



CARACTERIZAÇÃO DE PERFIS PULTRUDIDOS HÍBRIDOS

HENRIQUE MANUEL DE PINHO FERNANDES

Outubro de 2015



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DE PERFIS PULTRUDIDOS HÍBRIDOS

Henrique Manuel de Pinho Fernandes



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DE PERFIS PULTRUDIDOS HÍBRIDOS

Henrique Manuel de Pinho Fernandes

1110971

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e co-Orientação do Mestre Mário Rui Monteiro Alvim de Castro, Assistente do 2.º Triénio do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e da Doutora Ana Cristina Meira da Silva e Castro, Professor Adjunto, do Departamento de Matemática do ISEP.

Júri

Presidente	Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho <i>Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Orientador	Doutor Francisco José Gomes da Silva <i>Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Co-Orientador	Mestre Mário Rui Alvim de Castro <i>Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Co-Orientadora	Doutora Ana Cristina Meira Castro <i>Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Arguente	Doutor NOME COMPLETO <i>Professor Associado com Agregação, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa</i>

Agradecimentos

“Se fui capaz de ver mais longe é porque estava em pé nos ombros de gigantes.”

(Isaac Newton)

São devidos agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, orientador da dissertação, agradeço todo o apoio, disponibilidade, dedicação e sabedoria partilhada, não só neste trabalho como também em todo o meu percurso do mestrado.

Ao Mestre Mário Rui Alvim de Castro, co-orientador da dissertação, agradeço todo o apoio prestado e o consentimento de realizar este trabalho em parceria com a ALTO.

À Professora Doutora Ana Cristina Meira Castro, co-orientadora da dissertação, por todo o apoio e partilha de conhecimentos fundamentais à realização deste trabalho.

À Doutora Cristina Ribeiro, por toda a colaboração prestada, disponibilidade e pela partilha de sabedoria.

Ao ISEP, pela oportunidade de aceder a este Mestrado, para enriquecimento da minha formação académica e realização pessoal.

Aos meus colegas de curso, que me acompanharam nesta jornada e me ajudaram a enriquecer os meus conhecimentos e a crescer moralmente.

E por fim, pois não poderia deixar de parte, a toda a minha família e amigos, que de forma directa ou indirecta me apoiaram e ajudaram durante este percurso.

A todos vós o meu sincero obrigado!

Palavras-chave

Pultrusão, Perfis pultrudidos híbridos, Perfis de material compósito, Caracterização de materiais, Ensaio Não-Destrutivo

Resumo

A pultrusão é uma técnica já sobejamente conhecida de produção de perfis de secção constante, tais como barras, cantoneiras, perfis estruturais ou tubos, em materiais compósitos de matriz polimérica.

A necessidade de, em determinadas aplicações, utilizar perfis que proporcionem melhor isolamento térmico, melhor isolamento acústico ou possuam um momento de inércia ligeiramente superior, sem que o peso próprio seja significativamente afectado, levou à produção de perfis pultrudidos híbridos, com núcleos baseados em pré-formas ou na alimentação contínua de resíduos.

Realizados os protótipos seguindo as metodologias acima descritas, urge verificar se as propriedades dos perfis híbridos correspondem às expectativas inicialmente neles depositadas, através de testes destrutivos e não-destrutivos.

Assim, foram realizados testes à tracção, à compressão e à flexão, no intuito de verificar os ganhos conseguidos e poder analisar o valor-acrescentado trazido por estes novos perfis em termos estruturais. Estes valores, depois de devidamente validados, permitirão a sua inserção em bases de dados agregadas a programas de cálculo estrutural, que efectuam de forma automática o dimensionamento de estruturas baseadas em perfis desta natureza. Complementarmente, foram realizados testes de isolamento térmico e acústico, com vista a quantificar a melhoria conseguida nestas propriedades, extremamente importantes em determinados tipos de aplicações ligadas à construção civil e obras públicas.

Keywords

Pultrusion, Hybrid pultruded pipes, Pipes of composite material, Materials characterization, Non-destructive testing

Abstract

Pultrusion is a technique already widely known for production of constant cross-section profiles, such as bars, L-shape, T-shape or structural tubes and profiles in polymer matrix composite materials.

In some applications, requirements demanding for profiles that provide better thermal or sound insulation or need a slightly higher moment of inertia without increasing the self-weight, leading to the production of hybrid pultruded profiles, with nuclei based on preforms or continuous feed waste.

After obtained the prototypes according to the methodologies described above, it's time to verify if the properties of these hybrid profiles correspond to initial expectations, carrying out non-destructive and destructive tests.

Thus, tensile, compression and bending tests were performed, in order to verify the gains achieved and to analyze the added value brought by these new profiles in structural terms. These values, once properly validated, will allow its inclusion in databases attached to structural calculation programs, performing automatically the dimensioning of structures based on such profiles.

In addition, tests of thermal and acoustic insulation were performed, in order to quantify the improvement achieved in these properties, which are extremely important in certain kinds of applications linked to the civil construction and public works.

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A	Area
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
C ₅ H ₁₂	Pentano
CO ₂	Dióxido de carbono
CRAG	<i>Composites Research Advisory Group</i>
EN	Euro Norma
F	Força
F/D	Força/deslocamento
FRP	<i>Fiberglass Reinforced Panels</i>
FST	Fogo, fumo e toxico
ISO	<i>International Standards Organisation</i>
K ₀ ''	Atenuações do tubo
P	Perfil simples
p _(mín,n)	n-ésima pressão mínima
P0a	Provete segundo o eixo de maior Inércia (Sem núcleo)
P0b	Provete segundo o eixo de menor Inércia (Sem núcleo)
Pa	Provete segundo o eixo de maior Inércia (Sem núcleo)
Pb	Provete segundo o eixo de menor Inércia (Sem núcleo)
PC	Perfil com núcleo de cortiça
PCa	Provete de Cortiça segundo o eixo de maior Inércia
PCb	Provete de Cortiça segundo o eixo de menor Inércia
PE	Espumas de polietileno
PEa	Provete de Espuma de Poliuretano segundo o eixo de maior Inércia
PEb	Provete de Espuma de Poliuretano segundo o eixo de menor Inércia
Pmáx	Pressão máxima da onda estacionária
Pmin	Pressão mínima da onda estacionária
PPa	Provete de Espuma de Poliuretano segundo o eixo de maior Inércia
PPb	Provete de Espuma de Poliuretano segundo o eixo de menor Inércia
PU	Espumas de poliuretano
S _n	Rácio da onda estacionária
t	Espessura do espaço de ar
T/D	Tensão/Deslocamento
T/T	Temperatura/Tempo
X _{max, n}	Comprimento para a n-ésima pressão máxima

$x_{\min,n}$	Comprimento para a n-ésima pressão mínima
α	Coefficiente de absorção sonora
α_n	Coefficiente de absorção sonora para uma incidência normal
α_{st}	Coefficiente de Absorção Sonora para o campo difuso segundo a norma ISO 10534-1
ΔL	Variação de pressão entre o máximo e o mínimo registado
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
σ_m	Resistência à compressão
λ_0	Comprimento da onda
c_0	Velocidade de propagação do som
f_u	Limite superior da frequência
Δn	Amplitude de pressão
T_x	Taxa de compressão dos núcleos
a	Deslocamentos que os núcleos comprimiram nas duas extremidades
d	Diâmetro interior do tubo circular
f	Frequência
h	Coefficiente peculiar
k	Condutividade térmica
l	Comprimento
q	Quantidade de calor transmitido
λ	Condutividade térmica
$ r $	Magnitude do factor de reflexão

Glossário de Termos

Absorção	Fixação de uma matéria líquida ou gasosa numa outra, geralmente sólida.
Aderência	Característica física dos objectos que permite que se unam entre si.
Amplitude	Espaço alcançado por uma oscilação ou vibração.
Anisotropia	Característica que uma substância possui em que uma certa propriedade física varia com a direcção.
Câmara reverberante	Divisão com superfícies tratadas com materiais altamente reflectores com o intuito de reflectir os sons incidentes. É usada para medir a potência sonora emitida por uma fonte e para medir o coeficiente de absorção de som de uma amostra de material absorvente.
Condutividade sonora	Grandeza que mensura a capacidade de um material propagar o som ou as vibrações sonoras, permitindo distinguir os bons dos maus condutores.
Condutividade térmica	Grandeza que mensura a capacidade de um material conduzir o calor, permitindo distinguir os bons dos maus condutores.
Corrosão	Acção ou efeito de corroer-se, desgastar-se por fenómeno químico.
Cortiça	Casca de sobreiro.
Deformação	Alteração da forma primitiva.
Dieléctrico	Substância ou material isolador de electricidade.
Ductilidade	Capacidade de um material se deformar sem entrar em rotura.
Elasticidade	Tendência que os materiais tem em voltar à sua forma inicial, após serem deformados por solicitação de forças.
Encurvadura	Acto ou efeito de encurvar, que ocorre em peças esbeltas quando sujeitas a um esforço de compressão axial.
Extrusão	Passagem forçada por uma fieira, um orifício ou um molde para ficar com um formato alongado.
Fibra	Material de reforço utilizado em materiais compósitos.
Fieira	Molde com uma secção transversal constante utilizado em pultrusão ou extrusão.

Flecha	Distância que vai do eixo de uma viga flectida até ao eixo da sua posição original.
Flexão	Acto de dobrar ou curvar.
Força	Capacidade de produzir trabalho ou causar alteração física.
Frequência	Número de ocorrências, ciclos ou oscilações num determinado período de tempo.
<i>Hand lay-up</i>	Processo de moldagem manual.
Híbrido	Que deriva de espécies, géneros, naturezas diferentes.
Impedância	Quociente da tensão eficaz pela intensidade eficaz de uma corrente alterna.
Impregnação	Embebimento, molhagem.
Infra-som	Som não audível inferior a 20Hz.
Isolamento Acústico	Capacidade de um material não propagar o som.
Isolamento Térmico	Capacidade de um material não transferir calor.
<i>Layout</i>	Estrangeirismo que significa modo de distribuição e arranjo de elementos gráficos num determinado espaço ou superfície.
Liga	Combinação de um ou mais metais com outro principal.
Material compósito	Material que possui pelo menos dois componentes ou duas fases, com propriedades físicas e químicas diferenciadas na sua composição. Quando misturados, os constituintes do compósito formam um composto com propriedades impossíveis de se obterem quando isolados.
Matriz	Material aglomerante onde se dispersam as fibras de um compósito.
Módulo de <i>Young</i>	Grandeza que determina uma medida de rigidez.
Núcleo	Parte central.
Ondas estacionárias	Ondas resultantes da sobreposição de duas ondas com a mesma frequência, mesma amplitude, mesmo comprimento de onda, mas com sentidos opostos.
<i>Passerelles</i>	Estrangeirismo que designa ponte de passagem de peões.
Perfil	Material cuja geometria da sua secção se mantém constante ao longo do seu comprimento.

Peso	Aceleração resultante da gravidade que age sobre a massa de um corpo.
Polímeros	Macromoléculas formadas a partir de monómeros.
Poliuretano	Polímero que abarca uma cadeia de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas.
Pré-forma	Peça que na qual é conformada uma ou várias camadas de reforço. Após a conformação, o produto adquire a geometria da pré-forma.
Provete	Pequena amostra de material de forma definida, utilizada para ensaios geralmente mecânicos ou físicos.
Pultrusão	Processo de fabrico de perfis em materiais compósitos constituídos por fibras e matrizes termoendurecíveis.
Punção	Ferramenta convexa que se acopla com uma matriz côncava.
Reforço	Material de um compósito que lhe dá as suas propriedades mecânicas como um todo.
Resistência	Força pelo meio do qual um corpo reage contra a acção de outro corpo.
Reverberação	Efeito físico gerado pelo som; reflexão múltipla de uma frequência.
Rigidez	Qualidade do que não é maleável.
Rotura	Acto ou efeito de romper.
<i>Rovings</i>	Mecha de filamentos contínuos com uma pequena torção, enrolados com orientação helicoidal numa bobina.
<i>Sandwich</i>	Algo inserido firmemente entre duas outras coisas, geralmente de diferente carácter ou qualidade.
<i>Setup</i>	Estrangeirismo que designa o modo como algo é constituído, arranjado ou planeado.
Sonómetro	Instrumento com que se medem os sons ou vibrações sonoras e os intervalos harmónicos.
Tensão	Carga exercida por uma determinada área.
Termoendurecível	Que possui a propriedade de endurecer acima de uma determinada temperatura. No entanto, após endurecida, o processo não é reversível.
Termografia	Técnica que permite medir temperaturas, mediante a captação da radiação infravermelha que os corpos emitem.

Termopar	Sensor de temperatura.
Torção	Acto de rodar um corpo pelas suas extremidades por sentidos opostos.
Tracção	Acção de duas forças uniaxiais com sentidos opostos.
Ultra-som	Som não audível superior a 20KHz.
Uniaxial	Que tem um só eixo.
Vs.	Abreviatura do estrangeirismo <i>versus</i> , significa: em oposição a; em contraste com; contra.

Grandezas e Unidades

Área	Metro quadrado, m ²
Calor	Watt, W
Coefficiente de condutibilidade térmica	Kcal/h.m.°C
Coefficiente peculiar	W/(m ² K)
Comprimento	Metro, m
Condutividade térmica	W/(mK)
Densidade	Kg/m ³
Espessura	Metro, m
Força	Newton, N
Frequência	Hertz, Hz
Modulo de <i>Young</i>	Pascal, Pa
Momento da Inércia	Milímetro à quarta, mm ⁴
Pressão	Bar, bar
Resistência à compressão	KPa ou Kg/cm ²
Resistência à flexão	N.mm ²
Resistência ao corte	Newton, N
Secção	Milímetro quadrado, mm ²
Temperatura	Grau Celsius, °C / Kelvin, K
Tensão	Pascal, Pa
Velocidade de propagação do som	Metro por segundo, m/s

Índice de Figuras

Figura 1: <i>Layout</i> do processo de Pultrusão (adaptado de Mécastyle, 21-09-2015)	6
Figura 2: <i>Layout</i> do processo de Pultrusão de polímero híbrido (adaptado de Mécastyle, 21-09-2015)	8
Figura 3: Solicitação de esforços para ensaios.....	9
Figura 4: Diagrama Força-Alongamento e representação esquemática do comportamento do provete durante o ensaio de tracção. (Soares, 2009).	11
Figura 5: Curvas típicas Tensão-Extensão: a) com patamar de cedência; b) com tensão limite convencional de proporcionalidade a $\eta\%$; c) com tensão limite convencional de elasticidade (Davim <i>et al.</i> , 2010).....	12
Figura 6: Esquema do ensaio de Compressão (Davim <i>et al.</i> , 2010).....	14
Figura 7: Dispositivo <i>Celanese</i> (Moura, Morais, & Magalhães, 2005)	15
Figura 8: Dispositivo IITRI (Moura, Morais, & Magalhães, 2005)	15
Figura 9: Ensaio de flexão em 3 pontos com os diagramas de esforços de corte V e de Momento flector M (Moura <i>et al.</i> , 2005).....	16
Figura 10: Ensaio de flexão de 4 pontos com os diagramas de esforços de corte V e de momento flector M (Moura <i>et al.</i> , 2005)	17
Figura 11: Gráfico L^2 vs s/PL (Dansk Standards Association, 2002)	21
Figura 12: Gráfico $1/L^2$ vs s/PL^3 (Dansk Standards Association, 2002).....	21
Figura 13: Modos de Transferências de Calor (Adaptado de quimicaensinada, 11-05-2013)	22
Figura 14: Ilustração da Lei de Fourier (Condução) (Moran <i>et al.</i> , 2014)	23
Figura 15: Casa modelo de alto isolamento PHYWE com paredes substituíveis (PHYWE, 01-09-2014)	24
Figura 16: Regulador térmico para casas de alto isolamento PHYWE (PHYWE, 01-09-2014)	25
Figura 17: <i>Hand-held Measuring Instrument</i> 2 x NiCr-Ni da PHYWE (PHYWE, 01-09-2014)	25
Figura 18: Casa PHYWE com termopares Easylog instalados no seu exterior.....	26
Figura 19: Onda estacionária no tubo de impedância (Adaptado de ISO 10531-1:1996)	29
Figura 20: Representação das células da cortiça (adaptado de Silva <i>et al.</i> , 2005).....	33
Figura 21: Micrografia da cortiça natural, a) corte radial, b) corte tangencial (Adaptado de Silva <i>et al.</i> , 2005).....	33
Figura 22: Esquema do corte axial do sobreiro (Adaptado de Silva <i>et al.</i> , 2005)	34
Figura 23: Curva típica de compressão T/D da cortiça (Silva <i>et al.</i> , 2005)	35
Figura 24: Curvas Tensão-Deformação médias para ensaio de tracção à cortiça (Silva <i>et al.</i> , 2005).....	37
Figura 25: Gráfico de selecção de materiais - comparativo da força específica de compressão (σ/ρ) com o módulo específico (E/ρ) (Silva <i>et al.</i> , 2005)	39

Figura 26: Gráfico de selecção de materiais - comparativo da condutividade térmica com a tensão de compressão (σ) (Silva <i>et al.</i> , 2005)	39
Figura 27: Percentagem de consumo de plásticos em 2012. (Sonnenschein, 2015)	41
Figura 28: Ligação uretânica dentro de uma cadeia polimérica de poliuretano (Sonnenschein, 2015).	41
Figura 29: Quatro fases na produção de espuma de poliuretano (BING, 2006)	42
Figura 30: Aumento da condutividade térmica da espuma de Poliuretano ao longo de 15 anos para espessuras de 40 e 80mm (Adaptado de BING, 2006)	45
Figura 31: Estrutura das células de espuma rígida de poliuretano (BING, 2006)	46
Figura 32: Resistência à compressão e tensão de compressão a 10% de deformação (*) (BING, 2006)....	46
Figura 33: Perfil 69 mm x 29 mm x 2,5 mm ALTO	47
Figura 34: Núcleo de cortiça	48
Figura 35: Núcleo Poliuretano	48
Figura 36: Perfil pultrudido híbrido com núcleo de cortiça	49
Figura 37: Perfil pultrudido híbrido com núcleo de poliuretano	49
Figura 38: Gráfico T/D de provetes de perfil compósito simples.....	51
Figura 39: Gráfico comparativo das propriedades de painéis <i>sandwich</i> com diferentes tipos de núcleos (Adaptado de Amorim Cork Composites, 2013).....	53
Figura 40: Solicitações no ensaio de aderência	55
Figura 41: Garra do perfil montada e em explosão	56
Figura 42: Garra do núcleo montada e em explosão.....	56
Figura 43: Pormenores do ensaio de adesão	57
Figura 44: <i>Setup</i> ensaio de adesão	58
Figura 45: Provede de adesão de 150mm com núcleo de poliuretano.....	59
Figura 46: Representação das cotas a1 e a2 em provede de 150 mm.	59
Figura 47: Fricção entre guias da garra e perfil	61
Figura 48: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provede com núcleo de cortiça nº1.....	61
Figura 49: Pormenor da fricção entre perfil e guias	62
Figura 50: Garra de núcleo sem guias.....	62
Figura 51: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provede com núcleo de cortiça nº2.....	63
Figura 52: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provede com núcleo de cortiça nº3.....	63
Figura 53: Gráfico F/D em ensaio de adesão, 3 provedes com núcleo de cortiça	64
Figura 54: Provede 1.....	64
Figura 55: Provede 2.....	64
Figura 56: Provede 3.....	64
Figura 57: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provede com núcleo de poliuretano nº1	65
Figura 58: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provede com núcleo de poliuretano nº2.....	65
Figura 59: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provede com núcleo de poliuretano nº3.....	66
Figura 60: Gráfico F/D em ensaio de adesão, 3 provedes com núcleo de poliuretano	66
Figura 61: Provedes com núcleo de poliuretano após ensaio de adesão.....	67
Figura 62: Representação dos eixos de maior e menor inércia, no topo do perfil.	69

Figura 63: Ensaio flexão: a) maior inércia; b) menor inércia	69
Figura 64: Ensaio de flexão a três pontos de um perfil simples, segundo eixo de maior inércia	70
Figura 65: Gráfico F/D de provetes Simples no eixo de maior Inércia.	71
Figura 66: Gráfico F/D de provetes com núcleo de cortiça no eixo de maior Inércia.	72
Figura 67: Gráfico F/D de provetes com núcleo de espuma no eixo de maior Inércia	73
Figura 68: Gráfico F/D Proвете simples vs cortiça vs espuma no eixo a	74
Figura 69: Gráfico F/D de provetes Simples no eixo de menor Inércia.....	75
Figura 70: Gráfico F/D de provetes com núcleo de cortiça no eixo de menor Inércia	76
Figura 71: Gráfico F/D de provetes com núcleo de espuma no eixo de menor Inércia	77
Figura 72: Gráfico F/D Proвете simples vs cortiça vs espuma no eixo b	78
Figura 73: Rotura de provete sem núcleo no ensaio de flexão a 3 pontos, segundo eixo de maior inércia	79
Figura 74: Rotura de provete com núcleo de cortiça no ensaio de flexão a 3 pontos, segundo eixo de maior inércia.....	80
Figura 75: Rotura de provete com núcleo de poliuretano no ensaio de flexão a 3 pontos, segundo eixo de maior inércia.....	80
Figura 76: Equipamento e método de ensaio segundo EN13607-2:2002 Anexo G no laboratório da ALTO81	
Figura 77: Exemplo do <i>setup</i> de ensaio e método de medição de flexa para os ensaios de três pontos segundo EN13607-2:2002 Anexo G	82
Figura 78: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples segundo o eixo de maior inércia - Proвете 1	83
Figura 79: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples segundo o eixo de maior inércia - Proвете 2	83
Figura 80: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples segundo o eixo de menor inércia - Proвете 1	84
Figura 81: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples segundo o eixo de menor inércia - Proвете 2	84
Figura 82: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo o eixo de maior inércia - Proвете 1	85
Figura 83: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo o eixo de maior inércia - Proвете 2	85
Figura 84: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo o eixo de menor inércia - Proвете 1	86
Figura 85: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo o eixo de menor inércia - Proвете 2	86
Figura 86: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça segundo o eixo de maior inércia - Proвете 1.....	87
Figura 87: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça segundo o eixo de maior inércia - Proвете 2.....	87

Figura 88: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça segundo o eixo de maior inércia - Provete 1.....	88
Figura 89: Curva força vs. deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça segundo o eixo de maior inércia - Provete 2.....	88
Figura 90: Curva L^2 vs s/PL para o perfil simples, segundo eixo de maior inércia	89
Figura 91: Curva L^2 vs s/PL para o perfil simples, segundo eixo de menor inércia	89
Figura 92: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de poliuretano, segundo eixo de maior inércia	90
Figura 93: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de poliuretano, segundo eixo de menor inércia	90
Figura 94: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de cortiça, segundo eixo de maior inércia	91
Figura 95: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de cortiça, segundo eixo de menor inércia	91
Figura 96: Distribuição dos termopares 1.....	94
Figura 97: Distribuição dos termopares 2.....	94
Figura 98: Temperatura nos termopares Nº 5 e 1 do 2º ensaio	95
Figura 99: Curva T/t Provete sem núcleo - 1ºEnsaio	97
Figura 100: Curva T/t Provete com núcleo de poliuretano - 1ºEnsaio.....	97
Figura 101: Curva T/t Provete com núcleo de cortiça - 1ºEnsaio	98
Figura 102: Curva T/t Provete sem núcleo - 2ºEnsaio	98
Figura 103: Curva T/t Provete com núcleo de poliuretano - 2ºEnsaio.....	99
Figura 104: Curva T/t Provete com núcleo de cortiça - 2ºEnsaio	99
Figura 105: Curva T/t Provete com núcleo de vidro duplo de 6mm - 3ºEnsaio.....	100
Figura 106: Curva T/t Provete com núcleo de cortiça - 3ºEnsaio	101
Figura 107: Tubo de Ondas Estacionárias FEUP (Rodrigues, 2008)	103
Figura 108: Provetes para ensaios com tubo de ondas estacionárias. Provete simples à esquerda, com núcleo de cortiça ao centro e com núcleo de poliuretano à direita.	105
Figura 109: Gráficos da absorção sonora dos provetes simples.	108
Figura 110: Gráficos da absorção sonora dos provetes com núcleo de Cortiça.	108
Figura 111: Gráficos da absorção sonora dos provetes com núcleos de Poliuretano de alta densidade.	109
Figura 112: Gráficos da absorção sonora dos provetes com núcleos de Poliuretano de baixa densidade.	109
Figura 113: Gráfico de α_n vs frequência dos diferentes tipos de perfis	110
Figura 114: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador)	120
Figura 115: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia.....	120
Figura 116: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador)	121
Figura 117: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia.....	121
Figura 118: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador).....	122
Figura 119: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de maior Inércia.....	122
Figura 120: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de menor Inércia (Ensaio sem comparador)	123

Figura 121: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de menor Inércia.....	123
Figura 122: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador).....	124
Figura 123: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de maior Inércia.....	124
Figura 124: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de menor Inércia (Ensaio sem comparador)	125
Figura 125: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de menor Inércia	125

Índice de Tabelas

Tabela 1: Módulos de <i>Young</i> cortiça com tratamento de cozedura (Silva et all, 2005)	36
Tabela 2: Propriedades gerais da cortiça (Silva et all, 2005).....	38
Tabela 3: Apresentação de resultados de ensaio de tracção do material do perfil	51
Tabela 4: Propriedades mecânicas dos núcleos de cortiça Corecork NL20 (Amorim Cork Composites, 2013).....	52
Tabela 5: Propriedades mecânicas dos núcleos de cortiça Corecork NL20 em estruturas <i>sandwich</i> * (Amorim Cork Composites, 2013)	52
Tabela 6: Directrizes de processo e compatibilidade com as resinas; cortiça Corecork NL20. (Adaptado de Amorim Cork Composites, 2013).....	53
Tabela 7: Características do Poliuretano PUR60	54
Tabela 8: Apresentação de resultados de ensaios de adesão em Provetes com núcleo de cortiça.	67
Tabela 9: Apresentação de resultados de ensaios de adesão em Provetes com núcleo de Poliuretano obtidos pelo equipamento de ensaio.	68
Tabela 10: Resultados dos provetes Simples no eixo de maior Inércia.	71
Tabela 11: Resultados dos provetes com núcleo de cortiça no eixo de maior Inércia.	72
Tabela 12: Resultados dos provetes com núcleo de Poliuretano no eixo de maior Inércia.	73
Tabela 13: Resultados dos provetes Simples no eixo de menor Inércia.	75
Tabela 14: Resultados dos provetes com núcleo de cortiça no eixo de menor Inércia.	76
Tabela 15: Resultados dos provetes com núcleo de Poliuretano no eixo de menor Inércia.....	77
Tabela 16: Resumo de resultados segundo eixo de maior inércia e respectiva variação.	78
Tabela 17: Resumo de resultados segundo eixo de menor inércia e respectiva variação.	79
Tabela 18: Resultados de Rigidez à flexão, Módulo de Flexão e variação relativa ao perfil simples.	92
Tabela 19: Resultados de Rigidez ao corte, Módulo ao e variação relativa ao perfil simples.	92
Tabela 20: <i>Layout</i> de distribuição dos termopares pelos provetes.	94
Tabela 21: Resultados das Condutividade Térmica K por ensaio.....	101
Tabela 22: Valores médios das Condutividade Térmica K e variação relativa ao provete sem núcleo.	102
Tabela 23: Gama de frequências que se podem medir com o Tubo de Ondas Estacionárias grande	103
Tabela 24: Gama de frequências que se podem medir com o Tubo de Ondas Estacionárias pequeno ...	104
Tabela 25: Atenuação do tubo Ko'' considerada para o cálculo dos valores de absorção sonora.	106
Tabela 26: Espaço dissipador de pressão t.	107
Tabela 27: α_n dos diferentes tipos de perfis.....	110

Índice

Lista de Símbolos e Abreviaturas	xiii
Glossário de Termos	xv
Grandezas e Unidades	xix
Índice de Figuras.....	xxi
Índice de Tabelas	xxvii
Índice	xxix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. A Pultrusão: Conceitos gerais	5
2.2. Motivações para a produção e aplicação de perfis pultrudidos híbridos	7
2.3. Produção de perfis pultrudidos híbridos	7
2.4. Caracterização mecânica e física de compósitos de matriz polimérica	8
2.4.1. Resistência mecânica.....	10
2.4.2. Resistência à compressão.....	13
2.4.3. Resistência à flexão.....	15
2.4.4. Isolamento térmico	22
2.4.5. Isolamento acústico.....	27
2.4.5.1. Tubo de Ondas Estacionárias	28
2.4.5.2. Determinação do coeficiente de absorção sonora	29
2.5. Propriedades dos núcleos.....	32
2.5.1. Propriedades da cortiça.....	32
2.5.2. Propriedades do poliuretano.....	40
3. Desenvolvimento	47
3.1. Caracterização da empresa que acolheu o projecto.....	47
3.2. Elencagem dos perfis considerados neste trabalho	47
3.3. Elencagem das características a analisar e dos ensaios a realizar	49
3.4. Caracterização da resistência mecânica da parede do perfil simples.....	50
3.5. Caracterização dos materiais usados como núcleos nos perfis híbridos	52
3.5.1. Características da Cortiça	52
3.5.2. Características do Poliuretano	54
3.6. Caracterização dos perfis híbridos.....	54
3.6.1. Caracterização da aderência entre perfil e núcleo	54

3.6.2. Caracterização da resistência à flexão dos perfis híbridos	68
3.6.2.1 Resistência à Flexão e modo de rotura	69
3.6.2.2 Rigidez à flexão, rigidez ao corte, módulo de flexão e módulo de corte	81
3.6.3. Caracterização do isolamento térmico dos perfis híbridos	93
3.6.4. Caracterização do isolamento acústico dos perfis híbridos.....	102
3.8. Análise crítica dos resultados no global.....	111
3.9. Propostas de melhoria e indicação de possíveis aplicações	112
4. Conclusões.....	115
5. Bibliografia e Outras Fontes de Informação	117
Bibliografia.....	117
Outras Fontes de informação	118

1. Introdução

1.1. Enquadramento

As aplicações para os materiais compósitos não param de crescer, dada a flexibilidade de propriedades destes materiais, mais facilmente adaptáveis a requisitos por vezes difíceis de alcançar com um dado material simples, ou mesmo até em liga. O subgrupo de materiais compósitos de matriz polimérica tem também registado um volume crescente de aplicações, devido às suas características de baixo peso específico, elevada resistência, elevada resistência à corrosão, fácil transformação e coloração, assim como montagem relativamente fácil através de vários processos de ligação.

As técnicas de produção de materiais compósitos são muito diversas, consoante o tipo de peça, componente ou subproduto que se pretende produzir. Desde a moldação manual – processo mais artesanal, até ao enrolamento filamental, existe uma diversidade de técnicas que conferem a estes produtos a competitividade e qualidade desejadas pelo mercado.

A pultrusão é um processo de produção de materiais compósitos de matriz polimérica, destinado principalmente à produção de perfis de secção constante, tanto maciços como tubulares. Neste processo, as fibras são puxadas através de uma fieira, onde o perfil vai adquirindo a forma desejada, sendo curado e obtendo a rigidez e forma final desejadas.

A necessidade de aproximar cada vez mais os produtos pultrudidos às necessidades do mercado, levou a que os seus produtores pensassem na fabricação de perfis híbridos, que fossem de encontro às necessidades de determinados segmentos de mercado, nomeadamente o mercado da construção. Estes perfis podem melhorar as características de isolamento térmico e acústico, através da inclusão de produtos adequados no seu interior (quando sob a forma de tubos), sem que o seu peso seja significativamente afectado. Os materiais inseridos no interior dos tubos pultrudidos poderão ser a cortiça ou a espuma de poliuretano, quando a pultrusão se dá em torno de pré-formas destes materiais, ou em torno de resíduos da própria pultrusão, alimentados de forma contínua, diminuindo o custo do subproduto e contribuindo para a inclusão de resíduos que se destinavam a aterro sanitário, contribuindo assim para um melhor ambiente.

1.2. Objectivos

Este trabalho tem como objectivo principal, estudar e caracterizar três diferentes perfis pultrudidos: um simples e dois híbridos que derivam do primeiro. Este estudo passa pela realização de ensaios destrutivos e não-destrutivos e análise de algumas das propriedades relevantes que se pretendem melhorar com estes sistemas híbridos, nomeadamente:

- Resistência à flexão e modo de rotura;
- Rigidez à flexão e ao corte;
- Resistência de adesão entre o perfil e os núcleos;
- Capacidade de isolamento térmico;
- Capacidade de isolamento acústico.

Para a prossecução dos objectivos anteriormente referidos, tornar-se-á necessário:

- Realizar ensaios de adesão;
- Realizar ensaios de flexão;
- Efectuar ensaios de transmissão térmica;
- Efectuar ensaios de transmissão acústica.

Serão estes os ensaios efectuados a cada um dos diversos perfis. Procura-se assim analisar as vantagens oferecidas por cada tipo de perfil híbrido, no que toca às principais propriedades que se pretendem potenciar. Os resultados serão comparados com os perfis pultrudidos simples e tiradas as respectivas conclusões.

1.3. Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a seguinte metodologia:

- Pesquisa bibliográfica sobre ensaios previamente efectuados sobre produtos similares;
- Pesquisa das normas que deverão reger os ensaios a efectuar;
- Análise e estabelecimento das condições necessárias à realização dos ensaios, nomeadamente dimensões dos provetes, obedecendo às normas e ao modo de fixação dos mesmos, em cada equipamento;

- Estudo do funcionamento dos equipamentos a usar neste trabalho, nomeadamente a máquina universal de ensaios, a casa de alto isolamento e o tubo de ondas estacionárias;
- Recolha e tratamento dos dados correspondentes a cada ensaio;
- Estabelecimento dos procedimentos e metodologias de ensaio mais convenientes;
- Análise e tratamento dos dados;
- Validação final dos resultados;
- Redacção da presente dissertação.

1.4. Estrutura

A estrutura deste trabalho está assente essencialmente em duas partes: Revisão Bibliográfica inicial, onde se pretende enquadrar o leitor com os temas envolvidos na presente dissertação, passando em revista os desenvolvimentos técnicos e científicos que foram publicados em livros e periódicos científicos dedicados à matéria, e o Desenvolvimento do Trabalho Prático propriamente dito, com a referência às metodologias de ensaio seguidas, assim como o tratamento e análise crítica dos resultados.

ESTA PÁGINA FOI, INTENCIONALMENTE, DEIXADA EM BRANCO.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. A Pultrusão: Conceitos gerais

A Pultrusão é um processo de fabrico que se destina à produção de grandes quantidades de perfis, a baixo custo, de geometria contínua e secção constante, em materiais compósitos constituídos por fibras de reforço e matrizes termoendurecíveis.

Este processo é semelhante ao de extrusão dos polímeros, com a grande diferença da matéria-prima em vez de ser empurrada, ser puxada conforme indica o prefixo “pul”, do inglês “pull”.

Este processo inicia-se com a orientação das fibras enroladas em bobines localizadas no início do sistema. Seguidamente, as fibras são orientadas para dentro de uma tina onde se efectua a impregnação das mesmas. Este sistema de orientação das fibras, cuja função também se amplia à remoção de excessos de resina, tem o nome de pré-forma. Após a impregnação das fibras, estas são conduzidas no interior de uma fieira quente, cuja geometria corresponde à geometria final da secção do perfil. A temperatura da fieira é responsável pela cura do material. Depois do molde ou fieira, encontra-se o sistema responsável por “puxar” o material. Por fim, na última fase, efectua-se o corte do perfil para a medida desejada, aquela na qual o perfil é armazenado.

A Figura 1 apresenta esquematicamente todo o processo, com indicação das suas fases.

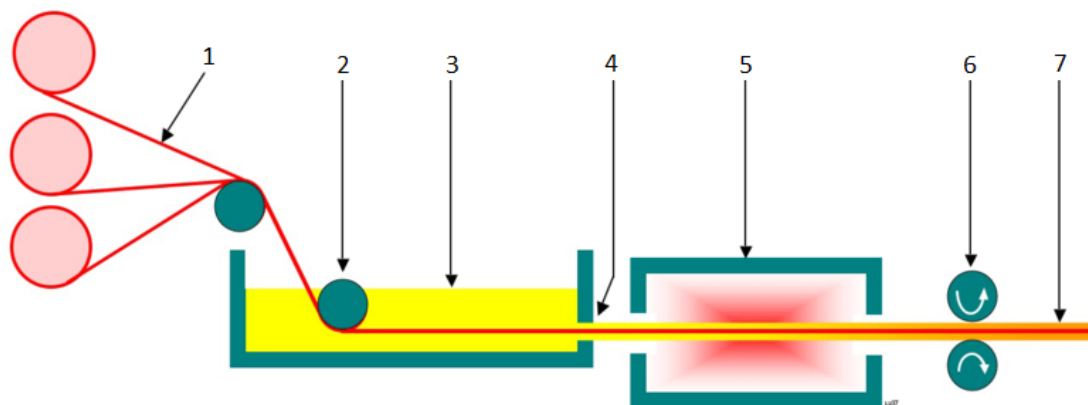


Figura 1: *Layout* do processo de Pultrusão (adaptado de Mécastyle, 21-09-2015).

Legenda:

Ponto 1: Fibras em *Rovings* e mantas orientadas para a pré-forma;

Ponto 2: Pré-formas;

Ponto 3: Impregnação;

Ponto 4: Passagem da impregnação para o molde;

Ponto 5: Fieira;

Ponto 6: Sistema de puxar;

Ponto 7: Zona de corte e fim do processo.

No processo de pultrusão existem dois parâmetros muito importantes a ter em conta, são eles, a velocidade e a temperatura de cura. Quanto maior for a velocidade de produção, maior terá que ser a temperatura do molde e vice-versa. Uma má afinação destes dois parâmetros podem originar defeitos de fabrico, como bolhas, fissuras, cura insuficiente, etc. (Cheremisinoff, 1998).

Este processo é utilizado para o fabrico de uma grande variedade de produto, como por exemplo, vigas, tubos, grades, pisos, passerelles, pontes, corrimões, escadas, postes de iluminação, caixas eléctricas e etc. (Sanjay K. Mazumdar, 2002). Esses produtos tornam-se muito competitivos devido ao seu baixo custo, alta performance, baixo peso e fácil manuseamento.

2.2. Motivações para a produção e aplicação de perfis pultrudidos híbridos

Devido às suas características mecânicas, os polímeros estão cada vez mais presentes no dia-a-dia. As suas aplicações são muito diversas, podendo ser encontradas desde objectos domésticos até acessórios de equipamentos industriais. Ao juntarem-se estes materiais com outros diferentes, como é o caso das fibras de reforço, podem-se obter materiais com propriedades combinadas. Assim, os diferentes materiais podem reunir as suas qualidades, colmatando os seus pontos fracos. A este tipo de materiais dá-se o nome de materiais compósitos.

Os compósitos são, actualmente, materiais que concorrem fortemente com os materiais metálicos, pois, para além das suas boas propriedades mecânicas, ainda podem oferecer outras mais-valias como a resistência à corrosão, a baixa densidade, isolamento térmico e acústico. No entanto, o seu processamento pode-se tornar muito complicado, dependendo da sua geometria, dimensão, tipo de processo, tipo de matriz e fibra, etc.

A pultrusão é um processo que possibilita a criação de perfis contínuos em materiais compósitos de uma forma simples. Estes perfis podem substituir perfis metálicos, melhorando consideravelmente a qualidade da função a que se destinam. Deste modo, o estudo e desenvolvimento destas técnicas, contribuem para a evolução da Engenharia, pois abre a porta a novos materiais disponíveis no mercado, com propriedades melhoradas, responsáveis por um incremento na qualidade de produtos fabricados, assim como em preços mais competitivos.

2.3. Produção de perfis pultrudidos híbridos

É habitual em Engenharia falar-se de materiais híbridos. São um bom exemplo destes as estruturas tipo *Sandwich* constituídas por peles poliméricas ou compósitas e núcleos de reforço como o poliuretano, estruturas em favo de abelha (*honeycomb*), etc. A pultrusão é um processo que permite criar perfis tubulares no mesmo âmbito.

A produção de perfis pultrudidos híbridos consiste em fabricar um perfil tubular em torno de um núcleo de material diferente. Este tipo de processo assemelha-se à pultrusão normal, com a diferença de se inserir um núcleo no início do processo, onde as fibras impregnadas são orientadas à sua volta. Seguidamente, todo o processo é igual, desde a passagem do conjunto no interior do molde, à passagem pelo sistema de puxar e ao corte. Assim, o produto final obtido é um perfil tubular, em que a sua zona oca dá lugar ao preenchimento do núcleo.

A Figura 2 representa esquematicamente o processo, com o pormenor do perfil pultrudido híbrido se encontrar em corte de modo a que se possa observar o núcleo.

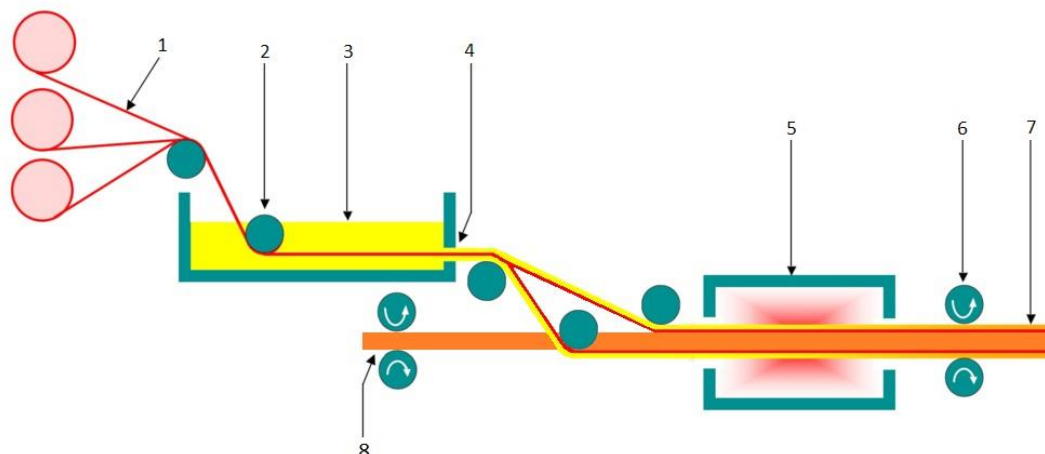


Figura 2: *Layout* do processo de Pultrusão de polímero híbrido (adaptado de Mécastyle, 21-09-2015).

Legenda:

Ponto 1: Fibras dos *Rovings* orientadas para a pré-forma;

Ponto 2: Pré-formas;

Ponto 3: Impregnação;

Ponto 4: Passagem da impregnação para o molde;

Ponto 5: Fieira;

Ponto 6: Sistema de puxar;

Ponto 7: Zona de corte e fim do processo;

Ponto 8: Zona de introdução do núcleo ao processo.

2.4. Caracterização mecânica e física de compósitos de matriz polimérica

A caracterização de materiais pode ser dividida em dois grupos distintos: Propriedades mecânicas e propriedades físicas. No grupo das propriedades mecânicas podemos enumerar a Fluência, a Ductilidade, a Fadiga, a Dureza, a Tenacidade e a Resistência. No grupo das propriedades físicas, podemos enumerar a Composição Química, a Densidade, a Condutividade Eléctrica, a Condutividade Térmica, a Condutividade Sonora e as Propriedades Ópticas (reflexão, refração, transmissão...) (ISQ, 2014).

Para se caracterizar mecânica e fisicamente os compósitos de matriz polimérica, como é comum a todos os materiais em geral, recorre-se à aplicação de alguns tipos de ensaios em amostras do material. Com os resultados dos ensaios obtêm-se grandezas que permitem a avaliação do material e o cálculo da resistência de componentes fabricados do mesmo (Moura *et al.*, 2005).

Os ensaios geralmente utilizados em compósitos de matriz polimérica, por aplicação de esforços, são os de tracção (a), compressão (b), flexão (c), torção (d) e corte (e), conforme ilustra a Figura 3.

