/4-4.0*	4.0	64	470	3.24	333	2.29	225	1.55	204	1.41	6.8	0.047	150	1.03	106	0.73	6.4	0.044
PN1-1/8-3.0-OV-20%	3.0	48	255	1.76	190	1.31	160	1.10	95	0.66	4.8	0.033	110	0.76	76	0.52	3.8	0.026
PN1-1/8-4.0-OV-20%*	4.0	64	480	3.31	333	2.30	225	1.55	150	1.03	6.7	0.046	185	1.28	125	0.86	6.8	0.047
PN1-3/16-2.0-OV	2.0	32	110	0.76	86	0.59	65	0.45	48	0.33	2.2	0.015	65	0.45	38	0.26	3.7	0.026
PN1-3/16-2.5-OV*	2.5	40	190	1.31	162	1.11	90	0.62	59	0.41	2.7	0.019	95	0.66	55	0.38	5.0	0.034
PN1-3/16-3.0-OV	3.0	48	270	1.86	238	1.64	110	0.76	71	0.49	3.2	0.022	130	0.90	71	0.49	6.3	0.043
PN1-3/16-4.0-OV	4.0	64	470	3.24	333	2.29	150	1.03	95	0.66	3.9	0.027	185	1.28	114	0.79	8.9	0.061

* Estimated or interpolated values based on limited testing per MIL-C-81968 at room temperature.

NOTE: The above data is based on variable sample sizes and is subject to change with continues manufacturing and testing of PN1 honeycomb core blocks.



Plascore, Inc., employs a quality management system that is Nadcap, AS9100, ISO 9001 and ISO 14001 certified.

IMPORTANT NOTICE: The information contained in these materials regarding Plascore's products, processes, or equipment, is intended to be up to date, accurate, and complete. However, Plascore cannot warrant that this is always the case. Accordingly, it is a purchaser's or user's responsibility to perform sufficient testing and evaluation to determine the suitability of Plascore's products for a particular purpose. Information in these materials and product specifications does not constitute an offer to sell. Your submission of an order to Plascore constitutes an offer to purchase which, if accepted by Plascore, shall be subject to Plascore's terms and conditions of sale. PLASCORE MAKES NO WARRANTIES OF ANY KIND REGARDING THESE MATERIALS OR INFORMATION, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Plascore owns and shall retain all worldwide rights in its intellectual property, and any other trademarks used in these materials are the property of their respective owners. The information in these materials shall not be construed as an inducement, permission, or recommendation to infringe any patent or other intellectual property rights of any third parties.

**PLASCORE®****Corporate Headquarters****Plascore Incorporated**615 N. Fairview St.
Zeeland, MI 49464-0170

Phone (616) 772-1220

Toll Free (800) 630-9257

Fax (616) 772-1289

Email sales@plascore.com

Web www.plascore.com

Europe**Plascore GmbH&CoKG**Feldborn 6
D-55444 Waldlaubersheim
Germany

Phone +49(0) 6707-9143 0

Fax +49(0) 6707-9143 40

Email sales.europe@plascore.com

Web www.plascore.de

© 2018 Plascore, Inc. All Rights Reserved. Rev 6.19.18

PN2 aerospace grade aramid fiber honeycomb is specified as follows:**Material - Cell Size - Density - Cell Configuration**

Note: 1/8" OV core can be over expanded only to a maximum of 20% over nominal cell size.
 ©Nomex is a registered trademark of E.I. DuPont de Nemours, Wilmington, Delaware.

Designates aerospace
grade aramid fiberThe nominal density in
pounds per cubic foot

Example:

PN2 - 3/16 - 3.0 - OV

Cell size in inches

Over expanded cells

PN2 Mechanical Properties

PLAScore® Honeycomb Designation	DENSITY		COMPRESSIVE (BARE)				PLATE SHEAR "L" DIRECTION						PLATE SHEAR "W" DIRECTION					
			STRENGTH (psi/MPa)				STRENGTH (psi/MPa)				MODULUS (ksi/GPa)		STRENGTH (psi/MPa)				MODULUS (ksi/GPa)	
			TYP		MIN		TYP		MIN		TYP		TYP		MIN		TYP	
	lb/ft³	kg/m³	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	ksi	GPa	psi	MPa	psi	MPa	ksi	GPa
PN2-1/8-1.8	1.8	29	85	0.59	74	0.51	75	0.52	60	0.41	3.8	0.026	45	0.31	32	0.22	1.7	0.012
PN2-1/8-3.0	3.0	48	290	2.00	200	1.38	205	1.41	140	0.97	6.7	0.046	105	0.72	74	0.51	3.5	0.024
PN2-1/8-4.0	4.0	64	515	3.55	350	2.41	275	1.90	215	1.48	8.6	0.059	150	1.04	108	0.74	4.7	0.032
PN2-1/8-5.0	5.0	80	700	4.83	540	3.72	325	2.24	265	1.83	10.8	0.074	215	1.48	130	0.90	6.2	0.042
PN2-1/8-6.0	6.0	96	930	6.41	700	4.83	360	2.48	320	2.21	12.9	0.089	245	1.69	150	1.03	7.5	0.052
PN2-1/8-8.0	8.0	128	1700	11.72	1170	8.07	420	2.90	400	2.76	16.7	0.115	295	2.03	200	1.38	10.6	0.073
PN2-1/8-9.0	9.0	144	2145	14.79	1450	10.00	445	3.07	425	2.93	18.7	0.129	315	2.17	240	1.65	11.2	0.077
PN2-3/16-1.8	1.8	29	90	0.62	74	0.51	70	0.48	50	0.34	3.3	0.023	45	0.31	30	0.21	1.8	0.013
PN2-3/16-2.0	2.0	32	125	0.86	93	0.64	95	0.66	70	0.48	4.5	0.031	55	0.38	40	0.28	2.5	0.017
PN2-3/16-3.0	3.0	48	300	2.07	200	1.38	185	1.28	140	0.97	6.1	0.042	110	0.76	67	0.46	4.1	0.028
PN2-3/16-4.0	4.0	64	515	3.55	350	2.41	235	1.62	215	1.48	8.2	0.056	165	1.14	112	0.77	5.5	0.038
PN2-1/4-1.5	1.5	24	70	0.48	54	0.37	55	0.38	45	0.31	2.8	0.019	35	0.24	23	0.16	1.7	0.012
PN2-1/4-2.0	2.0	32	130	0.90	93	0.64	90	0.62	70	0.48	3.8	0.026	55	0.38	36	0.25	2.4	0.017
PN2-3/8-3.0	3.0	48	287	1.98	217	1.5	194	1.34	145	1.0	6.8	.047	126	.87	73	.50	4.4	.030
PN2-1/8-3.0-OV	3.0	48	270	1.86	200	1.38	165	1.14	100	0.69	5.0	0.035	115	0.79	80	0.55	4.0	0.027
PN2-3/16-1.8-OV	1.8	29	95	0.66	75	0.52	60	0.41	35	0.24	2.2	0.015	60	0.41	36	0.25	3.3	0.023
PN2-3/16-2.0-OV	2.0	32	115	0.79	90	0.62	70	0.48	50	0.34	2.4	0.016	70	0.48	40	0.28	3.9	0.027
PN2-3/16-3.0-OV	3.0	48	280	1.93	250	1.72	115	0.79	75	0.52	3.3	0.023	135	0.93	75	0.52	6.6	0.045
PN2-3/16-4.0-OV	4.0	64	495	3.41	350	2.41	160	1.10	100	0.69	4.1	0.028	195	1.34	120	0.83	9.4	0.065
PN2-3/8-3.0-OV	3.0	48	250	1.72	200	1.38	105	0.72	60	0.41	2.8	0.020	135	0.93	80	0.55	6.5	0.045

NOTE: The above data is based on variable sample sizes and is subject to change with continued manufacturing and testing of PN2 honeycomb core blocks per MIL-C-81986 at room temperature.