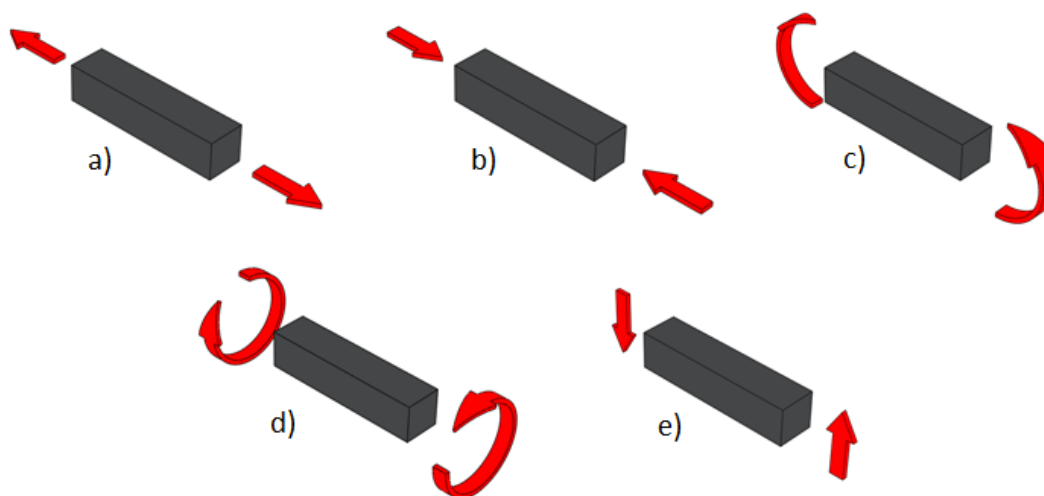


Figura 3: Tipos de sollicitação efectuados nos diferentes ensaios.

Um ensaio muito utilizado também para materiais compósitos é o de calcinação.

Os ensaios de calcinação servem para quantificar a percentagem de fibras existentes na composição do compósito, ou seja $x\%$ de fibra e $(100-x)\%$ de matriz.

Como no presente estudo se pretende caracterizar perfis pultrudidos híbridos, é pertinente a aplicação de outro tipo de ensaios. Apesar da necessidade de se caracterizar as propriedades mecânicas, surge também a necessidade de se ensaiar a resistência da interface do material compósito com o núcleo, assim como a melhoria acrescentada pelo núcleo no que diz respeito aos isolamentos térmico e acústico.

2.4.1. Resistência mecânica

A caracterização da resistência mecânica dos materiais tem como objectivo determinar a ordem de grandeza das dimensões das peças que constituem órgãos de máquinas e/ou estruturas, de modo a que estas resistam aos esforços a que são submetidos. A resistência mecânica de um material é caracterizada por 3 variáveis principais: Módulo de *Young*, Tensão de cedência e Tensão de rotura. A Tensão está directamente relacionada com uma Força aplicada sobre uma determinada Área e pode ser dividida em três diferentes vertentes: Tensão de tracção, Tensão de compressão e Tensão de corte (ISQ, 2014).

Para se quantificar estas propriedades, um dos ensaios mais comuns é o ensaio de tracção, devido à sua facilidade de execução e reprodutibilidade dos resultados.

O ensaio de tracção trata-se de um ensaio destrutivo, ao qual se sacrifica um provete do material em estudo. Todo o procedimento do ensaio, assim como a geometria do provete devem obedecer a uma norma adequada (Davim *et al.*, 2010).

Podem ser encontradas algumas normas elaboradas por diferentes organizações, como a ISO (*International Standards Organisation*), a ASTM (*American Society for Testing Materials*) e o CRAG (*Composites Research Advisory Group*) (Moura *et al.*, 2005).

Uma norma muito comum para realização de ensaios de tracção em materiais compósitos é a EN ISO 527-4 : 1997.

O ensaio de tracção realiza-se através da fixação de um provete com geometria e dimensões normalizadas, pelas suas extremidades e aplicação de uma força de tracção (F) com a direcção alinhada ao eixo do provete (Soares, 2009).

As máquinas utilizadas para estes ensaios têm sistemas que registam a curva que traduz o comportamento do provete perante o esforço (Força e Deslocamento). A Figura 4 apresenta uma curva típica deste processo.

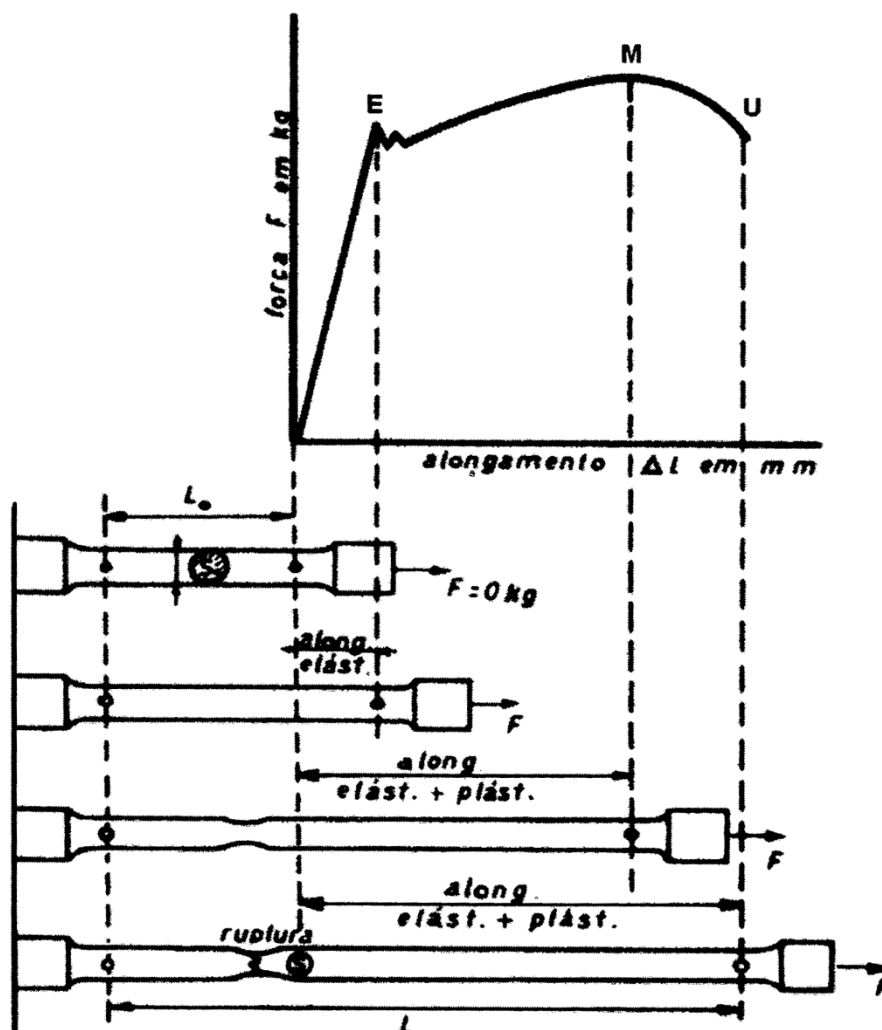


Figura 4: Diagrama Força-Alongamento e representação esquemática do comportamento do provete durante o ensaio de tracção. (Soares, 2009). [\(Trocar Imagem\)](#)

Até ao ponto E, o provete encontra-se na zona elástica e alonga-se proporcionalmente à força. Nesta zona se a solicitação da força for suspensa o provete retoma o seu comprimento inicial (L_0). Se se continuar a aumentar a força, passa-se para a zona elástica até ao ponto M. Nesta zona, o alongamento deixa de ser proporcional à força, e se esta for suspensa, o provete não retoma o seu comprimento inicial. Com o aumento do alongamento do provete, a secção começa a diminuir e quando se atinge o valor máximo da força, no ponto M, verifica-se um estrangulamento numa determinada zona do provete. A partir deste momento, o alongamento continua a aumentar e a força a diminuir, até se dar a rotura do provete no ponto U. Ao efeito de estrangulamento referido anteriormente dá-se o nome de estrição (Soares, 2009). Para se poder comparar provetes de secção diferente não se utiliza os valores de força, mas sim os da Tensão (Soares, 2009).

Para fazer a passagem para a curva convencional de tensão *versus* extensão ($\sigma - \epsilon$), faz-se através das seguintes relações (Davim *et al.*, 2010):

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

Onde F representa a força e S_0 a secção inicial do provete e (Davim *et al.*, 2010):

$$\epsilon = 100 \frac{l_f + l_e}{l_e} \quad (2)$$

onde l_f e l_e representam respectivamente o comprimento final e o comprimento inicial do provete (Davim *et al.*, 2010).

Na zona elástica existe uma proporcionalidade entre a força e o alongamento e/ou entre a tensão e a extensão, pois ambas as curvas apresentam uma configuração semelhante. Esta zona pode ser traduzida analiticamente pela equação da Lei de *Hooke* (Davim *et al.*, 2010):

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

Segundo a norma NP10002-1, as curvas tensão-extensão podem ser divididas em três tipos: com patamar de cedência, com tensão limite convencional de proporcionalidade a $\eta\%$ e com tensão limite convencional de elasticidade (Davim *et al.*, 2010).

A Figura 5 apresenta os três tipos.

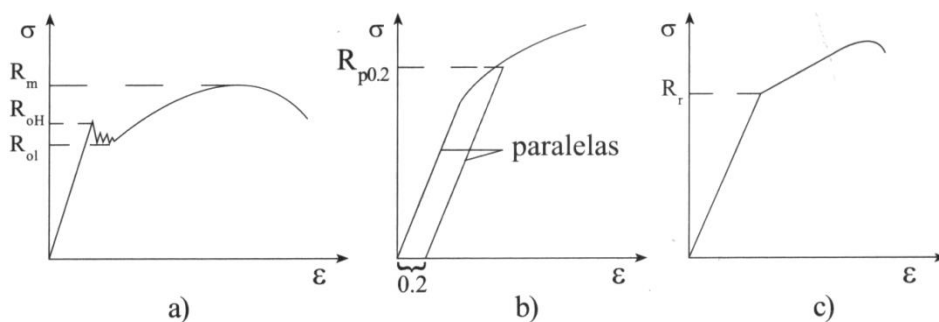


Figura 5: Curvas típicas Tensão-Extensão: a) com patamar de cedência; b) com tensão limite convencional de proporcionalidade a $\eta\%$; c) com tensão limite convencional de elasticidade (Davim *et al.*, 2010).

Nos materiais compósitos, os ensaios de tracção são geralmente aplicados a situações em que as fibras são unidireccionais do tipo $[0]_n$ e $[90]_n$ (Moura *et al.*, 2005).

Os compósitos deste tipo geram dificuldades na obtenção dos seus provetes, pois trata-se de materiais de natureza anisotrópica. Esta natureza dificulta a caracterização do material, devido à variação da resistência em função do alinhamento das fibras (Moura *et al.*, 2005).

Como a composição dos materiais compósitos é heterogenea, os ensaios apresentam uma grande dispersão de resultados, o que obriga ao ensaio de um número considerável de amostras (Moura *et al.*, 2005).

No Sistema Internacional de unidades, as grandezas utilizadas neste ensaio são: a Tensão em Pascal [Pa], a Força em Newton [N] e a secção de provete em milímetros quadrado [mm²]. O Módulo de *Young*, como se trata de uma grandeza de proporcionalidade, é também apresentado em Pascal [Pa] (Moura *et al.*, 2005).

2.4.2. Resistência à compressão

O ensaio de compressão consiste em solicitar o provete com uma força de compressão uniaxial, continuamente crescente, efectuando-se em simultâneo o registo da força aplicada e o valor de compressão sofrido pelo provete (Davim *et al.*, 2010).

Estes ensaios são pouco utilizados na obtenção de propriedades mecânicas dos materiais, pois apresentam algumas limitações como são exemplo: o atrito entre o provete e os pratos da máquina, a possibilidade de encurvadura do provete e os erros de medida frequentes (Davim *et al.*, 2010).

A ductilidade do material também influencia as condições de ensaio. No caso dos materiais dúcteis, é difícil medir as forças máximas e de rotura, o que se traduz numa medição de resultados com boa precisão apenas para a zona elástica (Davim *et al.*, 2010).

Um outro fenómeno que ocorre é da deformação geométrica de provetes cilíndricos na zona plástica, quando o material é dúctil. A Figura 6 apresenta esta deformação (Davim *et al.*, 2010).

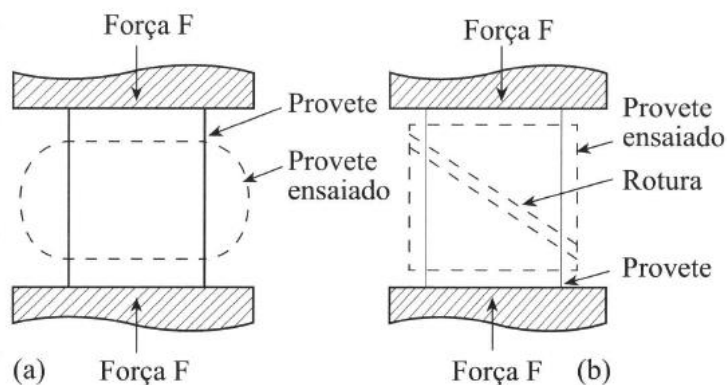


Figura 6: Esquema do ensaio de Compressão (Davim *et al.*, 2010).

Legenda:

- a) Metal dúctil – deformação sem rotura;
- b) Metal frágil deformação lateral com rotura.

No caso dos materiais frágeis, há dificuldade em medir a zona elástica por esta ser muito pequena. Por outro lado, para materiais dúcteis, as propriedades mecânicas da zona elástica podem ser quantificadas pela utilização da Lei de *Hooke* (Davim *et al.*, 2010).

Tem-se verificado que os resultados não são fiáveis na aplicação destes ensaios em materiais compósitos, quando a solitação é efectuada longitudinalmente. Este problema deve-se à tendência que o provete tem na propensão à encurvadura, o que obriga a que o comprimento livre do provete seja reduzido. Este problema obriga à utilização de insertos colados que provocam o efeito de *Saint-Venant*, originando a rotura junto aos mesmos (Moura *et al.*, 2005).

Segundo J. F. Silva Gomes, o princípio de *Saint-Venant* pode ser expresso da seguinte forma: "Se o sistema de forças que actua sobre uma pequena área da superfície dum corpo elástico por um outro sistema de forças estaticamente equivalente actuando sobre a mesma área, essa redistribuição da carga poderá produzir alterações substanciais das tensões na vizinhança imediata da zona de aplicação da carga, mas as tensões permanecerão essencialmente inalteradas nas regiões mais afastadas do corpo, a partir de uma distância considerável em relação às dimensões da área de carregamento." (Gomes, 2010).

Têm sido desenvolvidas algumas normas para os ensaios de compressão como a ASTM D 3410 e o CRAG. A norma ASTM apoia-se na utilização dos dispositivos *Celanese* e no IITRI que tem sido o mais utilizado (Moura *et al.*, 2005).

A Figura 7 apresenta o dispositivo *Celanese* e a Figura 8 o dispositivo IITRI.

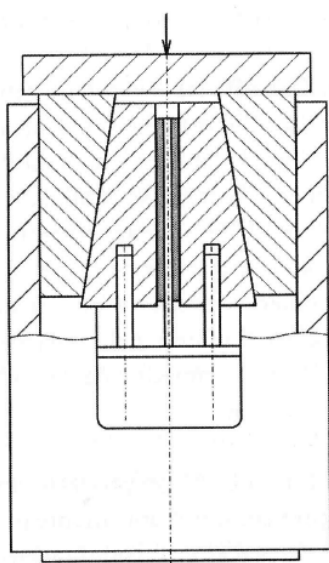


Figura 7: Dispositivo *Celanese* (Moura, Morais, & Magalhães, 2005).

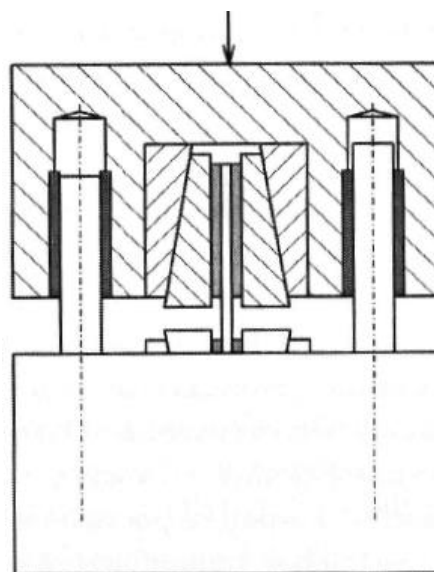


Figura 8: Dispositivo IITRI (Moura, Morais, & Magalhães, 2005).

Para ensaios em provetes tipo *sandwich*, com núcleo em favo de abelha e pele superior em laminado, os ensaios de compressão podem ser regidos pela norma ASTM D 5467, em que a técnica utilizada é a de um ensaio de flexão em 4 pontos. Um outro método para provetes *sandwich*, cujo núcleo é a matriz do compósito, é o ensaio com o dispositivo IITRI, já anteriormente apresentado (figura acima) (Moura *et al.*, 2005).

No Sistema Internacional de unidades, as grandezas utilizadas neste ensaio são exactamente as mesmas que nos ensaios de tracção.

2.4.3. Resistência à flexão

A resistência à flexão é dimensionada a partir do ensaio à flexão. Este tipo de ensaio é geralmente utilizado em materiais frágeis para determinar o módulo de elasticidade à flexão, a flecha e a tensão de rotura. Este ensaio tem tanto mais aplicação, quanto mais duro for o material. No entanto, para materiais muito frágeis, os resultados podem apresentar uma dispersão até 25%. Esta dispersão de resultados implica a realização de vários ensaios e o estabelecimento de valores médios (Davim *et al.*, 2010).

O ensaio de flexão consiste em apoiar o provete em dois pontos a uma distância (L) e aplicar uma solicitação lentamente num ponto ao centro do provete (Davim *et al.*, 2010).

Os ensaios de flexão dividem-se em dois tipos, que se designam por flexão em 3 pontos e flexão em 4 pontos, conforme o número total de pontos de carregamento e apoio. O ensaio de flexão em 4 pontos tem a vantagem de criar momento flector constante sem corte transversal na zona situada entre os dois pontos de carregamento ao centro. A Figura 9 e a Figura 10 seguintes ilustram este fenómeno (Moura *et al.*, 2005).

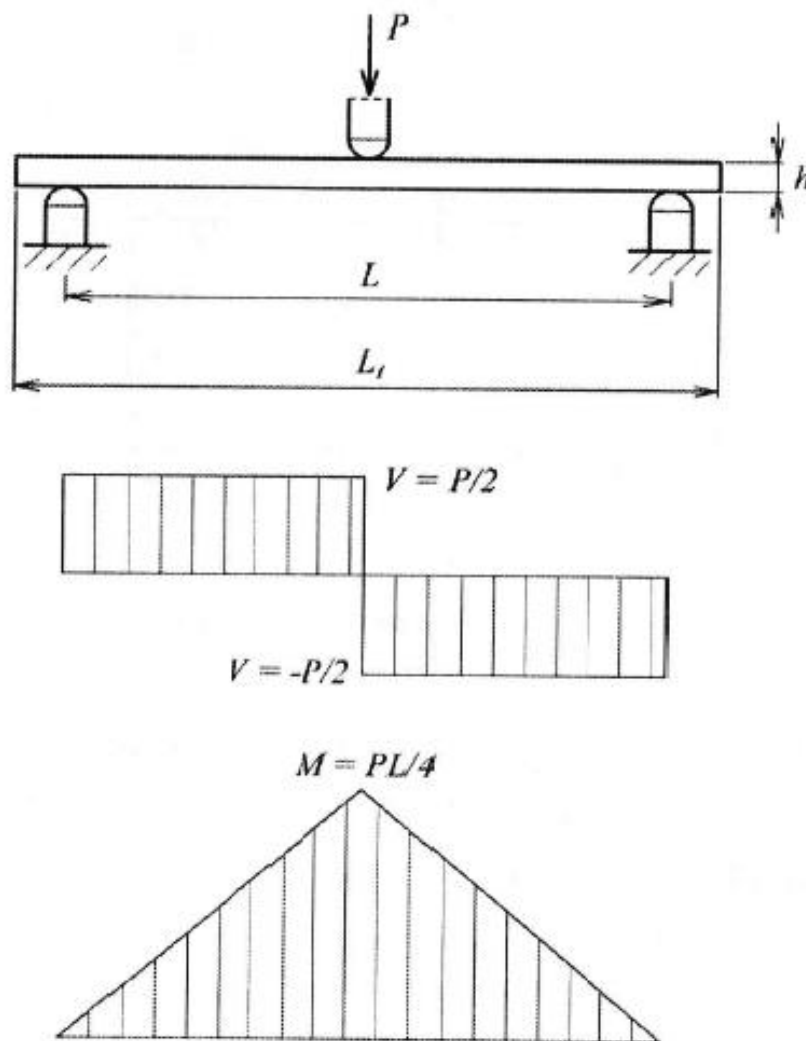


Figura 9: Ensaio de flexão em 3 pontos com os diagramas de esforços de corte V e de Momento flector M (Moura *et al.*, 2005).

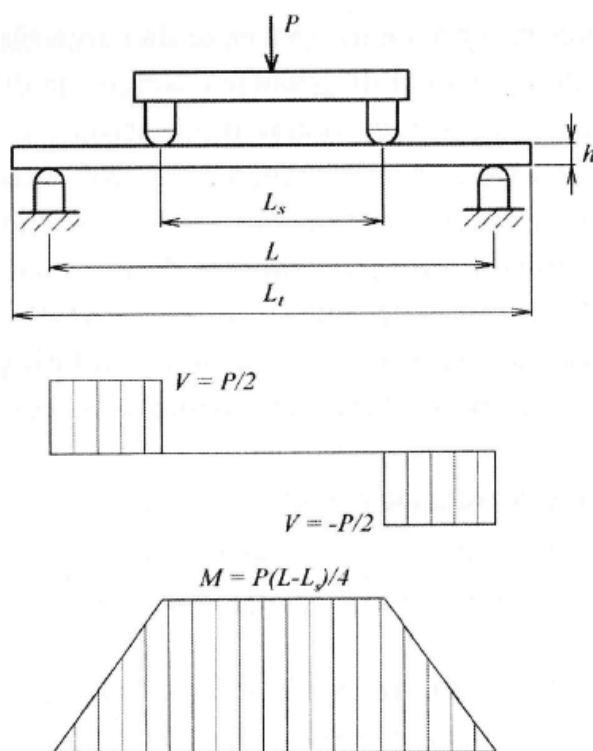


Figura 10: Ensaio de flexão de 4 pontos com os diagramas de esforços de corte V e de momento flector M (Moura *et al.*, 2005).

Tal como nos ensaios de tracção e compressão, as dimensões dos provetes são muito importantes. Existem algumas normas para a realização deste ensaio, como ISO 14125 e a ASTM D 790 (Moura *et al.*, 2005).

Neste estudo realizaram-se dois tipos de ensaios de flexão: o primeiro, com o objectivo de se determinar a resistência à flexão e o seu modo de rotura, e o segundo para se determinar a rigidez à flexão e ao corte.

Para se determinar a resistência à flexão foram utilizados provetes com 570 mm de comprimento, utilizando-se um vão de 540 mm. Este ensaio não seguiu nenhuma norma ou especificação.

Para se determinar a rigidez à flexão e ao corte, foi seguida a norma EN 13706-2 Anexo G e método A. O comprimento dos provetes utilizados foi de 1300, 1050, 850, 550 e 300 mm.

Segundo a norma EN 13706-2 Anexo G, método A, podemos determinar a rigidez à flexão e ao corte. Este método é adequado para perfis pultrudidos de parede fina e simétrica, mas não angulares (Dansk Standards Association, 2002).

Um perfil pultrudido simples de secção transversal regular é repetidamente carregado (elasticamente), como uma simples viga em três pontos, a um número de diferentes comprimentos de vão. A contribuição de corte e de flexão para todas as deflecções das vigas varia em função do vão de ensaio. Traçando os resultados para cada vão como L^2 vs s/PL e $1/L^2$ vs s/PL^3 , reproduz-se a rigidez de flexão e de corte. Durante o processo, a força aplicada, assim como a deflexão deve ser mensurada (Dansk Standards Association, 2002).

Termos e definições segundo a norma EN 13706-2 Anexo G:

- Resistência à flexão (D) – $N \cdot mm^2$;
- Resistência ao corte (Q) – N;
- Vão – L mm;
- Deflexão da viga (s) – mm;
- Segundo momento de Inércia (I) - mm^4 ;

A máquina de ensaio deve estar conforme a norma ISO 5893, assim como ter um indicador de carga cujo erro não exceda $\pm 1\%$ da escala respectiva. Alternativamente, pode ser utilizado um sistema de teste de peso morto (Dansk Standards Association, 2002).

A deflexão a meio vão deve ser medida com o auxílio de um aparelho de precisão de $\pm 1\%$ do valor indicado, como um comparador, um Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT), ou equivalente (Dansk Standards Association, 2002).

O membro de carga e os suportes devem ter raios respectivamente de 100 mm e 50 mm, no mínimo. A tolerância máxima permitida será de 2% de na circularidade no elemento de carga e não deve também ultrapassar 1% da sua largura, em termos de linearidade do seu eixo. O comprimento do membro de carga e dos suportes deve ser maior que a largura dos provetes. O vão entre os suportes deve ser ajustável (Dansk Standards Association, 2002).

Os provetes devem ser cortados com 1,2 vezes o vão de ensaio, tem que ser plano e livres de torceduras. Além disso, devem ser ensaiados 2 provetes para cada método e quando se obtiverem diferenças de resultados na ordem dos 5%, um terceiro provete deve ser testado (Dansk Standards Association, 2002).

A gama de medida dos vãos a testar deve ser escolhida de modo a cobrir os valores maiores e menores relativamente ao comprimento crítico estimado do perfil a testar ou para cobrir a

gama do equipamento de teste de três pontos usado. A gama de vãos deve ser espaçada de forma razoável e um mínimo de 5 vãos devem ser testados (Dansk Standards Association, 2002).

O provete deve ser deflectido até uma distância igual a $L/200$ (ex: vão de teste dividido por 200) (Dansk Standards Association, 2002).

O equipamento de teste deve ser ajustado para o maior provete da gama escolhida, e o mesmo deve ser colocado de forma simétrica através de dois suportes paralelos. A força deve ser aplicada de forma uniforme através da largura do provete por intermédio do elemento de carga, paralelo e a meio, entre os dois suportes. Este procedimento deve ser repetido para cada vão escolhido, começando com o maior e terminando com o menor. Quando se coloca o provete, o excesso de material fora dos suportes deve ser igual dos dois lados, de modo a que se mantenha o provete centrado (Dansk Standards Association, 2002).

A força e a deflecção a meio-vão devem ser registados para cada teste, usando, se aplicável, um registo automático da curva carga/deslocamento para esta operação (Dansk Standards Association, 2002).

Método de cálculo e expressão de resultados:

1. Em cada vão, através de um gráfico de deslocamento (no eixo dos xx) relativamente à carga (no eixo dos yy), mede-se o declive (P/s) em Newton por milímetro, N/mm) da secção linear do gráfico.
2. Traça-se o gráfico L^2 (eixo dos XX') de frente a s/PL (eixo dos YY') conforme a Figura 11 e $1/L^2$ (eixo dos XX') relativamente a s/PL^3 (eixo dos YY') conforme a Figura 12, para todos os comprimentos ensaiados. Para além disso, valores individuais de L^2 , s/PL , $1/L^2$ e s/PL^3 devem estar tabelados.
3. Calcular a resistencia à Flexão, D , a partir do declive da linha recta através dos pontos do gráfico L^2 vs s/PL .

Onde:

- D é a rigidez à flexão, Nmm^2 ;
- P é a carga, N ;
- S é a deflecção a meio vão, mm ;

- L é o vão, mm.

O módulo de Flexão E_{eff} , apresentado em Giga Pascal, é obtido através da seguinte expressão:

$$E_{eff}=D/I \quad (4)$$

onde I é o segundo momento da Inércia do perfil em mm^4 .

4. Cortar a resistência ao corte, Q , a partir do declive da linha recta do gráfico de $1/L^2$ vs s/PL^3 .

Onde:

- Q é a resistêncai ao corte, N;
- P é a carga, N;
- S é a deflecção a meio-vão, mm;
- L é o vão.

O módulo de corte, G_{eff} , expresso em Giga Pascal, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$G_{eff}=Q/A \quad (5)$$

Onde:

A é a área da secção transversal do perfil em mm^2 .

NOTA: O declive de L^2 vs s/PL deve corresponder com a intercepção de $1/L^2$ vs s/PL^3 e a intercepção de L^2 vs s/PL deve corresponder ao declive de $1/L^2$ vs s/PL^3 .

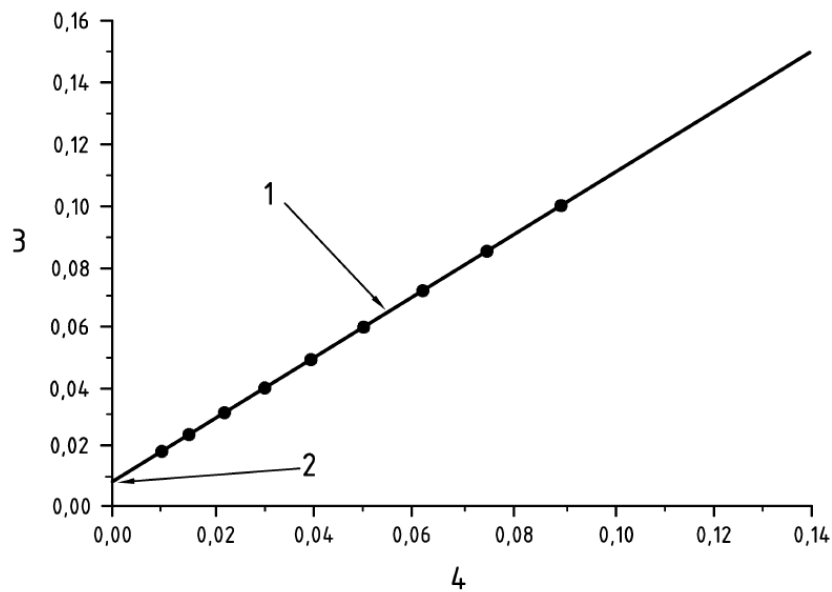


Figura 11: Gráfico L^2 vs s/PL (Dansk Standards Association, 2002).

Legenda:

- 1 – Declive= $1/48D$;
- 2 – Intercept= $1/4D$;
- 3 – s/PL ($\times 10^{-3} \text{ N}^{-1}$);
- 4 – L^2 ($\times 10^6 \text{ mm}^2$).

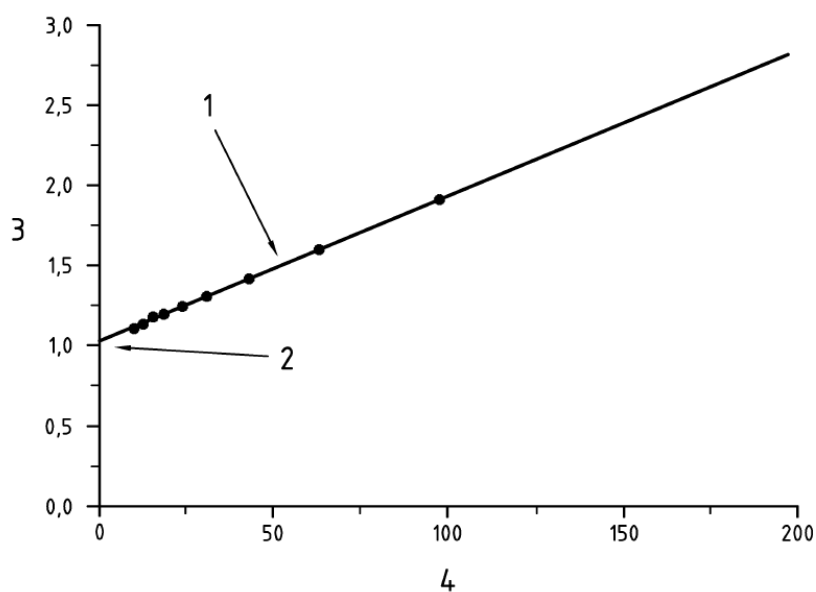


Figura 12: Gráfico $1/L^2$ vs s/PL^3 (Dansk Standards Association, 2002).

Legenda:

1 – Declive=1/4Q;

2 – Intercept=1/48D;

3 – s/PL^3 ($\times 10^{-9} \text{ N}^{-1}\text{mm}^{-2}$);

4 – $1/L^2$ ($\times 10^{-6} \text{ mm}^{-2}$).

2.4.4. Isolamento térmico

O isolamento térmico dos materiais é estudado com base nos processos físicos responsáveis pelo transporte ou transferência de calor. Além disso, relações empíricas estão disponíveis para avaliar a transferência de energia que envolvem um modo combinado, chamado convecção.

Existem métodos baseados na experimentação disponíveis para avaliarem a energia transferida pelo calor. Estes métodos reconhecem dois mecanismos básicos de transferência: a condução e a radiação térmica (Moran *et al.*, 2014).

A Figura 13 ilustra os 3 modos de transferências de calor.

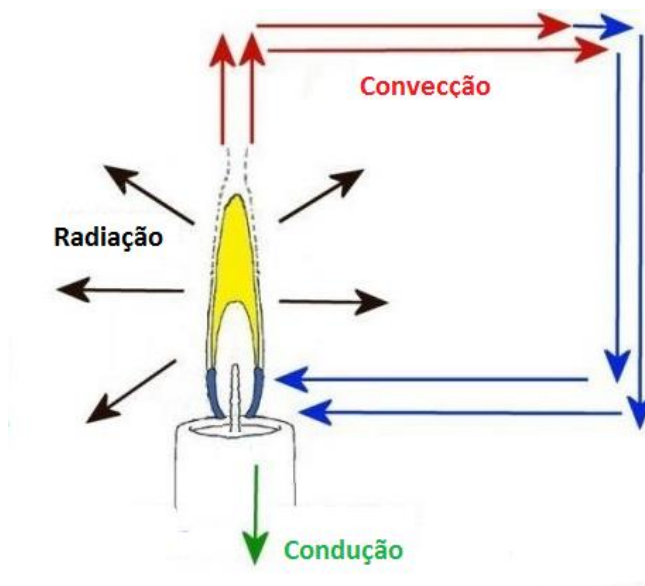


Figura 13: Modos de transferências de calor (adaptado de quimicaensinada, 11-05-2013).

A transferência de energia por condução pode dar-se nos sólidos, líquidos ou gases. A condução pode ser vista como a transferência de energia a partir das partículas mais

energéticas de uma substância, para as partículas adjacentes que tem menos energia, por meio de interacção das mesmas (Moran *et al.*, 2014).

A radiação térmica é emitida pela matéria como resultado de alterações nas configurações electrónicas dos átomos ou moléculas no seu interior. A energia é transportada por ondas electromagnéticas (ou fotões). Ao contrário da condução, a radiação térmica não requer nenhum meio intermediário para a propagação e pode mesmo ocorrer no vácuo. Superfícies sólidas, gases e líquidos, todos emitem, absorvem e transmitem radiação para graus variados (Moran *et al.*, 2014).

A transferência de energia entre uma superfície sólida a uma temperatura (t_b) e um gás ou líquido adjacente com uma temperatura (t_f), onde $t_b > t_f$, dá-se um fenómeno de destaque no desempenho de muitos dispositivos de interesse prático. Este fenómeno é conhecido por convecção (Moran *et al.*, 2014).

Consideremos a Figura 14, onde está representada uma parede plana de espessura L no estado de equilíbrio, em que a temperatura $T(x)$ varia de forma linear com a posição x . Pela Lei de Fourier, a taxa de transferência de calor através de qualquer plano normal para a direcção x , \dot{Q}_x é proporcional à área A da parede, e ao gradiente de temperatura na direcção de x , dT/dx (Moran *et al.*, 2014):

$$\dot{Q}_x = -KA \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

onde a constante de proporcionalidade K é a propriedade chamada de condutividade térmica. O sinal menos é a consequência da transferência de energia na direcção da diminuição da temperatura (Moran *et al.*, 2014).

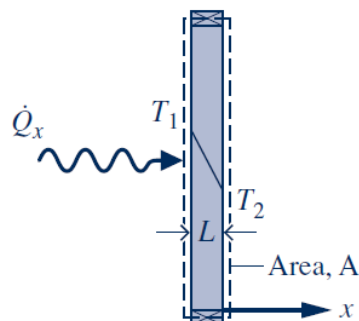


Figura 14: Ilustração da Lei de Fourier (Condução) (Moran *et al.*, 2014).

No âmbito deste estudo, o preenchimento do interior do perfil com o núcleo pode alterar significativamente a capacidade de isolamento térmico por dois motivos. O primeiro, pela diferença de condutividade térmica entre o ar (normalmente existente no interior do perfil simples) e o material do núcleo. O segundo deve-se ao facto do ar e o núcleo poderem apresentar modos de transferência de calor diferentes. No caso do núcleo, sabe-se que se trata de um sólido, cuja transferência de calor se realiza por condução. No entanto, o ar, como se trata de um fluido, pode transferir o calor por condução ou convecção, conforme as circunstâncias, tais como a espessura da camada de ar e a diferença de temperatura.

Para se fazer medição do isolamento térmico, existem algumas técnicas, tais como a termografia ou a utilização de termopares para medir as variações de temperatura (Δt), etc.

Neste trabalho, para se caracterizarem os perfis a nível de isolamento térmico, utilizou-se uma casa modelo de alto isolamento, com paredes substituíveis da PHYWE. A Figura 15 apresenta a casa modelo.

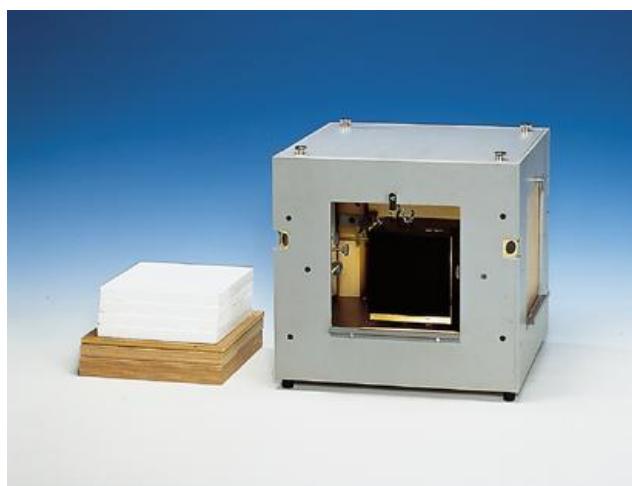


Figura 15: Casa modelo de alto isolamento PHYWE com paredes substituíveis (PHYWE, 01-09-2014).

Esta casa permite calcular o coeficiente de condução térmica k dos materiais. Para isso, é necessário fabricarem-se provetes do material em estudo com as dimensões adequadas para se substituírem as paredes da casa.

Em conjunto com a casa, é necessário também uma fonte de calor para se ajustar a temperatura no seu interior e um conjunto de termopares para se registarem as diferenças de temperatura no interior e exterior dos provetes.

A Figura 16 apresenta a fonte de calor regulável, para casas isoladas da PHYWE.



Figura 16: Regulador térmico para casas de alto isolamento PHYWE (PHYWE, 01-09-2014).

O regulador térmico permite ajustar a temperatura dentro da casa de alto isolamento térmico entre 35°C e 70°C, sendo possível registar graficamente as fases de aquecimento (PHYWE Systeme GmbH & Co.).

As temperaturas dentro e fora da casa foram medidas pelo equipamento *Hand-Held Measuring Instrument 2 x NiCr-Ni* da PHYWE. Este equipamento serve para medir e avaliar até duas temperaturas e a diferença de temperaturas em ensaios, quer em laboratórios, quer ao ar livre (PHYWE Systeme GmbH & Co.).

A Figura 17 apresenta o *Hand-Held Measuring Instrument 2 x NiCr-Ni* da PHYWE.



Figura 17: *Hand-Held Measuring Instrument 2 x NiCr-Ni* da PHYWE (PHYWE, 01-09-2014).

Para medir as temperaturas no interior e exterior da casa, utilizaram-se termopares *Easylog* com amplitude de -30°C a 100°C.

A Figura 18 apresenta termopares *Easylog* instalados num provete pelo lado exterior da casa PHYWE.

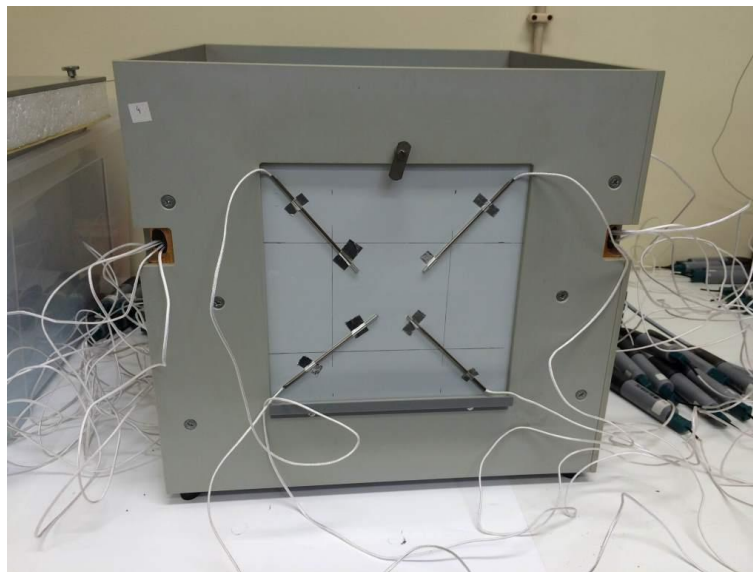


Figura 18: Casa PHYWE com termopares *Easylog* instalados no seu exterior.

O calor define-se como sendo o processo de transferência de energia de um corpo ou sistema, para outro corpo ou sistema, devido a uma diferença de temperaturas (Marques *et al.*, 2008).

Segundo Fourier, a equação de calor transferido por condução na parede é (Marques *et al.*, 2008):

$$q = \frac{k}{e} A (T_{pi} - T_{pe}) \quad (7)$$

Em que:

- q – Quantidade de calor transferido por convecção [W];
- k – Condutividade térmica $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$;
- A – Área de transferência de calor [m^2];
- e – Espessura [m];
- T_{pe} – Temperatura de parede exterior [K];
- T_{pi} – Temperatura de parede interior [K].

A quantidade de calor transferido por convecção na parede interior e exterior é dada por (Marques *et al.*, 2008):

$$q = hA(T_p - T) \quad (8)$$

Em que:

- q – Quantidade de calor transferido por convecção [W];
- h – Coeficiente peculiar $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$;
- A – Área de transferência de calor [m^2];
- T_p – Temperatura de parede [K];
- T – Temperatura do ambiente [K].

Sabendo que $h = 8,1 \left[\frac{W}{m^2K}\right]$ e, registrando as temperaturas em estado estacionário, pode-se determinar o calor transferido por convecção e a condutividade k (Marques *et al.*, 2008).

2.4.5. Isolamento acústico

Entende-se por isolamento acústico, a capacidade que os materiais têm de resistir à propagação das ondas sonoras. Quanto maior a resistência, melhor o isolamento.

O som é a propagação de uma frente de compressão mecânica, que se propaga de forma circunferencial, apenas em materiais que possuem massa e elasticidade, tal como os sólidos, líquidos e gases. O som caracteriza-se pela frequência em Hertz [Hz] e pela amplitude em decibéis [dB] (Só física, 2008).

Quanto ao ambiente ou material onde o som se propaga, pode-se medir também a velocidade de propagação em metro por segundo [m/s].

O som, para o ouvido humano, está limitado ao intervalo de 20 Hz a 20 KHz de Frequência. Caracterizam-se por infra-sons as frequências inferiores a 20 Hz e ultra-sons as frequências superiores a 20 KHz (Castro, 2012).