Plascore, Inc., employs a quality management system that is Nadcap, AS9100, ISO 9001 and ISO 14001 certified.

IMPORTANT NOTICE: The information contained in these materials regarding Plascore's products, processes, or equipment, is intended to be up to date, accurate, and complete. However, Plascore cannot warrant that this is always the case. Accordingly, it is a purchaser's or user's responsibility to perform sufficient testing and evaluation to determine the suitability of Plascore's products for a particular purpose. Information in these materials and product specifications does not constitute an offer to sell. Your submission of an order to Plascore constitutes an offer to purchase which, if accepted by Plascore, shall be subject to Plascore's terms and conditions of sale. PLAScore MAKES NO WARRANTIES OF ANY KIND REGARDING THESE MATERIALS OR INFORMATION, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Plascore owns and shall retain all worldwide rights in its intellectual property, and any other trademarks used in these materials are the property of their respective owners. The information in these materials shall not be construed as an inducement, permission, or recommendation to infringe any patent or other intellectual property rights of any third parties.

**PLAScore®**

© 2018 Plascore, Inc. All Rights Reserved. Rev 6.19.18

Corporate Headquarters**Plascore Incorporated**615 N. Fairview St.
Zeeland, MI 49464-0170

Phone (616) 772-1220

Toll Free (800) 630-9257

Fax (616) 772-1289

Email sales@plascore.com

Web www.plascore.com

Europe**Plascore GmbH & Co KG**Feldborn 6
D-55444 Walddraubersheim
Germany

Phone +49(0) 6707-9143 0

Fax +49(0) 6707-9143 40

Email sales.europe@plascore.com

Web www.plascore.de

PK2 Kevlar® honeycomb is specified as follows:

Material - Cell Size - Density - Cell Configuration

Note: ®Kevlar and ®Nomex are registered trademarks of E.I. DuPont de Nemours, Wilmington, Delaware.

Designates aerospace grade Kevlar® The nominal density in pounds per cubic foot

Example: **PK2 - 3/16 - 3.0 - HS**

Cell size in inches Higher shear property configuration

PK2 Mechanical Properties*

PLASCORE® Honeycomb Designation	DENSITY		COMPRESSIVE (BARE STRENGTH)		PLATE SHEAR "L" DIRECTION				PLATE SHEAR "W" DIRECTION			
					STRENGTH		MODULUS		STRENGTH		MODULUS	
	lb/ft³	kg/m³	psi	MPa	psi	MPa	ksi	GPa	psi	MPa	ksi	GPa
PK2-1/8-2.5	2.5	40.0	225	1.55	190	1.31	15.0	0.104	115	0.79	8.1	0.056
PK2-1/8-3.0	3.0	48.1	315	2.17	235	1.62	15.6	0.107	140	0.97	9.0	0.062
PK2-1/8-3.0 HS	3.0	48.1	305	2.10	270	1.86	21.0	0.145	160	1.10	12.7	0.088
PK2-1/8-4.5	4.5	72.1	600	4.14	345	2.38	17.2	0.118	215	1.48	9.6	0.066
PK2-1/8-4.5 HS	4.5	72.1	610	4.21	410	2.82	22.3	0.153	235	1.62	13.3	0.092
PK2-1/8-6.0	6.0	96.1	925	6.38	465	3.21	18.7	0.129	290	2.00	10.9	0.075
PK2-1/8-6.0 HS	6.0	96.1	1000	6.89	560	3.86	23.6	0.162	315	2.17	14.6	0.100
PK2-5/32-2.5	2.5	40.0	215	1.48	190	1.31	12.7	0.088	130	0.90	8.7	0.060
PK2-3/16-2.0	2.0	32.0	150	1.03	145	1.00	10.2	0.070	90	0.62	6.0	0.042
PK2-3/16-3.0	3.0	48.1	320	2.21	230	1.58	15.2	0.105	160	1.10	9.0	0.062

* Preliminary or estimated values based on limited testing per MIL-STD-401 at room temperature.



Plascore, Inc., employs a quality management system that is Nadcap, AS9100, ISO 9001 and ISO 14001 certified.

IMPORTANT NOTICE: The information contained in these materials regarding Plascore's products, processes, or equipment, is intended to be up to date, accurate, and complete. However, Plascore cannot warrant that this is always the case. Accordingly, it is a purchaser's or user's responsibility to perform sufficient testing and evaluation to determine the suitability of Plascore's products for a particular purpose. Information in these materials and product specifications does not constitute an offer to sell. Your submission of an order to Plascore constitutes an offer to purchase which, if accepted by Plascore, shall be subject to Plascore's terms and conditions of sale. PLASCORE MAKES NO WARRANTIES OF ANY KIND REGARDING THESE MATERIALS OR INFORMATION, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Plascore owns and shall retain all worldwide rights in its intellectual property, and any other trademarks used in these materials are the property of their respective owners. The information in these materials shall not be construed as an inducement, permission, or recommendation to infringe any patent or other intellectual property rights of any third parties.

**PLASCORE®**

© 2018 Plascore, Inc. All Rights Reserved. Rev 6.19.18

Corporate Headquarters

Plascore Incorporated
615 N. Fairview St.
Zeeland, MI 49464-0170

Phone (616) 772-1220
Toll Free (800) 630-9257
Fax (616) 772-1289
Email sales@plascore.com
Web www.plascore.com

Europe

Plascore GmbH&CoKG
Feldborn 6
D-55444 Walddraubersheim
Germany

Phone +49(0) 6707-9143 0
Fax +49(0) 6707-9143 40
Email sales.europe@plascore.com
Web www.plascore.de

ANEXO B: Catálogo da Amorim Cork Composites® para os aglomerados NL10, 20 e 25.

CORECORK



NL10

Material Data Sheet

Flexibility and excellent conformability make **NL10** possible to be easily integrated into fast production cycles.

This product can be processed by hand layup, vacuum bagging and infusion processes and will withstand manufacturing temperatures up to 150°C.

The unique properties of **NL10** such as: a closed air filled cell structure, low water absorption, rot resistance and high level of noise and vibration attenuation make it an excellent core material for the composites industry - perfectly aligned with the new green classifications.

MECHANICAL PROPERTIES OF THE CORE MATERIAL

DENSITY (Kg/m³)	ASTM C271	120-180
COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)	ASTM C365	0,3*
COMPRESSIVE MODULUS (MPa)	ASTM C365	5,1*
TENSILE STRENGTH (MPa)	ASTM C297	0,6*
SHEAR STRENGTH (MPa)	ASTM C273	0,9*
SHEAR MODULUS (MPa)	ASTM C273	5,9*
THERMAL CONDUCTIVITY (W/mK)	ASTM E1530	0,042*
LOSS FACTOR (at 1KHz)	ASTM E756	0,022*

MECHANICAL PROPERTIES OF THE CORE MATERIAL IN A COMPOSITE ⁽¹⁾

FLEXURAL STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM D790	37*
FLEXURAL MODULUS (GPa)	ASTM D790	3,5*
SHEAR STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM C392	0,8*
SHEAR MODULUS (MPa)	ASTM C392	44*
COMPRESSIVE STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM C365	1,2*
COMPRESSIVE MODULUS (MPa)	ASTM C365	19*
WATER ABSORPTION (%)	ASTM C272	<4*
PANEL DENSITY	-	0,600*

⁽¹⁾ Samples made by Infusion (0,6 bar) with epoxy resin ref. SR8100/cat. ref. SD8824 and two layers of 300g/m² glass fibre roving, on each side, sandwich thickness: 6,5 mm; cure at 60°C; samples tested after 5 days of manufacturing.

* Typical values



Lightweight



Vibration damping



Thermal insulation



Sustainable and energy efficient

KEY FEATURES

- Good drapeability
- Print blocking capability
- Stable material
- Lower resin consumption
- Resin compatibility (Excellent for: Epoxy, Polyester, Phenolic, Vynilester and Polyurethane)

PROCESS GUIDELINES

RESIN UPTAKE (*) (per m² at 1 mm)	270g
MAXIMUM PROCESSING TEMPERATURE	180°C
VACUUM BAG PROCESSING	up to 150°C
AUTOClave CURE PROCESSING	possible
COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION (ASTM E831-06)	aprox. 110 X 10 ⁻⁶ /°C at RT



The data provided in this Material Data Sheet represents typical values. This information is not intended to be used as a purchasing specification and does not imply suitability for use in a specific application. Failure to select the proper sealing product may result in either product damage or personal injury. Please contact Amorim Cork Composites regarding recommendations for specific applications. Amorim Cork Composites expressly disclaims all warranties, including any implied warranties or merchantability or of fitness for a particular purpose. Amorim Cork Composites is not liable for any indirect, special, incidental, consequential, or punitive damages as a result of using the information listed in this material data sheet, any of its brochures, its products or any future use or re-use of them by any person or entity. **For contractual purposes, please request our Product Specifications Sheet (PDA).**

www.amorimcorkcomposites.com

CORECORK



NL20

Material Data Sheet

Flexibility and excellent conformability make **NL20** possible to be easily integrated into fast production cycles.

This product can be processed by hand layup, vacuum bagging and infusion processes and will withstand manufacturing temperatures up to 150°C.

The unique properties of **NL20** such as: a closed air filled cell structure, low water absorption, rot resistance and high level of noise and vibration attenuation make it an excellent material for to the composites industry - perfectly aligned with the new green classifications.

MECHANICAL PROPERTIES OF THE CORE MATERIAL

DENSITY (Kg/m³)	ASTM C271	170-235
COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)	ASTM C365	0,5*
COMPRESSIVE MODULUS (MPa)	ASTM C365	6,0*
TENSILE STRENGTH (MPa)	ASTM C297	0,7*
SHEAR STRENGTH (MPa)	ASTM C273	0,9*
SHEAR MODULUS (MPa)	ASTM C273	5,9*
THERMAL CONDUCTIVITY (W/mK)	ASTM E1530	0,044*
LOSS FACTOR (at 1 KHz)	ASTM E756	0,043*

MECHANICAL PROPERTIES OF THE CORE MATERIAL IN A COMPOSITE ⁽¹⁾

FLEXURAL STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM D790	56*
FLEXURAL MODULUS (GPa)	ASTM D790	4*
SHEAR STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM C392	0,9*
SHEAR MODULUS (MPa)	ASTM C392	41*
COMPRESSIVE STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM C365	2,2*
COMPRESSIVE MODULUS (MPa)	ASTM C365	23*
WATER ABSORPTION (%)	ASTM C272	<4*
PANEL DENSITY	-	0,560*

⁽¹⁾ Samples made by Infusion (0,6 bar) with epoxy resin ref. SR8100/cat ref. SD6824 and two layers of 300g/m² glass fibre roving, on each side, sandwich thickness: 6,5 mm; cure at 60°C; samples tested after 5 days of manufacturing.

* Typical values



Lightweight



Vibration damping



Thermal Insulation



Sustainable and energy efficient

KEY FEATURES

- Good drapeability
- Print blocking capability
- Stable material
- Lower resin consumption
- Resin compatibility (Excelent for: Epoxy, Polyester, Phenolic, Vynilester and Polyurethane)

PROCESS GUIDELINES

RESIN UPTAKE (*) (per m² at 1 mm)	170g
MAXIMUM PROCESSING TEMPERATURE	180°C
VACUUM BAG PROCESSING	up to 150°C
AUTOClave CURE PROCESSING	possible
COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION (ASTM E831-06)	aprox. 110 X 10 ⁻⁶ /°C at RT



The data provided in this Material Data Sheet represents typical values. This information is not intended to be used as a purchasing specification and does not imply suitability for use in a specific application. Failure to select the proper sealing product may result in either product damage or personal injury. Please contact Amorim Cork Composites regarding recommendations for specific applications. Amorim Cork Composites expressly disclaims all warranties, including any implied warranties or merchantability or of fitness for a particular purpose. Amorim Cork Composites is not liable for any indirect, special, incidental, consequential, or punitive damages as a result of using the information listed in this material data sheet, any of its brochures, its products or any future use or re-use of them by any person or entity. **For contractual purposes, please request our Product Specifications Sheet (PDA).**

www.amorimcorkcomposites.com

CORECORK



NL25

Material Data Sheet

Flexibility and excellent conformability make **NL25** possible to be easily integrated into fast production cycles.

This product can be processed by hand layup, vacuum bagging and infusion processes and will withstand manufacturing temperatures up to 150°C.

The unique properties of **NL25** such as: a closed air filled cell structure, low water absorption, rot resistance and high level of noise and vibration attenuation make it an excellent core material for the composites industry - perfectly aligned with the new green classifications.

MECHANICAL PROPERTIES OF THE CORE MATERIAL

DENSITY (Kg/m³)	ASTM C271	220-260
COMPRESSIVE STRENGTH (MPa)	ASTM C365	0,6*
COMPRESSIVE MODULUS (MPa)	ASTM C365	6,9*
TENSILE STRENGTH (MPa)	ASTM C297	0,7*
SHEAR STRENGTH (MPa)	ASTM C273	1,0*
SHEAR MODULUS (MPa)	ASTM C273	6,0*
THERMAL CONDUCTIVITY (W/mK)	ASTM E1530	0,046*
LOSS FACTOR (at 1 KHz)	ASTM E756	0,062*

MECHANICAL PROPERTIES OF THE CORE MATERIAL IN A COMPOSITE ⁽¹⁾

FLEXURAL STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM D790	63*
FLEXURAL MODULUS (GPa)	ASTM D790	4,3*
SHEAR STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM C392	0,9*
SHEAR MODULUS (MPa)	ASTM C392	38*
COMPRESSIVE STRENGTH AT YIELD (MPa)	ASTM C365	2,5*
COMPRESSIVE MODULUS (MPa)	ASTM C365	26*
WATER ABSORPTION (%)	ASTM C272	<4*
PANEL DENSITY	-	0,630*

⁽¹⁾ Samples made by Infusion (0,6 bar) with epoxy resin ref. SR8100/cat ref. SD8824 and two layers of 300g/m² glass fibre roving, on each side, sandwich thickness: 6,5 mm; cure at 60°C; samples tested after 5 days of manufacturing.

* Typical values



Lightweight



Vibration damping



Thermal insulation



Sustainable and energy efficient

KEY FEATURES

- Good drapeability
- Print blocking capability
- Stable material
- Lower resin consumption
- Resin compatibility (Excellent for: Epoxy, Polyester, Phenolic, Vynilester and Polyurethane)



The data provided in this Material Data Sheet represents typical values. This information is not intended to be used as a purchasing specification and does not imply suitability for use in a specific application. Failure to select the proper sealing product may result in either product damage or personal injury. Please contact Amorim Cork Composites regarding recommendations for specific applications. Amorim Cork Composites expressly disclaims all warranties, including any implied warranties or merchantability or of fitness for a particular purpose. Amorim Cork Composites is not liable for any indirect, special, incidental, consequential, or punitive damages as a result of using the information listed in this material data sheet, any of its brochures, its products or any future use or re-use of them by any person or entity. **For contractual purposes, please request our Product Specifications Sheet (PDA).**

ANEXO C: Gráficos de força reativa do punção ao longo do tempo e segundo a direção Z para os 3 casos de espessura de parede (Abaqus CAE®).