Apesar dos ultra-sons não serem audíveis ao ouvido humano, propagam-se sob a forma de vibrações que podem ser detectadas e convertidas em sinais eléctricos por equipamentos próprios, o que permite a quantificação da sua intensidade. Desta forma, podem-se efectuar ensaios de isolamento acústicos com equipamentos de ultra-sons, com a vantagem de ser um método não destrutivo (Castro, 2012).

Para se determinar a capacidade de isolamento acústico dos materiais, existem vários ensaios conhecidos. Dois ensaios muito frequentes na caracterização de isolamento acústico nos materiais são: a Câmara Reverberante e o Tubo de Ondas Estacionárias.

Para se realizar um ensaio pelo método da Câmara Reverberante, são necessários provetes de grande dimensão, que podem variar entre os 10 m² e os 12 m². Já no ensaio de Tubo de Ondas estacionárias, os provetes apenas necessitam de uma dimensão igual à secção do tubo (Rodrigues, 2008).

Para caracterização dos Perfis Pultrudidos Híbridos em estudo, utilizou-se o ensaio de Tubo de Ondas Estacionárias, por se adequar melhor à dimensão dos provetes.

2.4.5.1. Tubo de Ondas Estacionárias

Pelo método de ensaio do Tubo de Ondas Estacionárias, o coeficiente de absorção sonora de um material pode ser obtido conforme especificado na norma ISO 10531-1:1996 (Rodrigues, 2008).

Este ensaio consiste em inserir numa extremidade dum tubo metálico um provete com secção igual. Na outra extremidade do tubo há um pequeno altifalante com um orifício para passagem de uma vareta com um microfone na ponta, de forma a se poder movimentar o microfone no interior do tubo. A deslocação do microfone é realizada por intermédio da movimentação de um carrinho ao qual a vareta está ligada, que se movimenta sobre uns carris. A sobreposição da onda sonora emitida com a onda sonora reflectida na amostra em estudo, dá origem à formação de uma onda estacionária dentro do tubo (Rodrigues, 2008).

As pressões máximas ($P_{máx}$) e mínimas (P_{min}) da onda estacionária, são determinadas como auxílio de um sonómetro e regista-se a distância a que a primeira pressão mínima ocorre da amostra ($x_{min,1}$) (Rodrigues, 2008). A Figura 19 representa estas condições.

$|P(x)|$

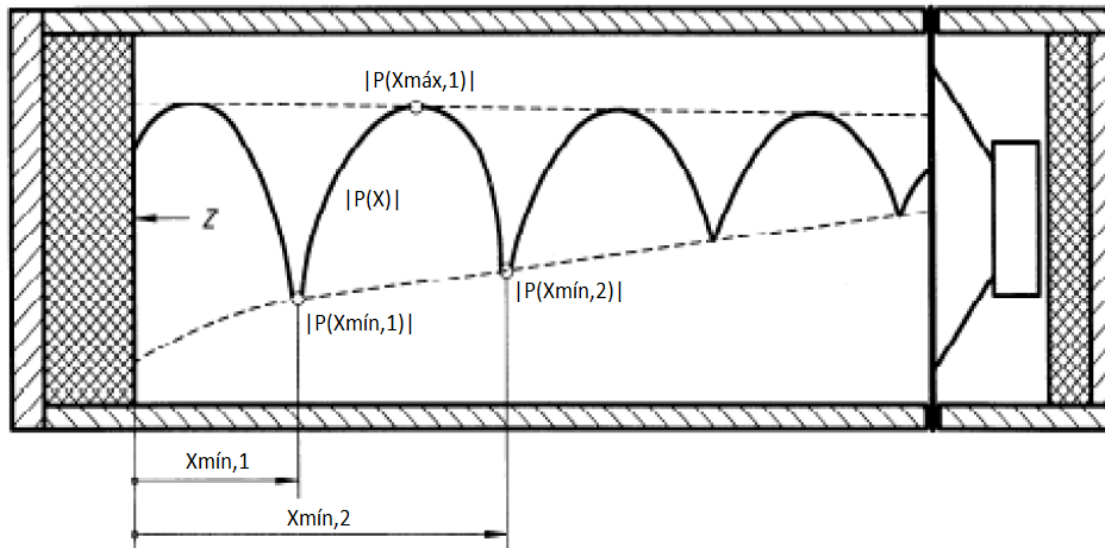


Figura 19: Onda estacionária no tubo de impedância (adaptado de ISO 10531-1:1996).

A partir destes dados determinam-se as propriedades acústicas do material em estudo. A primeira pressão máxima determina-se entre os dois primeiros mínimos.

2.4.5.2. Determinação do coeficiente de absorção sonora

Para determinação do coeficiente de absorção sonora (α), em primeiro lugar tem que se definir o intervalo de frequências de trabalho, $f_1 < f < f_u$. Este intervalo é determinado em função da dimensão e da secção transversal do tubo (Rodrigues, 2008).

Para que seja possível obter o limite inferior F_1 no tubo de impedâncias, é necessário que o comprimento do tubo, l , tenha a seguinte relação com o comprimento de onda (λ_0):

$$l = \frac{3\lambda_0}{4} \quad (9)$$

Além disso, o comprimento entre a face do provete e o altifalante, l , deve ter de comprimento, no mínimo:

$$l = \frac{250}{f} + 3d \quad (10)$$

Onde:

- d – Diâmetro interior do tubo circular, em metros;
- f – Frequência, em Hz.

A limitação inferior tem o objectivo de, na eventualidade de surgirem frequências superiores às que estão a ser estudadas (geradas pelo altifalante ou por objectos cujas propriedades oscilem lentamente), não influenciem os resultados obtidos nas medições (Rodrigues, 2008).

O limite superior da frequência tem o objectivo de impedir o aparecimento de ondas transversais no tubo, que possam vir a afectar as medições. Assim, tubos circulares de diâmetro (d) devem respeitar as seguintes condições (Rodrigues, 2008):

$$d = 0,58\lambda_0 \quad (11)$$

e

$$d = \frac{200}{fu} \quad (12)$$

Para se evitarem erros nas medições, é necessário ter em conta as atenuações do próprio tubo. Estas atenuações do tubo (K_0) devem ser calculadas para cada uma das frequências em estudo com o tubo vazio. Medem-se as pressões mínimas $p(x_{\min,n})$ e $p(x_{\min,n+1})$ com $n=1,2,3,\dots$, através da seguinte expressão (Rodrigues, 2008):

$$\Delta n = \frac{|p(x_{\min,n+1})| + |p(x_{\min,n})|}{|p(x_{\max,n})|} = 2 \sinh\left(\frac{K_0''\lambda_0}{4}\right) \quad (13)$$

Obtendo-se assim,

$$K_0'' = \frac{4}{\lambda_0} \operatorname{arcsinh} \frac{\Delta n}{2} \quad (14)$$

Se não for possível determinar dois valores de pressão mínima com precisão suficiente (como no caso das baixas frequências, onde é necessário um comprimento de tubo elevado, devido ao elevado comprimento de onda para essas frequências), o valor da constante de atenuação do tubo pode ser determinado pela seguinte expressão (Rodrigues, 2008).

$$K_0'' = 1,94 \times 10^{-2} \left(\sqrt{\frac{f}{C_0}} \times d \right) \quad (15)$$

Para se calcular o coeficiente de absorção sonora, tem que se colocar o provete no tubo de impedância e registarem-se os seguintes valores:

- Frequências emitidas pelo gerador de sinal;
- Pressão mínima ($p_{\min, n}$);
- Distância para o qual ocorre (x_{\min});
- Pressão máxima ($p_{\max, n}$).

Em casos em que os valores do tubo de impedância forem medidos numa escala logarítmica (em dB), é possível determinar a variação de pressão entre o máximo e o mínimo ΔL registado, em dB, e o rácio da onda estacionária S_n , a qual permite obter a magnitude do factor de reflexão $|r|$ (Rodrigues, 2008):

$$S_n = 10^{\frac{\Delta L}{20}} \quad (16)$$

$$|r| = e^{2K_0'' X_{\min, n}} \frac{S_n - e^{K_0'' \frac{\lambda_0}{4}}}{S_n + e^{-K_0'' \frac{\lambda_0}{4}}} \quad (17)$$

Através do valor da magnitude do factor de reflexão $|r|$, é possível determinar o coeficiente de absorção sonora para uma incidência normal (α_n), pela seguinte expressão:

$$\alpha_n = 1 - |r|^2 \quad (18)$$

Já o Coeficiente de Absorção Sonora para o campo difuso (α_{st}), baseado pelo anexo D da Norma ISO 10534-1, pode ser calculado segundo a fórmula seguinte:

$$\alpha_{st} = 8 \frac{Z'}{Z'^2 + Z''^2} \left[1 - \frac{Z'}{Z'^2 + Z''^2} \ln(1 + 2Z' + Z'^2 + Z''^2) + \frac{1}{Z''} \cdot \frac{Z'^2 - Z''^2}{Z'^2 + Z''^2} \cdot \arctan \frac{Z''}{1 + Z'} \right] \quad (19)$$

2.5. Propriedades dos núcleos

2.5.1. Propriedades da cortiça

A cortiça é uma matéria-prima natural renovável, extraída do sobreiro (casca). As suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, oferecem-lhe propriedades únicas, tornando-a prestável para diversas aplicações, em diferentes tipos de áreas (Silva *et al.*, 2005).

O sobreiro é uma árvore da família do carvalho, de crescimento lento, que cresce apenas em alguns países mediterrânicos, como Portugal, Espanha, Sul de França, parte de Itália, Norte de África e China. Esta árvore necessita de uma combinação de três elementos: grande quantidade solar, pouca chuva e humidade relativamente elevada. A Europa tem 60% da área total de produção mundial, e produz mais de 80% da cortiça consumida em todo o mundo, sendo Portugal o maior produtor com uma produção de cerca de três quartos de toda a cortiça (Silva *et al.*, 2005).

A extracção de cortiça é feita por períodos definidos de acordo com a idade do sobreiro. A primeira extracção é efectuada quando o sobreiro atinge idades entre 25 e 27 anos. Esta primeira extracção denomina-se por cortiça virgem. A cortiça virgem é de cor acinzentada, com textura irregular e rica em resinas. Após um período de 9 a 12 anos, extrai-se a segunda camada, a qual se designa de cortiça secundária. Esta já apresenta uma textura regular e a sua cor é castanha escura. A partir da segunda camada, todas as extracções se efectuam em ciclos periódicos que variam entre os 9 e 12 anos e chamam-se cortiça amadia. As suas texturas e cores, tal como a cortiça secundária, são respectivamente, regulares e castanhas. Cada sobreiro é utilizado para a produção de cortiça até idades compreendidas entre os 160 e 200 anos.

A cortiça pode ser definida como um tecido de células de parede fina. A sua estrutura é do género alveolar, similar ao favo do mel de abelha, sem espaços vazios entre as células adjacentes, estando fechadas (Silva *et al.*, 2005).

As células podem ser descritas como prismas rectangulares, empilhadas base com base, em colunas paralelas à direcção radial do tronco Figura 20. Os alvéolos são diminutos e compactamente arranjados, de modo que a quantidade de células pode variar muito de cortiça para cortiça (Silva *et al.*, 2005).

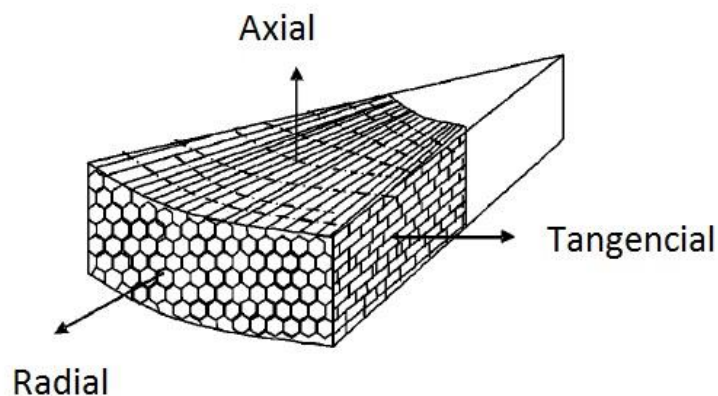


Figura 20: Representação das células da cortiça (adaptado de Silva *et al.*, 2005).

Por observação microscópica à secção radial, pode-se verificar que as células apresentam uma geometria de polígonos que podem variar entre 4 a 9 lados (Silva *et al.* 2005).

A Figura 21 apresenta as secções radial a) e tangencial b).

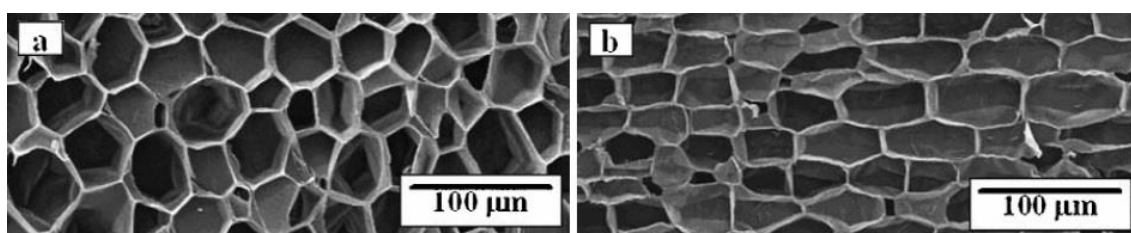


Figura 21: Micrografia da cortiça natural, a) corte radial, b) corte tangencial (Adaptado de Silva *et al.*, 2005).

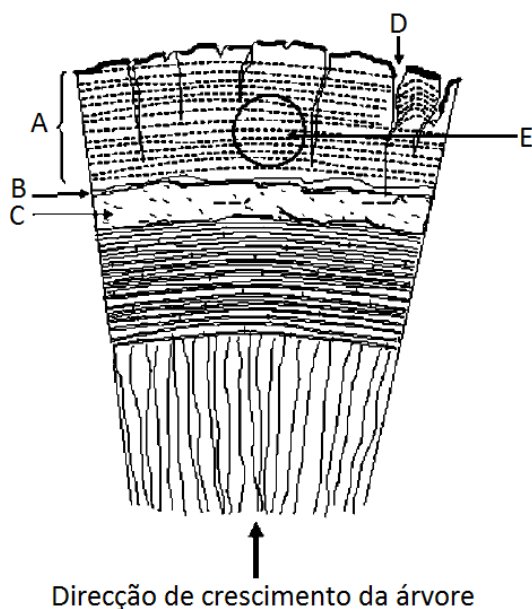
O corte das secções axial e tangencial (Figura 21 b)) mostra que as células se encaixam umas nas outras, como uma parede de tijolos. As células são dispostas em linhas paralelas à direcção radial (Silva *et al.*, 2005).

A anisotropia da estrutura celular da cortiça implica que esta também apresente propriedades anisotrópicas. As células são fechadas e ocas, contendo no seu interior um gás semelhante ao ar atmosférico. Este facto é muito importante para as propriedades da cortiça, tais como o seu baixo peso específico, a capacidade de alongar ou encurtar conforme esforços de tensão ou compressão, que se fazem reflectir nas características mecânicas (Silva *et al.*, 2005).

A densidade da cortiça pode variar muito de acordo com a idade (virgem ou amadia) e do seu tratamento (natural ou cozida). Esta variação pode dar-se por um factor de 2 (120 a 240

Kg/m³). As altas densidades correspondem a paredes espessas e onduladas e a uma baixa incidência de canais lenticulares (Silva *et al.*, 2005).

A Figura 22 apresenta o corte do troco do sobreiro, com alguns detalhes, onde se podem verificar também os canais lenticulares.



Legenda:

- A- Cortiça (tecido suberoso);
- B- Mudança de suberoso para felogénio;
- C- Tecido felogénio;
- D- Canal lenticular;
- E- Zona para produção de rolhas.

Figura 22: Esquema do corte axial do sobreiro (Adaptado de Silva *et al.*, 2005).

Os canais lenticulares são os melhores indicadores macroscópicos da qualidade da cortiça, pois quanto menos e menores os canais, melhor será a qualidade.

O processo de cozedura pode melhorar a qualidade da cortiça, numa redução da sua porosidade até metade, melhorando a sua uniformidade e, conseqüentemente, a sua trabalhabilidade (Silva *et al.*, 2005).

A composição química da cortiça pode variar consoante os factores geográficos, como o clima e o solo, das origens genéticas, da idade e dimensões da árvore, bem como das condições de crescimento.

Quanto às propriedades mecânicas, a cortiça apresenta algumas particularidades. A curva de compressão (tensão-deformação) apresenta 3 zonas relacionadas com os três mecanismos responsáveis pelas propriedades de flexibilidade celular dos materiais. (Silva *et al.*, 2005).

A Figura 23 representa essa curva.

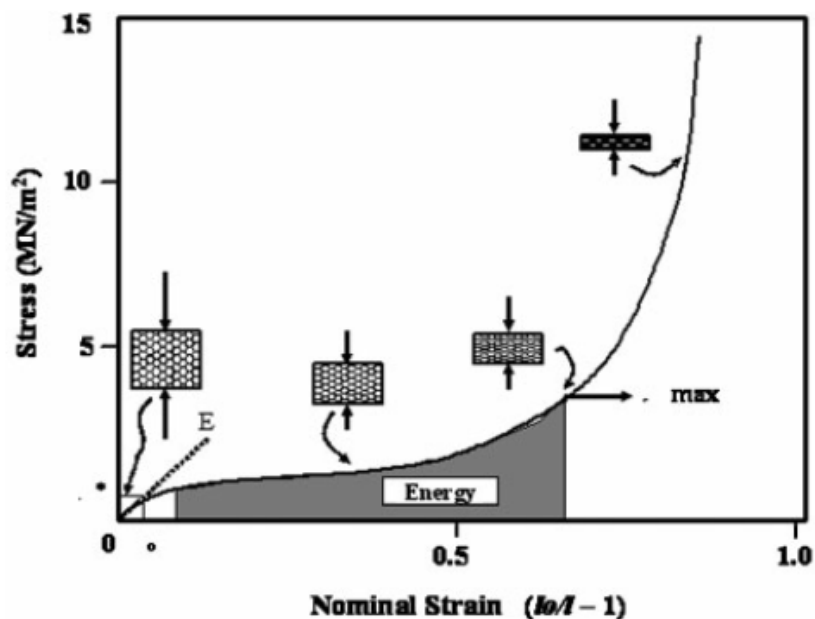


Figura 23: Curva típica de compressão T/D da cortiça (Silva et al., 2005).

A primeira região, até cerca de 7% de deformação, corresponde à flexão elástica das paredes das células. A segunda é uma zona quase horizontal, que se estende até 70% de deformação, causada pela progressiva deformação das células. Por fim, na terceira zona, a curva sobe acentuadamente, devido ao colapso das paredes das células. A disposição escalonada e aleatória da base das células e a ondulação das paredes laterais influenciam o coeficiente de *Poisson* (ν), dando origem a algumas das principais propriedades da cortiça, levando-a às suas diversas aplicações. Quando a cortiça é comprimida no sentido radial, as paredes dobram-se e embrulham-se por corrugação. O aumento da amplitude da corrugação alinha as bases das células perpendiculares à direcção radial, criando uma pequena expansão na direcção não radial que cria, por sua vez, um pequeno valor positivo para ν . Quando a compressão é efectuada na direcção não radial, as paredes celulares laterais dobradas endireitam-se em tensões elevadas e o padrão de ondulação inverte-se, criando uma retracção na direcção radial, originando um ν negativo para tensões elevadas (Silva *et al.*, 2005).

As placas de cortiça podem ter espessuras diferentes devido às diferentes taxas de crescimento, sendo que esta pode afectar as suas propriedades mecânicas. Na compressão, as placas de maior espessura têm menor resistência e Módulo de *Young* (Silva *et al.*, 2005).

O tratamento térmico da cortiça em ar altera as propriedades de compressão da cortiça. Com tratamentos a 100-300°C, a força máxima admissível diminui consideravelmente. Após a temperatura passar os 200°C, o Módulo de *Young* diminui para cerca de 1/3 e acima dos 300°C

para cerca de 1/15. O Módulo de *Young* específico (módulo/densidade) também diminui para para cerca de 1/5 ou 1/10 aos 300°C. Um aquecimento a 100-150°C pelo período de um dia pode aumentar a força à compressão devido à perda de água. Se este tratamento for prolongado para longos períodos (1 a 14 dias) à mesma temperatura, a força à compressão sofre uma redução, devido à degradação termomecânica (Silva *et al.*, 2005).

O tratamento térmico com água (cozedura) também altera as propriedades mecânicas da cortiça, não só pela exposição à temperatura, mas também pela absorção da água. A absorção da água provoca a suavização das paredes das células, enquanto as diferenças de pressão entre as células adjacentes provocam tensões de tracção suficientes para endireitar as paredes. Isto provoca três alterações nas propriedades mecânicas: redução da força e da anisotropia (particularmente na zona elástica) e um ponto de cedência mais nítido em compressão, na direcção radial. O último efeito é a redução das ondulações na zona plana (Figura 23), uma vez que com as amplitudes mais altas, o ponto de transição se torna menos nítido e a zona plana menos definida (Silva *et al.*, 2005).

A Tabela 1 apresenta os módulos de *Young* obtidos nas três direcções da cortiça, para diferentes espessuras e com tratamento de cozedura, quando submetidos a ensaios de compressão.

Tabela 1: Módulos de *Young* da cortiça submetida a tratamento de cozedura (Silva *et al.*, 2005).

Espessura	Módulo de <i>Young</i> E [MPa]		
	Radial	Axial	Tangencial
Pequena	11,5±1,0	10,9±0,6	8,6±0,7
Média	13,2±0,1	12,0±1,5	9,6±1,4
Larga	9,9±0,4	9,2±0,5	7,9±1,3

O gráfico apresentado na Figura 24 apresenta as curvas médias típicas para ensaios de tracção (tensão-deformação), onde as letras T, A e R representam, respectivamente, os sentidos Tangencial, Axial e Radial.

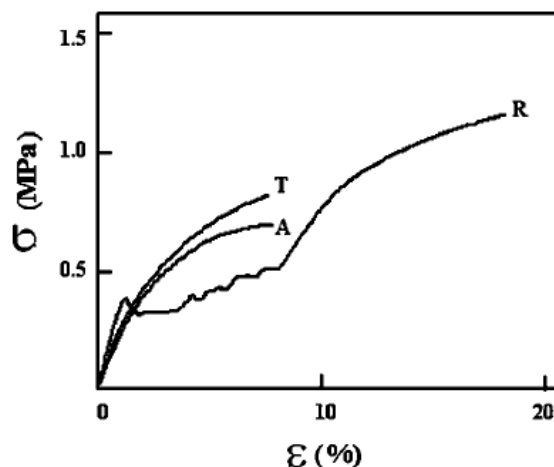


Figura 24: Curvas Tensão-Deformação médias para ensaio de tracção à cortiça (Silva et al., 2005).

Apesar das propriedades mecânicas da cortiça serem importantes para as suas aplicações, na maioria dos casos procuram-se as propriedades físicas, nomeadamente, o isolamento, a impermeabilidade à água, as características de superfície e propriedades dieléctricas (aptidão dos materiais não-condutores passarem a condutores, quando submetidos a cargas eléctricas superiores à do seu limite de isolante eléctrico).

A Tabela 2 resume as propriedades gerais da cortiça.

A baixa densidade da cortiça deve-se ao alto teor de ar existente nas suas células. A quantidade de gás e as dimensões pequenas das células contribuem para a baixa condutividade térmica. O calor transferido pela cortiça realiza-se por condução, pois a convecção apenas é considerada para grandes quantidades de ar. Mesmo assim, considera-se que a condução nas paredes das células será ligeiramente maior que no gás. Do mesmo modo, a transmissão do som é muito baixa, devido à baixa densidade e elevada porosidade. A maioria das ondas sonoras incidentes são absorvidas e transformadas em energia térmica, o que reduz a reverberação (Silva *et al.*, 2005).

Outras propriedades muito interessantes da cortiça são o seu elevado coeficiente de atrito e a sua capacidade de amortecimento, que lhe abrem portas a diversas aplicações, como as rolhas, solas de sapatos, punhos de ferramentas, entre outros (Silva *et al.*, 2005).

Como já foi referido anteriormente, a cortiça tem propriedades dieléctricas, o que lhe permite ser utilizada como isolante eléctrico (Silva *et al.*, 2005).

Tabela 2: Propriedades gerais da cortiça (Silva et al., 2005).

Propriedades gerais da cortiça	
Propriedades	Valores
Coeficiente de atrito	0,1 – 1,2 (cortiça/vidro e cortiça/Aço) 0,97 (cortiça/cortiça) Sentido radial 0,77 (cortiça/cortiça) Sentido não radial 0,76 (cortiça/vidro) Sentido radial 0,35 (cortiça/vidro) Sentido não radial
Densidade [Kg/m ³]	120 – 180 (Amadia) 160 – 240 (Virgem)
Energia de Superfície [m·J/m ²]	24 – 38 (40°C) 41 (25°C)
Condutividade térmica [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,045 (Cortiça) 0,025 (Ar) 0,2 (Paredes das células)
Condutividade térmica [S·m ⁻¹]	1,2x10 ⁻¹⁰ (25°C) 1,67x10 ⁻¹³ (50°C)
Isolamento Acústico [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	1,2x10 ⁵
Calor Especifico [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	350
Difusidade térmica [m ² ·s ⁻¹]	1x10 ⁻⁶
Coeficiente de difusão da água [m ² ·s ⁻¹]	4x10 ⁻¹⁰ Sentido não radial 1x10 ⁻¹¹ Sentido radial

Para melhor se compreender as propriedades da cortiça, há que compará-la com outros materiais, essencialmente espumas, naturais e sintéticas. Os gráficos apresentados na Figura 25 e na Figura 26 ilustram essa comparação.

Após a comparação, pode-se verificar que, devido à sua morfologia e estrutura, a cortiça não nos pode oferecer uma vasta gama de propriedades, como por exemplo as espumas de poliuretano (PU) ou as de polietileno (PE). No entanto, ela pode competir com os melhores materiais sintéticos em diversas aplicações (Silva *et al.*, 2005).

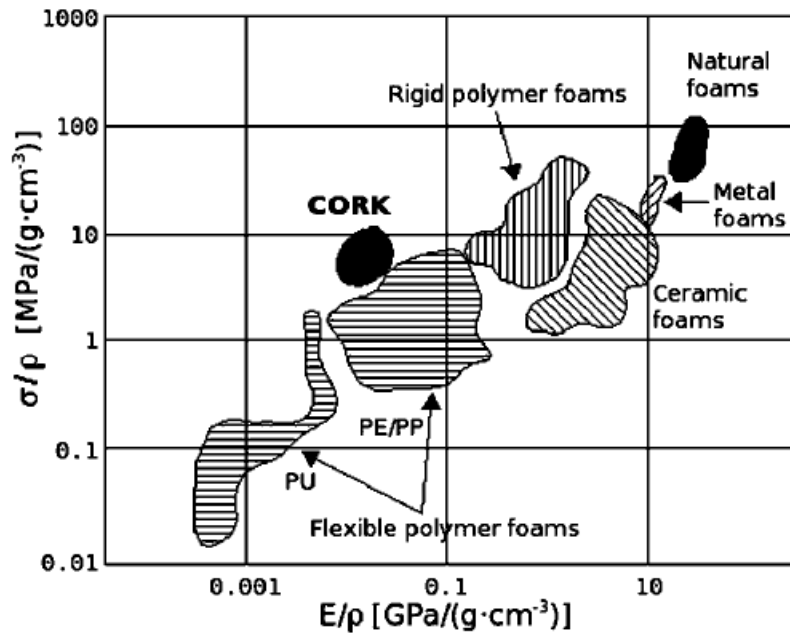


Figura 25: Gráfico de selecção de materiais - comparativo da força específica de compressão (σ/ρ) com o módulo específico (E/ρ) (Silva *et al.*, 2005).

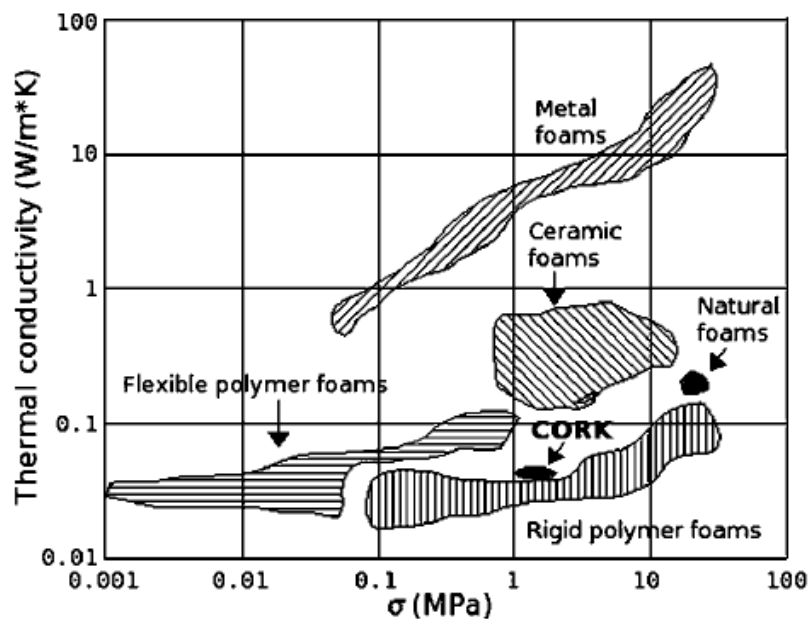


Figura 26: Gráfico de selecção de materiais - comparativo da condutividade térmica com a tensão de compressão (σ) (Silva *et al.*, 2005).

Pelo gráfico apresentado na Figura 25, pode-se ver que as aplicações da cortiça em engenharia são um pouco limitadas devido às suas propriedades relativamente fracas em relação a outras espumas, com paredes celulares rígidas (metais, cerâmicas), que oferecem muito mais

resistência a cargas mecânicas. No entanto, com baixa rigidez, a cortiça apresenta propriedades mecânicas equivalentes às de espuma polimérica flexíveis (Silva *et al.*, 2005).

O gráfico apresentado na Figura 26 revela que, quando se compara a condutividade térmica e a resistência à compressão, a cortiça ganha vantagens. A sua baixa condutividade térmica combinada com a sua razoável resistência à compressão, torna-a um bom isolante térmico. Pode-se também verificar que neste gráfico a cortiça tem um desempenho semelhante ao das espumas rígidas de polímeros sintéticos (Silva *et al.*, 2005).

Resumindo, a cortiça tem um elevado coeficiente de atrito, resiliência, boa energia de absorção, excelentes propriedades de isolamento e coeficiente de Poisson próximo do zero, o que a torna adequada para certas aplicações. Além disso, é um material natural e renovável (Silva *et al.*, 2005).

Nota: Materiais convencionais têm o coeficiente de *Poisson* positivo (ex.: aço=0,3), o que significa que contraem-se transversalmente quando esticados longitudinalmente e vice-versa.

A cortiça seleccionada para este trabalho foi a Corecork NL20 da Amorim Cork Composites.

Corecork é um material de núcleo natural e sustentável, compatível com as aplicações dos núcleos das sandwichs já existentes, oferecendo excelentes propriedades FST (fogo, fumo e tóxico), com boas propriedades mecânicas e características de processamento. A sua baixa densidade, flexibilidade e excelente conformidade, tornam possível a sua fácil integração em ciclos rápidos de produção (Amorim Cork Composites, 2013).

A cortiça Corecork pode ser aplicada nos processos de *hand lay-up* (moldagem manual), *vacuum bagging* (sacos de vácuo) e infusão, pode suportar temperaturas de processamento até aos 150°C (Amorim Cork Composites, 2013).

A Corecork apresenta propriedades únicas, tais como: a estrutura em células fechadas de ar, baixa absorção de água, resistência ao apodrecimento, excelente resistência ao fogo e alto nível de atenuação de ruídos e vibrações, torna este produto um excelente núcleo em alternativa para as indústrias de compósitos (Amorim Cork Composites, 2013).

2.5.2. Propriedades do poliuretano

O poliuretano foi inventado na década de 1930. A descoberta da química do poliuretano deve-se aos esforços de Otto Bayer e da equipa de investigação que ele liderou, da empresa química I.G. Farben AG. A primeira patente associada aos poliuretanos foi em 1937 (Sonnenschein, 2015).

A espuma rígida de poliuretano é produzida através de uma reacção química entre dois componentes de base sob a forma líquida e um baixo ponto de ebulição do agente de sopro, tal como o Pentano (C_5H_{12}) ou o Dióxido de Carbono (CO_2), conforme apresenta a Figura 29. Os materiais de base reagem directamente na mistura e constroem a matriz polimérica (Poliuretano). O Calor libertado na reacção causa a evaporação do agente de sopro, originando a espuma. O volume e a densidade da espuma, são assim controlados através da quantidade de agente de sopro adicionado à reacção, podendo a formulação do material de espuma ser modificada pelo uso de aditivos de modo a produzir as propriedades desejadas (BING, 2006).

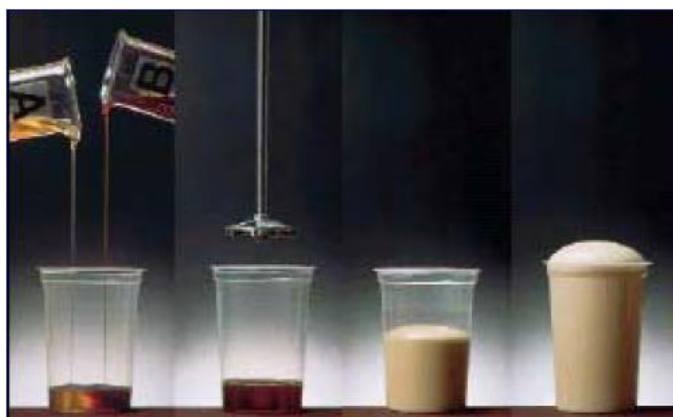


Figura 29: Quatro fases na produção de espuma de poliuretano (BING, 2006).

A superfície da mistura de reacção mantém a sua capacidade adesiva durante um certo período de tempo após o processo de formação de espuma, permitindo uma boa adesão a materiais de revestimento (BING, 2006).

Por ser um material com um vasto leque de aplicações, o poliuretano contribui para uma melhoria na qualidade de vida humana. Dada a sua disponibilidade numa vasta gama de durezas, resiliência e densidades, as espumas flexíveis de poliuretano oferecem níveis de conforto humano dificilmente atingidos por outros tipos de materiais, como o exemplo da sua aplicação em estofos de automóveis e sofás (Peixoto, 2000).

A espuma de poliuretano rígida é um dos materiais com maior eficiência de isolamento térmico. A sua utilização permite, desta forma, uma poupança de energia eficaz, com o sacrifício de pequenos espaços para a sua instalação (BING, 2006).

No nosso mundo actual é impensável não se utilizar o poliuretano. Ele encontra-se em todo o lado e tem um impacto positivo sobre a vida humana, como por exemplo no mundo dos

desportos ou actividades de laser, em casa ou no carro. Dependendo da formulação e mistura química base, a variedade de propriedades dos poliuretanos pode ser determinada com precisão durante o fabrico (rígida, macia, integral ou compacta) (BING, 2006).

No que diz respeito ao isolamento de edifícios, a espuma de poliuretano rígida é o material com a relação custo-benefício ideal devido à sua baixa condutividade térmica, inigualável por outro produto convencional. O seu desempenho de isolamento é extremamente alto, até para modestas espessuras. Além disso, as boas propriedades mecânicas e a excelente adesão a outros materiais, abre as portas a um vasto leque de aplicações. Temos exemplos das suas aplicações versáteis nas: placas de isolamento para paredes, coberturas, pisos e tectos, estruturas de janelas, etc. Geralmente, estes exemplos de aplicações são feitas a partir de placas *sandwich* nas quais a espuma de poliuretano é o núcleo (BING, 2006).

A espuma rígida de poliuretano é um plástico de células fechadas, sendo utilizado como material de isolamento em forma de placas ou de blocos, combinando-se com vários revestimentos rígidos (BING, 2006).

Os painéis *sandwich* de núcleo em poliuretano são particularmente adequados a coberturas e paredes de edifícios, bem como a unidades frigoríficas. Estes painéis são leves, fáceis de processar e podem ser instalados em todas as condições meteorológicas. O alto grau de pré-fabrico destes painéis dá-lhes boas propriedades de *design* e de construção estrutural que proporcionam um elevado nível de segurança, tanto na fase de processamento como na construção acabada (BING, 2006).

As propriedades dos materiais de isolamento dependem da sua estrutura, das matérias-primas utilizadas e do processo de fabrico. Para a melhor funcionalidade de um material existem outros critérios importantes como a resistência mecânica, resistência ao envelhecimento, isolamento acústico e resistência à humidade e ao fogo. A espuma rígida de poliuretano cumpre todos estes valores de modo a ser um material isolante a utilizar na construção (BING, 2006).

A condutividade térmica do Poliuretano depende: do gás utilizado para preenchimento das células, da densidade, da temperatura, do comportamento na presença de água ou de ambientes húmidos e do tempo de medição (BING, 2006).

As propriedades de isolamento da espuma de poliuretano são alcançados através do uso de agentes de sopro, que têm uma condutividade térmica mais baixa que a do ar ($\lambda_{ar} = 0,024$

$W/(m \cdot K)$ a $10^{\circ}C$), variando entre 0,012 e 0,013 $W/(m \cdot K)$. Geralmente, o agente de sopro utilizado é o Pentano Hidrocarboneto (BING, 2006).

Devido ao grande conteúdo de células fechadas na espuma (mais de 90%), os agentes de expansão permanecem no isolamento a longo prazo (baseado na vida do material, pelo menos de 25 anos, que na prática deve ser superior a 60 anos). A estanquicidade das células garante que não haja trocas do gás com o ar envolvente (BING, 2006).

À medida que a quantidade de material aumenta, o mesmo acontece com a sua densidade. Este facto também aumenta a parcela de calor que a estrutura do material pode conduzir. No entanto, o incremento da condutividade térmica não acresce em proporção com o aumento da densidade. A condutividade térmica da espuma rígida de poliuretano relevante para a construção, varia pouco nas gamas de 30 a 100 kg/m^3 (BING, 2006).

A condutividade térmica dos materiais de isolamento diminui à medida que a temperatura desce. Por outro lado, o aumento da temperatura resulta num mínimo aumento de condutividade térmica (BING, 2006).

A uma temperatura de referência de $25^{\circ}C$, a condutividade térmica da água é $\lambda=0,58 \text{ W/(m} \cdot K)$. Como a condutividade térmica da maioria dos materiais de isolamento mais comuns varia entre $\lambda=0,020$ e $0,05 \text{ W/(m} \cdot K)$, a absorção de água aumenta a condutividade térmica. No entanto, a absorção da água tem um pequeno impacto na condutividade térmica da espuma rígida de poliuretano (BING, 2006).

O gráfico apresentado na Figura 30, ilustra testes realizados por *Forschungsinstitut Für Wärmeschutz e V. Munique* da variação da condutividade térmica de espumas rígidas de poliuretano para espessuras de 40 mm e 80 mm, durante um período de 15 anos.

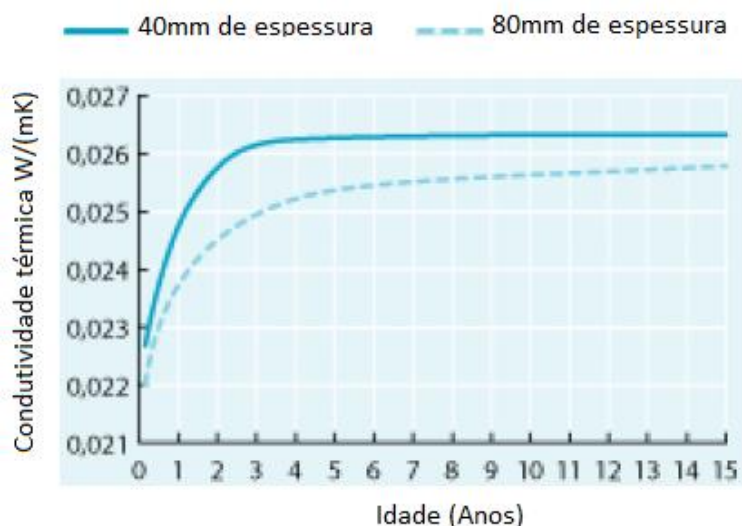


Figura 30: Aumento da condutividade térmica da espuma de Poliuretano ao longo de 15 anos para espessuras de 40 e 80 mm (Adaptado de BING, 2006).

O acentuado aumento da condutividade térmica no início do estudo, deve-se à troca de gases entre CO_2 ($\lambda=0,016 W/(m\cdot K)$) e o ar ($\lambda=0,024 W/(m\cdot K)$). Depois de cerca de 3 anos, a composição do gás das células chega a um equilíbrio estável. A partir desse ponto, a condutividade térmica pouco se altera (BING, 2006).

A densidade da espuma rígida de poliuretano usada para isolamento de edifícios geralmente varia entre $30 kg/m^3$ e $45 kg/m^3$. Contudo, ela pode atingir até $100 kg/m^3$ para determinadas aplicações. Para condições especiais em que as espumas sejam solicitadas a extremas cargas mecânicas, a densidade pode ser aumentada até $700 kg/m^3$ (BING, 2006).

Só uma pequena porção da espuma consiste em material sólido. Para a densidade de $30 kg/m^3$ apenas 3% do seu volume corresponde a material sólido. A estrutura deste material é um aglomerado de células nas quais as suas paredes podem suportar grandes cargas mecânicas devido à sua rigidez e propriedades anti-encurvadura (BING, 2006).

A Figura 31 apresenta a estrutura das espumas rígidas de poliuretano, onde se podem verificar as células de gás com as paredes poliméricas.



Figura 31: Estrutura das células de espuma rígida de poliuretano (BING, 2006).

O comportamento da força da espuma rígida de poliuretano (PUR/PIR) é função principalmente da sua densidade. Quando se repara no comportamento do material sob carga, podemos distinguir tensão compressiva de força compressiva. Normalmente, a tensão de compressão é determinada a 10% da sua deformação. A força de compressão é definida como a tensão máxima para a força de colapso (BING, 2006).

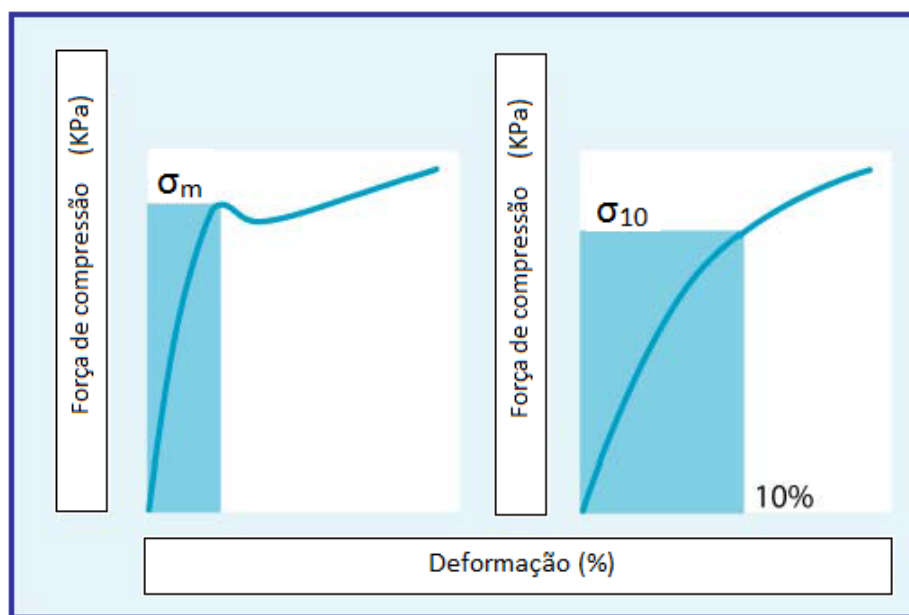


Figura 32: Resistência à compressão e tensão de compressão a 10% de deformação (*) (BING, 2006).

(*) Força de compressão: o material de repente colapsa com o aumento da carga de pressão. O valor do ponto máximo da curva representa a força de compressão σ_m . Tensão de compressão: Para a tensão de compressão não existe uma ruptura clara. O valor da deformação a 10% é a Tensão de compressão σ_{10} . (BING, 2006).

3. Desenvolvimento

3.1. Caracterização da empresa que acolheu o projecto

Alto – Perfis Pultrudidos, Lda.

Fundada em 1996, a Alto – Perfis Pultrudidos, Lda. situa-se na Zona Industrial da Maia (Zona do grande Porto). A sua produção foca-se na área dos materiais compósitos, sendo especialista nos processos de pultrusão, moldação manual, VARTM e infusão.

É uma empresa certificada pela norma ISO 9001:2008 e formada por uma equipa de Engenheiros empenhados em obter as melhores soluções para a exigência dos seus clientes. Actua em diversas áreas como ETA's e ETAR's, sector automóvel, ramo alimentar, marcos de recolha selectiva para resíduos e objectos decorativos para eventos, entre outros.

3.2. Elencagem dos perfis considerados neste trabalho

Neste trabalho, o estudo dirige-se apenas a uma inovação reservada ao perfil tubular de secção rectangular de 69 mm x 29 mm x 3 mm, conforme apresentado na Figura 33. Esta inovação consiste em introduzir no interior do perfil dois tipos de núcleos, o núcleo de cortiça conforme ilustra a Figura 34 ou o núcleo de poliuretano apresentado na Figura 35.

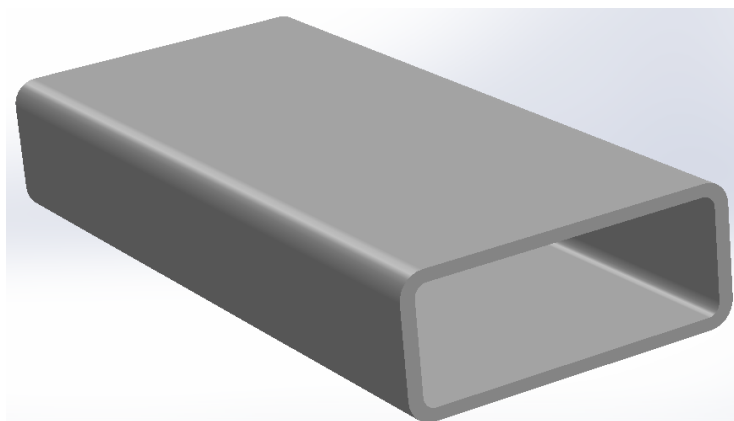
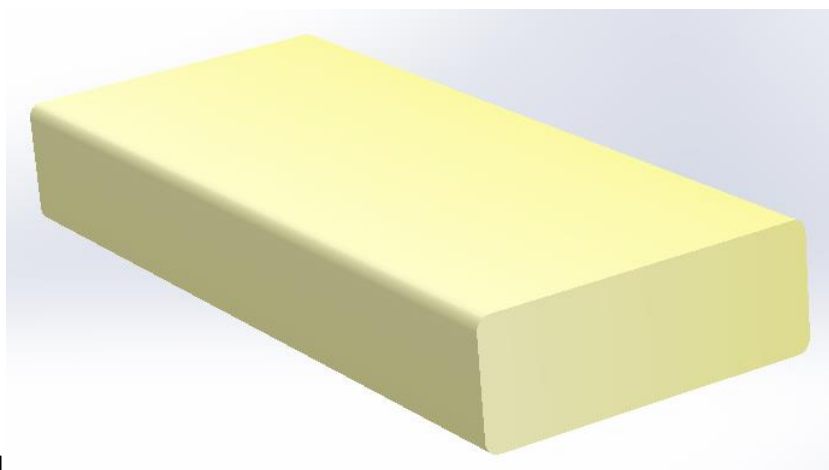


Figura 33: Perfil ALTO com 69 mm x 29 mm x 3 mm.



Figura 34: Núcleo de cortiça.



1

Figura 35: Núcleo de Poliuretano.

Pretende-se assim dar origem a dois novos perfis pultrudidos híbridos:

- O perfil com núcleo de cortiça, Figura 36;
- O perfil com núcleo de poliuretano, Figura 37.

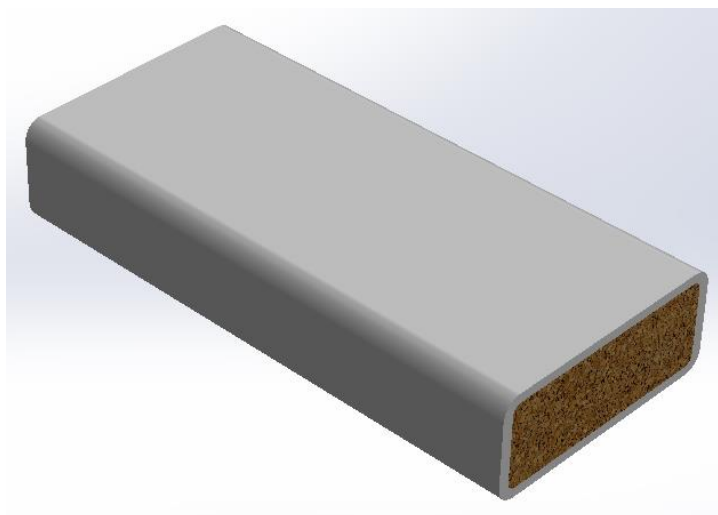


Figura 36: Perfil pultrudido híbrido com núcleo de cortiça.

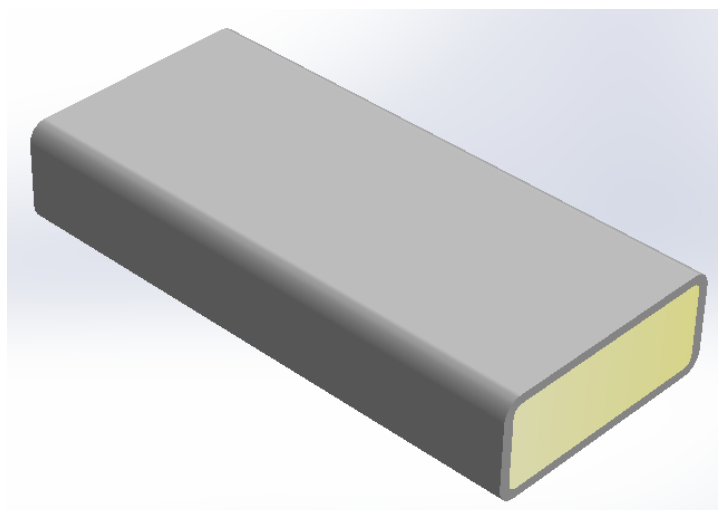


Figura 37: Perfil pultrudido híbrido com núcleo de poliuretano.

3.3. Elencagem das características a analisar e dos ensaios a realizar

As características que se pretendem obter com a realização deste estudo são, principalmente a resistência mecânica, o isolamento térmico e o isolamento acústico. O facto de o perfil ser de uma composição complexa (perfil compósito rígido com núcleo maleável), para determinação das características mecânicas, a dificuldade para se cumprirem determinados ensaios é bem maior. O ensaio de tracção é um exemplo dessa dificuldade, devido à impossibilidade que há em fabricar um provete com dimensões adequadas, que pudesse representar o perfil no seu todo.

Deste modo, para obtenção das propriedades mecânicas, efectuaram-se os seguintes ensaios:

- Ensaio de tracção (apenas ao material do perfil). – Na impossibilidade de se aplicar este ensaio ao perfil híbrido no seu todo, conforme referido anteriormente, é fundamental conhecerem-se as características do perfil que mais contribuem para a sua resistência. Neste ensaio, pretende-se conhecer a Força máxima, a Tensão máxima, o Módulo de *Young* e a Deformação do material;
- Ensaio de flexão em 3 pontos. – Este tipo de ensaio é muito importante para se conhecer o comportamento do perfil híbrido, quando este é utilizado numa situação em que o perfil desempenhe um papel de viga e lhe seja solicitada carga. Foram realizados dois tipos de ensaios de flexão com âmbitos diferentes. O primeiro com o objectivo de se conhecer a resistência à flexão e o modo de rotura. O segundo para se conhecer a rigidez à flexão e ao corte;
- Ensaio de aderência. – Este ensaio realizou-se para se caracterizar a resistência da ligação obtida entre o núcleo e o perfil, obtida durante o processo de fabrico. Com isto, pretende-se conhecer a Força máxima, a Tensão máxima, o Módulo de *Young* e a taxa de compressão do núcleo.

Para além destes ensaios, foram também realizados os seguintes:

- Ensaio de isolamento acústico. – Com o objectivo de determinar a resistência que o material oferece à propagação do som. Pretende-se conhecer os coeficientes de absorção sonora de incidência normal (α_n) e campo difuso segundo a norma ISO 10534-1 (α_{st}).
- Ensaio de isolamento térmico. – Este ensaio destina-se a caracterizar o material quanto à resistência que ele oferece à transferência de calor, pretendendo-se conhecer a condutividade térmica (k) do material.

3.4. Caracterização da resistência mecânica da parede do perfil simples

Este capítulo tem o objectivo de caracterizar a resistência da parede de perfil simples. A caracterização da resistência mecânica do perfil normal efectuou-se através de ensaios de tracção aplicados a provetes, cortados da parede do perfil, de acordo com a norma ISO 527-4:1997. Cortaram-se 5 provetes com as dimensões de 250 mm x 25 mm x 2,5 mm com o auxílio

de um disco diamantado. Os provetes foram cortados com o cuidado de se deixarem as fibras de reforço orientadas para as solicitações do ensaio. A velocidade de ensaio foi de 5mm/min. A Figura 38 apresenta o gráfico das curvas Tensão/Deslocamento para cada um dos 5 provetes.

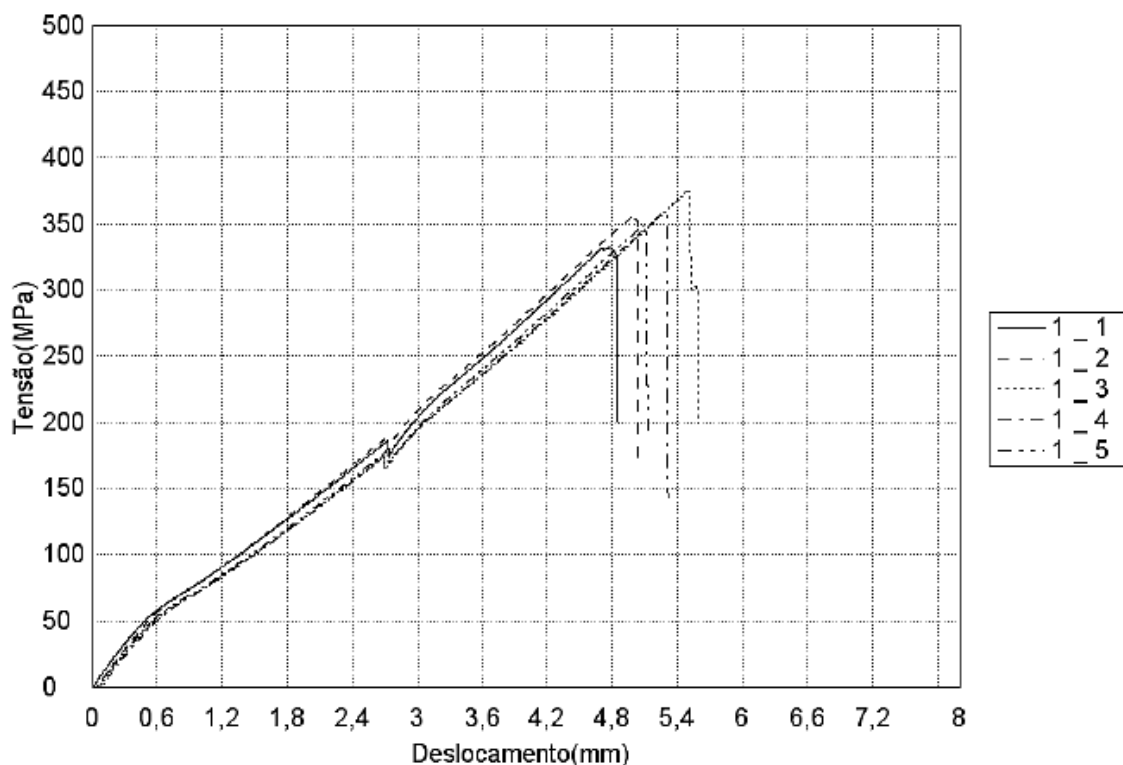


Figura 38: Gráfico T/D de provetes de perfil compósito simples.

A Tabela 3, apresenta os valores obtidos nos ensaios de tracção.

Tabela 3: Apresentação de resultados de ensaio de tracção do material do perfil.

	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Deformação Máxima [%]
Provete 1	19570,0	332,37	31,81	3,18
Provete 2	20252,6	355,06	33,21	3,33
Provete 3	22130,9	374,40	31,09	3,67
Provete 4	21278,3	358,58	31,04	3,52
Provete 5	20512,7	349,75	31,70	3,40
Média	20748,9	354,03	31,77	3,42
Desvio Padrão	985,2	15,20	0,88	0,18
Máximo	22130,9	374,40	33,21	3,67
Mínimo	19570,0	332,37	31,04	3,18

3.5. Caracterização dos materiais usados como núcleos nos perfis híbridos

3.5.1. Características da Cortiça

A cortiça seleccionada para este trabalho foi a Corecork NL20 da Amorim Cork Composites. A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas dos núcleos de cortiça Corecork NL20.

Tabela 4: Propriedades mecânicas dos núcleos de cortiça Corecork NL20 (Amorim Cork Composites, 2013).

Propriedade	Método	Unidade	Corecork NL20
Densidade	ASTM C271	Kg/m ³	200
Resistência à Compressão	ASTM C365	MPa	0,5
Módulo de Compressão	ASTM C365	MPa	6,0
Resistência à Tracção	ASTM C297	MPa	0,7
Resistência ao Corte	ASTM C273	MPa	0,9
Módulo de Corte	ASTM C273	MPa	5,9
Condutividade térmica	ASTM E1530	W/mK	0,044
Factor de perda (a 1KHz)	ASTM E756	–	0,043

A Tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas dos núcleos de cortiça Corecork NL20 em estruturas *sandwich*.

Tabela 5: Propriedades mecânicas dos núcleos de cortiça Corecork NL20 em estruturas *sandwich** (Amorim Cork Composites, 2013).

Propriedade	Método	Unidade	Corecork NL20
Resistência à Flexão	ASTM D790	MPa	56
Modulo à Flexão	ASTM D790	GPa	4
Resistência ao Corte	ASTM C392	MPa	0,9
Módulo de Corte	ASTM C392	MPa	41
Resistência à Compressão	ASTM C365	MPa	2,2
Módulo de Compressão	ASTM C365	MPa	23
Absorção de Água (%)	ASTM C272	%	<4
Densidade do Painel	–	–	0,56

(*). Amostras feitas por infusão (0,6 bar) com resina epóxida e duas camadas de 300g/m² de fibra de vidro, de cada lado. A espessura da *sandwich*: 6.5mm; Temperatura de cura: 60°C; Amostras Testadas 5 dias após o fabrico.

Os painéis *sandwich* feitos com núcleo de cortiça Corecork podem-se equiparar ou superar outros painéis FRP (*Fiberglass Reinforced Panels*) realizados com núcleos sintéticos (Amorim Cork Composites, 2013). O gráfico na Figura 39 apresenta as propriedades de painéis *sandwich* produzidos com diferentes núcleos, onde se pode apurar a qualidade dos núcleos Corecork NL20 utilizados neste trabalho.

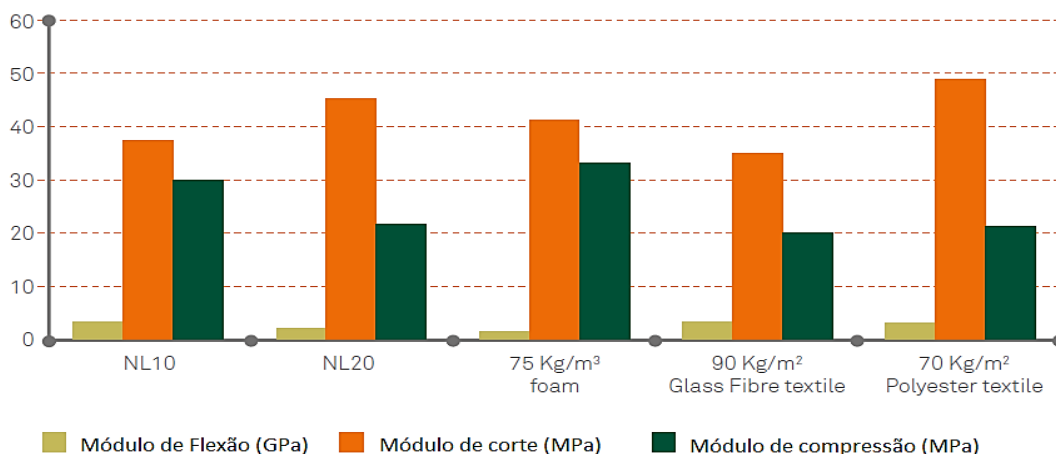


Figura 39: Gráfico comparativo das propriedades de painéis *sandwich* com diferentes tipos de núcleos (Adaptado de Amorim Cork Composites, 2013).

A Tabela 6 apresenta as directrizes de processo e a compatibilidade com as resinas para a cortiça Corecork NL20.

Tabela 6: Directrizes de processo e compatibilidade com as resinas; cortiça Corecork NL20. (Adaptado de Amorim Cork Composites, 2013).

Directrizes de Processo	
Captação de resina (*) (por m ² a 1mm)	170g
Temperatura máxima de processamento	180°C
Vacuum Bag Processing	Até 150°C
Autoclave Cure Processing	Possível
Coeficiente de Expansão Térmica	Aprox. 110x10 ⁻⁶ /°C à temperatura ambiente
Compatibilidade com a resina	
Epóxida	Excelente
Poliéster	Excelente
Fenólica	Excelente
Ester Vinílica	Excelente
Poliuretano	Excelente

(*) Amostras feitas por infusão (0,6 bar) com resina epóxida e duas camadas de 300g/m² de fibra de vidro, de cada lado. A espessura da sandwich: 6.5mm; Temperatura de cura: 60°C; Amostras Testadas 5 dias após o fabrico.

3.5.2. Características do Poliuretano

O poliuretano utilizado para fabrico das amostras foi o PUR60.

A Tabela 7 apresenta as suas características.

Tabela 7: Características do Poliuretano PUR60.

Característica	Unidade	PUR60
Densidade	Kg/m ³	60
Resistência à compressão	//	3,6
	⊥	1,9
Quantidade Células fechadas	%	96
Coefficiente de condutibilidade térmica	Kcal/h.m ⁰ C	0,02
Temperatura máxima	⁰ C	110
Classificação ao Fogo		E

3.6. Caracterização dos perfis híbridos

O âmbito deste capítulo é caracterizar os perfis pultrudidos híbridos e compará-los com o perfil simples.

3.6.1. Caracterização da aderência entre perfil e núcleo

O ensaio de adesão, tal como o ensaio de compressão, consiste na aplicação de duas forças uniaxiais, orientadas uma para a outra. A diferença encontra-se no facto de num dos topos a força ser aplicada no núcleo e no outro ser aplicada no perfil. Assim, em vez de se mensurar a resistência do material, verifica-se a adesão ou resistência na interface entre o perfil e o núcleo. A Figura 40 representa a solicitação dos esforços no ensaio de aderência.

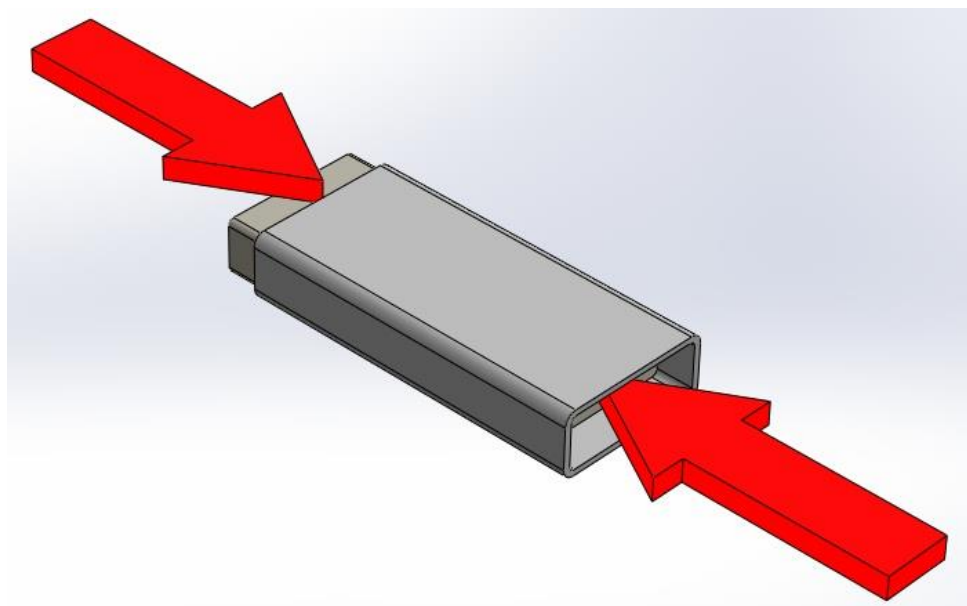


Figura 40: Solicitações no ensaio de aderência.

Para se conseguir realizar este ensaio, foi necessário fabricar uma ferramenta adequada à geometria do provete e à máquina de ensaios. A ferramenta foi desenhada por Bruno Moreira, ex-aluno da Escola Superior de Estudos Industriais (ESEIG), sob a orientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva no projecto QREN com o acrónimo HybridPultrusion, e fabricada nas oficinas mecânicas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Foi também pensada, para facilmente se adaptar à máquina de ensaios SHIMADZU, existente nos laboratórios de ensaios do ISEP.

A ferramenta é constituída por duas garras: uma garra para aplicar a força no perfil e a outra no núcleo. Por se tratar de peças com geometria complexa, impossível de se fabricar cada garra num só corpo, cada garra teve que ser fabricada em várias peças, de forma a serem convenientemente montadas, à posteriori. A Figura 41 e a Figura 42 representam respectivamente a garra para o perfil e a garra para o núcleo.

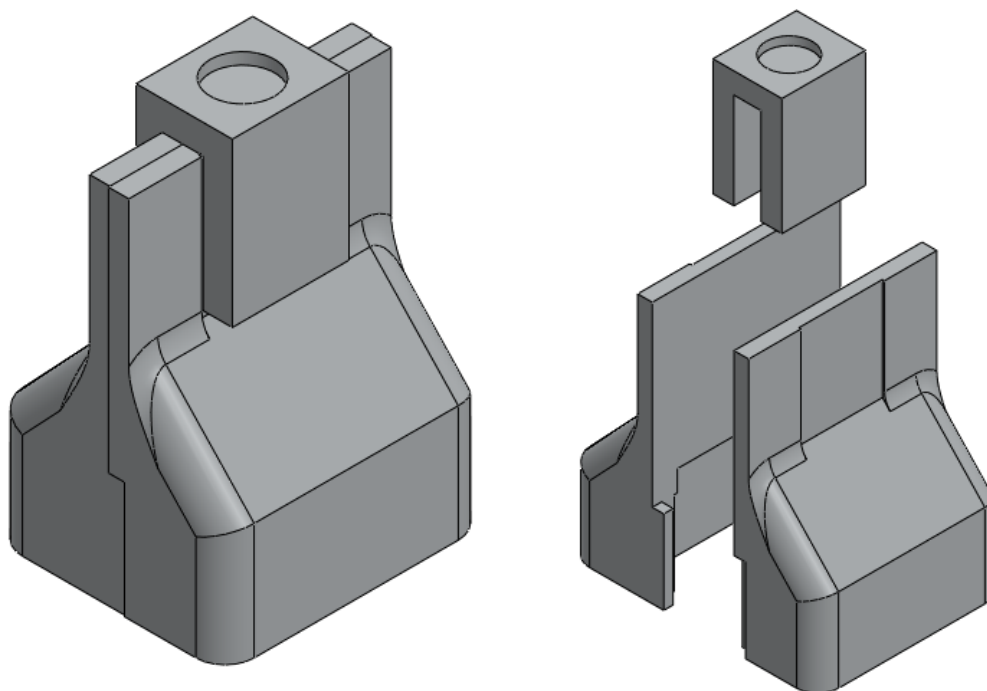


Figura 41: Garra do perfil montada e observada em vista explodida.

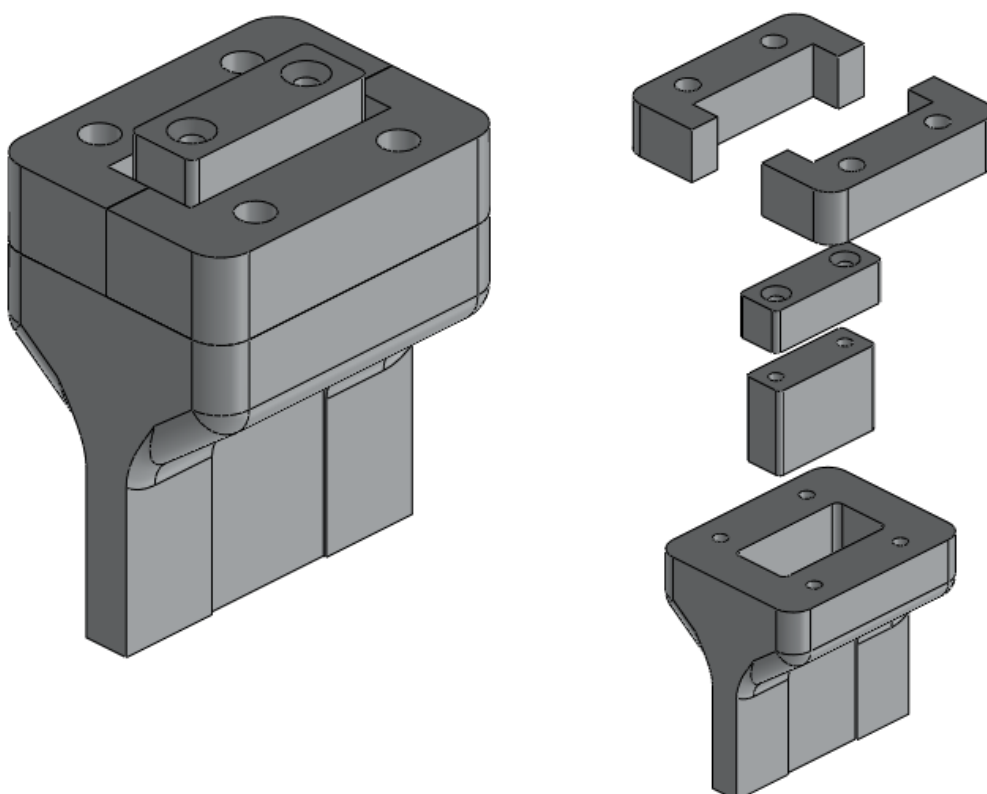


Figura 42: Garra do núcleo montada e observada em vista explodida.

A garra que actua sobre o perfil tem o objectivo de “empurrar” o mesmo e permitir que o núcleo entre numa cavidade, Figura 43 Pormenor A.

A garra que actua sobre o núcleo tem o objectivo de “empurrar” o núcleo e permitir que o perfil entre num canal do seu interior, Figura 43 Pormenor B.

Esta ferramenta, aplicada na máquina de universal de ensaios, permite testar perfeitamente a adesão entre o perfil e o núcleo.

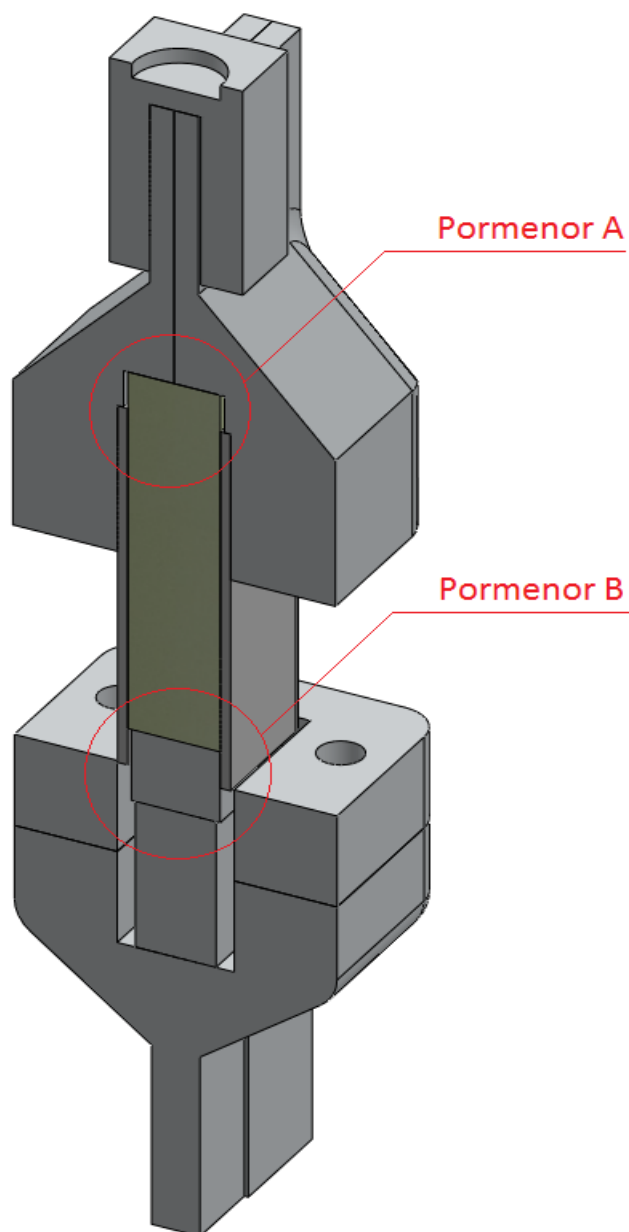


Figura 43: Pormenores do ensaio de adesão.

Para se conseguir realizar o ensaio com sucesso, foi necessário observar alguns cuidados: Ter em conta o correcto alinhamento entre o ponto de carga da máquina, as garras e o provete. A Figura 44 apresenta a montagem do equipamento devidamente alinhado, pronto para iniciar um ensaio.



Figura 44: *Setup* do ensaio de adesão.

Foi também de grande importância, garantir a orientação do punção, de modo que a sua superfície de contacto apenas solicitasse o esforço no núcleo, pois o seu contacto com o perfil iria converter o ensaio de adesão numa situação de compressão do perfil.

Um outro cuidado muito importante foi não permitir que se atingisse o curso máximo admissível de ensaio. Este curso é limitado pela geometria das garras, ou seja, pelo ponto de penetramento do punção, para o qual o perfil entra em contacto com as duas garras, expondo-o a uma situação de compressão.

Começou-se por ensaiar dois provetes com 150 mm de comprimento, um com núcleo de cortiça e outro com núcleo de poliuretano, para se verificar o comportamento. O equipamento foi ajustado para uma velocidade de deslocamento de 0,5 mm/min.

Nesta primeira tentativa, os ensaios não foram bem-sucedidos. Devido à taxa de compressão oferecida pelos núcleos e ao curso máximo admissível, os ensaios tiveram que ser abortados, antes de se dar a rotura completa entre núcleo e perfil.

A Figura 45 apresenta um provete com núcleo de poliuretano após ensaio de adesão.



Figura 45: Provete de adesão de 150 mm com núcleo de poliuretano.

Nestes dois provetes de 150 mm, após os ensaios, mediram-se os deslocamentos (a) correspondentes ao que os núcleos comprimiram nas duas extremidades, para se encontrar o deslocamento médio e efectuar o cálculo da taxa de compressão (T_x). A Figura 46 representa os deslocamentos.

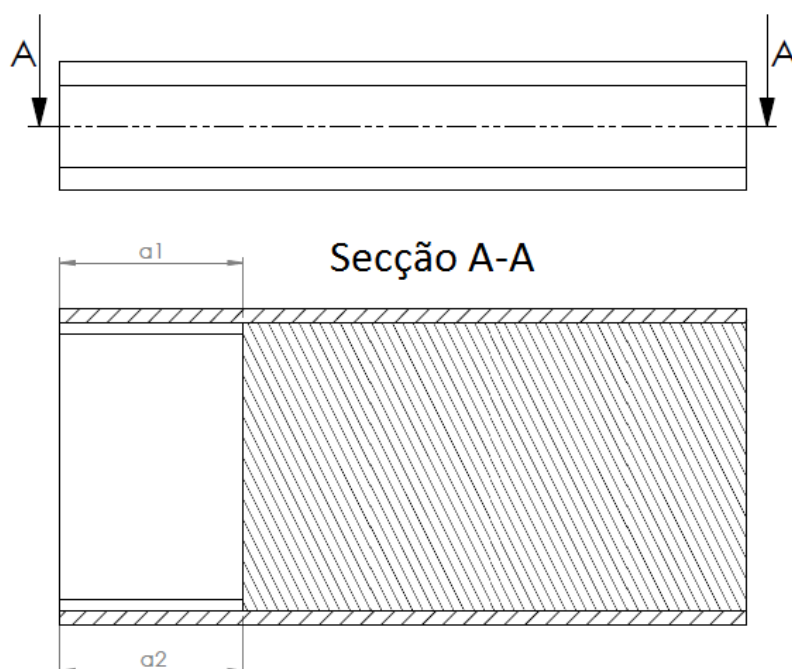


Figura 46: Representação das cotas a_1 e a_2 em provete com 150 mm de comprimento.

Provete com núcleo de cortiça:

$$a_1 = 43,6 \text{ mm}$$

$$a_2 = 44,5 \text{ mm}$$

$$a = \frac{43,6 + 44,5}{2} = 44,05 \text{ mm}$$

$$Tx_{\text{Compressão}} = \frac{44,05}{150} \times 100 = 29,37\%$$

Provete com núcleo de Poliuretano:

$$a_1 = 44,5 \text{ mm}$$

$$a_2 = 46 \text{ mm}$$

$$a = \frac{44,5 + 46}{2} = 45,25 \text{ mm}$$

$$Tx_{\text{Compressão}} = \frac{45,25}{150} \times 100 = 30,17\%$$

Nestes dois ensaios, chegou-se à conclusão que devido às elevadas taxas de compressão e ao curso máximo admissível de deslocamento, o comprimento dos provetes deveria ser menor.

Dado o insucesso destes ensaios, decidiu-se diminuir o comprimento dos provetes, de forma à taxa de compressão do núcleo e ao curso máximo admissível não comprometerem o sucesso do ensaio.

Diminuiu-se o comprimento dos provetes de 130 mm para 88 mm e manteve-se a velocidade de deslocamento no ensaio de adesão/compressão de 0,5 mm/min.

Começou-se por ensaiar um provete com núcleo de cortiça. Dado o sucesso deste ensaio, de seguida ensaiaram-se mais dois provetes semelhantes com núcleo de cortiça, seguidos de ensaios a mais três provetes com núcleo de poliuretano, de forma a se obterem resultados para três provetes de cada tipo.

No primeiro ensaio detectou-se que o perfil sofreu fricção ao entrar nas guias montadas na garra do núcleo Figura 47.



Figura 47: Fricção entre guias da garra e perfil.

O efeito desta fricção pode ser visualizado no gráfico Força/Deslocamento da Figura 48, o qual apresenta o referido gráfico para o primeiro provete ensaiado (núcleo de cortiça).

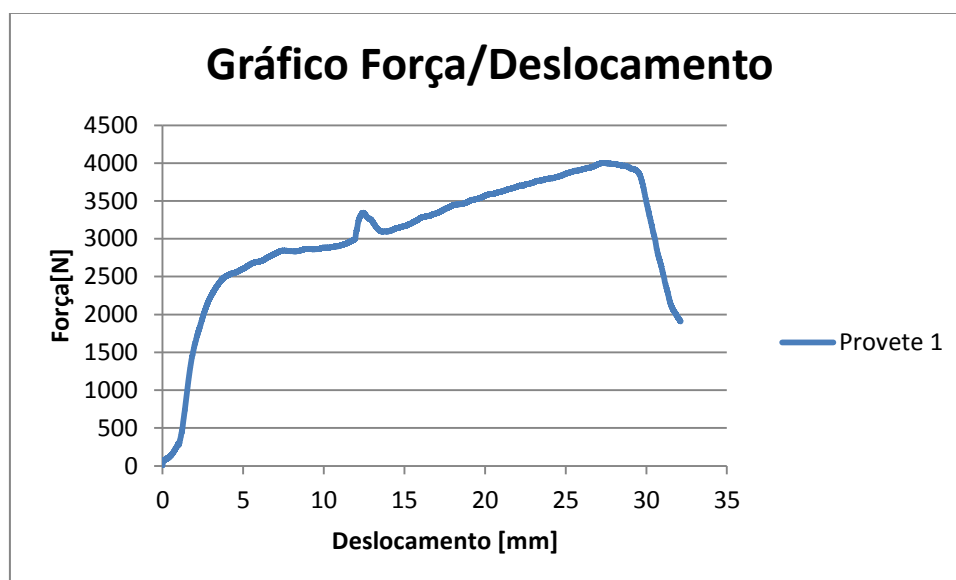


Figura 48: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provete com núcleo de cortiça nº 1.

Na Figura 49 seguinte, o pormenor A apresenta a alteração provocada no ensaio, pelo facto de ter existido fricção do perfil ao entrar nas guias da garra do núcleo.

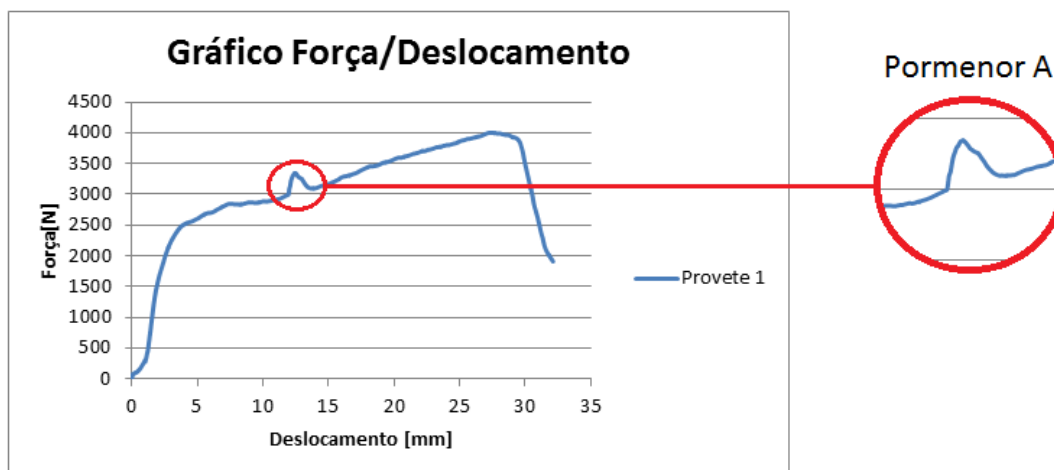


Figura 49: Pormenor da fricção entre perfil e guias.

Para se evitar repetir este problema de fricção, optou-se por se retirar as guias da garra para os ensaios seguintes, conforme ilustra a Figura 50. Conseguiu-se efectuar os ensaios com a mesma qualidade e sem o problema de fricção.

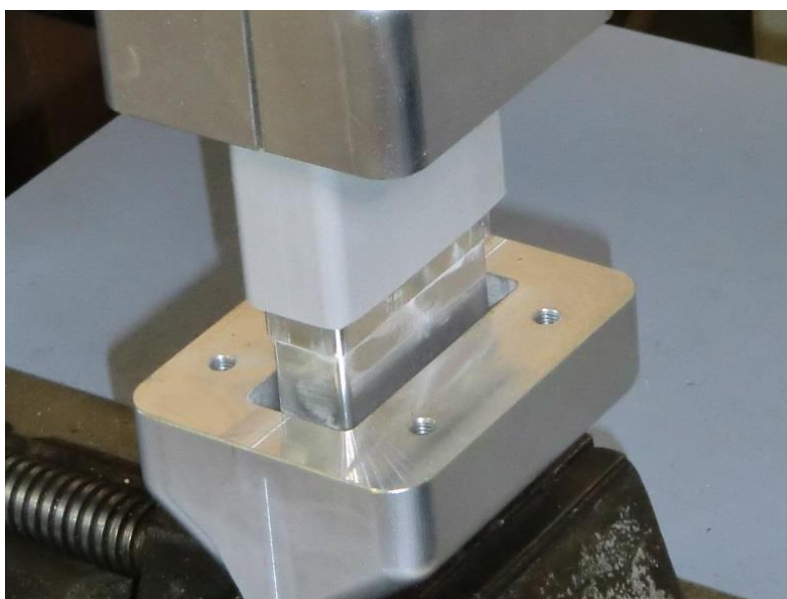


Figura 50: Garra de núcleo sem guias.

As Figura 51 e Figura 52 apresentam os gráficos Força/Deslocamento para os provetes números 2 e 3, respectivamente.

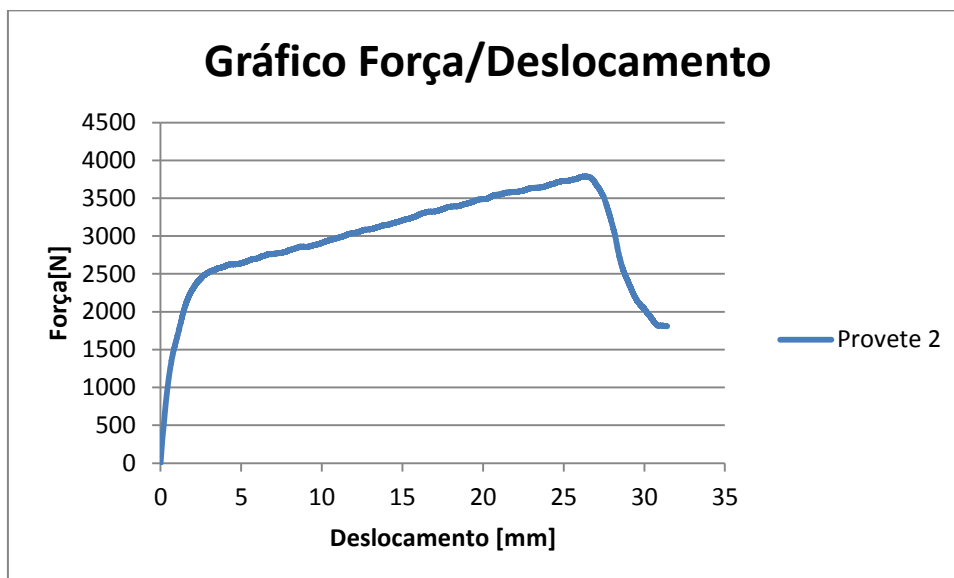


Figura 51: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provete com núcleo de cortiça nº 2.

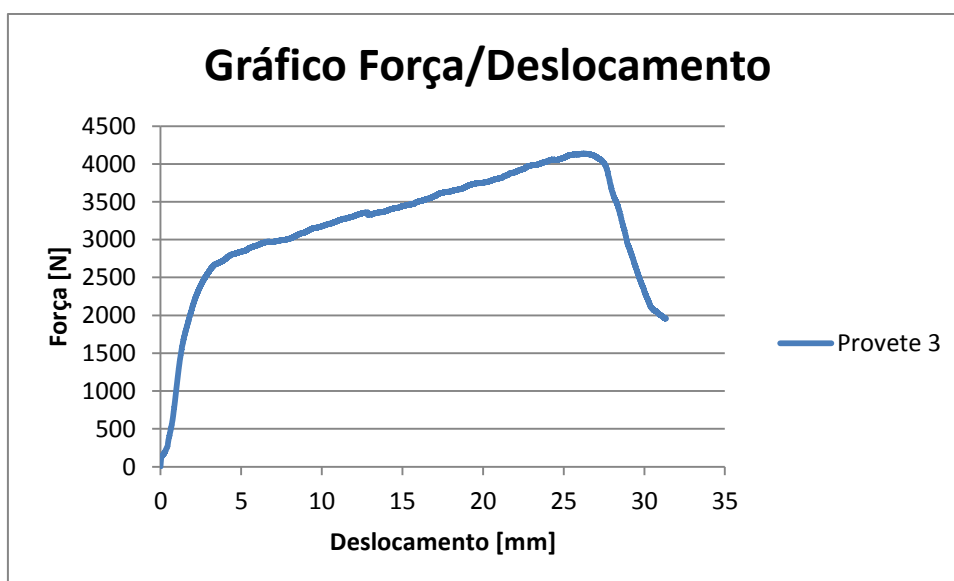


Figura 52: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provete com núcleo de cortiça nº 3.