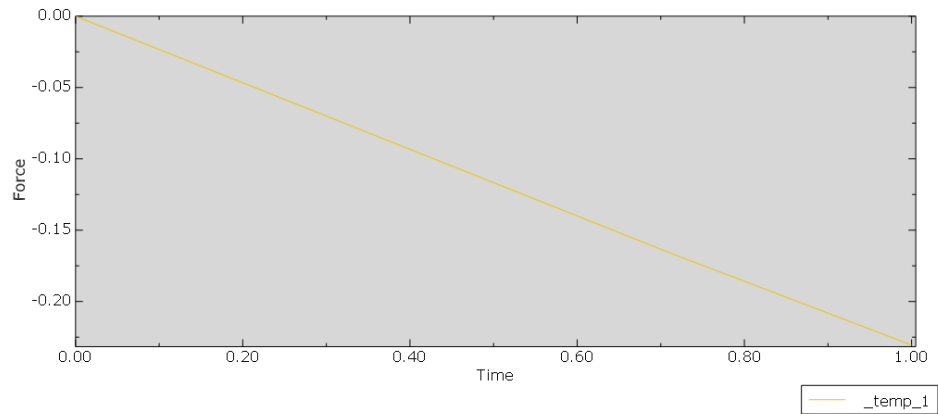


Figura 70 - Gráfico tempo / força para o caso de 1,68 mm de espessura de parede.

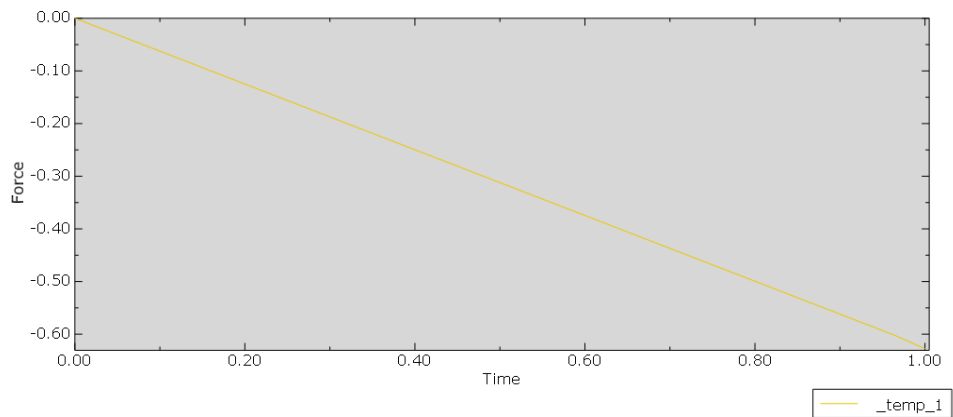


Figura 71 - Gráfico tempo / força para o caso de 2,17 mm de espessura de parede.

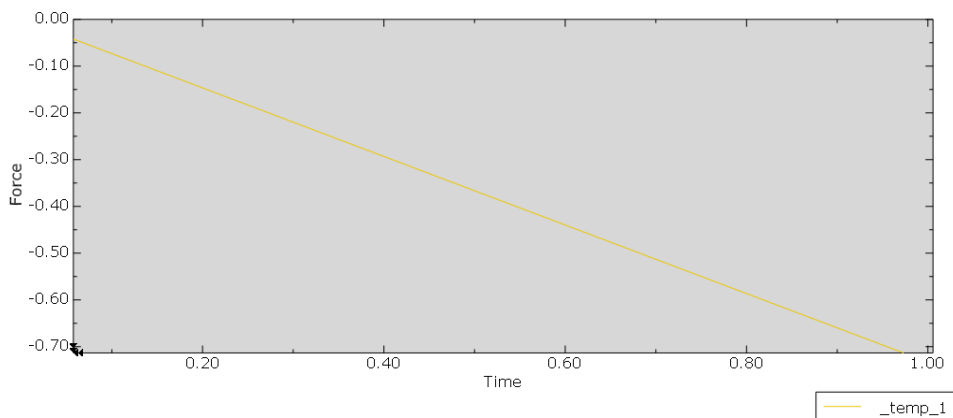


Figura 72 - Gráfico tempo / força para o caso de 3,00 mm de espessura de parede.

ANEXO D: Propriedades da resina de epóxico - Biresin® CR83.

Product Data Sheet
Version 05 / 2017

Biresin® CR83 Composite resin system

Product Description

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

Application Areas

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

Features / Advantages

- 3 hardeners (B) give a wide range of processing times
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Fast infusion and good wet-out of fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics even at low temperatures
- All systems Germanischer Lloyd approved, Certificate No. WP 1420017 HH (attached)
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions
- Carbon fibres are wet out well by all of the resin systems
- Biresin® CR83 resin (A) has a low tendency to crystallise

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

Processing

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

Postcuring

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

An appropriate cure cycle could look as follows:

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

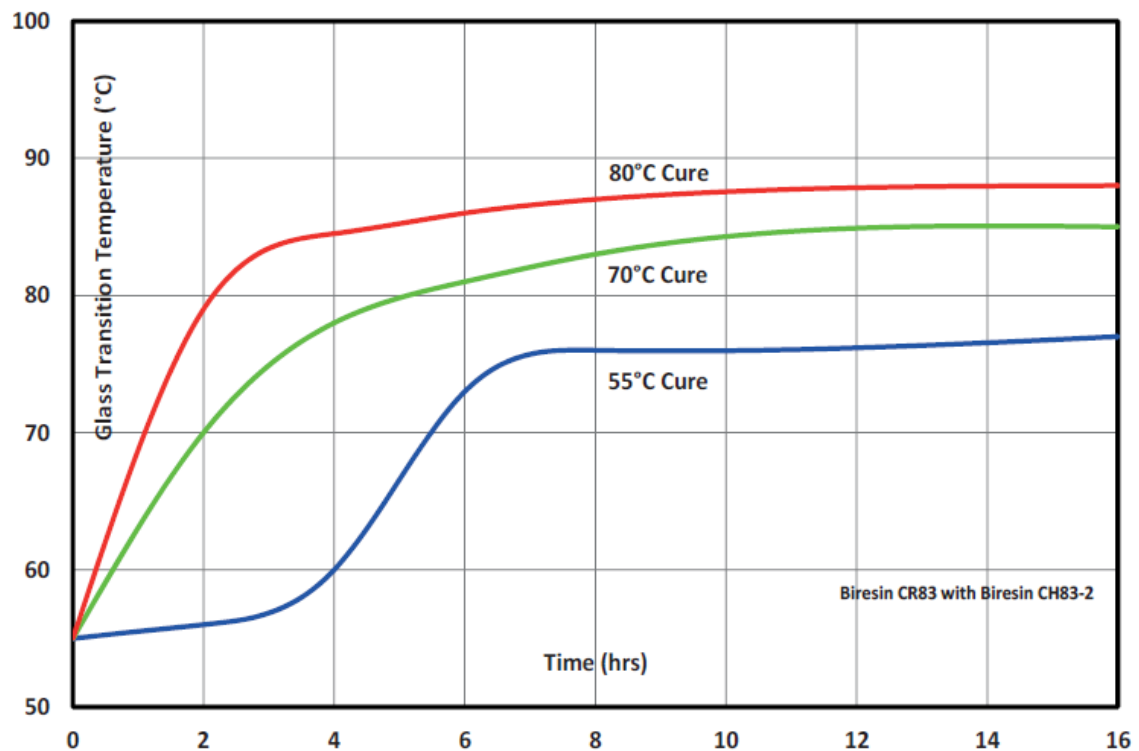
The specific postcure should be adapted to the required technical and economic requirements.

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

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

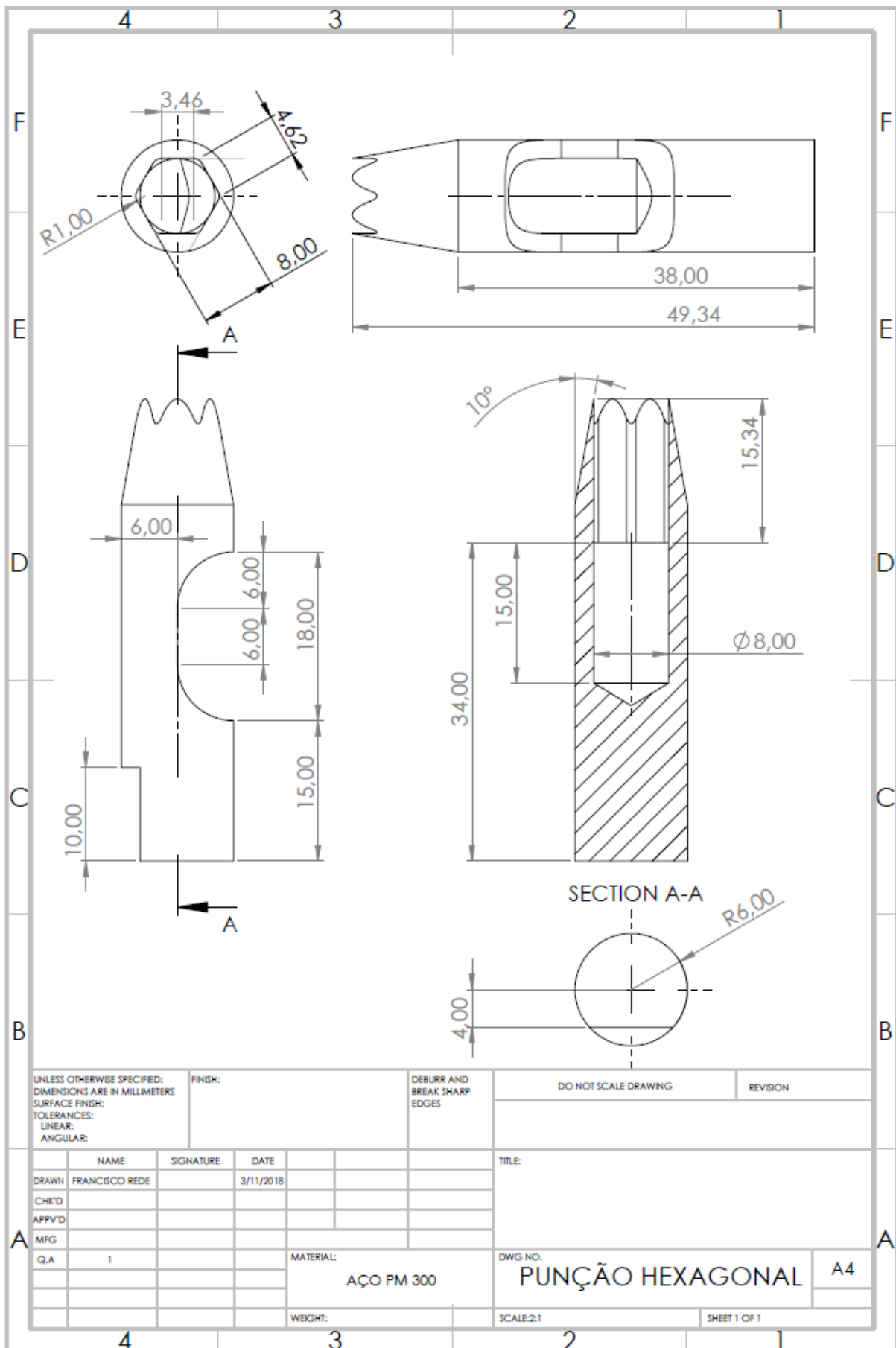
Typical Thermal Properties of Fully Cured Neat Resin					
Biresin® CR83 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH83-2	CH83-6	CH83-10
Heat distortion temperature	ISO 75B	°C	79	79	78
Glass transition temperature	ISO 11357	°C	84	80	81

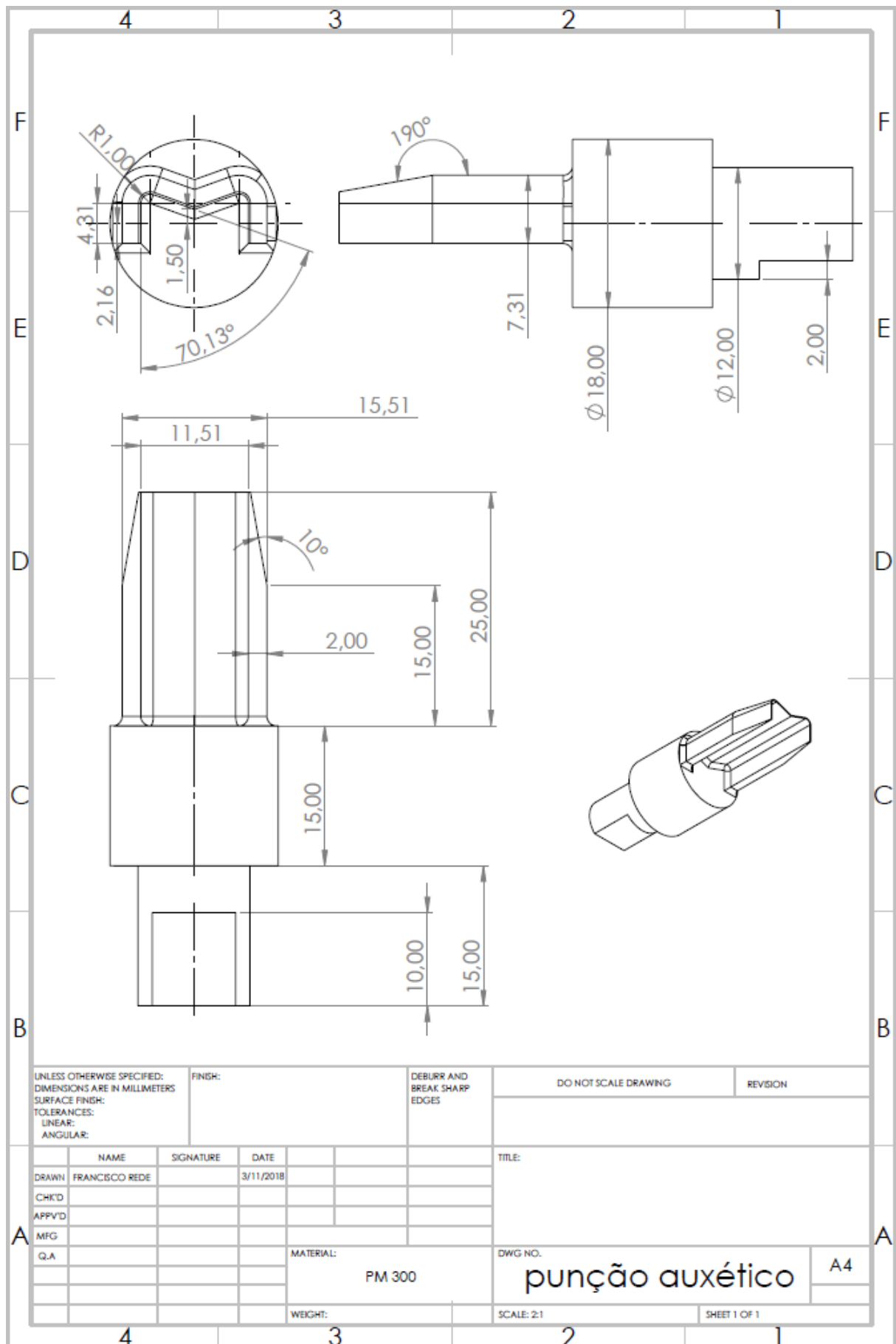
Glass Transition Temperature vs. Cure Cycle