Para os três ensaios efectuados aos provetes com núcleo de cortiça, verificou-se um comportamento semelhante, quer na curva Força/Deslocamento, quer no modo de rotura entre o núcleo e o perfil. A rotura obtida para os três provetes foi do tipo adesiva ou interfacial. A Figura 53 apresenta as três curvas inseridas no mesmo sistema de eixos para melhor se visualizar a semelhança.

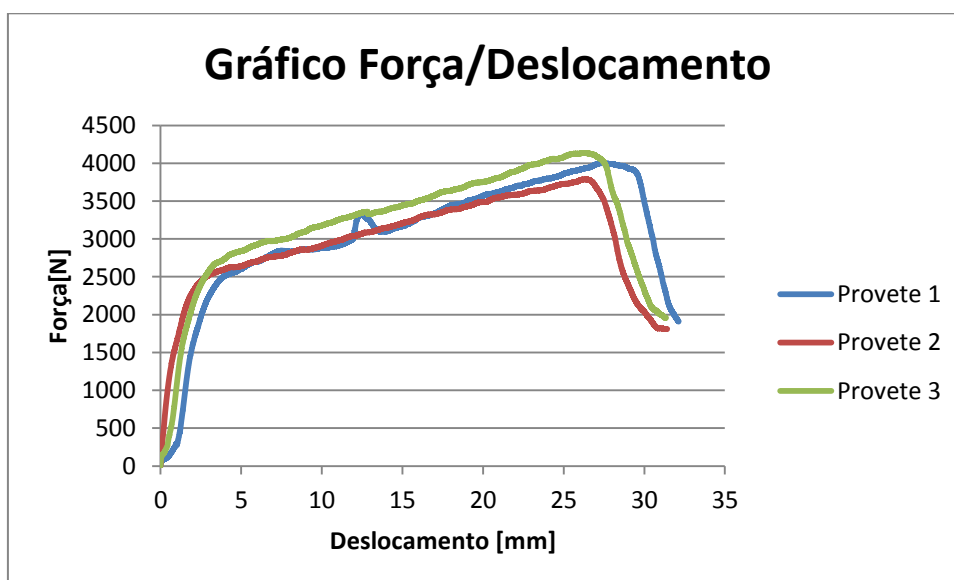


Figura 53: Gráfico F/D em ensaio de adesão, 3 provetes com núcleo de cortiça.

A Figura 54, Figura 55 e Figura 56 apresentam os provetes com núcleo de cortiça após ensaio. A rotura por adesão ou interfacial é notória, ou seja, verifica-se com segurança que houve uma perfeita separação dos dois materiais pela sua interface. Deste modo, sabe-se que os valores obtidos são relativos à adesão.



Figura 54: Provete Nº 1.



Figura 55: Provete Nº 2.



Figura 56: Provete Nº 3.

Os ensaios para os três provetes com núcleo de poliuretano foram efectuados pelo mesmo método, utilizando uma velocidade de 0,5 mm/min, comprimento de provete de 88 mm e com as guias da garra do núcleo desmontadas.

A Figura 57, Figura 58 e Figura 59, apresentam os gráficos Força/Deslocamento para os três provetes com núcleo de poliuretano.

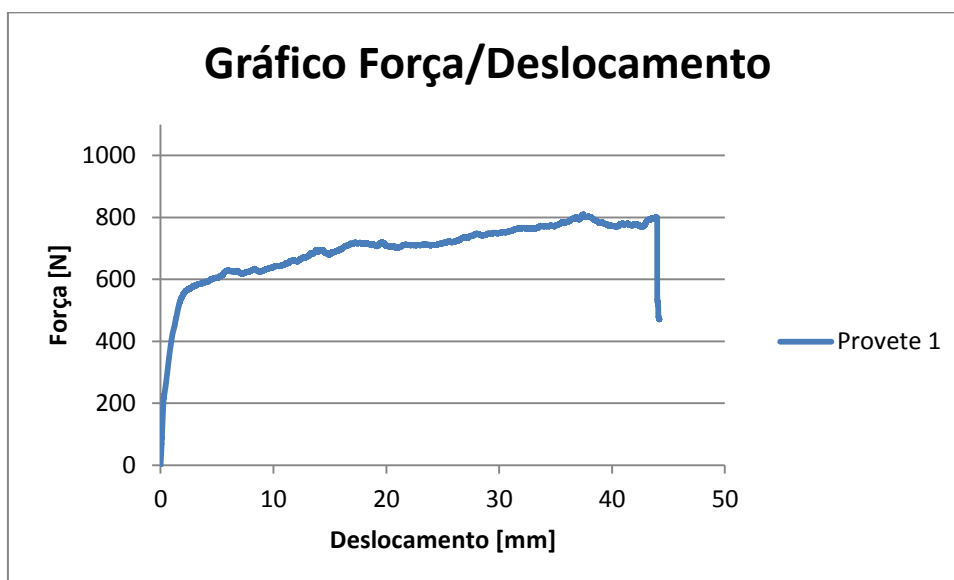


Figura 57: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provete com núcleo de poliuretano nº 1.

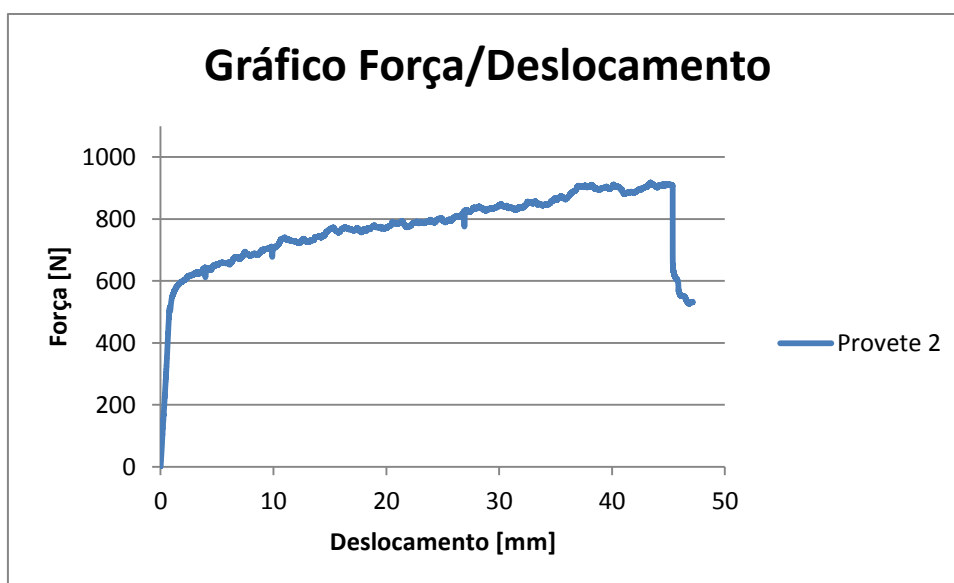


Figura 58: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provete com núcleo de poliuretano nº 2.

A Figura 60 apresenta as três curvas dos provetes com núcleo de poliuretano inseridas no mesmo sistema de eixos, para melhor se visualizar a semelhança.

Tal como nos ensaios efectuados aos provetes com núcleo de cortiça, com os provetes de núcleo de poliuretano também foi possível realizar os ensaios com sucesso. No entanto, as conclusões não foram as mesmas. O tipo de rotura nestes provetes foi do tipo coesiva no núcleo, isto é, em vez de a rotura se ter manifestado na interface dos dois materiais, ocorreu

por corte na estrutura do núcleo. A Figura 61 apresenta os provetes com núcleo de poliuretano após ensaios de adesão, onde se pode verificar a rotura por coesão do núcleo.

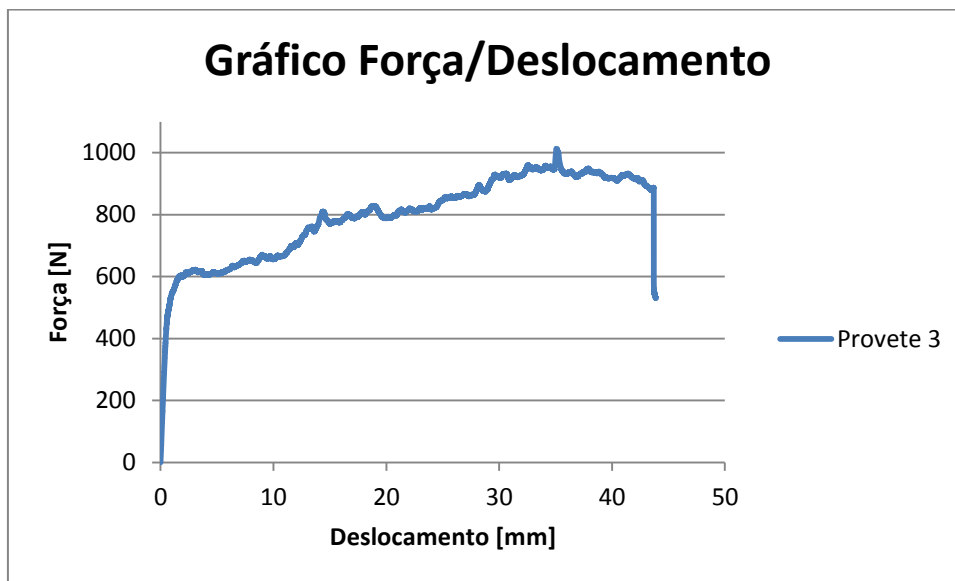


Figura 59: Gráfico F/D em ensaio de adesão, provete com núcleo de poliuretano nº 3

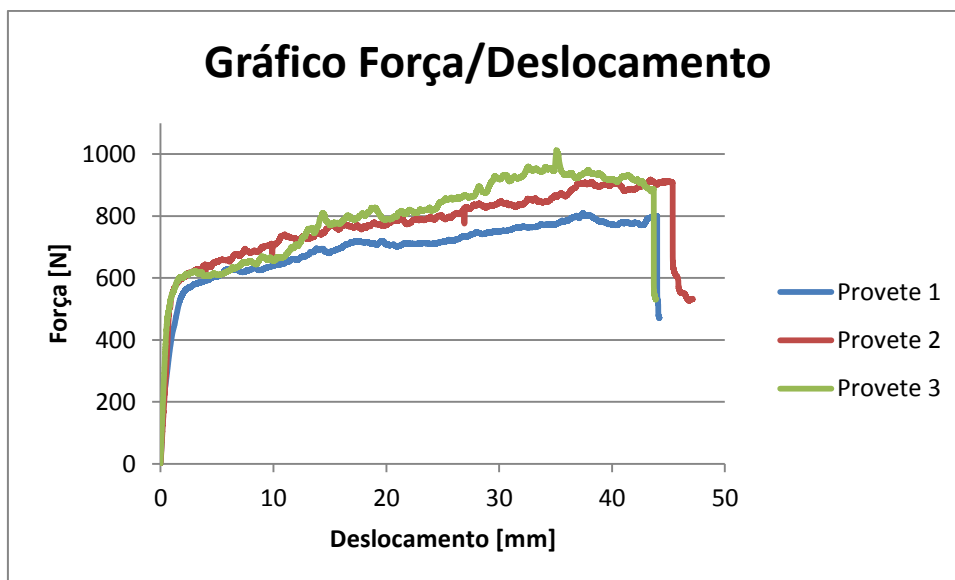


Figura 60: Gráfico F/D em ensaio de adesão, 3 provetes com núcleo de poliuretano.



Figura 61: Provetes com núcleo de poliuretano após ensaio de adesão.

Aprofundando os resultados, seguem os valores das Força e Tensões máximas obtidos por registo e cálculo no equipamento de ensaio, os valores da Tensão máxima ajustados com a taxa de compressão do núcleo a também o valor da tensão de adesão por metro linear de perfil.

As Tabela 8 e Tabela 9 apresentam esses valores.

Tabela 8: Apresentação de resultados de ensaios de adesão em provetes com núcleo de cortiça.

Provetes com núcleo de cortiça	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [N/mm ²]	Tensão Máxima, considerando Tx=29,37% [kPa]	Aderência por metro de perfil [kPa]
Provete 1	4002,11	2,76	22,18	252,08
Provete 2	3788,82	2,61	20,98	238,38
Provete 3	4137,28	2,86	22,91	260,31
Média	3976,07	2,75	22,02	250,25
Desvio Padrão	175,68	0,12	0,96	11,07

Tabela 9: Apresentação de resultados de ensaios de adesão em provetes com núcleo de Poliuretano obtidos pelo equipamento de ensaio.

Provetes com núcleo de Poliuretano	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [N/mm ²]	Tensão Máxima, considerando $T_x=30,17\%$ [kPa]	Aderência por metro de perfil [kPa]
Provete 1	809,97	0,56	4,43	50,38
Provete 2	917,44	0,63	5,02	57,07
Provete 3	1012,85	0,70	5,54	63,00
Média	913,42	0,63	5,00	56,82
Desvio Padrão	101,50	0,07	0,56	6,31

Os ensaios de adesão revelaram que os núcleos de cortiça ofereceram uma resistência à adesão cerca de 4,4 vezes maior que os núcleos de poliuretano. Esta diferença não se traduz apenas na diferente adesão entre núcleos e perfis, pois como se sabe a rotura nos núcleos de poliuretano não se deu na interface. Um outro aspecto que se pode ter em conta, é o facto da cortiça ter maior resistência à compressão, que a leva a alargar no eixo dos XX', quanto comprimida no eixo dos YY', enquanto no domínio elástico. Este alargamento em XX' é responsável pelo aumento do atrito com as paredes do perfil. Este tipo de característica é quantificado pelo coeficiente de *Poisson*.

Com base nestes ensaios, é importante referir que o processo de fabrico dos perfis pultrudidos híbridos proporciona excelentes resultados quanto à adesão entre os núcleos e os perfis.

3.6.2. Caracterização da resistência à flexão dos perfis híbridos

Para se compreenderem as alterações das características que os núcleos podem oferecer aos perfis, foram ensaiados os três tipos de perfis: perfil simples (P), perfil com núcleo de cortiça (PC) e perfil com núcleo de espuma de poliuretano (PE).

Como referido anteriormente, realizaram-se dois tipos de ensaios que serão apresentados nos dois próximos capítulos: o 3.6.2.1. para caracterização da resistência à flexão e modo de rotura e o 3.6.2.2. para caracterização da rigidez à flexão, rigidez ao corte, módulo de flexão e módulo de corte.

Os três tipos de perfil foram ensaiados segundo os eixos de maior inércia (a) e menor inércia (b), conforme representa a Figura 1.

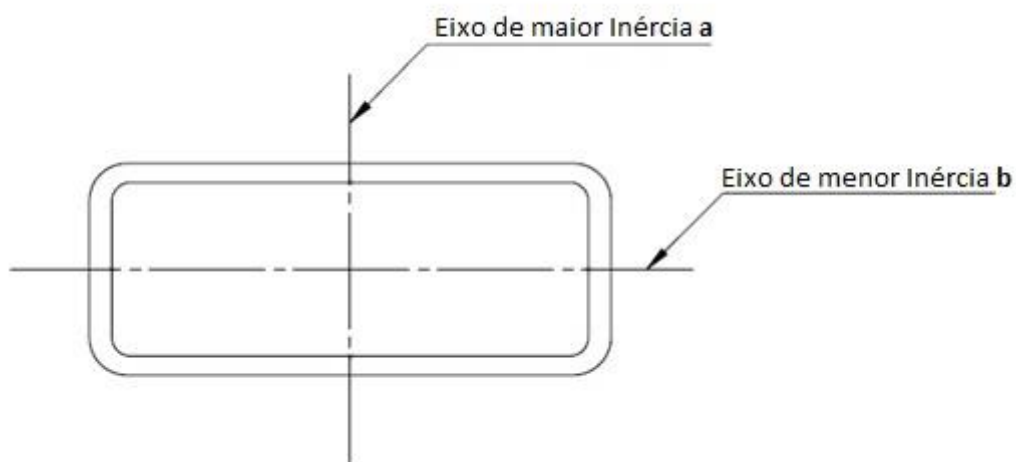


Figura 62: Representação dos eixos de maior e menor inércia, no topo do perfil.

A Figura 63 representa a solicitação das cargas segundo os dois eixos a e b.

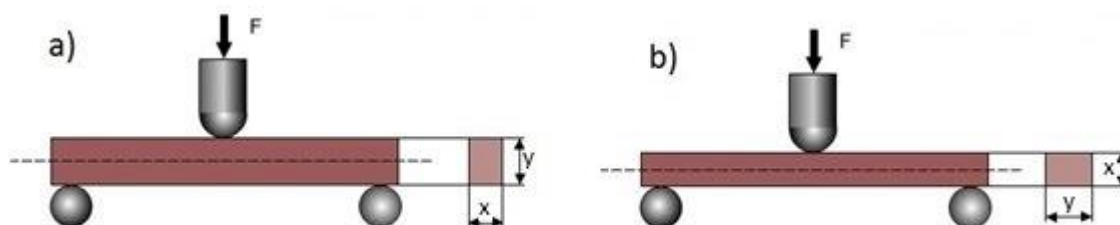


Figura 63: Ensaio de flexão segundo o eixo de: a) maior inércia; b) menor inércia
(adaptado de CIMM, 09-09-2013).

3.6.2.1 Resistência à Flexão e modo de rotura

Para se caracterizar a resistência à flexão dos perfis pultrudidos híbridos e comparar com o perfil pultrudidos simples, optou-se por se realizar ensaios de flexão em 3 pontos. Para um

melhor ajuste de resultados, cada ensaio foi repetido 5 vezes, isto é, foram ensaiados 5 provetes de cada tipo.

Os provetes utilizados para o ensaio de 3 pontos foram cortados do perfil de 69 mm x 29 mm a um comprimento de 570 mm. Este comprimento deve-se ao facto de se ter utilizado um vão de 540 mm e, conseqüentemente, 15 mm de margem de cada lado.

A Figura 64 apresenta como exemplo o *setup* de ensaio de um perfil simples segundo o eixo de maior inércia.



Figura 64: Ensaio de flexão a três pontos de um perfil simples, segundo eixo de maior inércia.

Para a aplicação da força F , a velocidade do travessão da máquina foi ajustada para 2 mm/min.

Para uma rápida visualização e melhor compreensão dos resultados dos ensaios, seguem os gráficos Força/Deslocamento (F/D) para cada conjunto de provetes, acompanhados por tabelas com os resultados da Força máxima, Tensão máxima e Deslocamento, seguidos dos cálculos da média, desvio padrão, máximo e mínimo.

O gráfico da Figura 65 e a Tabela 10 apresentam os resultados para os 5 provetes simples, segundo o eixo de maior Inércia.

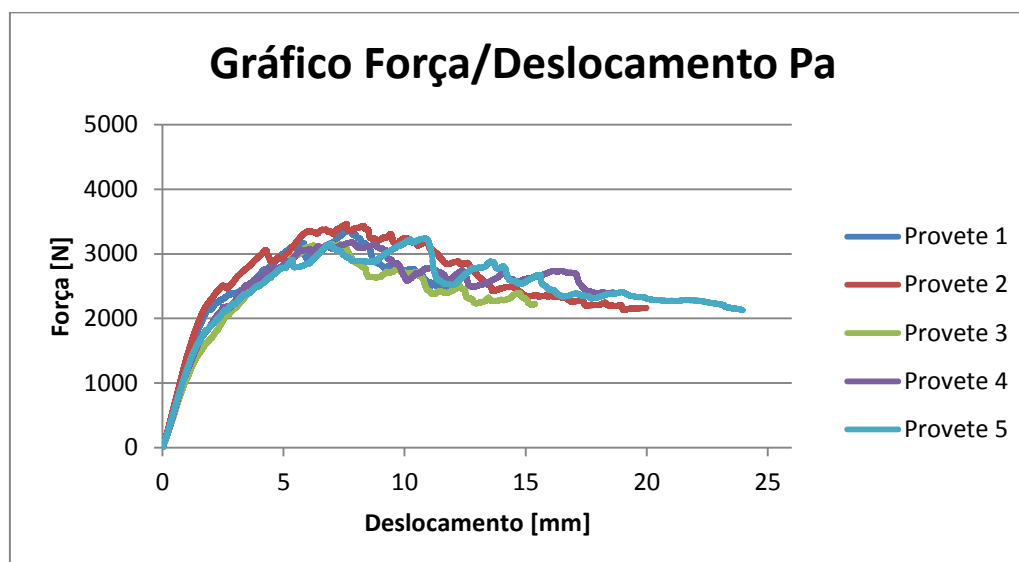


Figura 65: Gráfico F/D de provetes Simples no eixo de maior Inércia.

Tabela 10: Resultados dos provetes Simples no eixo de maior Inércia.

	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Provete Pa1	3359,91	19,10	7,69
Provete Pa2	3465,69	19,70	7,61
Provete Pa3	3155,11	17,94	6,98
Provete Pa4	3176,77	19,06	7,82
Provete Pa5	3237,21	18,40	10,85
Média	3278,94	18,64	8,19
Desvio Padrão	131,29	0,75	1,52
Máximo	3465,69	19,70	10,85
Mínimo	3155,11	17,74	6,98

O gráfico da Figura 66 e a Tabela 11 apresentam os resultados para os 5 provetes híbridos com núcleo de cortiça, segundo o eixo de maior Inércia.

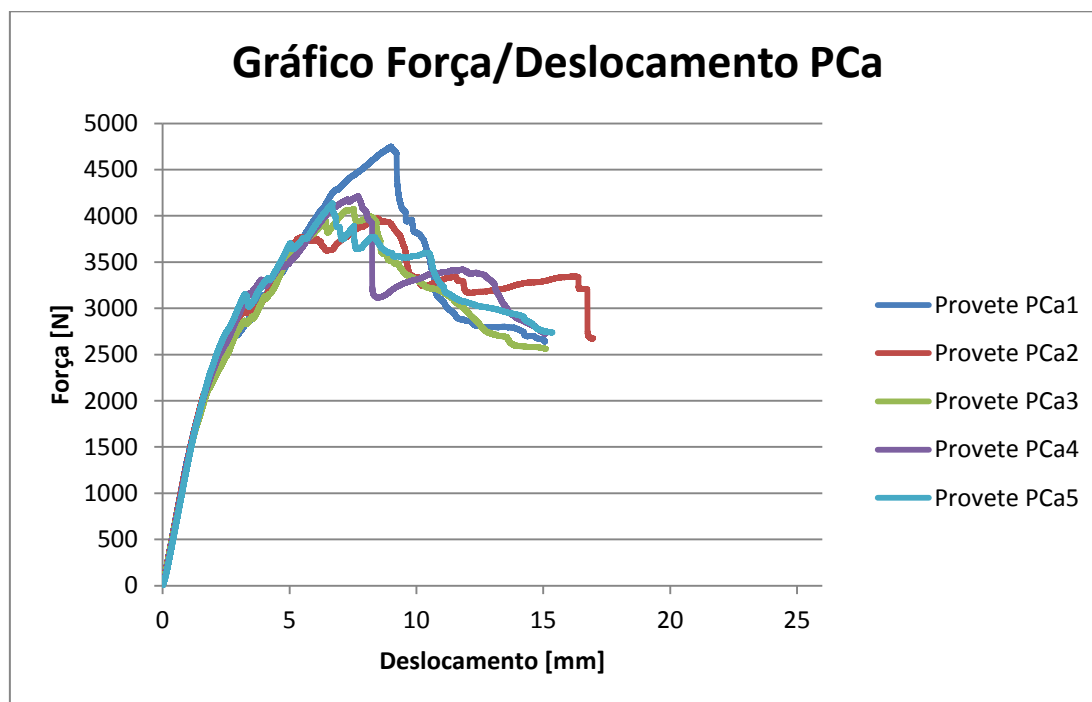


Figura 66: Gráfico F/D de provetes com núcleo de cortiça no eixo de maior Inércia.

Tabela 11: Resultados dos provetes com núcleo de cortiça no eixo de maior Inércia.

	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Provete PCa1	4749,22	27,00	8,99
Provete PCa2	3973,96	22,59	8,42
Provete PCa3	4075,25	23,17	7,54
Provete PCa4	4214,41	23,96	7,70
Provete PCa5	4133,98	23,50	6,69
Média	4229,36	24,04	7,87
Desvio Padrão	303,54	1,73	0,88
Máximo	4749,22	27,00	8,99
Mínimo	3973,96	22,59	6,70

O gráfico da Figura 67 e a Tabela 12 apresentam os resultados para os 5 provetes híbridos com núcleo de espuma de poliuretano, segundo o eixo de maior Inércia.

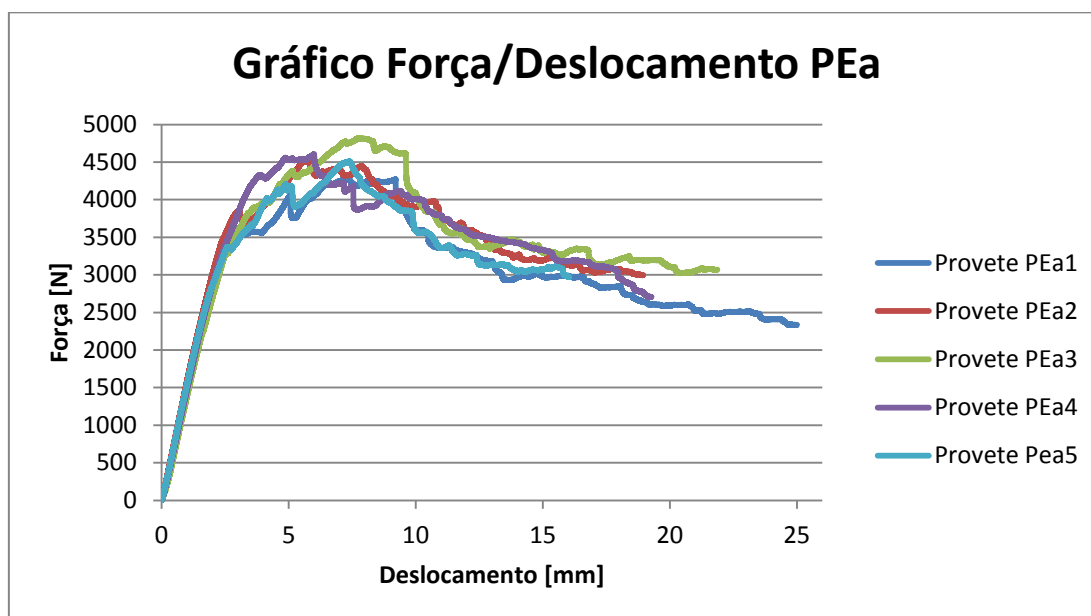


Figura 67: Gráfico F/D de provetes com núcleo de espuma no eixo de maior Inércia.

Tabela 12: Resultados dos provetes com núcleo de Poliuretano no eixo de maior Inércia.

	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Provete PEa1	4273,65	24,30	7,30
Provete PEa2	4542,71	25,82	5,65
Provete PEa3	4817,13	27,38	7,77
Provete PEa4	4607,72	26,19	6,00
Provete PEa5	4509,73	25,64	7,40
Média	4550,19	25,87	6,82
Desvio Padrão	195,41	1,11	0,93
Máximo	4817,13	27,38	7,77
Mínimo	4273,65	24,29	5,65

Após uma rápida análise a estes resultados e gráficos apresentados, verifica-se que no eixo de maior inércia, para a mesma solicitação, o deslocamento (flecha) diminui ligeiramente para os perfis com núcleo. No entanto, o acréscimo do núcleo no interior do perfil aumenta significativamente a resistência mecânica do perfil, principalmente o núcleo de espuma de poliuretano.

O gráfico da Figura 68 apresenta a curva Força/Deslocamento de 3 provetes. Cada provete foi seleccionado de um grupo diferente (vazio, cortiça e espuma), para melhor se observar as variações de resultados.

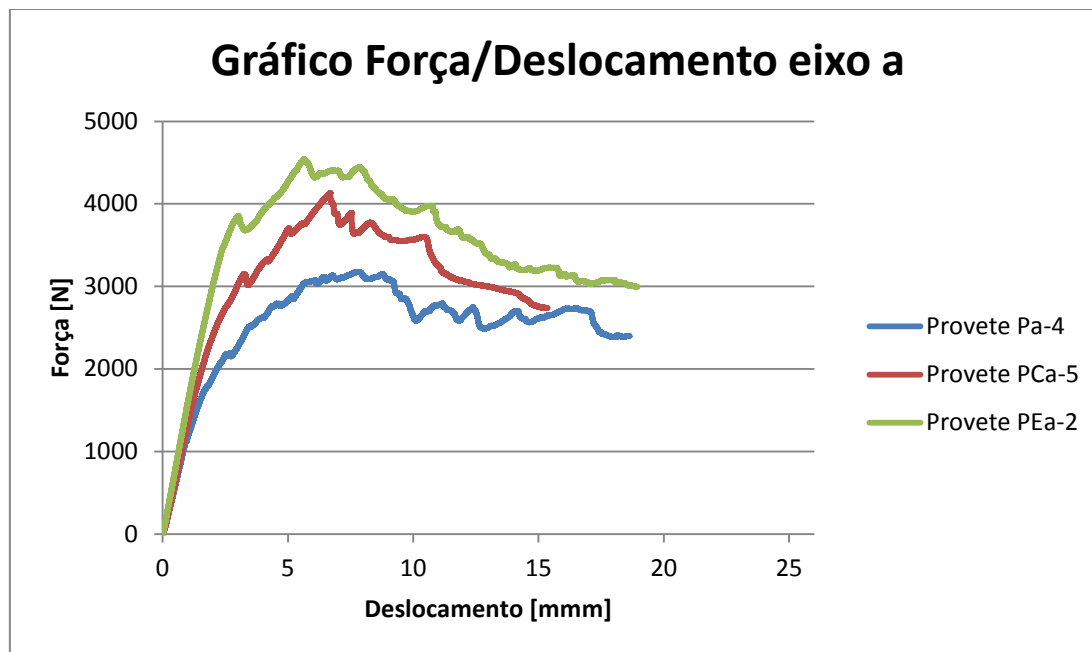


Figura 68: Gráfico F/D relativo ao provete simples vs cortiça vs espuma no eixo a.

Nas figuras seguintes poderão ser observados os gráficos e tabelas para os eixos de menor inércia.

O gráfico da Figura 69 e a Tabela 13 apresentam os resultados para os 5 provetes simples, segundo o eixo de menor Inércia.

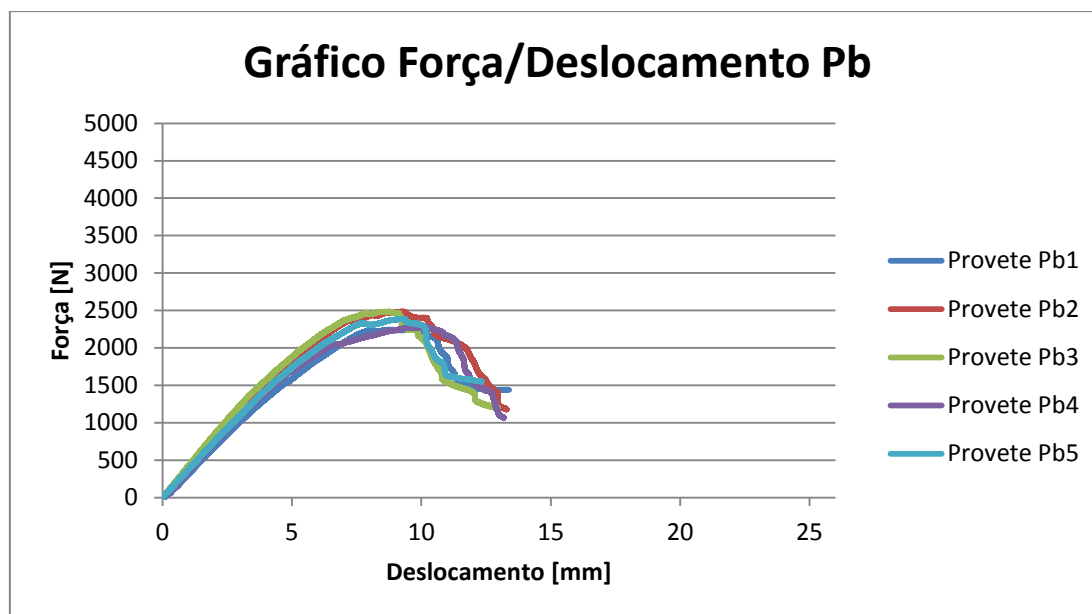


Figura 69: Gráfico F/D relativo a provetes simples no eixo de menor Inércia.

Tabela 13: Resultados dos provetes Simples no eixo de menor Inércia.

	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Provete Pb1	2275,23	30,47	9,86
Provete Pb2	2484,44	33,27	9,28
Provete Pb3	2483,53	33,26	8,76
Provete Pb4	2277,69	30,50	10,16
Provete Pb5	2387,64	31,98	9,24
Média	2381,71	31,90	9,46
Desvio Padrão	103,82	1,39	0,55
Máximo	2484,44	33,27	10,16
Mínimo	2275,23	30,47	8,76

O gráfico da Figura 70 e a Tabela 14 apresentam os resultados para os 5 provetes híbridos com núcleo de cortiça, segundo o eixo de menor Inércia.

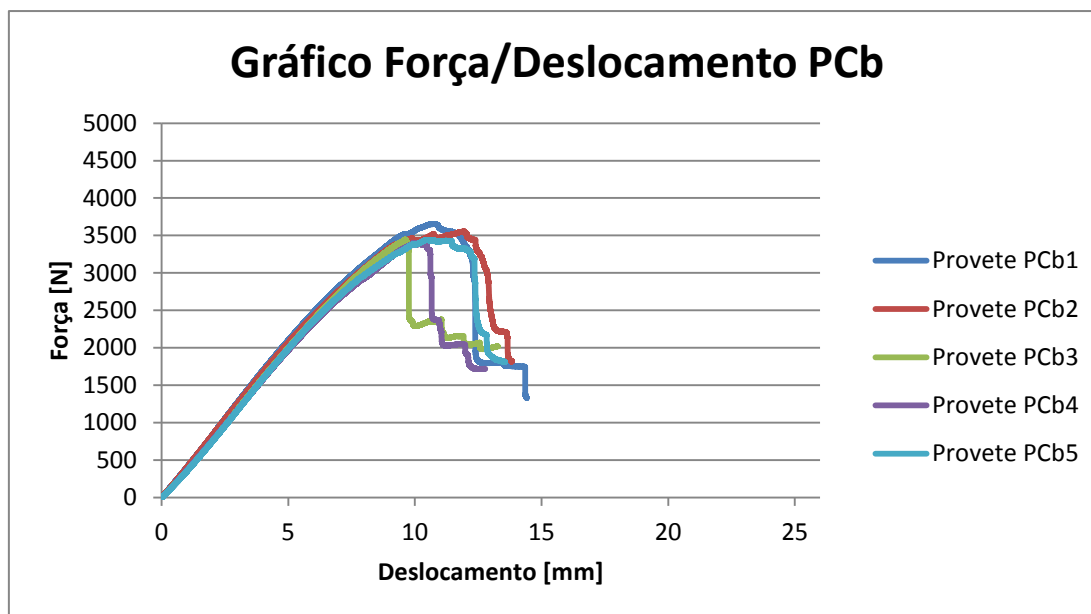


Figura 70: Gráfico F/D relativo a provetes com núcleo de cortiça no eixo de menor Inércia.

Tabela 14: Resultados dos provetes com núcleo de cortiça no eixo de menor Inércia.

	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Provete PCb1	3652,57	48,91	10,75
Provete PCb2	3554,82	47,61	11,94
Provete PCb3	3445,03	46,14	9,63
Provete PCb4	3401,20	45,55	9,96
Provete PCb5	3442,01	46,10	10,52
Média	3499,13	46,86	10,56
Desvio Padrão	102,99	1,38	0,89
Máximo	3652,57	48,92	11,94
Mínimo	3401,2	45,55	9,63

O gráfico da Figura 71 e a Tabela 15 apresentam os resultados para os 5 provetes híbridos com núcleo de espuma de poliuretano, segundo o eixo de menor Inércia.

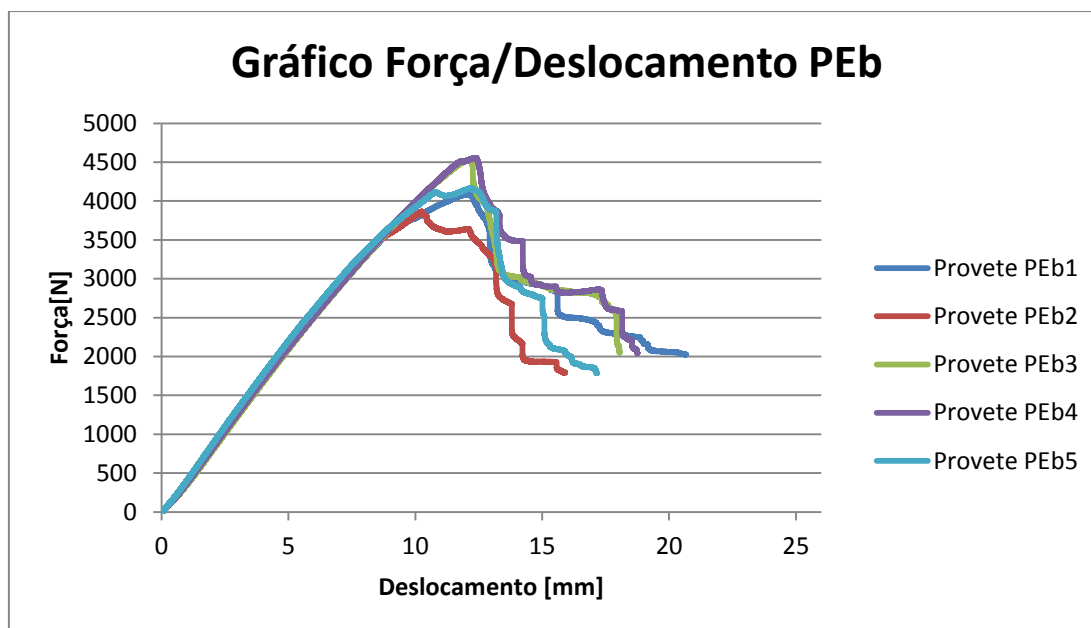


Figura 71: Gráfico F/D relativo a provetes com núcleo de espuma no eixo de menor Inércia.

Tabela 15: Resultados dos provetes com núcleo de Poliuretano no eixo de menor Inércia.

	Força Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Provete PEb1	4088,08	54,75	12,09
Provete PEb2	3856,32	51,77	10,25
Provete PEb3	4529,16	60,66	12,29
Provete PEb4	4556,54	61,02	12,42
Provete PEb5	4170,82	55,86	12,21
Média	4241,98	56,81	11,81
Desvio Padrão	296,67	3,97	0,88
Máximo	4556,54	61,02	12,42
Mínimo	3865,32	51,77	10,25

Após uma rápida análise a estes resultados e gráficos apresentados, verifica-se que no eixo de menor inércia os resultados são semelhantes ao eixo de maior inércia. Para a mesma solicitação, o deslocamento (flecha) diminui ligeiramente para os perfis híbridos. Além disso, o acréscimo do núcleo no interior do perfil também aumenta significativamente a resistência mecânica do perfil, principalmente aqueles que têm núcleo de espuma de poliuretano.

Tal como para o eixo de maior inércia, o gráfico da Figura 72, apresenta a curva Força/Deslocamento de 3 provetes seleccionados no mesmo âmbito.

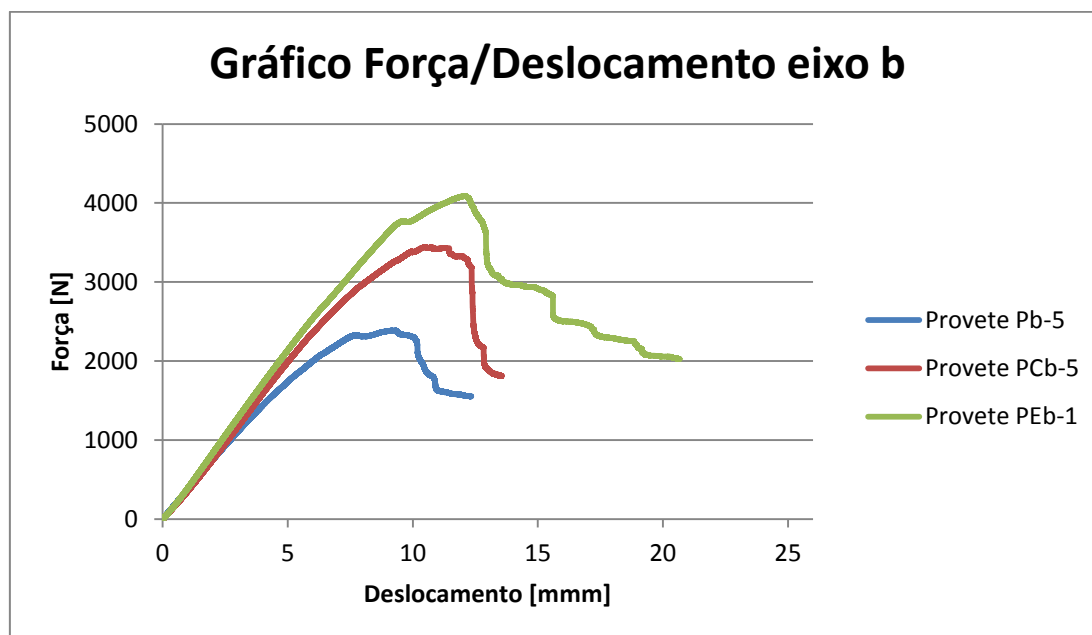


Figura 72: Gráfico F/D relativo ao provete simples vs cortiça vs espuma no eixo b.

Dos ensaios de flexão a três pontos pode-se concluir que em ambos os eixos (maior e menor inércia), a aplicação de ambos os núcleos (cortiça e poliuretano) incrementam relevantemente a resistência mecânica. Conforme podemos verificar nas Tabela 16 e Tabela 17, os núcleos de espuma de poliuretano são os que mais contribuem para o aumento da resistência mecânica, destacando-se a situação de carga segundo o eixo de maior inércia, com um aumento de 78%. A variação mais baixa obtida foi revelada pelo núcleo de cortiça, com a carga solicitada no eixo de menor inércia, mas mesmo assim com um melhoramento de 29%.

Tabela 16: Resumo de resultados segundo o eixo de maior inércia e respectiva variação.

Perfil	Carga Máxima Média [N]	Tensão de rotura [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Varição [%]
Pa	3279	18,64	0,75	
PCa	1229	24,04	1,73	+29%
PEa	4550	25,87	1,11	+39%

Tabela 17: Resumo de resultados segundo eixo de menor inércia e respectiva variação.

Perfil	Carga Máxima Média [N]	Tensão de rotura [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Varição [%]
Pb	2382	31,90	1,39	
PCb	3499	46,86	1,38	+47%
PEb	4242	56,81	3,97	+78%

Para além desta análise quantitativa, também é importante conhecer o modo de rotura obtido nos ensaios. Verificou-se que a rotura dos provetes se dá por corte, na zona onde lhe é aplicada a força F.

A Figura 73, Figura 74 e Figura 75 demonstram a rotura dos provetes: sem núcleo, com núcleo de cortiça e com núcleo de poliuretano, respectivamente, segundo o eixo de maior inércia.