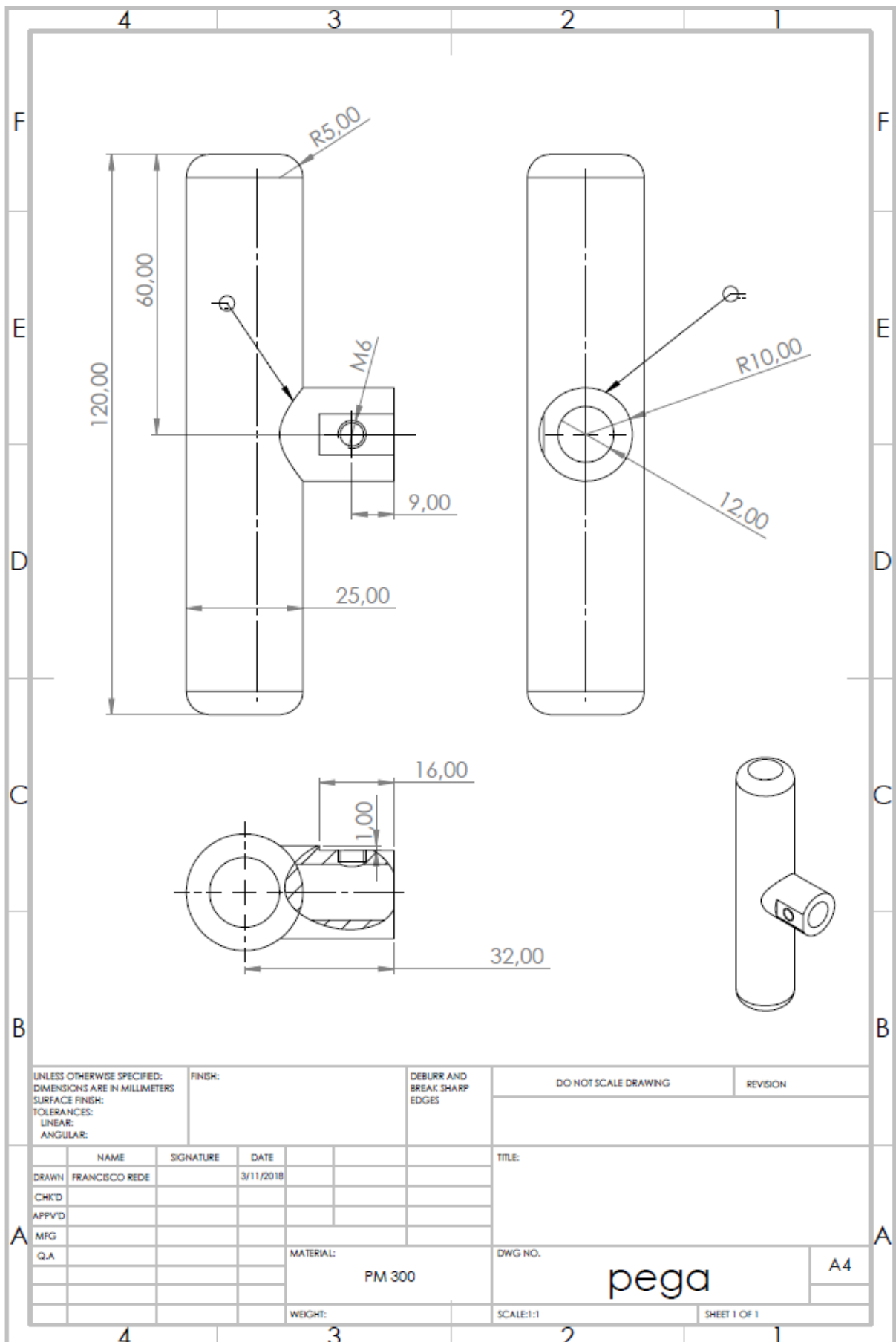


The test specimens were produced from 3 mm thick pure resin. Before the above postcuring, the samples were cured for 7 days at 23°C. When curing a composite part, the whole of the part (including the very middle of the laminate) needs to see the cure temperature.

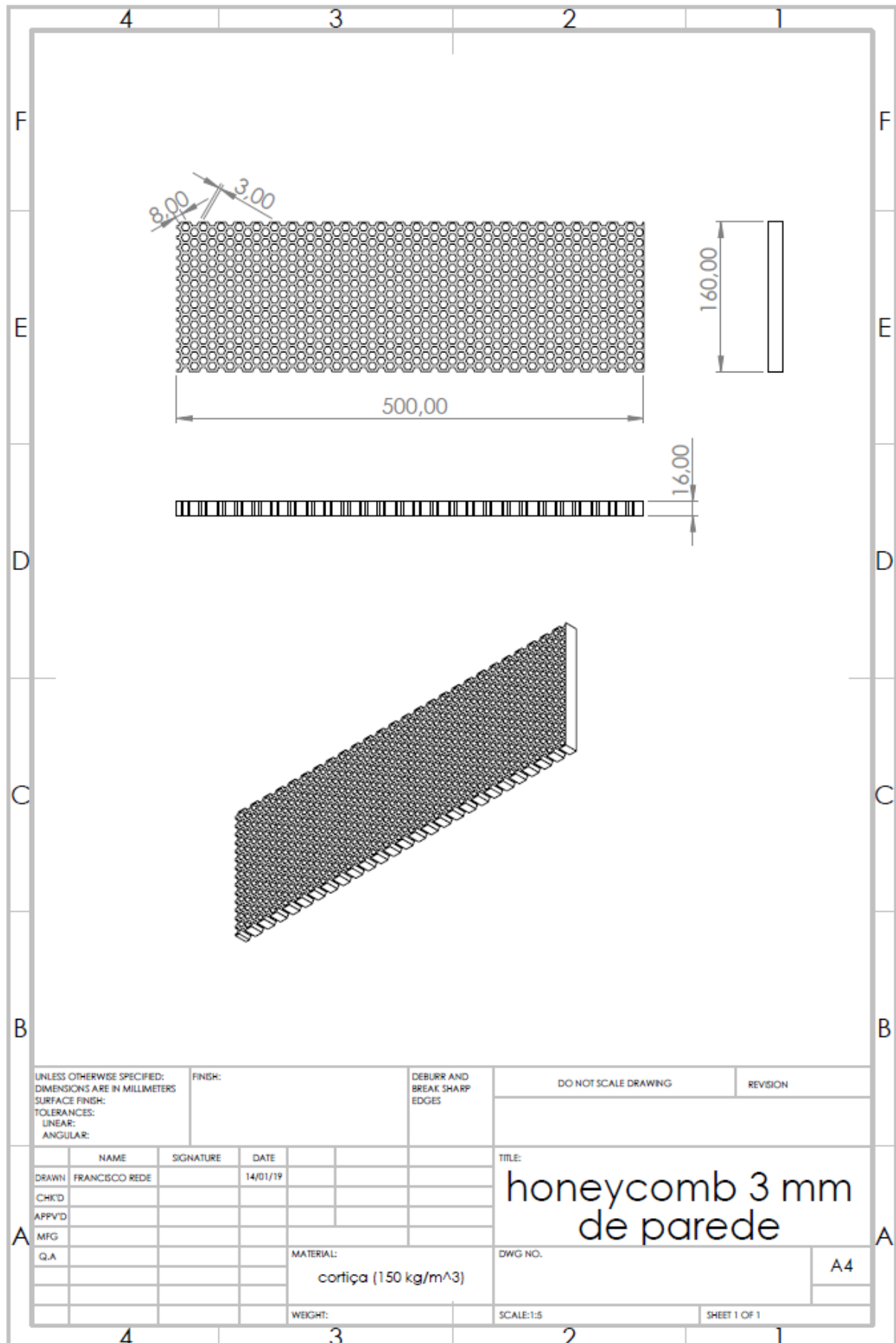
ANEXO E: Punção hexagonal, auxético e respetiva pega.

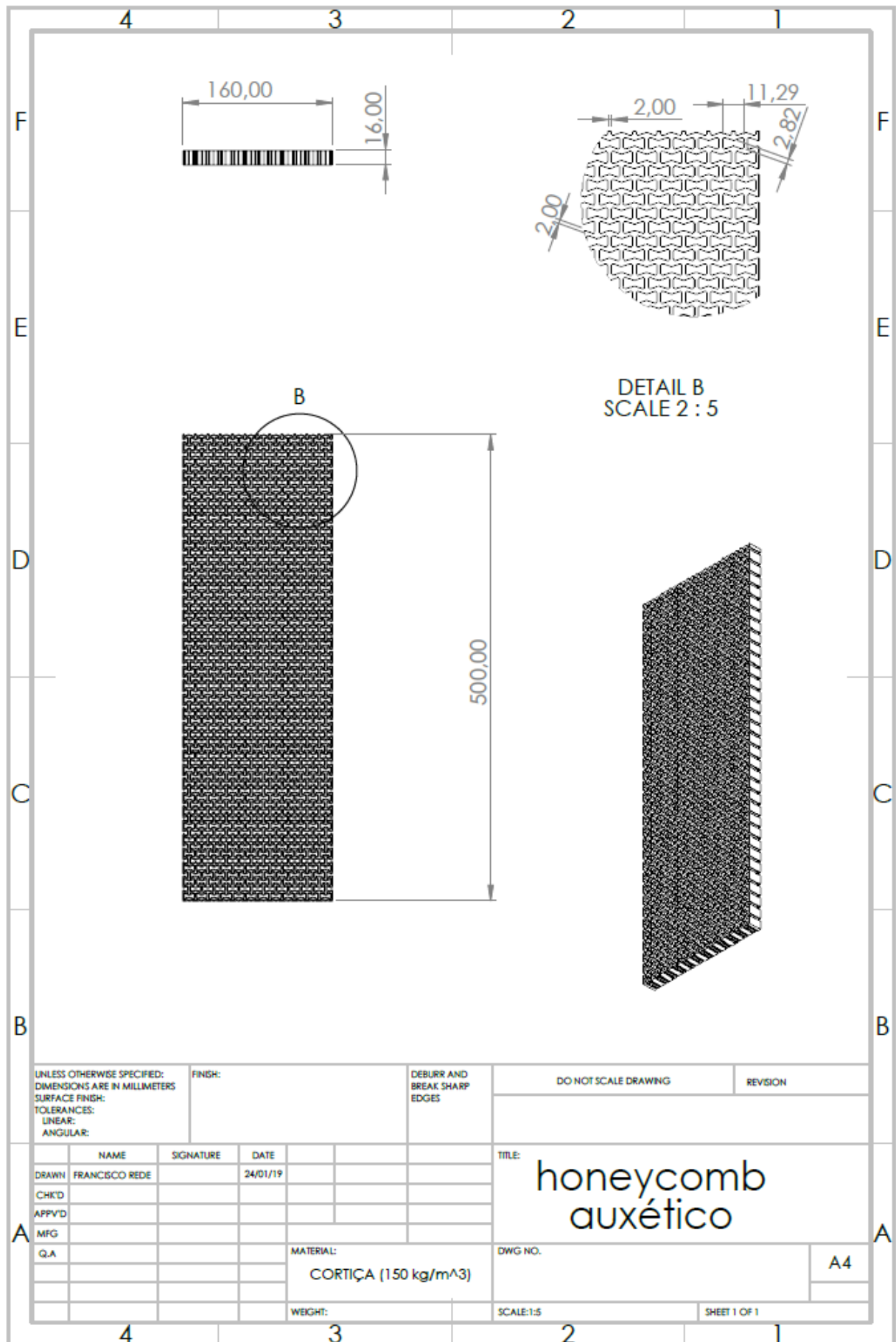






ANEXO F: Desenho dos núcleos de cortiça em *honeycomb* hexagonal e auxético.





ANEXO G: Ficha de produto do adesivo para painéis de sandwich SikaForce®.

Ficha de Produto
Versão 3 (02 / 2012)

SikaForce® -7710 L100

Adesivo para painéis de sandwich de uso geral

Dados técnicos do produto

Propriedades	Componente A SikaForce® -7710 L100	Componente B SikaForce® -7010
Base química	Poliol, com cargas	Derivados de isocianatos
Cor (CQP ¹⁾ 001-1)	Bege	Castanho
Cor – mistura	Bege	
Mecanismo de cura	Poli Adição	
Densidade (CQP 006-5)	1,6 g/cm ³ aprox.	1,2 g/cm ³ aprox.
Densidade mistura (calculado)	1,5 g/cm ³ aprox.	
Rácio de mistura	em volume 100	25
	em peso 100	19
Conteúdo de sólidos	100 %	100 %
Viscosidade ²⁾ (CQP 538-2)	30 000 mPas aprox. (Brookfield RVT 6/20)	250 mPas aprox. (Brookfield RVT 2/50)
Viscosidade mistura	10 000 mPas aprox. (Brookfield RVT 6/20)	
Tempo mistura ²⁾ (CQP 536-3)	100 min. aprox.	
Temperatura de aplicação	15 a 30°C	
Tempo de abertura ²⁾ (CQP 590-1)	100 min aprox. (ver diagrama 1)	
Tempo prensagem ²⁾ (CQP 590-1)	230 min aprox. (ver diagrama 1)	
Dureza Shore D ²⁾ (CQP 537-2)	80 D aprox.	
Resistência à tracção ³⁾ (CQP 545-2 / ISO 527)	13 N/mm ² aprox.	
Alongamento à ruptura ³⁾ (CQP 545-2 / ISO 527)	8 % aprox.	
Resistência ao arrancamento (CQP 546-2 / ISO 4587)	9 N/mm ² aprox.	
Tempo de armazenagem em contentores de 1.000 litros	6 meses	9 meses
Tempo de armazenagem em pequenas embalagens	12 meses	9 meses

¹⁾CQP = Procedimento Qualidade SIKKA

²⁾+23°C e 50% H.R.

³⁾Condições de cura de acordo com CQP 542-2

Descrição

O SikaForce® -7710 L100 é usado em conjunto com o SikaForce® -7010 formando um adesivo base poliuretano bi-componente.

O SikaForce® -7710 L100 é produzido de acordo com as normas de qualidade ISO 9001/14001 e com o programa de actuação responsável.

Vantagens

- Cura à temperatura ambiente
- Isento de solventes
- Tempo de abertura longo conjugado com tempo de prensagem curto

Campos de Aplicação

Colagem de metais, madeira, fibra de vidro e fibrocimento a espuma de poliuretano ou poliestireno e lã de rocha no fabrico de painéis sanduíche ou de outro tipo de tipologias.

Este produto é para uso apenas por profissionais experientes. Devem ser efectuados testes de aderência com os substratos e condições reais para assegurar compatibilidade.

Industry

Mecanismo de cura

A cura do SikaForce®-7710 L100 desenvolve-se por reacção química dos dois componentes. Temperaturas superiores aceleram a reacção assim como temperaturas inferiores aumentam o tempo de cura.

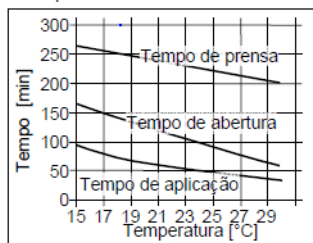


Diagrama 1: Tempo de prensa e tempo de aplicação para SikaForce®-7710 L100

Resistência química

No caso de exposição a agentes químicos ou temperatura, aconselhamos a realização de testes.

Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Método de Aplicação*Preparação de superfície*

É normalmente necessário preparar as superfícies a colar de forma a assegurar aderência e resistência mecânica adequada. Assegurar que os substratos estão limpos e secos.

Depois do processo de limpeza, um pré tratamento físico ou químico poderá ser necessário, dependendo da superfície e tipo de material. O tipo de pré tratamento necessário só pode ser determinado através de ensaios.

Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento em aplicações específicas.

Aplicação

Estimam-se consumos entre 150 e 350 g/m², dependendo dos substratos a colar. O rendimento para uma determinada combinação de substratos deve ser determinado a partir de testes efectuados.

Aplicação Manual:

Agitar o componentes A e B cuidadosamente antes de usar, e misturá-los constantemente até formar uma mistura homogênea. Aplicar com um rolo antes de expirar o tempo de aplicação da mistura e pressionar os substratos antes do fim do open-time. Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Aplicação automatizada:

Contactar os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Prensagem

Deve ser aplicada uma pressão adequada para obter resultados satisfatórios. A pressão específica depende do material do núcleo e deve ser aferida em testes. A força de prensagem deve ser sempre inferior à resistência à compressão do núcleo. Os elementos a colar não devem ser movidos durante o processo de prensagem.

Remoção

O SikaForce®-7710 L100 não curado, pode ser removido das ferramentas e equipamentos com SikaForce®-7260 Cleaner. Uma vez curado, o material apenas pode ser retirado mecanicamente. Em caso de contacto com as mãos, lavar de imediato com os toalhetes Sika® Top Clean e água. Não usar solventes.

Condições de armazenamento

Deve ser mantido entre +10°C e +30°C num lugar seco. Não expor à luz directa ou geada. Após abertura da embalagem o conteúdo deve ser protegido da humidade atmosférica. A temperatura mínima durante o transporte é de -20° C no máximo de 7 dias.

Outras informações

Cópias das seguintes publicações estão disponíveis quando pedidas:
- Ficha de Segurança

Valores base

Todos os valores apresentados nesta ficha de produto são baseados em testes de laboratório.

Valores obtidos podem variar devido a circunstâncias fora do nosso controle.

Informação Higiene e Segurança

Para informações e aconselhamento sobre segurança no manuseamento, armazenamento e disposição dos produtos químicos, os utilizadores devem ter em conta as folhas de segurança que contém dados, relativos a segurança, físicos, ecológicos, toxicológicos e outros.

Informação Legal

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.



Informação adicional disponível em:
www.sika.pt
www.sika.com

Sika Portugal SA
Divisão Indústria
Rua Santarém, 113
4400-292 V.N. Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 377 69 77



Implementado na fábrica de Ovar

ANEXO H: Gráficos força vs. deformação obtidos na Instron 5900R®.

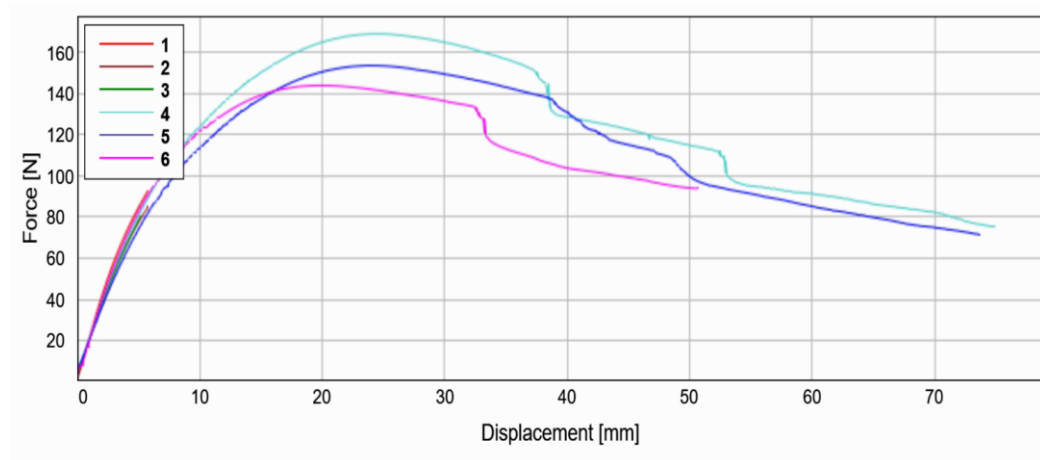


Figura 73 – Gráfico de força vs. deformação obtido nos ensaios de 3P e 4P para SNR.

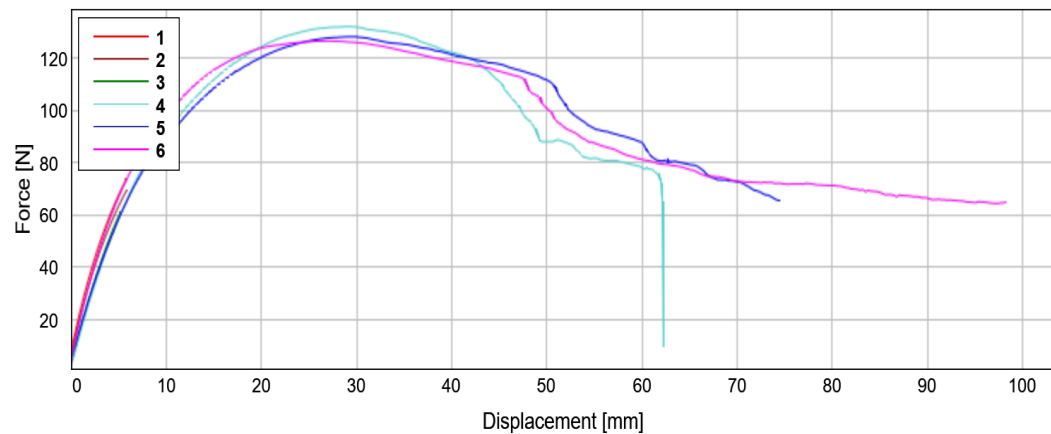


Figura 74 - Gráfico de força vs. deformação obtido nos ensaios de 3P e 4P para SNHC.

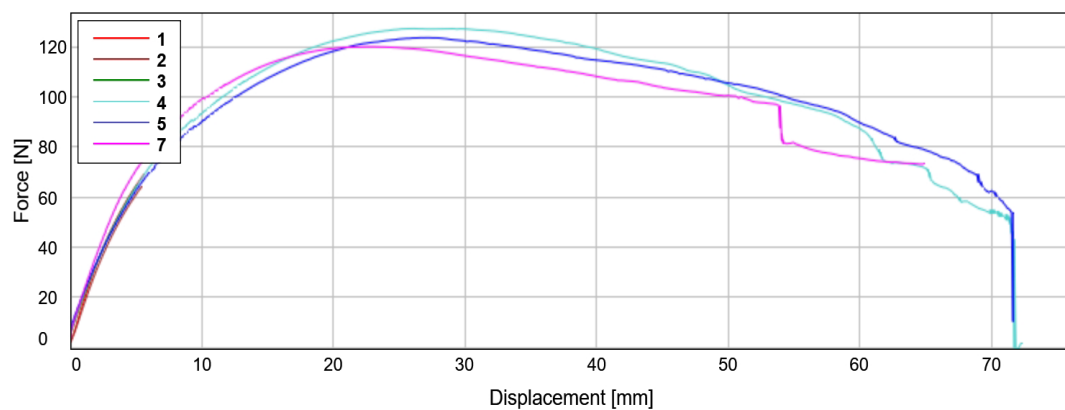


Figura 75 - Gráfico de força vs. deformação obtido ensaios de 3P e 4P para SNHH.