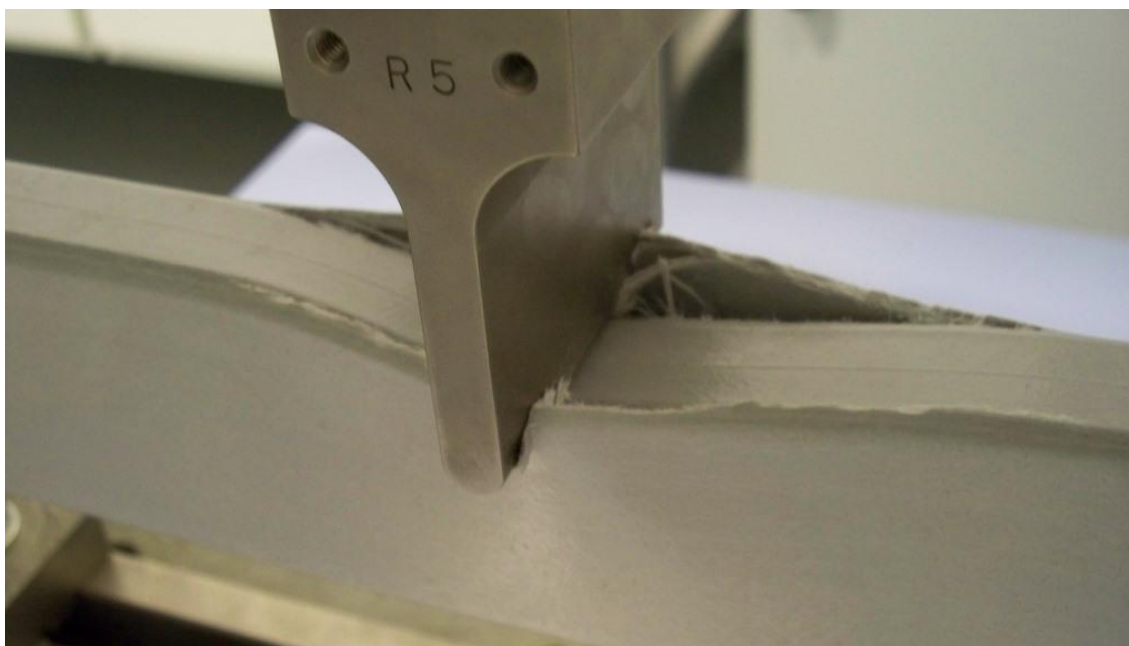


Figura 73: Rotura de provete sem núcleo no ensaio de flexão a 3 pontos, segundo o eixo de maior inércia.



Figura 74: Rotura de provete com núcleo de cortiça no ensaio de flexão a 3 pontos, segundo o eixo de maior inércia.

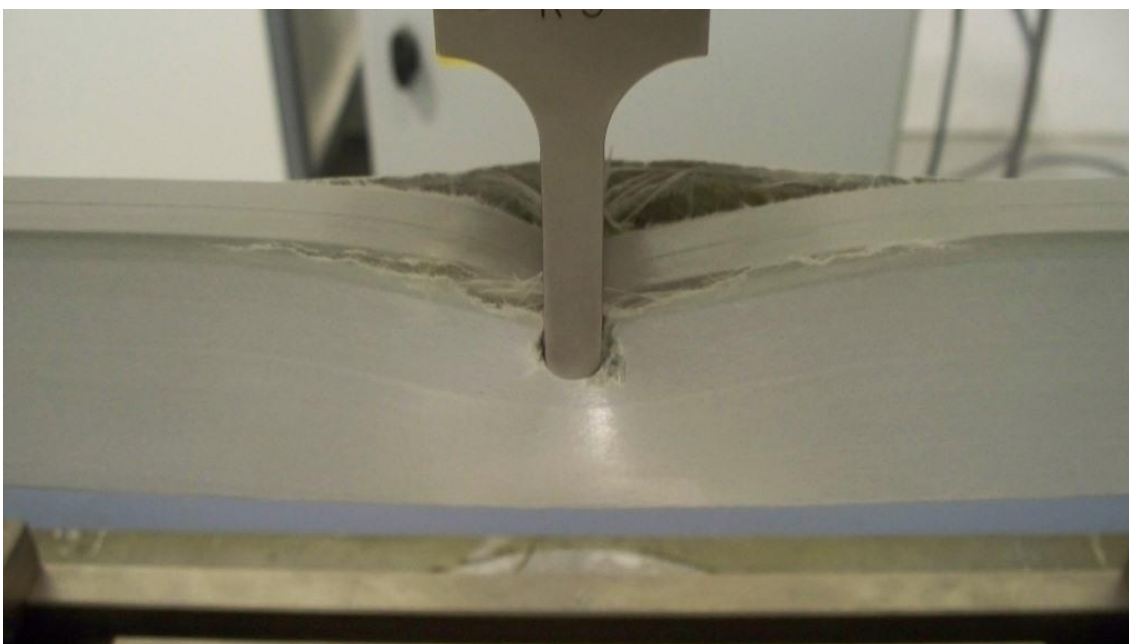


Figura 75: Rotura de provete com núcleo de poliuretano no ensaio de flexão a 3 pontos, segundo o eixo de maior inércia.

3.6.2.2 Rigidez à flexão, rigidez ao corte, módulo de flexão e módulo de corte

Os ensaios de flexão para determinar a rigidez à flexão, rigidez ao corte, módulo de flexão e módulo ao corte, foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da ALTO, com um equipamento SHIMADZU, com uma célula de carga de 100 kN. A Figura 76 apresenta como exemplo um ensaio de um perfil simples, de vão de 1300 mm e segundo o eixo de menor inércia.



Figura 76: Equipamento e método de ensaio segundo EN13607-2:2002 Anexo G no laboratório da ALTO.

Os ensaios seguiram a norma EN13706-2:2002 Anexo G.

De acordo com a norma, foram seleccionados 5 vãos: 1300, 1050, 850, 550 e 300 mm. Para satisfazer os vãos seleccionados, cortaram-se provetes com 1,2x o vão a ensaiar, ou seja, provetes com os seguintes comprimentos: 1560, 1260, 1020, 660 e 360 mm.

Cortaram-se 4 provetes de cada tipo, de modo a realizarem-se 2 ensaios a cada tipo, segundo os dois eixos eixo (maior e menor inércia), o que representa um total de 120 ensaios.

Para além de se registarem os valores de carga e deslocamento através da máquina de ensaios, também se utilizou um comparador com resolução 0,01 mm, para se medir o deslocamento pela face de baixo do perfil, conforme se pode ver nas Figura 76 e Figura 77.



Figura 77: Exemplo do *setup* de ensaio e método de medição de flexa para os ensaios de três pontos segundo EN13607-2:2002 Anexo G.

Para uma visualização simples da curva força vs deslocamento, traçaram-se os gráficos de todos os ensaios através dos valores das cargas registados pelo equipamento para comparar com os deslocamentos medidos através do comparador. Da Figura 78 até à Figura 89 pode-se verificar essas curvas.

NOTA: Para além destes ensaios, foi realizado outro conjunto de ensaios semelhantes, mas sem se registarem as medições obtidas pelo comparador. Estes não foram considerados para cálculo, uma vez que não existe a medição pela face inferior. No ANEXO I podem-se encontrar as curvas força vs deslocamento, traçadas com valores registados pelo equipamento de ensaio para todos os testes realizados.

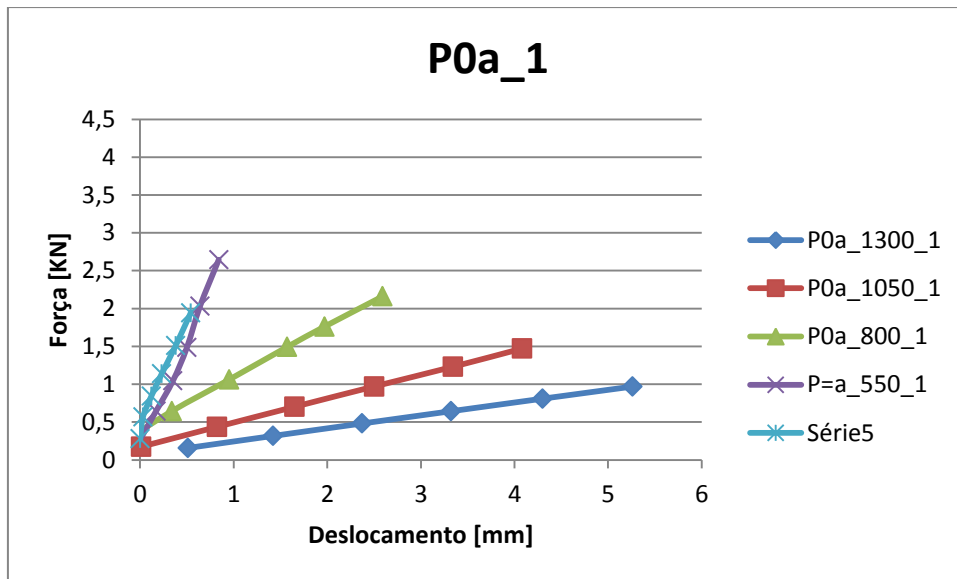


Figura 78: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples, segundo o eixo de maior inércia - Provete 1.

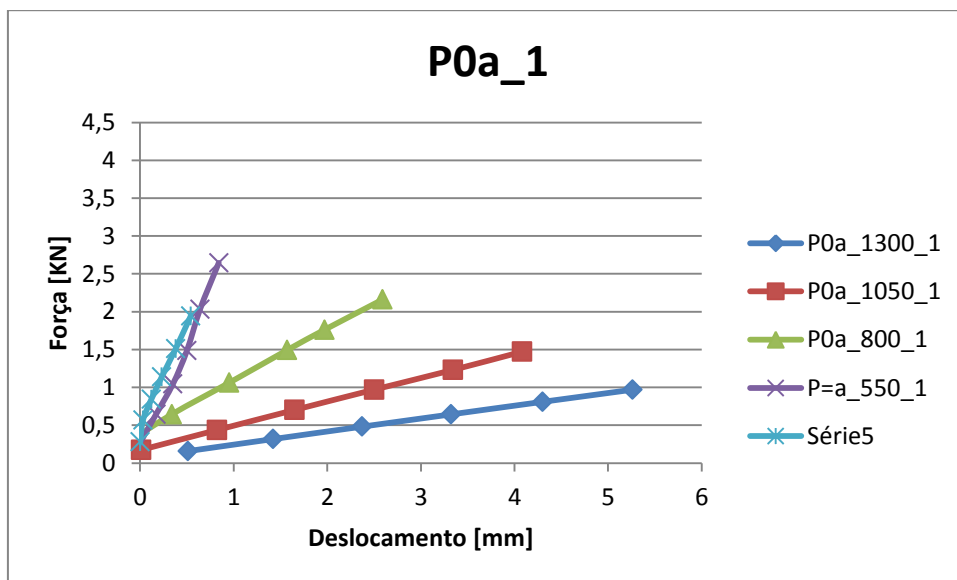


Figura 79: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples, segundo o eixo de maior inércia - Provete 2.

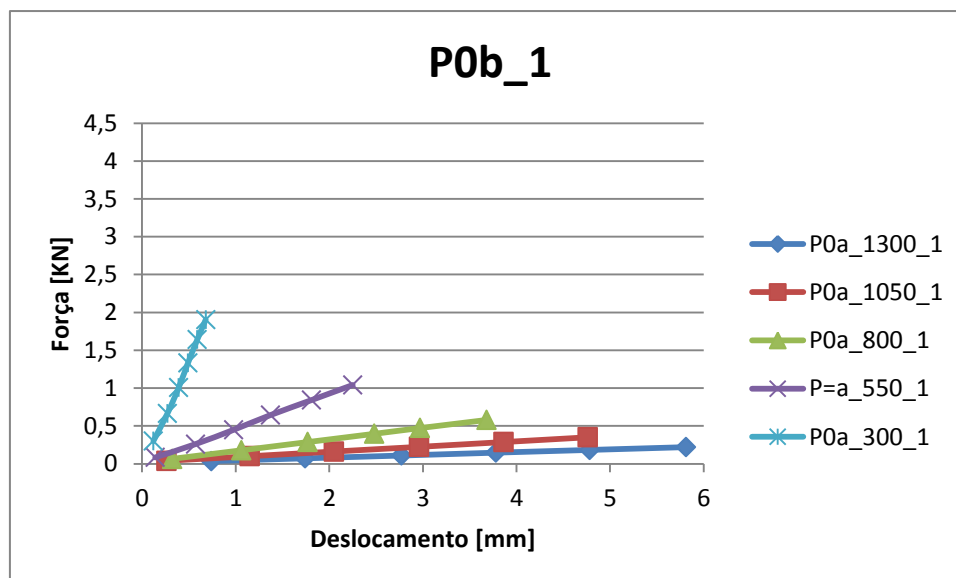


Figura 80: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples, segundo o eixo de menor inércia - Provete 1.

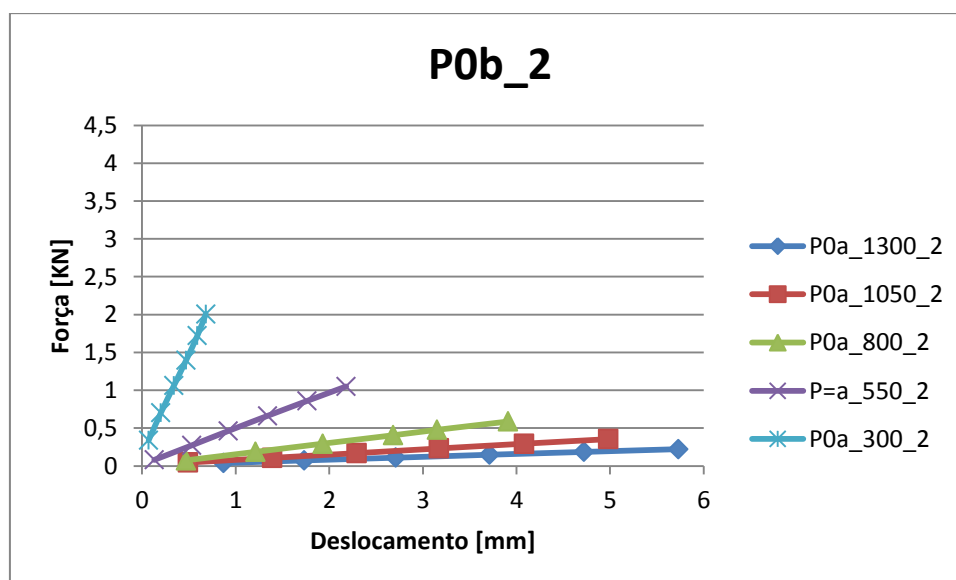


Figura 81: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil simples, segundo o eixo de menor inércia - Provete 2.

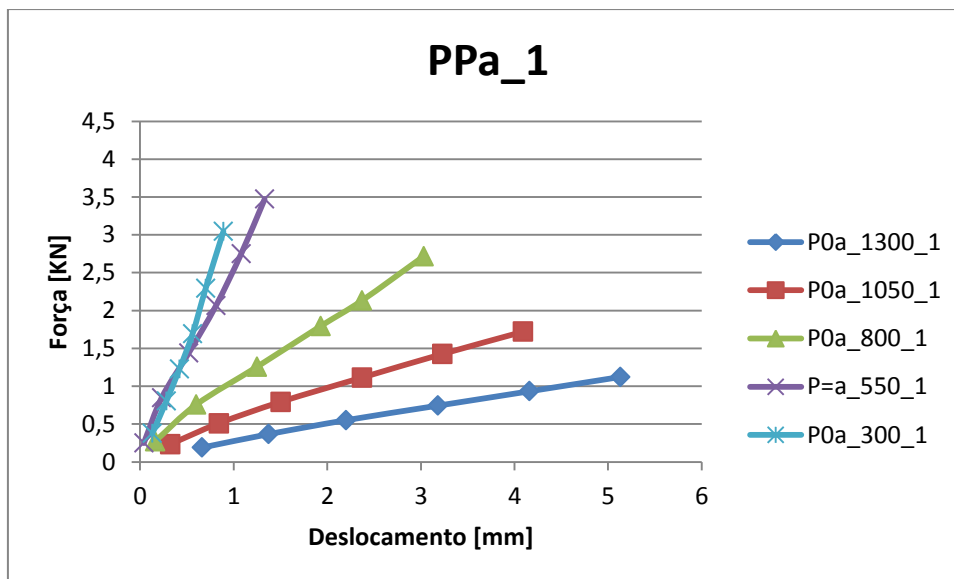


Figura 82: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano, segundo o eixo de maior inércia - Provete 1.

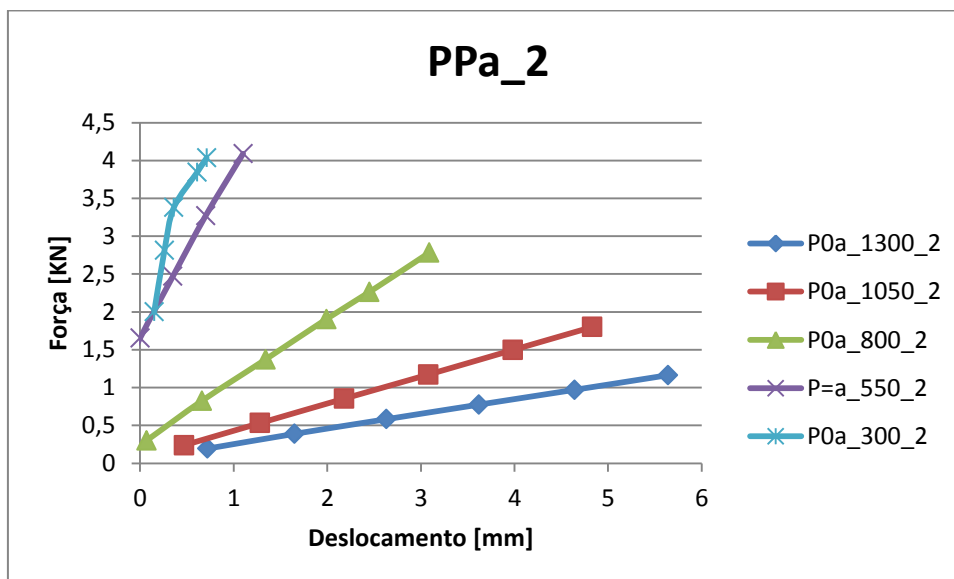


Figura 83: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano, segundo o eixo de maior inércia - Provete 2.

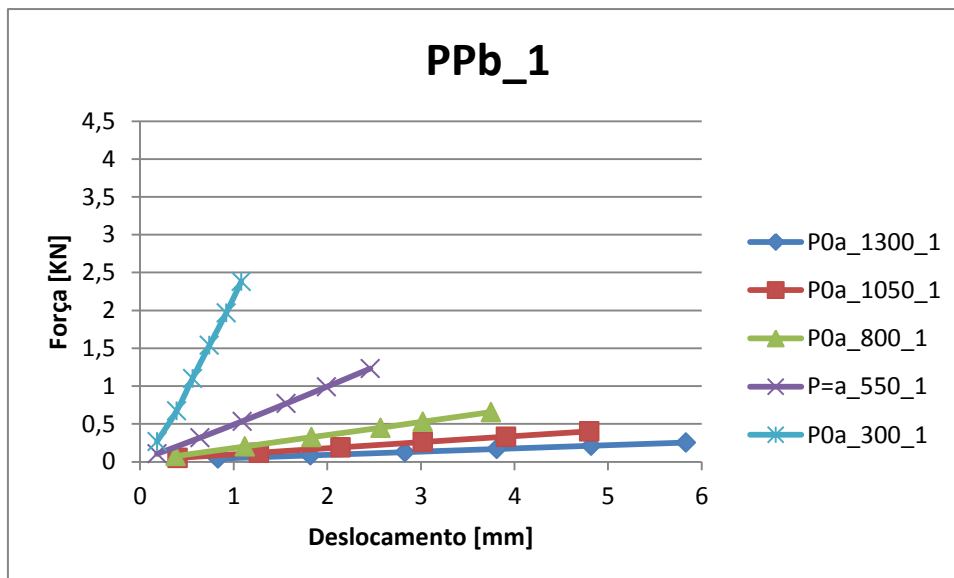


Figura 84: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano, segundo o eixo de menor inércia - Provete 1.

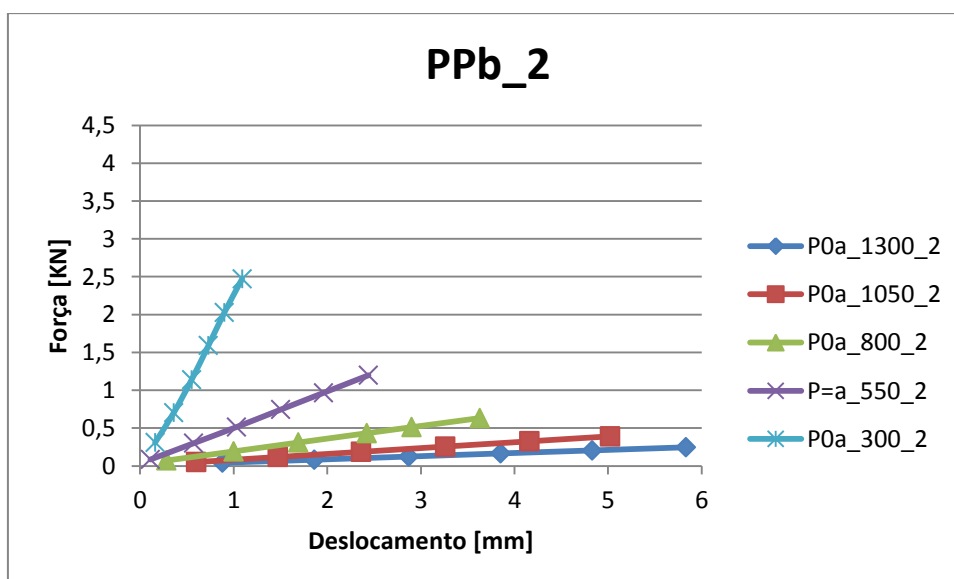


Figura 85: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo de espuma de poliuretano, segundo o eixo de menor inércia - Provete 2.

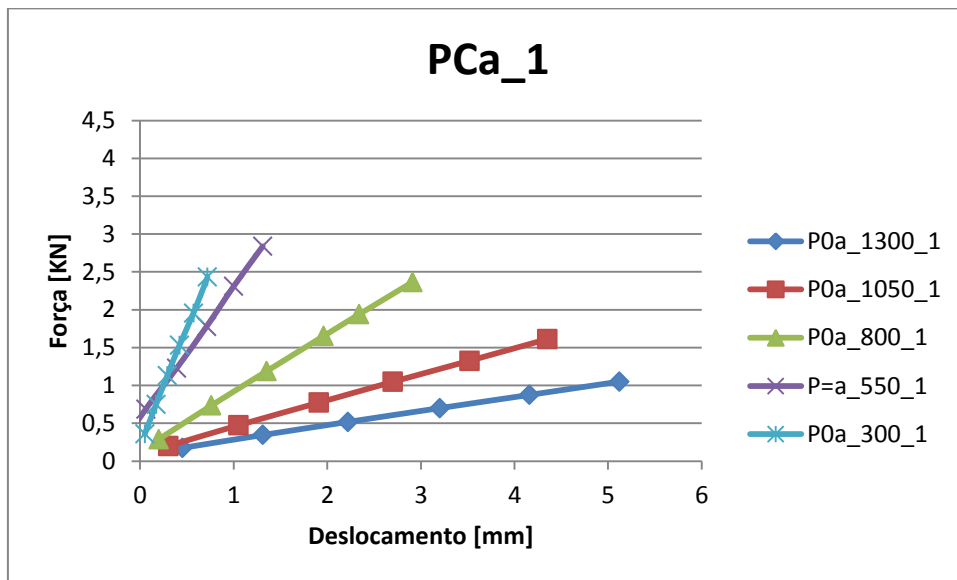


Figura 86: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça, segundo o eixo de maior inércia - Provete 1.

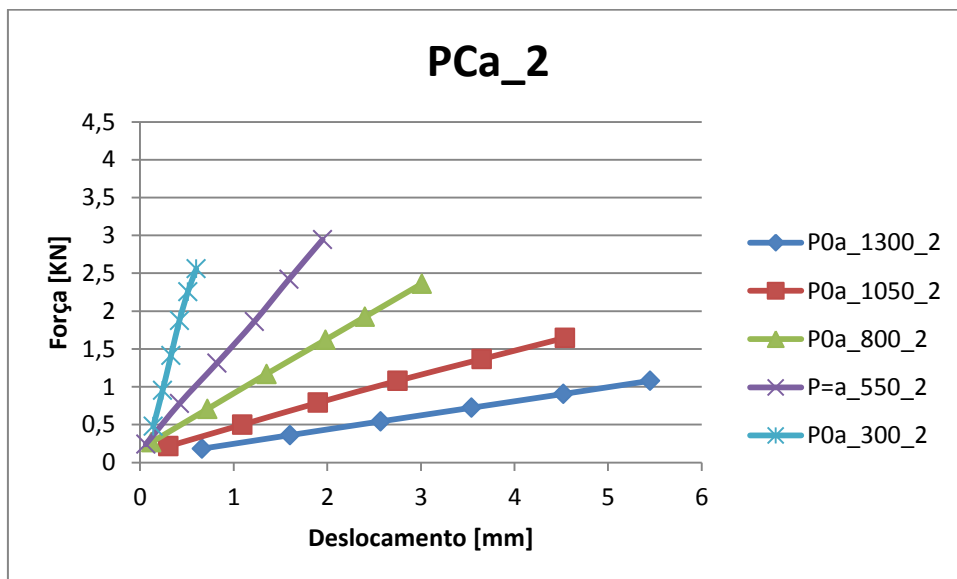


Figura 87: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça, segundo o eixo de maior inércia - Provete 2.

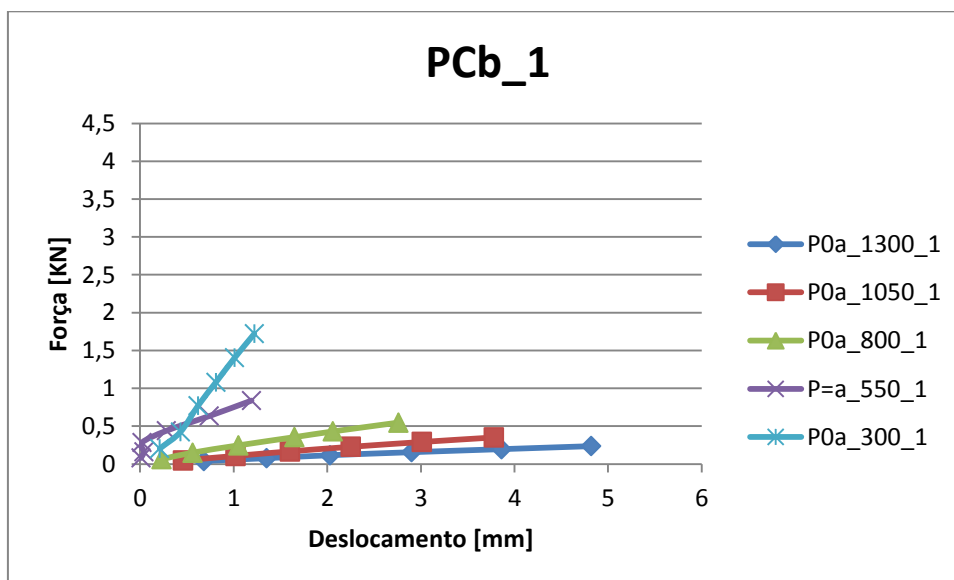


Figura 88: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça, segundo o eixo de maior inércia - Provete 1.

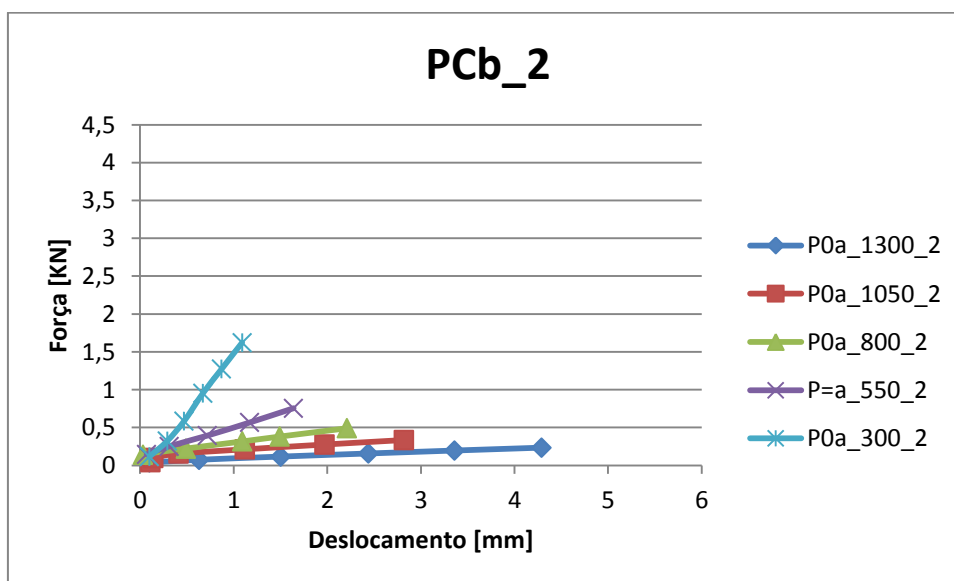


Figura 89: Curva Força vs Deslocamento do ensaio de flexão pela norma EN13706-2, para o perfil com núcleo cortiça, segundo o eixo de maior inércia - Provete 2.

De acordo com a norma EN 13706-2:2002 Anexo G, através da ajuda de uma folha de cálculo, traçaram-se as curvas L^2 vs s/PL . Da Figura 90 à Figura 95 são apresentadas as curvas, juntamente com a tendência linear.

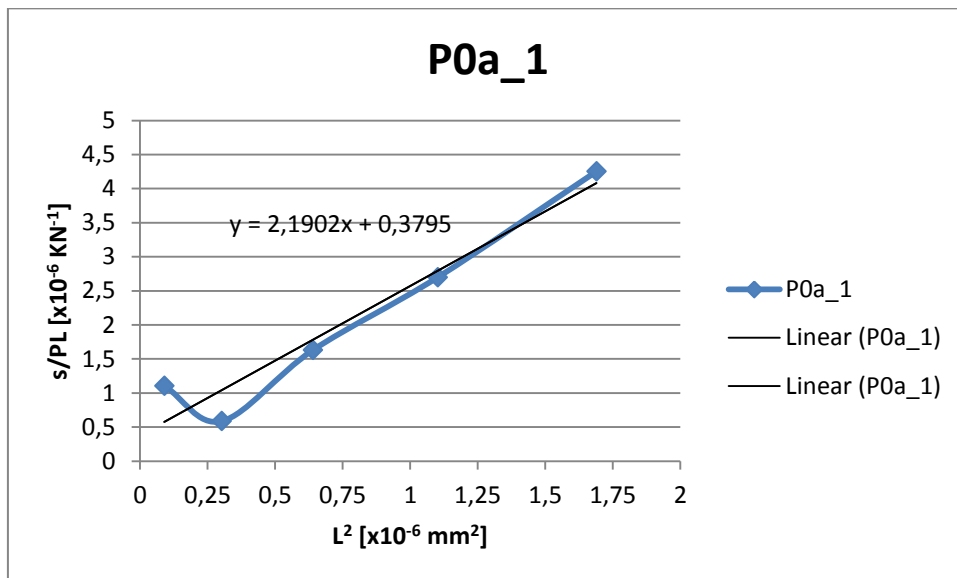


Figura 90: Curva L^2 vs s/PL para o perfil simples, segundo o eixo de maior inércia.

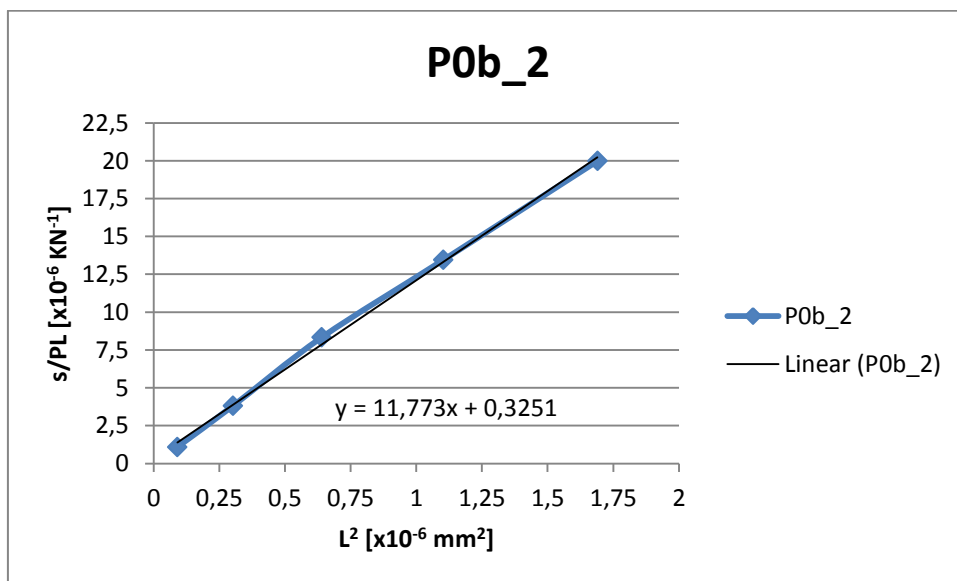


Figura 91: Curva L^2 vs s/PL para o perfil simples, segundo o eixo de menor inércia.

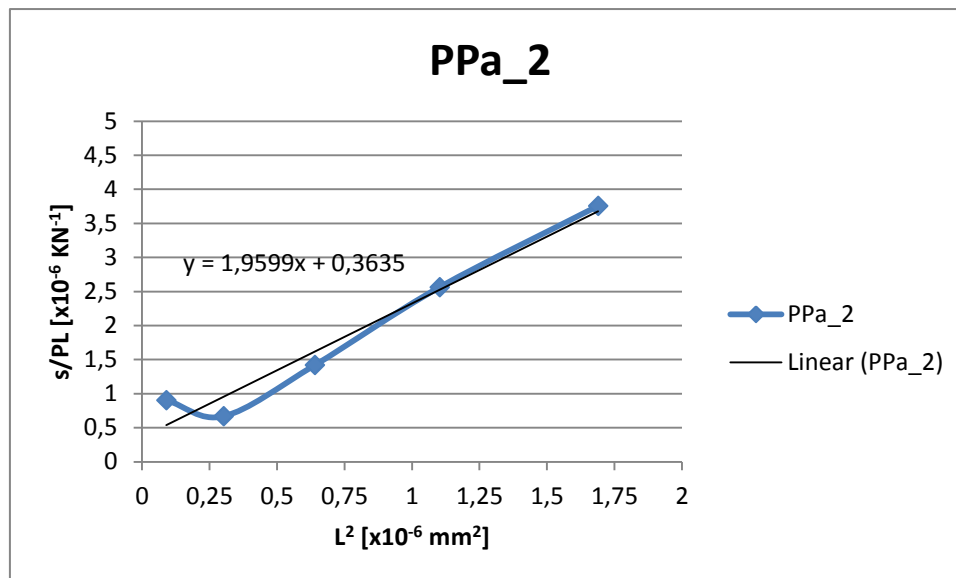


Figura 92: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de poliuretano, segundo eixo de maior inércia.

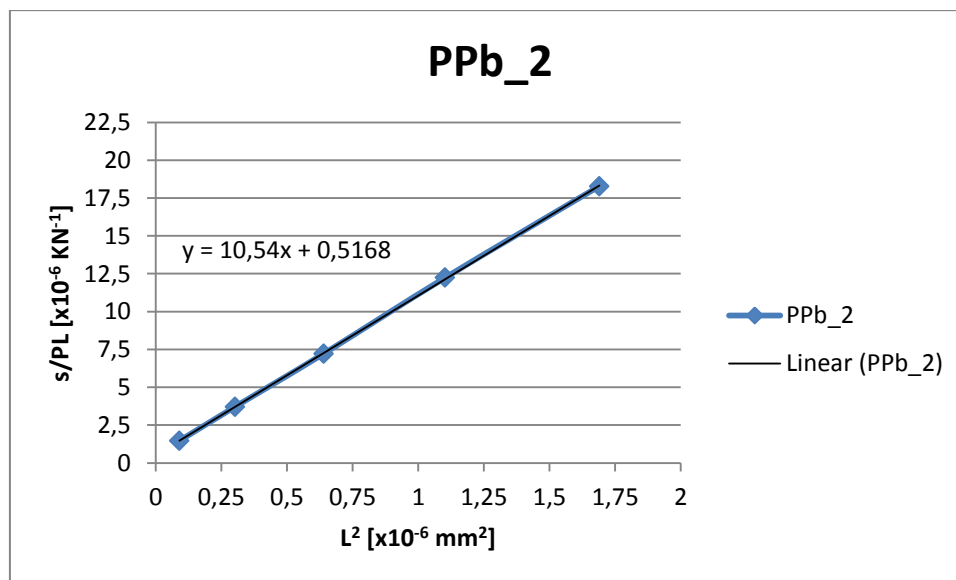


Figura 93: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de poliuretano, segundo eixo de menor inércia.

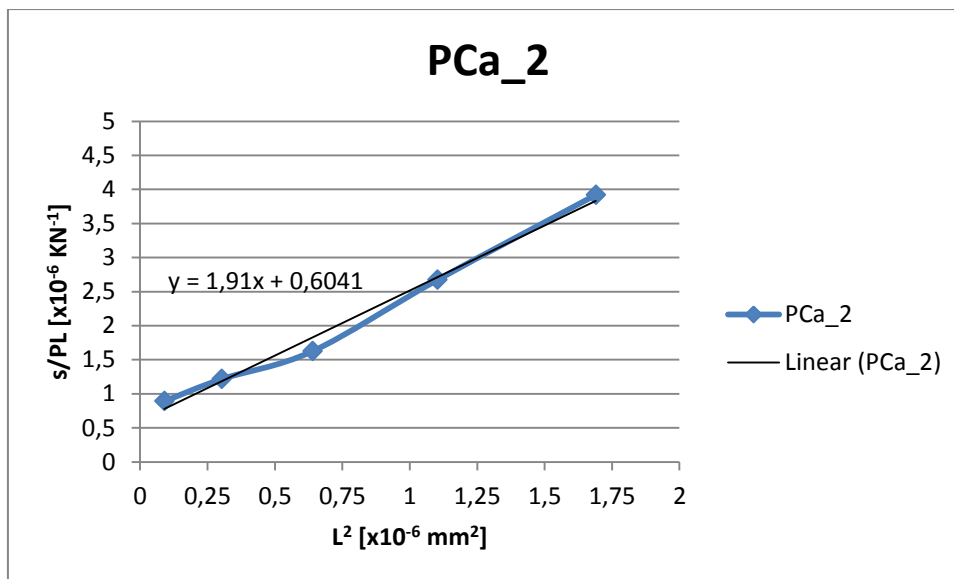


Figura 94: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de cortiça, segundo eixo de maior inércia.

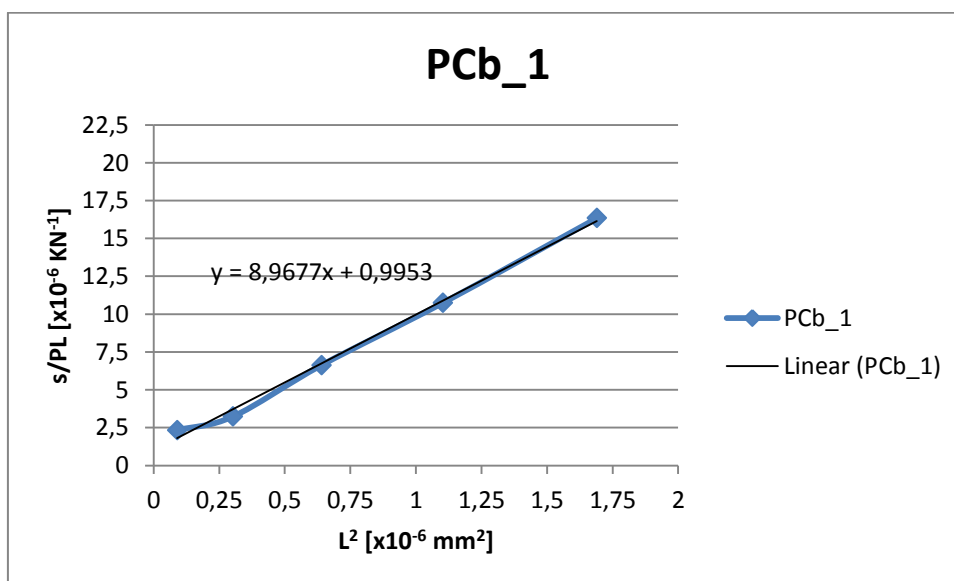


Figura 95: Curva L^2 vs s/PL para o perfil com núcleo de cortiça, segundo eixo de menor inércia.

Com as curvas e as suas linhas de tendência traçadas, pode-se saber o declive (m) e a intercepção (b) com o eixo, através da equação reduzida da recta, $y=mx+b$. A partir do declive e da expressão $m=1/48D$, pode-se calcular a rigidez à flexão (D). De seguida, calcula-se o módulo à flexão (E_{eff}) pela expressão $E_{eff}=D/I$, onde I é momento da inércia.

Como a Norma EN13706-2:2002 diz que “o declive de L^2 vs s/PL deve corresponder com a intercepção de $1/L^2$ vs s/PL^3 , e a intercepção de L^2 vs s/PL deve corresponder ao declive de $1/L^2$ vs s/PL^3 ”, pode-se calcular a resistência ao corte (Q) pela expressão $b=1/4Q$. De seguida, calcula-se o módulo de corte (G_{eff}) pela expressão $G_{eff}=Q/A$, onde A é a área da secção transversal.

Fizeram-se estes cálculos, também por intermédio da mesma folha de cálculo. A Tabela 18 e a Tabela 19 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 18: Resultados de Rigidez à flexão, Módulo de Flexão e variação relativa ao perfil simples.

Eixo	Perfil	Rigidez à Flexão D [N.mm ²]	Módulo de Flexão E_{eff} [GPa]	Variação [%]
Maior Inércia	POa	$9,51 \times 10^9$	65,87	Ref.
	PPa	$10,63 \times 10^9$	73,61	+11,8%
	PCa	$10,91 \times 10^9$	75,53	+14,7%
Menor Inércia	POb	$1,78 \times 10^9$	47,87	Ref.
	PPb	$1,98 \times 10^9$	53,27	+11,2%
	PCb	$2,32 \times 10^9$	62,61	+30,3%

Tabela 19: Resultados de Rigidez ao corte, Módulo ao e variação relativa ao perfil simples.

Eixo	Perfil	Rigidez ao Corte Q [N]	Módulo ao Corte G_{eff} [GPa]	Variação [%]
Maior Inércia	POa	$658,7 \times 10^3$	2,76	Ref.
	PPa	$687,7 \times 10^3$	2,71	+4,4%
	PCa	$413,8 \times 10^3$	1,73	-37.2%
Menor Inércia	POb	$768,9 \times 10^3$	3,22	Ref.
	PPb	$483,7 \times 10^3$	2,03	-37.1%
	PCb	$251,1 \times 10^3$	1,05	-48.1%

3.6.3. Caracterização do isolamento térmico dos perfis híbridos

Como referido anteriormente no capítulo 2.4.4., para a caracterização do isolamento térmico utilizou-se a casa de alto isolamento térmico PHYWE, com a ajuda do regulador térmico PHYWE e um conjunto de termopares para se registar as variações de temperatura no interior e exterior da casa.

Foram preparados quatro diferentes tipos de provetes:

- Provete sem núcleo – provete fabricado com duas peles separadas por um espaço vazio, de modo a simular o perfil sem núcleo;
- Provete com núcleo de Poliuretano;
- Provete com núcleo de cortiça;
- Provete de vidro duplo de 6 mm.

Todos os provetes foram fabricados com a geometria de placas quadradas de 250 x 250 mm², para poderem ser montadas na casa. Foram realizados três ensaios e em cada um deles testaram-se três provetes. Os provetes testados por ensaio foram os seguintes:

- 1º Ensaio – Sem núcleo, núcleo de poliuretano e núcleo de cortiça;
- 2º Ensaio – Sem núcleo, núcleo de poliuretano e núcleo de cortiça;
- 3º Ensaio – Sem núcleo, Vidro duplo de 6 mm e núcleo de cortiça.

Em cada ensaio foram utilizados 24 termopares, numerados de 1 a 24 e devidamente distribuídos pelo interior e pelo exterior de cada provete. Para além destes 24 termopares, foram utilizados mais 2, pertencentes ao equipamento Hand-Held Measuring Instrument 2xNiCr-Ni da PHYWE, para controlo da temperatura dentro e fora da casa.

Na Tabela 20 é apresentado o *layout* de distribuição dos termopares pelos provetes, sabendo que cada face foi dividida em 9 áreas e em 4 delas foram instalados os termopares, tal como apresenta a Figura 96 e Figura 97.

Tabela 20: *Layout* de distribuição dos termopares pelos provetes.

Provete de Controle 1º, 2º e 3º Ensaio																				
Exterior da casa <table border="1"> <tr><td>1</td><td></td><td>2</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td>3</td></tr> </table>	1		2				4		3	Interior da casa <table border="1"> <tr><td>5</td><td></td><td>6</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td>7</td></tr> </table>	5		6				8		7	Correspondência Exterior – Interior 1 – 5 2 – 6 4 – 8 3 – 7
1		2																		
4		3																		
5		6																		
8		7																		
Provete de Poliuretano 1º e 2º Ensaio / Provete de Vidro 3º Ensaio																				
Exterior da casa <table border="1"> <tr><td>9</td><td></td><td>10</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>11</td></tr> </table>	9		10				12		11	Interior da casa <table border="1"> <tr><td>13</td><td></td><td>14</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>16</td><td></td><td>15</td></tr> </table>	13		14				16		15	Correspondência Exterior – Interior 9 – 13 10 – 14 12 – 16 11 – 15
9		10																		
12		11																		
13		14																		
16		15																		
Provete de Cortiça 1º, 2º e 3º Ensaio																				
Exterior da casa <table border="1"> <tr><td>17</td><td></td><td>18</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td><td>19</td></tr> </table>	17		18				20		19	Interior da casa <table border="1"> <tr><td>13</td><td></td><td>14</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>24</td><td></td><td>23</td></tr> </table>	13		14				24		23	Correspondência Exterior – Interior 17 – 21 18 – 22 20 – 24 19 – 23
17		18																		
20		19																		
13		14																		
24		23																		

A Figura 96 e a Figura 97 ilustram os termopares devidamente instalados na casa para ensaio.



Figura 96: Distribuição dos termopares 1



Figura 97: Distribuição dos termopares 2

Após se realizarem os ensaios, verificou-se que alguns termopares, por razões desconhecidas, não registaram os valores reais. Por este motivo, todos os valores que se desviaram da realidade, não foram considerados para efeitos de cálculo.

Após a montagem dos provetes e dos termopares, o ensaio consiste em subir-se a temperatura no interior da casa e, com a ajuda dos termopares, registarem-se as temperaturas de todos os

termopares, de modo a podermos confrontar a temperatura de cada termopar do interior com o seu par do exterior (consultar as correspondências na Tabela 20). Por exemplo, ao verificar-se a temperatura do termopar número 5 no interior da casa, deve-se confrontá-lo com o seu par número 1 que regista as temperaturas no mesmo alinhamento pelo lado exterior. Assim, podemos medir a quantidade de calor transferida pela parede do provete.

A Figura 98 apresenta o gráfico com as curvas das variações de temperatura dos termopares números 5 e 1 do segundo ensaio, correspondentes ao provete sem núcleo.

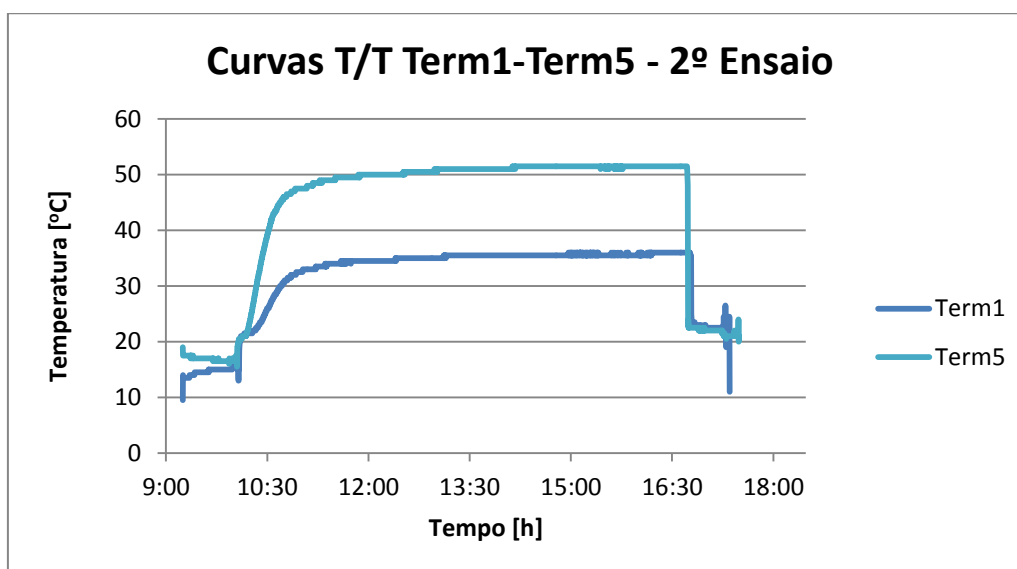


Figura 98: Temperatura nos termopares Nº 5 e 1 do 2º ensaio.

Pela Figura 98, com as curvas Temperatura/Tempo dos termopares 1 e 5, podemos verificar que com o aumento da temperatura no interior (Term5) a temperatura exterior (Term1) também subiu proporcionalmente. O fenómeno responsável pelo aumento da temperatura exterior é a condutividade térmica (k) que o material possui e que lhe permite transferir calor (q) por condução do seu interior para o exterior.

Conforme o capítulo 2.4.4., podemos calcular estes dois factores através das seguintes equações:

$$q = \frac{k}{e} A (T_{pi} - T_{pe}) \quad (7)$$

e

$$q = hA(T_p - T) \quad (8)$$

Como é visível no gráfico da Figura 98, os termopares registaram uma quantidade enorme de valores de temperatura durante o período de ensaio (cerca de 3000 registos por termopar em cada ensaio). Para facilitar o processamento destes valores e elaboração dos gráficos, utilizaram-se folhas de cálculo Microsoft Excel. Deste modo, os valores foram calculados individualmente para cada instante (t) e de seguida foram procurados os valores de k máximo e mínimo dentro do período útil do ensaio, ou seja, após o aquecimento da casa e o fim de ensaio. Assim, em vez de se encontrar um valor para k , encontrou-se um intervalo de valores k máximo e k mínimo, onde k estará inserido.

Como para cada provete foram utilizados 8 termopares, 4 internos mais 4 externos, e em termos de cálculos só se considera uma temperatura interior e outra exterior, optou-se por se fazer a média dos 4 valores internos e dos 4 valores externos. Em casos em que um termopar tenha falhado o registo correcto de valores, optou-se por se considerarem duas vezes os valores do termopar instalado ao mesmo nível (altura). Por exemplo, ao fazer-se a média dos valores internos do provete sem núcleo temos:

$$\bar{t} = \frac{t_5 + t_6 + t_7 + t_8}{4} \quad (20)$$

Se o termopar 7 não tiver resultados aceitáveis, considera-se $t_7=t_8$, sendo a média dada por:

$$\bar{t} = \frac{t_5 + t_6 + t_8 + t_8}{4} \quad (21)$$

Explicado o método de processamento de dados, passa-se agora a apresentar os gráficos de temperaturas e os resultados obtidos.

1º Ensaio

A Figura 99 apresenta o gráfico das curvas Temperatura/Tempo para o provete sem núcleo obtido no primeiro ensaio. Devido à incoerência em termos de valores fornecidos pelos Termopares 2, 3, 5 e 7, os mesmos não foram considerados para efeitos de estudo, utilizando-se apenas os Termopares 1, 4, 6 e 8.

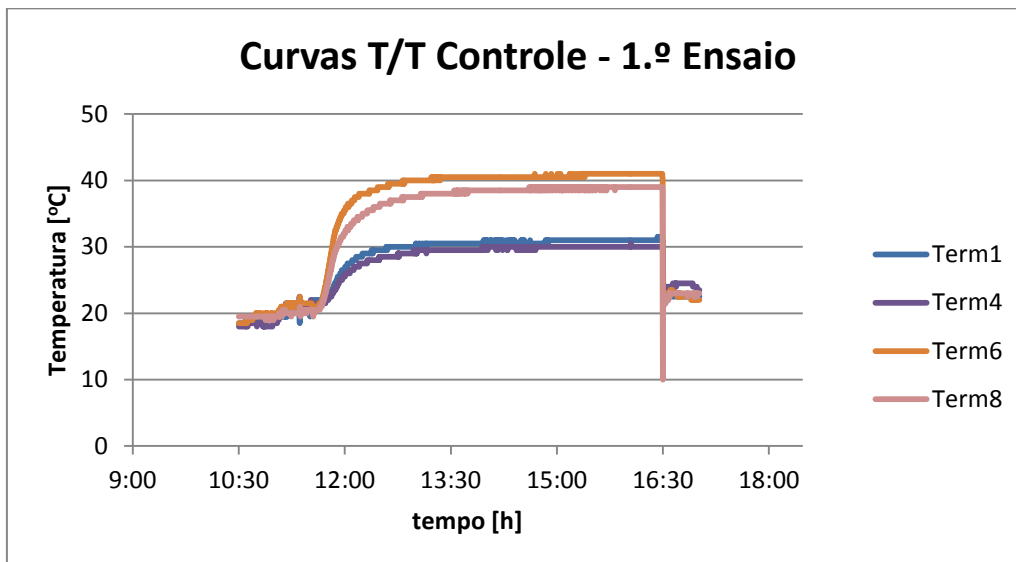


Figura 99: Curva T/t para o provete sem núcleo - 1º Ensaio.

A Figura 100, apresenta o gráfico das curvas Temperatura/Tempo para o provete com núcleo de poliuretano obtido no primeiro ensaio. Devido a incoerência de valores dos Termopares 9, 11, 12, 13, 15 e 16, os mesmos não foram considerados para efeitos de estudo, utilizando-se apenas os Termopares 10 e 14.

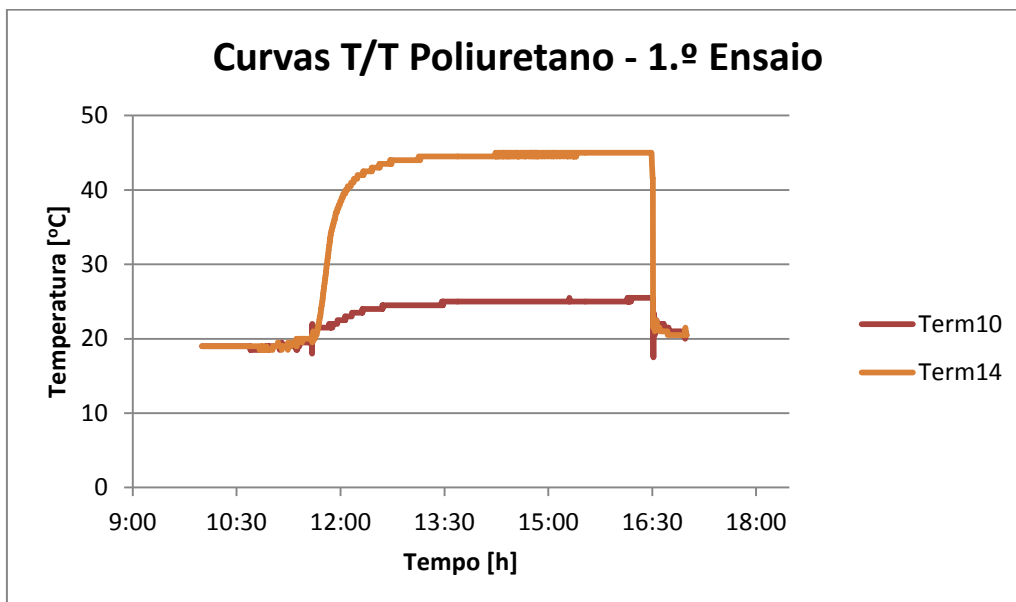


Figura 100: Curva T/t para o provete com núcleo de poliuretano - 1º Ensaio.

A Figura 101, apresenta o gráfico das curvas Temperatura/tempo para o provete com núcleo de cortiça obtido no primeiro ensaio. Devido a incoerência de valores dos Termopares 18, 19, 21 e 22, os mesmos não forma considerados para efeitos de estudo, utilizando-se apenas os Termopares 17, 20, 23 e 24.

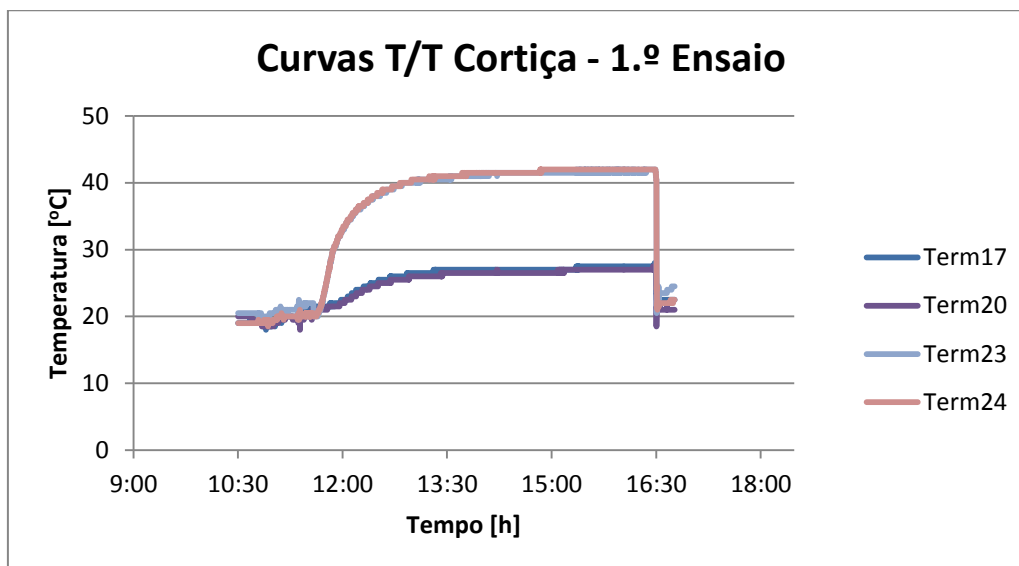


Figura 101: Curva T/t para o provete com núcleo de cortiça - 1ºEnsaio.

2ºEnsaio

A Figura 102 apresenta o gráfico das curvas Temperatura/Tempo para o provete sem núcleo obtido no segundo ensaio. Devido a incoerência de valores dos Termopares 2, 3, 6 e 7, os mesmos não forma considerados para efeitos de estudo, utilizando-se apenas os Termopares 1, 4, 5 e 8.

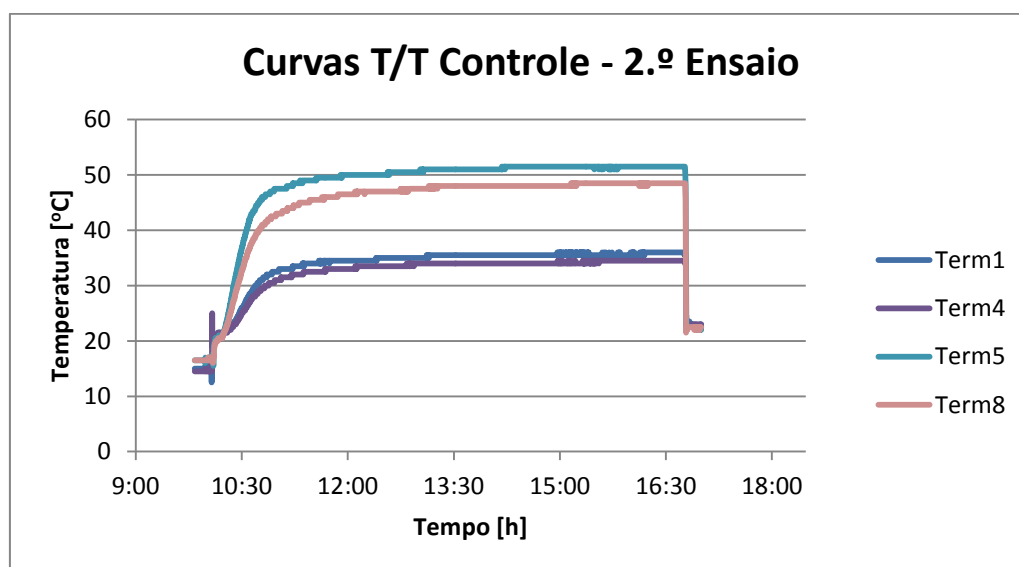


Figura 102: Curva T/t para o provete sem núcleo - 2ºEnsaio.

A Figura 103, apresenta o gráfico das curvas Temperatura/Tempo para o provete com núcleo de poliuretano obtido no segundo ensaio. Neste ensaio, todos os termopares tiveram valores coerentes, deste modo, todos foram considerados para efeitos de estudo.

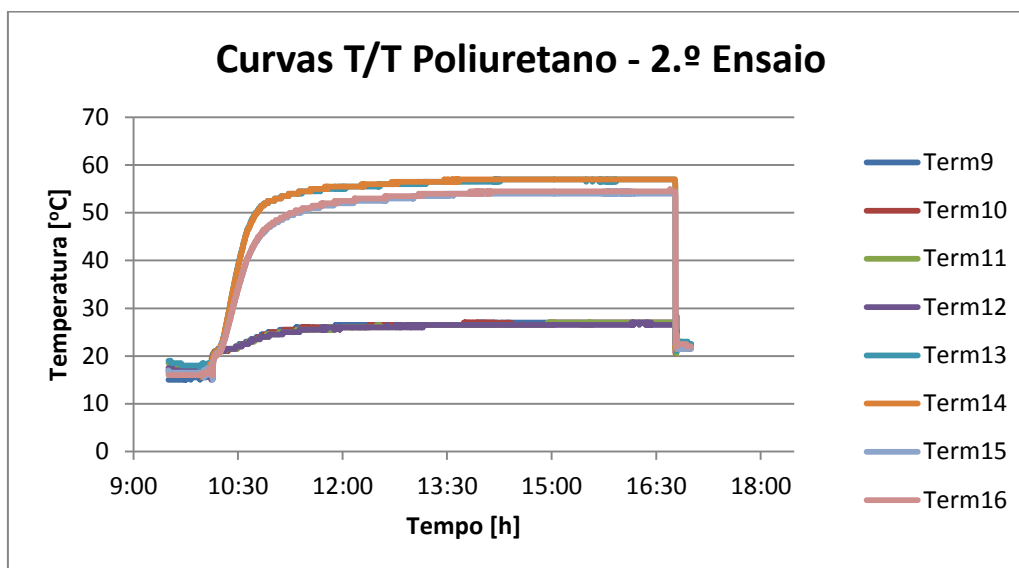


Figura 103: Curva T/t para o provete com núcleo de poliuretano - 2º Ensaio.

A Figura 104 apresenta o gráfico das curvas Temperatura/Tempo para o provete com núcleo de cortiça obtido no segundo ensaio, no qual todos os termopares tiveram valores coerentes. Deste modo, todos foram considerados para efeitos de estudo.

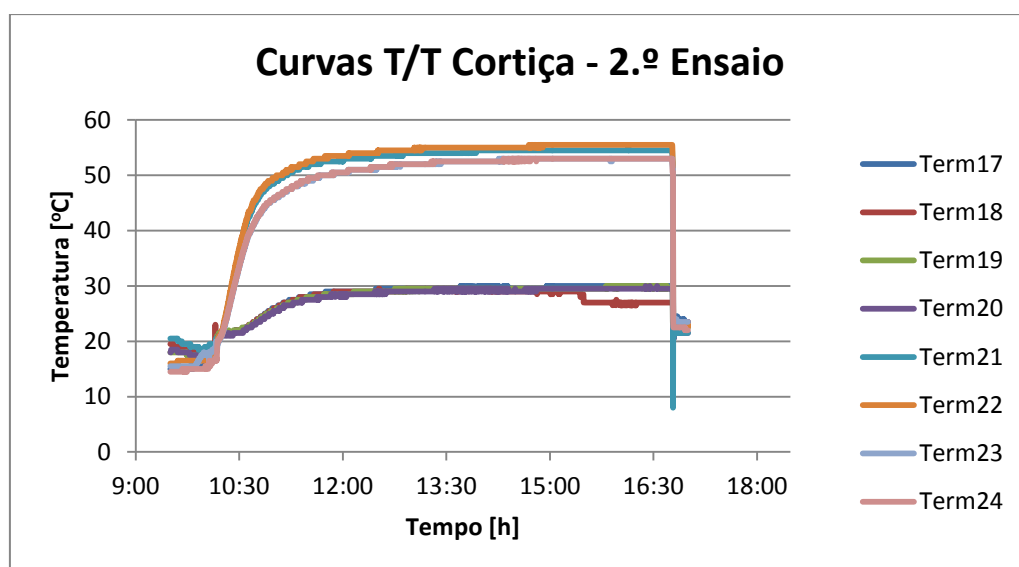


Figura 104: Curva T/t para o provete com núcleo de cortiça - 2º Ensaio.

3º Ensaio

Devido a incoerência de valores obtidos para o provete sem núcleo no terceiro ensaio, estes não foram considerados para efeitos de cálculo.

A Figura 105, apresenta o gráfico das curvas Temperatura/Tempo para o provete de vidro duplo de 6 mm obtido no terceiro ensaio. Neste ensaio, todos os termopares tiveram valores coerentes, deste modo, todos foram considerados para efeitos de estudo.

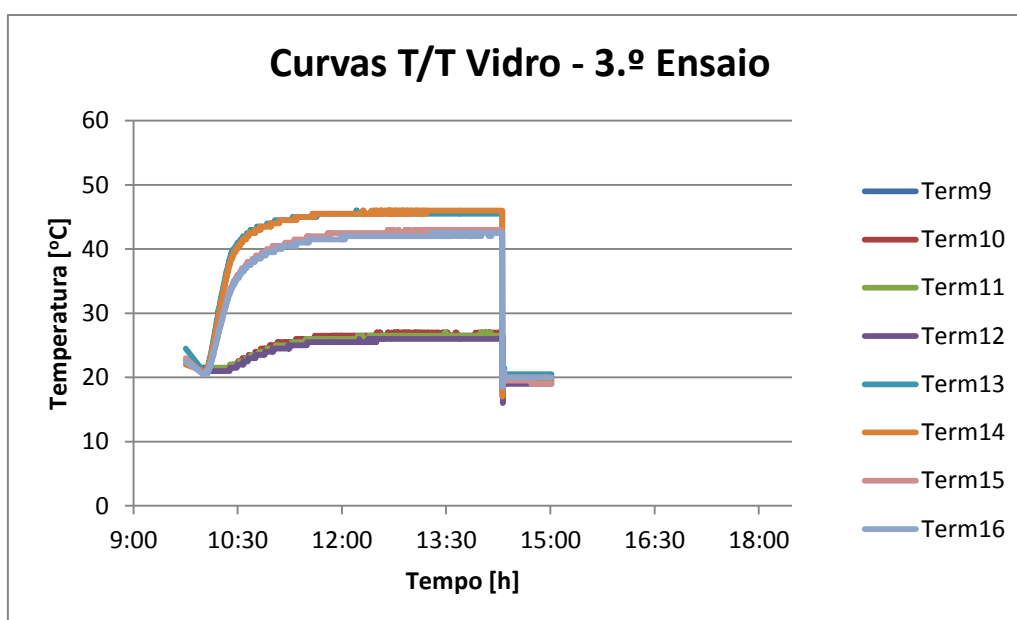


Figura 105: Curva T/t para o provete com núcleo de vidro duplo de 6mm - 3º Ensaio.

A Figura 106, apresenta o gráfico das curvas Temperatura/Tempo para o provete com núcleo de cortiça obtido no terceiro ensaio. Neste ensaio, todos os termopares tiveram valores coerentes, deste modo, todos foram considerados para efeitos de estudo.

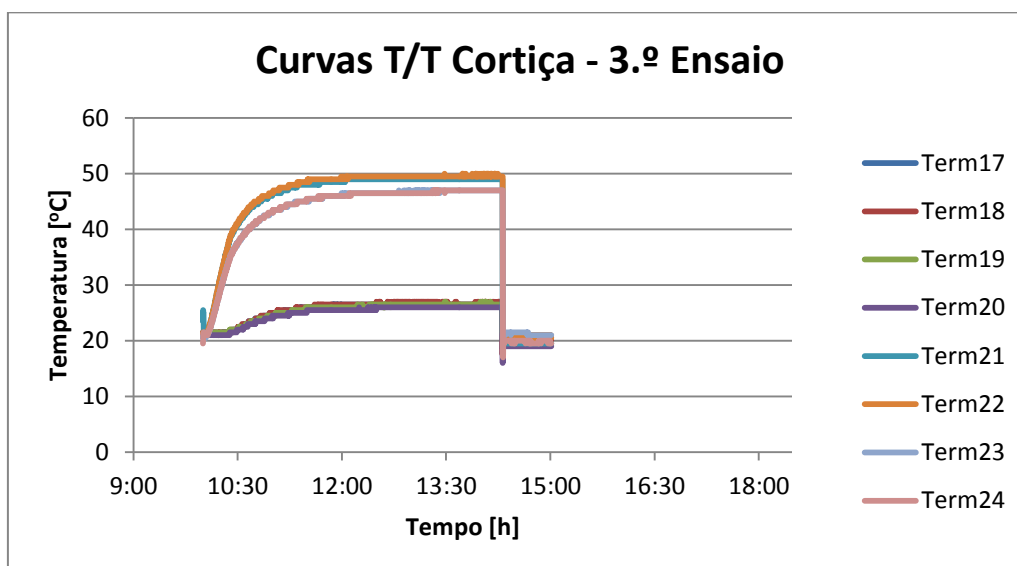


Figura 106: Curva T/t para o provete com núcleo de cortiça - 3º Ensaio.

Através de uma análise visual aos gráficos, pela diferença de temperaturas registada no interior e exterior da casa, consegue-se avaliar a capacidade de isolamento térmico de uns provetes relativamente aos outros. Quanto maior a diferença de temperatura entre o interior e o exterior, menor será o coeficiente de condutividade térmico k e por sua vez, maior a capacidade de isolamento térmico do material de estudo. Assim, rapidamente se pode concluir que os núcleos de poliuretano e de cortiça, contribuem para um aumento significativo do isolamento térmico, quando comparados ao perfil sem núcleo.

Para uma análise mais rigorosa, a Tabela 21 apresenta os intervalos de valores obtidos para k e os seus valores médios, através dos cálculos efectuados através da folha de cálculo.

Tabela 21: Resultados da Condutividade Térmica k por ensaio.

Provete	1º Ensaio			2º Ensaio			3º Ensaio		
	$k \left[\frac{W}{m^2K} \right]$			$k_{m\acute{a}x} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$			$k_{m\acute{a}x} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$		
	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.
Sem Núcleo	4,6	6,0	5,3	5,7	6,6	6,2	7,3	29,5	18
Poliuretano	2,3	2,8	2,6	2,9	3,1	3,0			
Cortiça	2,6	3,5	3,1	2,8	3,8	3,8	2,6	3,1	3,0
Vidro Duplo							3	3,1	3,1

Pela Tabela 21, verifica-se que os valores a vermelho, do terceiro ensaio para o perfil sem núcleo, sofreram grandes desvios relativamente ao primeiro e segundo ensaio. Por este motivo, esses valores não foram considerados.

De forma a simplificar todos os resultados obtidos na Tabela 21, segue agora a Tabela 22 com as médias de todos os valores obtidos entre os ensaios e a variação obtida em relação ao provete sem núcleo.

Tabela 22: Valores médios das Condutividade Térmica k e variação relativa ao provete sem núcleo.

	Coeficiente de Condutividade Térmica k $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$			Variação obtida em relação ao provete sem núcleo [%]
	Mín.	Máx.	Méd.	%
Provete Sem Núcleo	5,2	6,3	5,7	-
Poliuretano	2,6	3,0	2,8	- 50,9 %
Cortiça	2,7	3,5	3,1	- 45,6 %
Vidro Duplo	3,0	3,1	3,1	- 45,6 %

Deste ensaio pode-se concluir que a aplicação dos núcleos no interior dos perfis contribuem para um incremento muito significativo do isolamento térmico, com redução de perdas de calor de cerca de 50,9% para os núcleos de poliuretano e de 45,6% para os de cortiça.

Pode-se também concluir que em relação aos vidros duplos, muito utilizados para isolamentos acústicos e térmicos em janelas de habitações, o perfil de núcleo de cortiça pode-se equiparar e o perfil de núcleo de poliuretano pode fazer uma redução de perdas de cerca de 9,7%.

3.6.4. Caracterização do isolamento acústico dos perfis híbridos

Para a caracterização do isolamento acústico dos perfis híbridos, utilizou-se o método do Tubo de Ondas Estacionárias.

O equipamento utilizado para o ensaio de isolamento acústico do material em estudo foi:

- Tubo de Ondas Estacionárias Brüel & Kjaer TYPE 4002;
- Sonómetro Brüel & Kjaer TYPE 2231;

- Fonte Brüel & Kjaer TYPE 1024.

A Figura 107 ilustra o equipamento utilizado.



Figura 107: Tubo de Ondas Estacionárias FEUP (Rodrigues, 2008)

Para se realizar o ensaio foi necessário determinar o tipo de tubo a utilizar para cada tipo de frequência. O Tubo de Ondas Estacionárias utilizado disponibiliza dois tipos de tubos de secção circular, com as seguintes dimensões:

1. Comprimento $l=1000$ mm; diâmetro $d=100$ mm;
2. Comprimento $l=310$ mm; diâmetro $d=30$ mm.


O tubo maior será utilizado nas baixas frequências e o tubo menor nas altas frequências. Como tal, é necessário definir em que gama de frequências se faz a transição do tubo.


A Tabela 23 e Tabela 24 apresentam a gama de frequências para as quais é possível a utilização de cada tubo.

Tabela 23: Gama de frequências que se podem medir com o Tubo de Ondas Estacionárias grande.

Frequência [Hz]	c_0 [m/s]	λ_0 [m]	Tubo grande $l = 1000$ mm; $d = 100$ mm			
			$l \geq 3\lambda_0/4$	$l \geq 250/f + 3d$	$d \leq 0.58 \times \lambda_0$	$f \times d \leq 200$
100	343.3	3.43	2.57	2.80	1.99	10.00
125	343.3	2.75	2.06	2.30	1.59	12.50
160	343.3	2.15	1.61	1.86	1.24	16.00
200	343.3	1.72	1.29	1.55	1.00	20.00
250	343.3	1.37	1.03	1.30	0.80	25.00
315	343.3	1.09	0.82	1.09	0.63	31.50

400	343.3	0.86	0.64	0.93	0.50	40.00
500	343.3	0.69	0.51	0.80	0.40	50.00
630	343.3	0.54	0.41	0.70	0.32	63.00
800	343.3	0.43	0.32	0.61	0.25	80.00
1000	343.3	0.34	0.26	0.55	0.20	100.00
1250	343.3	0.27	0.21	0.50	0.16	125.00
1600	343.3	0.21	0.16	0.46	0.12	160.00
2000	343.3	0.17	0.13	0.43	0.10	200.00
2500	343.3	0.14	0.10	0.40	0.08	250.00
3150	343.3	0.11	0.08	0.38	0.06	315.00
4000	343.3	0.09	0.06	0.36	0.05	400.00
5000	343.3	0.07	0.05	0.35	0.04	500.00

 Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas no tubo grande

 Valores para os quais correspondem frequências que não podem ser estudadas em nenhum dos tubos





 Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas em ambos os tubos

Tabela 24: Gama de frequências que se podem medir com o Tubo de Ondas Estacionárias pequeno.

Frequência [Hz]	c_0 [m/s]	λ_0 [m]	Tubo pequeno $l = 0.30$ m; $d = 0.03$			
			$l \geq 3\lambda_0/4$	$l \geq 250/f + 3d$	$d \leq 0.58 \times \lambda_0$	$f \times d \leq 200$
100	343.3	3.43	2.57	2.59	1.99	3.00
125	343.3	2.75	2.06	2.09	1.59	3.75
160	343.3	2.15	1.61	1.65	1.24	4.80
200	343.3	1.72	1.29	1.34	1.00	6.00
250	343.3	1.37	1.03	1.09	0.80	7.50
315	343.3	1.09	0.82	0.88	0.63	9.45
400	343.3	0.86	0.64	0.72	0.50	12.00
500	343.3	0.69	0.51	0.59	0.40	15.00
630	343.3	0.54	0.41	0.49	0.32	18.90
800	343.3	0.43	0.32	0.40	0.25	24.00
1000	343.3	0.34	0.26	0.34	0.20	30.00
1250	343.3	0.27	0.21	0.29	0.16	37.50
1600	343.3	0.21	0.16	0.25	0.12	48.00
2000	343.3	0.17	0.13	0.22	0.10	60.00
2500	343.3	0.14	0.10	0.19	0.08	75.00
3150	343.3	0.11	0.08	0.17	0.06	94.50
4000	343.3	0.09	0.06	0.15	0.05	120.00
5000	343.3	0.07	0.05	0.14	0.04	150.00

 Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas no tubo grande

 Valores para os quais correspondem frequências que não podem ser estudadas em nenhum dos tubos

 Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas em ambos os tubos

Pela análise da tabela, conclui-se que os tubos podem ser utilizados nos seguintes intervalos:

- Tubo grande: $400 \leq f \leq 1600$ (Hz)
- Tubo pequeno: $1250 \leq f \leq 5000$ (Hz)

Apesar das frequências inferiores a 400 Hz não poderem ser medidas por nenhum dos tubos, optou-se por se efectuarem as suas medições com o tubo grande. Assim, para esta gama de frequências, os valores não possuirão a precisão necessária.

Com base nestes valores, optou-se por se utilizarem os 1250 Hz como ponto de transição entre tubos, ficando cada tubo utilizado na seguinte gama de valores:

- Tubo grande: $100 \leq f \leq 1000$ (Hz);
- Tubo pequeno: $1250 \leq f \leq 5000$ (Hz),.

Os diâmetros utilizados foram:

- $\varnothing 100$ mm para frequências entre 100 e 1000 Hz;
- $\varnothing 30$ mm para frequências entre 1250 e 5000 Hz.

Para isso tiveram que ser produzidos diferentes provetes, conforme o tipo de perfil e diâmetros dos tubos utilizados. A Figura 108 apresenta esses provetes.

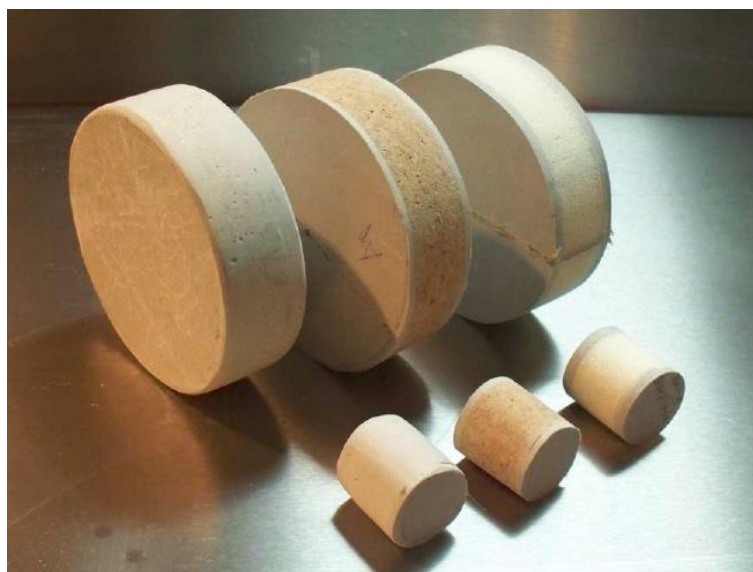


Figura 108: Provetes produzidos para ensaios com tubo de ondas estacionárias. Proвете simples à esquerda, com núcleo de cortiça ao centro e com núcleo de poliuretano à direita.

Calculou-se o valor de K_0'' , para cálculo da atenuação do tubo e para determinar dois valores mínimos de pressão sonora consecutivos nas baixas frequências. O tubo que se utilizou não tem comprimento suficiente para ser utilizado nos comprimentos de ondas elevados que ocorrem nas baixas frequências, assim para todas as frequências conseguiram-se valores aceitáveis.

A equação utilizada foi:

$$K_0'' = \frac{4}{\lambda_0} \operatorname{arcsinh} \frac{\Delta n}{2} \quad (23)$$

A Tabela 25 apresenta os valores determinados.

Tabela 25: Atenuação do tubo K_0'' , considerada para o cálculo dos valores de absorção sonora.

Frequência (Hz)	c0	ko''
100	343,3	5,65E-05
125	343,3	6,32E-05
160	343,3	7,15E-05
200	343,3	7,99E-05
250	343,3	8,94E-05
315	343,3	1,00E-04
400	343,3	1,13E-04
500	343,3	1,26E-04
630	343,3	1,42E-04
800	343,3	1,60E-04
1000	343,3	1,79E-04
1250	343,3	2,00E-04
1600	343,3	2,26E-04
2000	343,3	2,53E-04
3150	343,3	3,17E-04
4000	343,3	3,57E-04
5000	343,3	4,00E-04

Para montagem da amostra, esta deve ficar com um espaço de ar atrás, de modo a que este espaço funcione como dissipador de pressão. Este espaço determina-se pela equação:

$$t = \frac{\lambda_0}{4} \quad (24)$$

Onde:

- t – espaço [m]
- λ_0 – comprimento de onda

A Tabela 26 apresenta o espaço t .

Tabela 26: Espaço dissipador de pressão t .

Frequência [Hz]	λ_0	t [m]
100	3,43	0,858
125	2,75	0,687
160	2,15	0,536
200	1,72	0,429
250	1,37	0,343
315	1,09	0,272
400	0,86	0,215
500	0,69	0,172
630	0,54	0,136
800	0,43	0,107
1000	0,34	0,086
1250	0,27	0,069
1600	0,21	0,054
2000	0,17	0,043
3150	0,11	0,027
4000	0,09	0,021
5000	0,07	0,017

Devido à falta de condições para se respeitarem as medidas de caixa-de-ar, decidiu-se suprimi-la. Deste modo, existe um erro associado, principalmente em baixas frequências. No entanto, como é âmbito deste trabalho conhecer as alterações provocadas ao perfil normal, através da inserção dos núcleos e como o erro é o mesmo para todos os tipos de provetes, estes resultados serão de todo muito importantes para compreendermos as alterações nos coeficientes de absorção sonora.

Devido à grande quantidade de cálculos efectuados para se determinar os coeficientes de absorção sonora, os mesmos foram efectuados por intermédio de folhas de cálculo.

Com base nesses cálculos, os gráficos seguintes apresentam os valores e curvas obtidas para os coeficientes de absorção sonora:

- α_n – incidência normal;
- α_{st} - campo difuso segundo a norma ISO 10534-1.

A Figura 109 apresenta os gráficos e os resultados de absorção sonora para o perfil simples (sem núcleo).

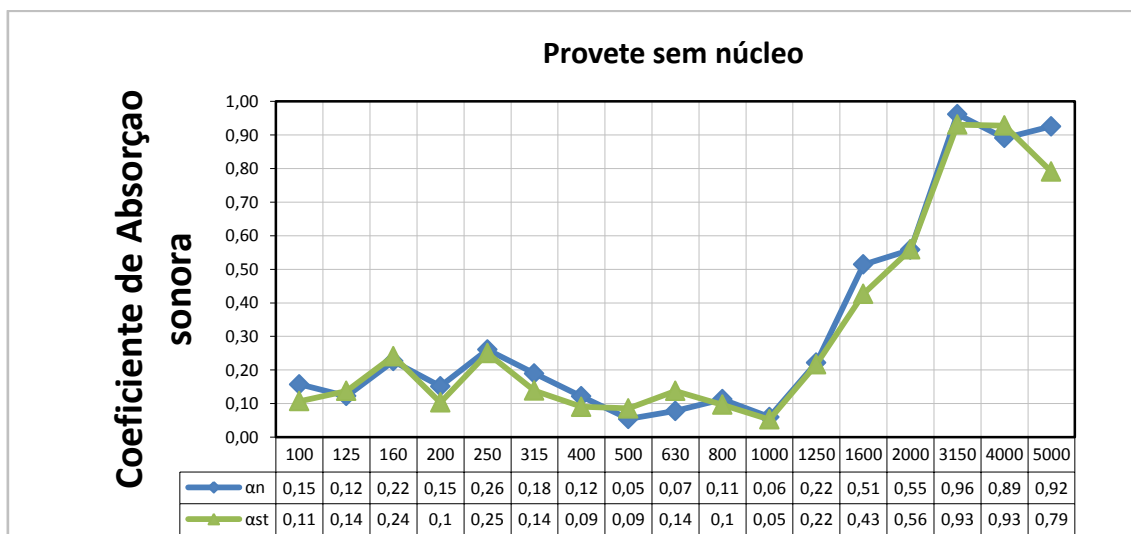


Figura 109: Gráficos da absorção sonora dos provetes simples.

A Figura 110 apresenta os gráficos e os resultados de absorção sonora para o perfil com núcleo de Cortiça.

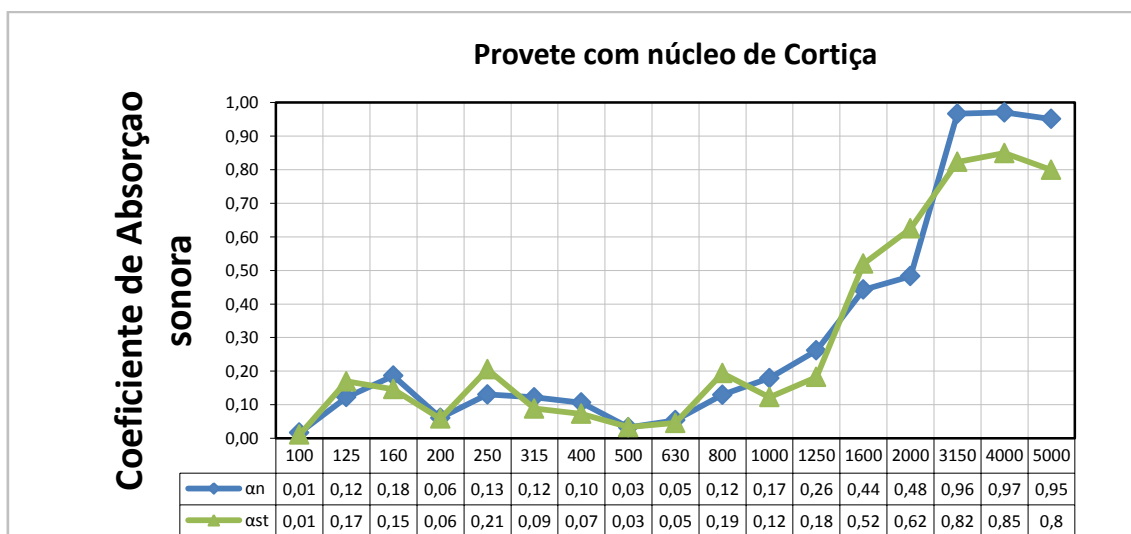


Figura 110: Gráficos da absorção sonora dos provetes com núcleo de Cortiça.

A Figura 111 apresenta os gráficos e os resultados de absorção sonora para o perfil com núcleo de Poliuretano de alta densidade.

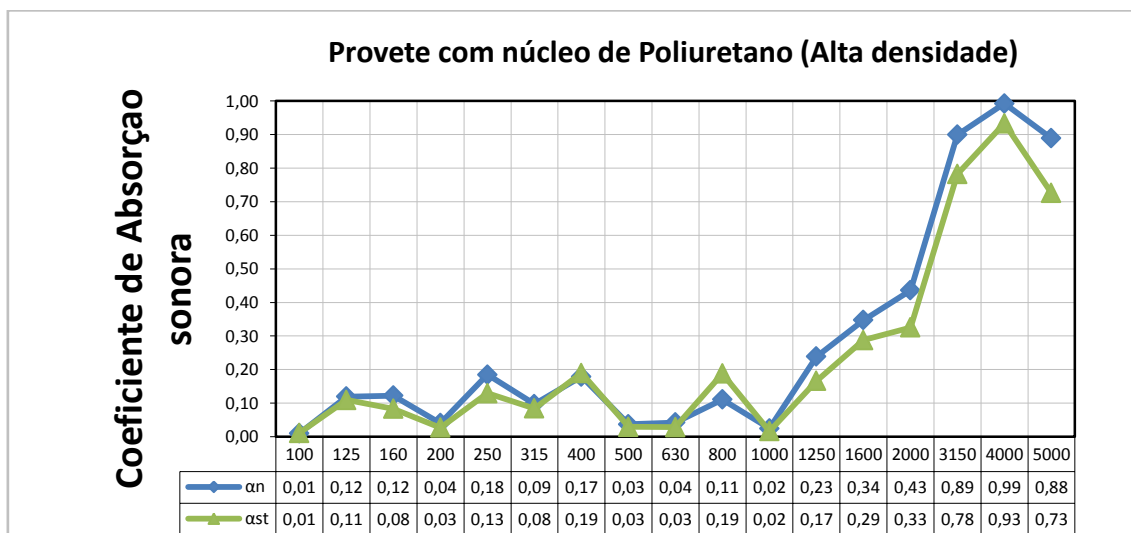


Figura 111: Gráficos da absorção sonora dos provetes com núcleos de Poliuretano de alta densidade.

A Figura 112 apresenta os gráficos e os resultados de absorção sonora para o perfil com núcleo de poliuretano de baixa densidade. Para este tipo de perfil, apenas foram realizados ensaios nas gamas de frequência de 1000 a 1250 Hz, isto é, só com o tubo grande.

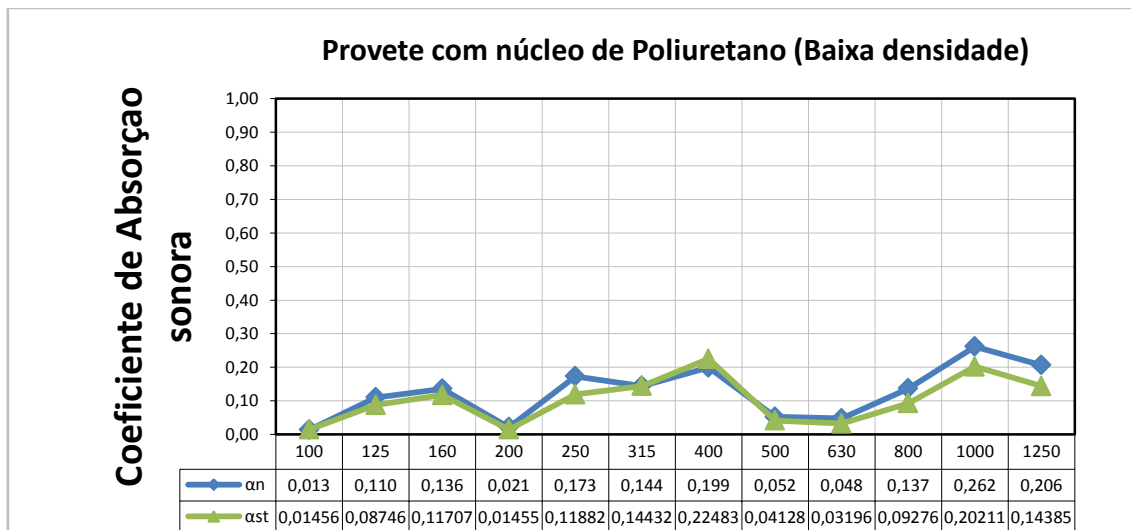


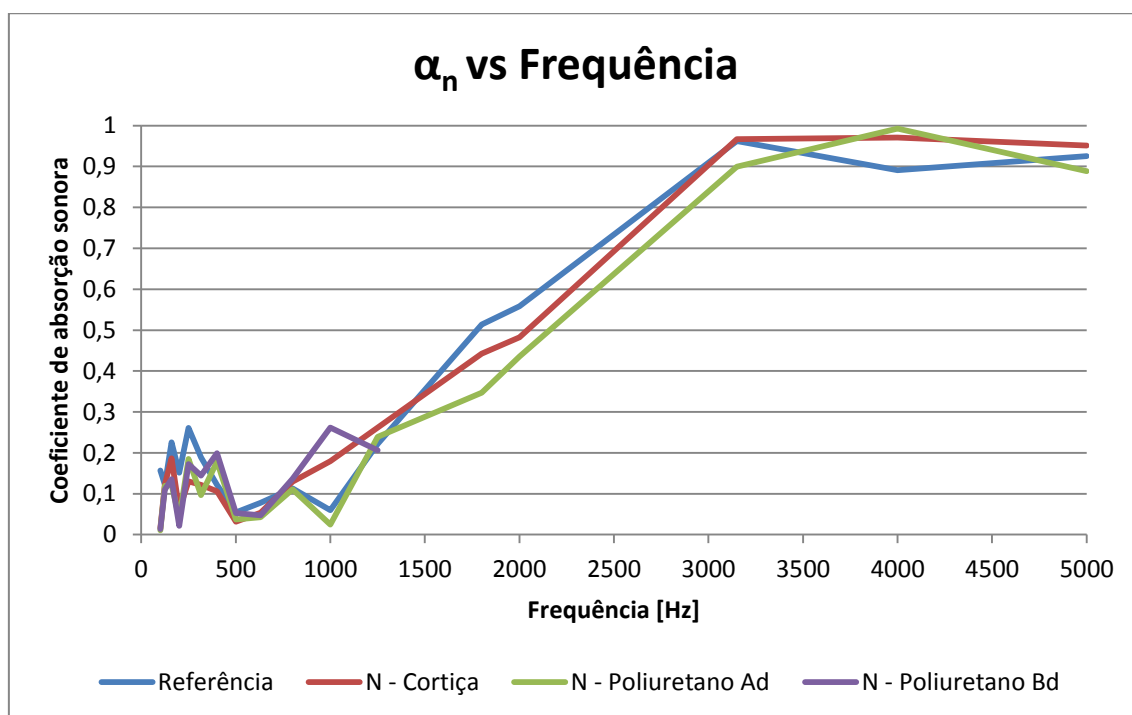
Figura 112: Gráficos da absorção sonora dos provetes com núcleos de Poliuretano de baixa densidade.

Para melhor a interpretação das diferenças obtidas entre os diversos tipos de perfis, a Tabela 27 apresenta os coeficientes de absorção sonora (incidência normal) para os diferentes tipos de perfis.

Tabela 27: α_n dos diferentes tipos de perfis.

Frequência [Hz]	α_n por tipo de núcleo			
	Sem núcleo	Cortiça	Poliuretano alta densidade	Poliuretano baixa densidade
100	0,157	0,016	0,010	0,013
125	0,122	0,122	0,120	0,110
160	0,226	0,186	0,122	0,136
200	0,152	0,061	0,040	0,021
250	0,261	0,131	0,185	0,173
315	0,189	0,122	0,097	0,144
400	0,121	0,106	0,179	0,199
500	0,054	0,032	0,037	0,052
630	0,078	0,053	0,042	0,048
800	0,113	0,129	0,111	0,137
1000	0,060	0,179	0,025	0,262
1250	0,222	0,262	0,239	0,206
1800	0,514	0,443	0,347	
2000	0,558	0,483	0,436	
3150	0,962	0,967	0,899	
4000	0,891	0,971	0,993	
5000	0,926	0,951	0,889	

A Figura 113 ilustra graficamente os coeficientes de absorção sonora (incidência normal) apresentados na Tabela 27.

Figura 113: Gráfico de α_n vs frequência dos diferentes tipos de perfis.

3.8. Análise crítica dos resultados no global

Neste capítulo pretende-se fazer uma análise crítica dos resultados no global. Por isso, começa-se por analisar individualmente cada ensaio.

Começando pelo ensaio de adesão, apesar de não se poder comparar com o perfil simples, pode-se dizer que os resultados foram bastante satisfatórios para os núcleos de Poliuretano e excelentes para os de Cortiça. Os núcleos de Poliuretano apresentaram valores de resistência de adesão na ordem de 56,82 kPa, com desvios de 6,31 KPa, por cada metro de perfil. A Cortiça apresentou valores 4,4 vezes superiores, atingindo 250,25 kPa com 11,07 kPa de desvio.

Quanto à resistência à flexão, comparando os perfis híbridos com o perfil simples, segundo o eixo de maior inércia, os núcleos de Cortiça aumentaram a resistência em 29%. Já os valores apresentados pelos perfis com núcleo de Poliuretano contribuíram para um aumento de 39%. Segundo o eixo de menor inércia, os núcleos de Cortiça incrementaram a resistência em 47% e os de Poliuretano em 78%. Com base nestes resultados, verifica-se que as pré-formas aumentam muito a resistência dos perfis à flexão, principalmente o perfil com núcleo de Poliuretano, que se destaca do de cortiça em 7,6% segundo o eixo de maior inércia e de 21,2% segundo o eixo de menor inércia, quando comparados os seus valores.

No que diz respeito à rigidez à flexão, segundo o eixo de maior inércia, o núcleo de Cortiça aumentou a rigidez em 14,7%, enquanto o núcleo de Poliuretano só aumentou 11,8%. Segundo o eixo de menor inércia a Cortiça aumentou a rigidez em 30,3%, enquanto o Poliuretano aumentou 11,2%. Estes valores voltam a revelar que de facto, os perfis híbridos, relativamente às propriedades mecânicas, são mais resistentes que os perfis simples. Em termos de propriedades mecânicas, os perfis híbridos só perdem vantagem com os simples, relativamente à rigidez ao corte, exceptuando-se o núcleo de Poliuretano, segundo o eixo de maior inércia, que subiu 4,4%. As restantes posições baixaram na ordem dos 37%, à excepção do núcleo de Cortiça segundo o eixo de menor inércia que chegou a baixar 48,1%. Estes valores fazem sentido, uma vez que, sendo o perfil simples oco, a parede de 2,5 mm tem mais liberdade para se deformar até se colapsar por corte.

De um modo geral, pode-se afirmar que os perfis híbridos são muito mais resistentes quando utilizados para fins estruturais. O perfil com núcleo de Poliuretano mostra-se mais flexível do que o de Cortiça, enquanto por outro lado, o de Cortiça apresenta maior rigidez à flexão. Por

outras palavras, o perfil de Cortiça é mais duro, portanto, mais susceptível de colapsar a cargas. Já o Poliuretano resiste mais às solicitações de flexão, mas também atinge flechas maiores.

Quanto às propriedades físicas estudadas, os resultados também são muito favoráveis aos perfis híbridos. Começando por avaliar o isolamento térmico, verificou-se que o Poliuretano reduziu a condutividade térmica em cerca de 50% e a Cortiça próximo dos 46%, o que significa que para efeitos de isolamento térmico, estes perfis conseguem reduzir muito desperdício de energia relativamente aos provetes simples.

Para efeitos de isolamento acústico, os resultados não são tão fáceis de se comparar, devido às variações de condutividade por comprimento de onda. No entanto, com uma análise aos valores da Tabela 27 e atenção ao gráfico da Figura 113, facilmente se verifica que, em geral, ambos os perfis contribuem para um melhor isolamento acústico, destacando-se o perfil com núcleo de Poliuretano.

Creio que é também importante referir, que apesar dos núcleos de Poliuretano oferecerem, na maioria, melhores propriedades que a cortiça, devemos ter em conta que este é um produto natural, extraído da natureza, ou seja, “amigo do ambiente”.

3.9. Propostas de melhoria e indicação de possíveis aplicações

Este trabalho pode ser entendido como o início da caracterização das propriedades mais relevantes para se conhecer minimamente os perfis em estudo, tendo em conta as suas possíveis utilizações. No entanto, existem outras propriedades que serão de toda uma mais-valia conhecê-las e podem ser apresentadas como uma proposta de melhoria futura. As propostas são as seguintes:

- A resistência do material à fluência, já que este material pode ser utilizado em aplicações estruturais;
- A resistência à corrosão;
- A resistência aos raios solares, mais propriamente aos raios UV, uma vez que a matriz do perfil é polimérica;
- A resistência à fadiga.
- Análise de custos, para se poder confrontar com outros materiais concorrentes e se possível, demonstrar que este produto é a escolha acertada.

- Seria também de muito interesse a investigação de novos materiais para utilizar como núcleo, como por exemplo as pré-formas poliméricas com estrutura em favo de abelha.

Os perfis pultrudidos híbridos podem ter uma vasta gama de aplicações em diversas áreas, como por exemplo:

- Na área eléctrica, em caminhos de cabos, esteiras, escadas isolantes, armaduras, transformadores, esteiras não magnéticas, postes de iluminação, postes de transporte de energia;
- Nos transportes, em perfis para camiões, reboques, prumos para placas de sinalização, estruturas de contentores, estruturas de paletes, etc.;
- Na construção civil em estruturas de edifícios, guarda-corpos, passadiços, armaduras de camaras de frio, escadas, barreiras de protecção, pontes para peões, vedações, estruturas de janelas e portas;
- No lazer, em bancos de jardim, mesas, estantes, etc.

4. Conclusões

Para o bem do avanço tecnológico, cada vez mais é necessário o desenvolvimento de novos produtos, com melhores propriedades e capazes de competir em mercados cheios de soluções concorrentes. Os polímeros pultrudidos híbridos em estudo neste trabalho, são isso mesmo: uma inovação que acrescentou diversas melhorias relativamente às propriedades do perfil simples já existente.

Este trabalho focou-se no estudo e caracterização desses perfis, de modo a quantificar-se as propriedades que se pretendiam melhorar.

No estudo, começou-se por seleccionar as propriedades mais pertinentes a serem avaliadas e a forma de as quantificar. Decidiu-se assim estudar as seguintes características mecânicas e físicas: resistência de adesão entre o perfil e o núcleo, resistência à flexão, rigidez à flexão, rigidez ao corte, módulo de flexão, módulo de corte, coeficiente de condutividade térmica e acústica.

O início do trabalho apoiou-se numa pesquisa bibliográfica orientada às características dos materiais e aos métodos de ensaio associados: ensaios destrutivos e não destrutivos. De seguida, realizaram-se os ensaios, registaram-se os valores e, por intermédio de folhas de cálculo de Microsoft Excel, calcularam-se as grandezas das propriedades pretendidas.

Uma vez calculadas todas as propriedades referidas anteriormente, estas foram comparadas entre si, para se compreenderem as vantagens que os perfis híbridos possam ter em relação ao perfil simples e também qual dos dois é mais vantajoso.

Com base nos valores apresentados neste trabalho, conclui-se que os perfis híbridos incrementam em grande escala as propriedades mecânicas e físicas, quando comparadas ao perfil simples. Para além disso, também se pode concluir que apesar do perfil com núcleo de Poliuretano apresentar algumas propriedades superiores às do núcleo de Cortiça, o contrário também acontece. Os perfis com núcleo de Cortiça apresentaram características superiores para a resistência de adesão e para a rigidez à flexão. Já os perfis com núcleo de Poliuretano foram superiores na resistência à flexão, no isolamento térmico e isolamento acústico. Por fim, pode-se concluir que os perfis simples, apenas superam os perfis híbridos na resistência ao corte.

Para finalizar, é sensato referir-se que este trabalho cumpriu com os seus objectivos, com a apresentação das características pretendidas dos materiais em estudo.

5. Bibliografia e Outras Fontes de Informação

Bibliografia

Amorim Cork Composites, 2013. Corecork Technical Data.

BING - Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations, 2006. Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam / Properties - Manufacture. Brussels.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G., 2010. Materials Science and Engineering as Introduction. John Wiley & Sons, Inc. United States of America ISBN: 0-471-13459-7.

Castro, M. J., 2012. Análise de Emissão de Ultra-sons. Porto.

Cheremisinoff, N.P., 1998. Advanced Polymer Processing Operations. Noyes Publications. Westwood, New Jersey. ISBN: 0-8155-1426-3.

Dansk Standards Association, 2002. DS/EN 13706-2 Reinforced plastics composites Specifications for pultruded profiles – Part 2: Methods of test and general requirements. Charlottenlund.

Davim, J. P., & Magalhães, A. G., 2010. Ensaios Mecânicos e Tecnológicos., 3ª Edição. Publindústria. Porto. ISBN: 978-972-8953-54-6.

Gomes, J. F., 2010. Mecânica dos Sólidos e Resistência dos Materiais. Edições INEGI. Porto. ISBN: 972-8826-06-0.

Gonçalves, I., 2014. Ensaio de juntas soldadas: Resistência dos Materiais. ISQ. Porto.

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B., 2014. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 8ª edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-1-118-41293-0.

Moura, M. F., Morais, A. B., & Magalhães, A. G., 2005. Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, 2ª edição. Publindústria. Porto. ISBN 978-972-8953-00-3.

Peixoto, V. M., 2000. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica: Estudo do Comportamento Térmico de Espumas Flexíveis de Poliuretano Durante a Fase de Cura. FEUP. Porto.

PHYWE Systeme GmbH & Co. PHYWE Hand-held measuring instrument 2 x NiCr-Ni Owner Manual : 07140.00. Göttingen.

PHYWE Systeme GmbH & Co. PHYWE High insulation house Owner Manual: 04507.90-99. Göttingen.

PHYWE Systeme GmbH & Co. PHYWE Thermal regulation for high insulated house Owner Manual : 04506-93. Göttingen.

Rodrigues, P. S., 2008. *Interação Engenharia Civil / Acústica com Base na Validação Experimental de Desempenho*. FEUP. Porto.

Sanjay K. Mazumdar, P., 2002. *Materials, Product and Process Engineering*. CRC Press. Boca Raton; London; New York; Washington, D.C. ISBN

Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., & Reis, R. L., 2005. *Cork: properties, capabilities and applications*. Maney for the Institute and ASM International.

Soares, P., 2009. *Aços - Características, Tratamentos*, 6ª edição. ISBN 978-989-20-1797-6.

Sonnenschein, M. F., 2015. *Polyurethanes, Technology, Markets, and Trends*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

Szycher, M. P., 2012. *Szycher's Handbook of Polyurethanes*, 2ª edition. CRC Press. New York.

Outras Fontes de informação

http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6596-ensaio-de-dobramento-para-materiais-frgeis#.Ui2ecz8ixGw (consultado em 09-09-2013).

<http://www.mecastyle.com/materiau-composite-pultrusion> (consultado em 21-09-2015).

<http://www.phywe-systeme.com/> (consultado em 09-01-2014).

http://quimicaensinada.blogspot.pt/2011_12_01_archive.html (consultado em 11-05-2013).

<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Acustica/som.php> (consultado em 15-10-2013).

ANEXO I

***Gráficos Força vs. Deslocamento do ensaio de três pontos segundo
EN 103706-2 : 2002 Anexo G***

Para além dos ensaios em estudados no capítulo 3.6.2.2., foi realizado outro conjunto de ensaios semelhantes mas sem se registarem as medições obtidas pelo comparador. Da Figura 114 à Figura 125 apresentam-se as curvas Força vs. Deslocamento, com os valores registados pela máquina, para todos os ensaios.

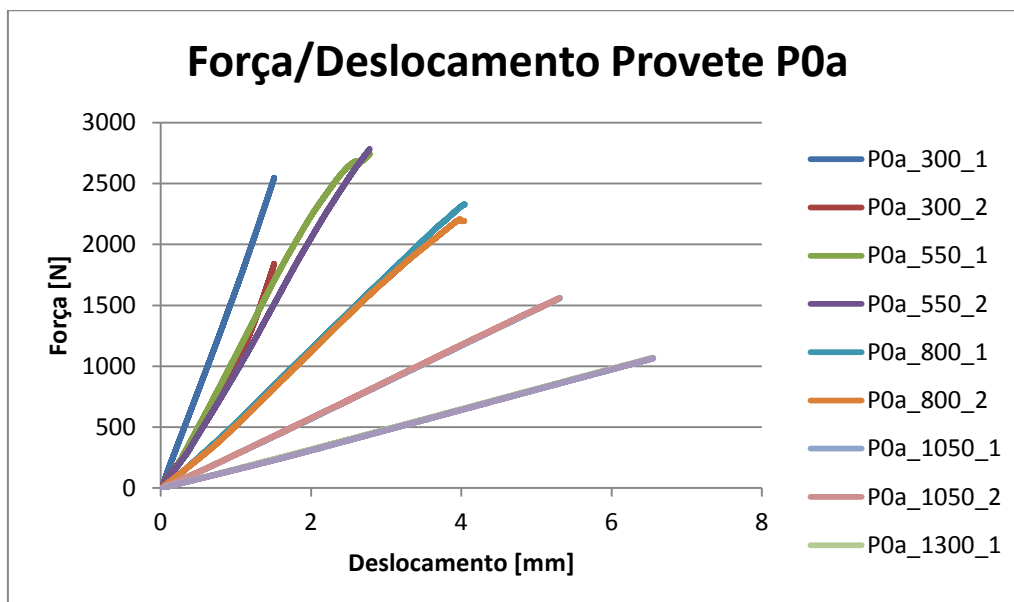


Figura 114: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador)

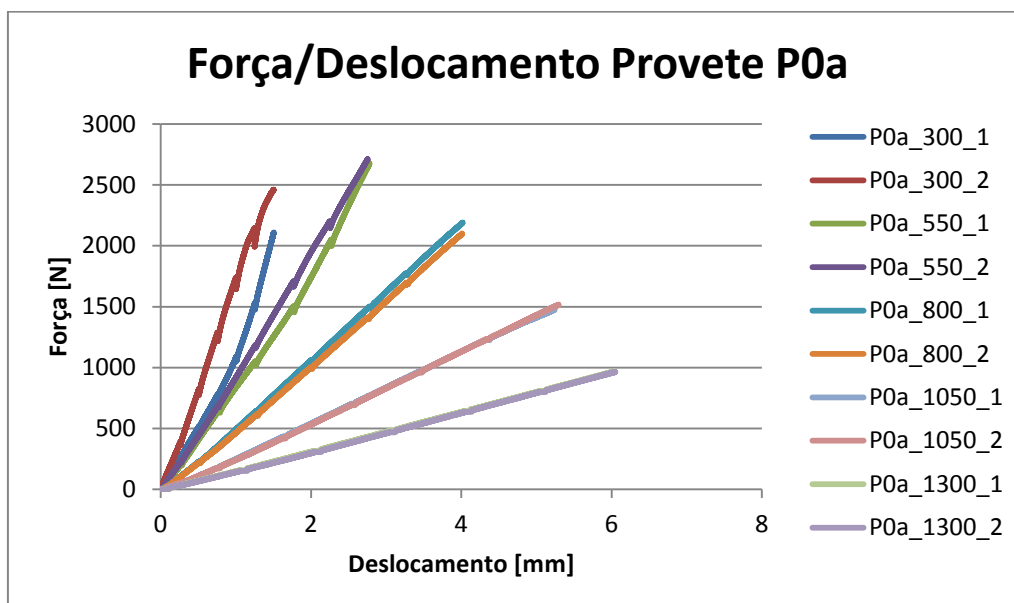


Figura 115: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia

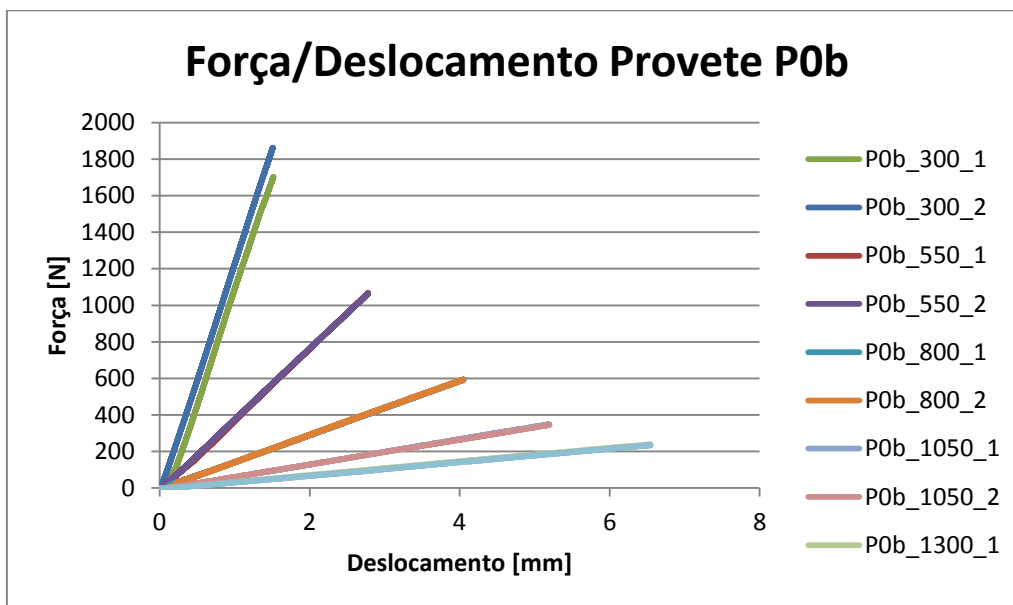


Figura 116: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador)

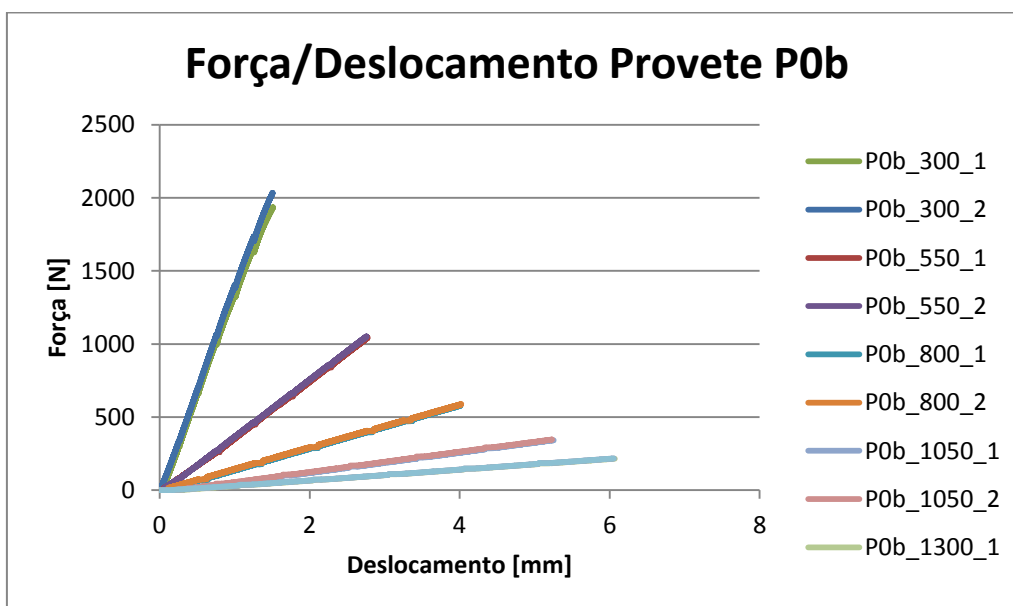


Figura 117: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil simples segundo eixo de maior Inércia

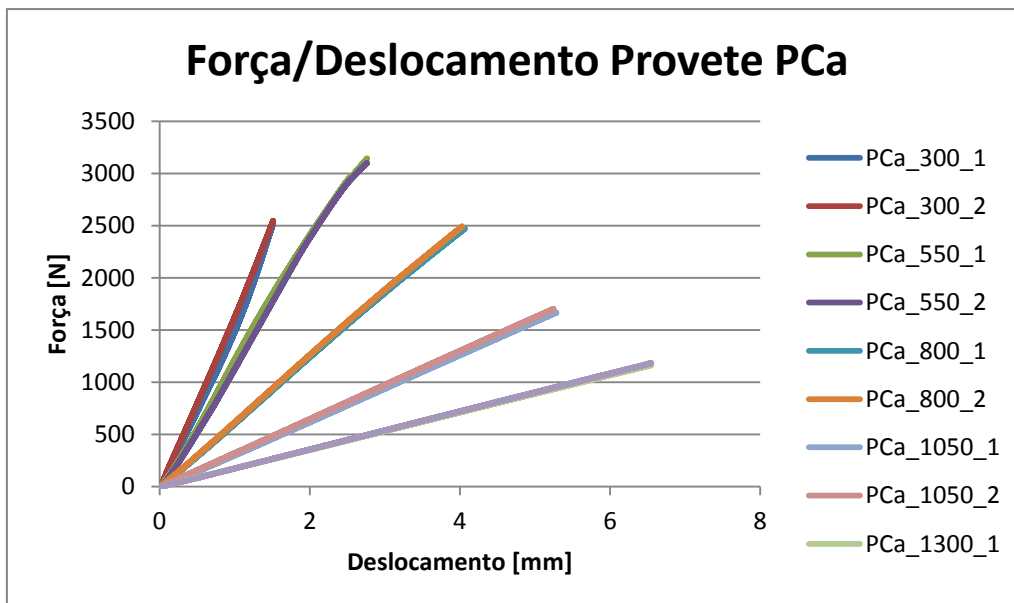


Figura 118: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador)

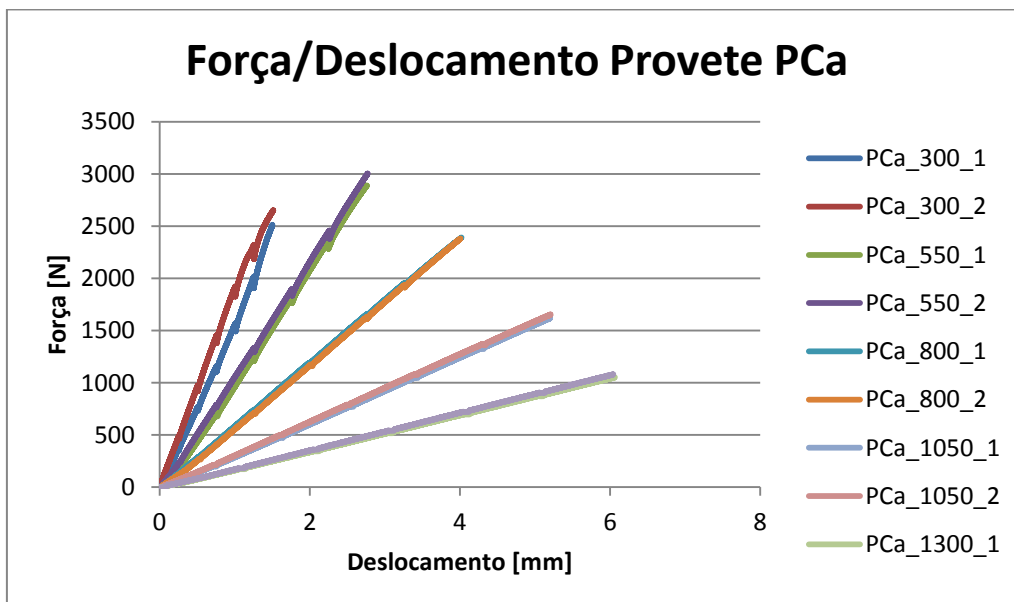


Figura 119: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de maior Inércia

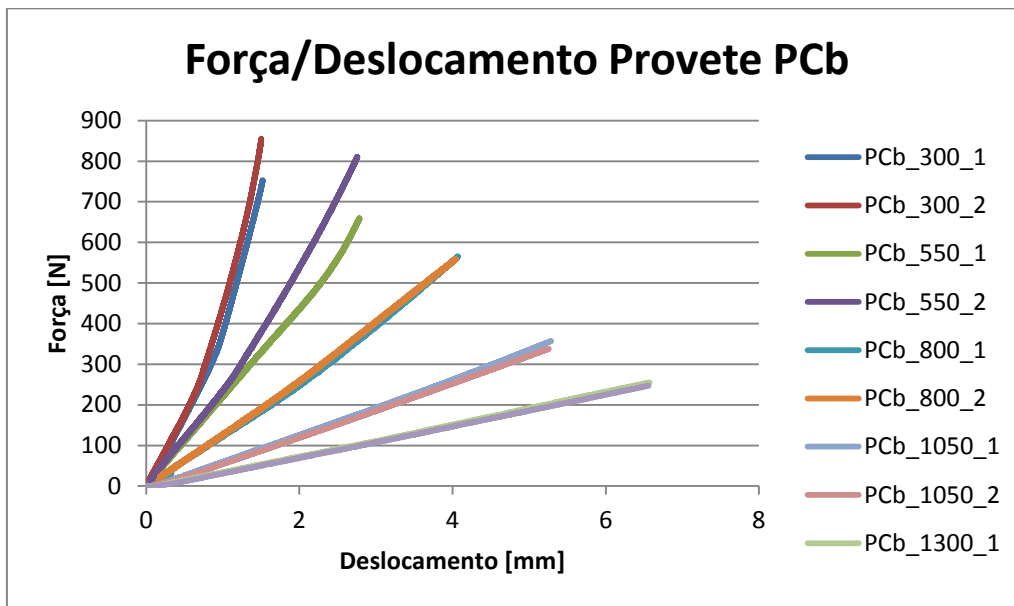


Figura 120: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de menor Inércia (Ensaio sem comparador)

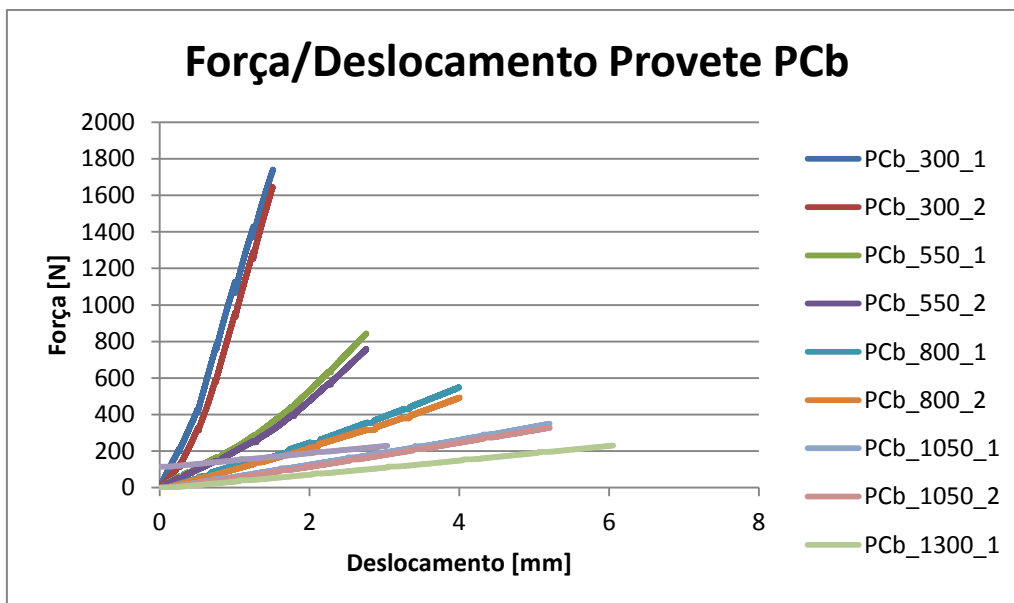


Figura 121: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de cortiça segundo eixo de menor Inércia

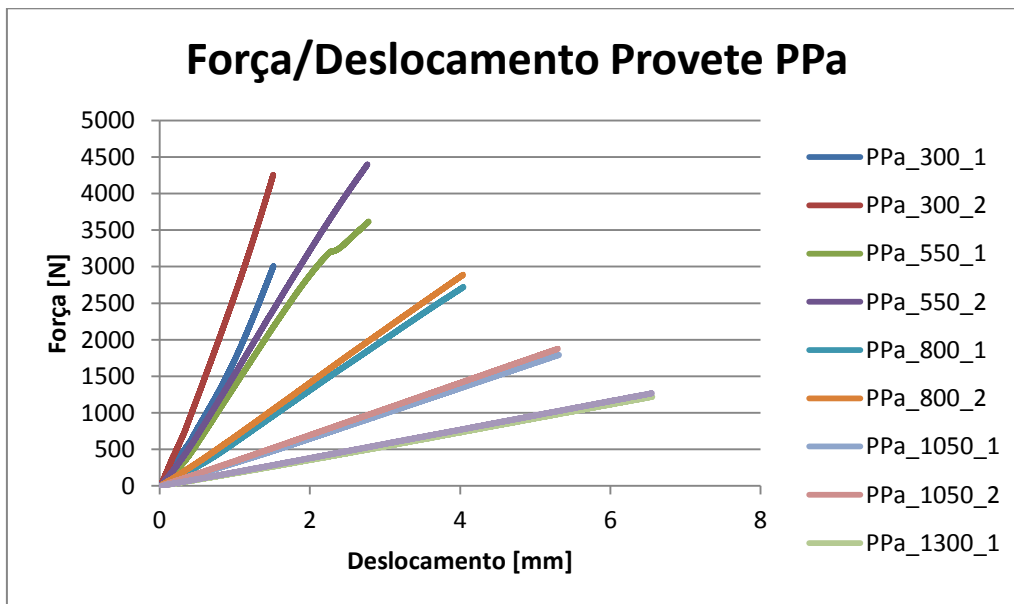


Figura 122: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de maior Inércia (Ensaio sem comparador)

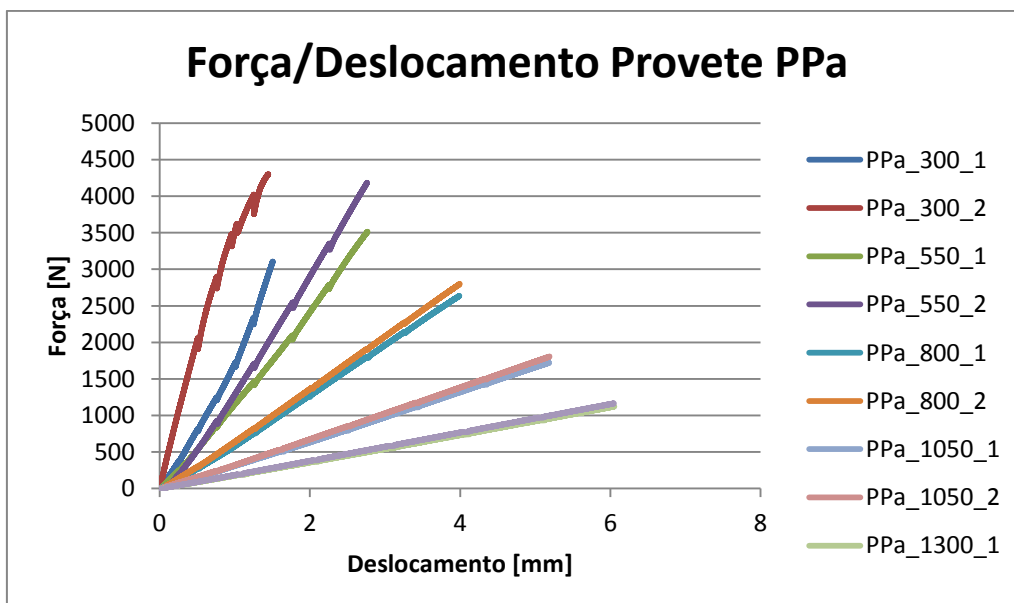


Figura 123: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de maior Inércia

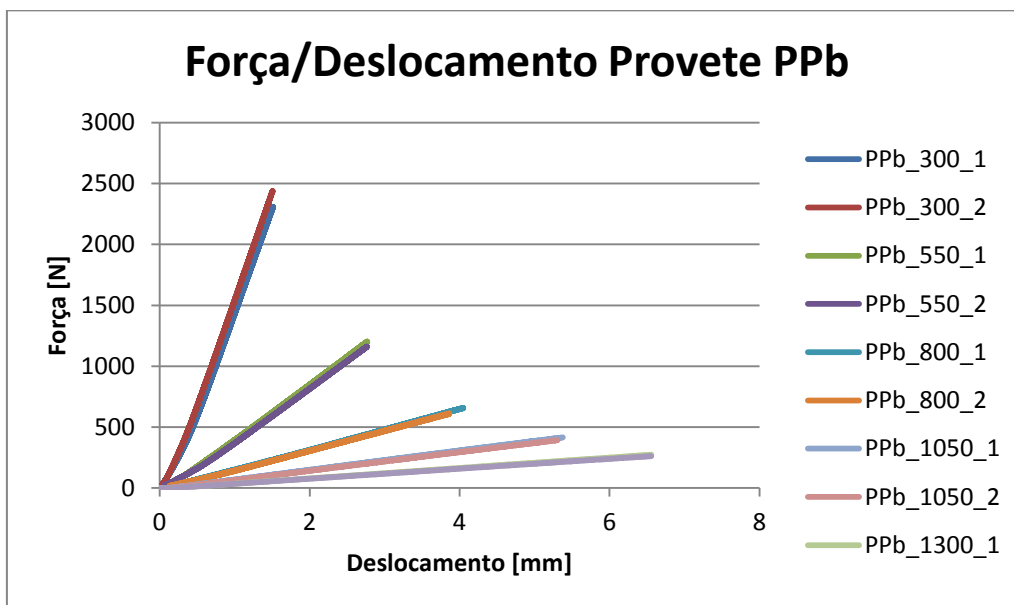


Figura 124: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de menor Inércia (Ensaio sem comparador)

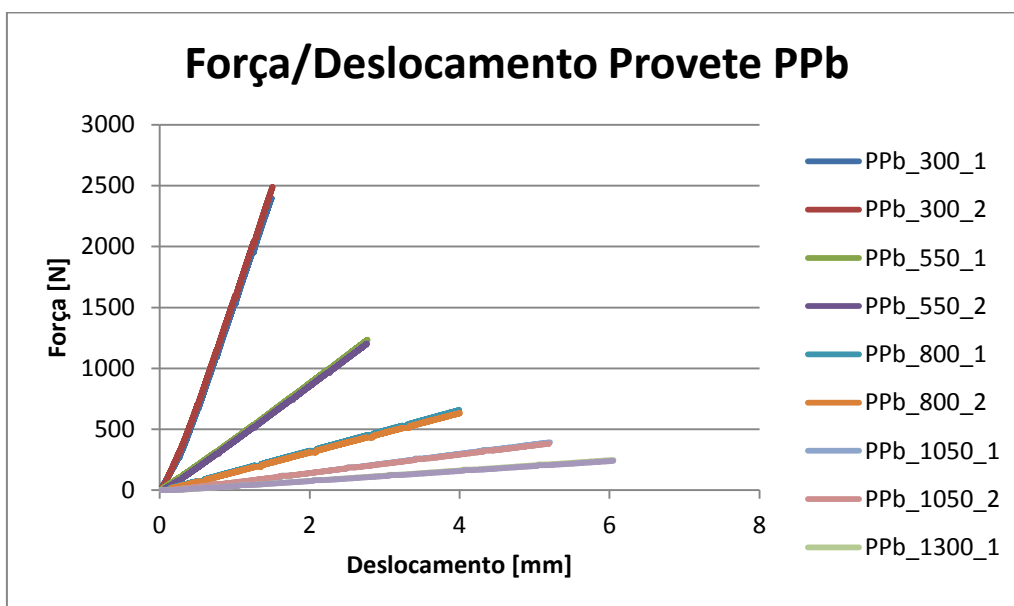


Figura 125: Curvas Força vs. Deslocamento do perfil com núcleo de espuma de poliuretano segundo eixo de menor Inércia