



Modelação numérica do comportamento à flexão de estruturas sandwich pelo Método de Elementos Finitos

PEDRO DANIEL DA SILVA MACEDO

novembro de 2020

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE ESTRUTURAS *SANDWICH* PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Pedro Daniel da Silva Macedo

1110366

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE ESTRUTURAS *SANDWICH* PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Pedro Daniel da Silva Macedo

1110366

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 Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Engenheiro Paulo Jorge Roque De Oliveira Nova.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Leonardo José Da Silva Ribeiro

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa

Professor Assistente Convidado, ISEP

Arguente

Doutor António Joaquim Mendes Ferreira

Professor Catedrático, FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, por todo o apoio durante o desenvolvimento da dissertação e motivação transmitida. Sem dúvida, foi de extrema importância para a realização desta dissertação.

Ao meu coorientador, Engenheiro Paulo Jorge Roque De Oliveira Novoa, pelo apoio com a parte experimental da dissertação.

Aos meus pais e ao meu primo Tiago por todo o apoio e incentivo ao longo do meu percurso académico.

PALAVRAS CHAVE

Estruturas *sandwich*; Adesivo estrutural; Análise de elementos finitos; Ensaio mecânico de estruturas *sandwich*; Ensaio de flexão; *Crushable foam*; Critério de Tsai-Wu; Modelos de dano coesivo.

RESUMO

A constante investigação e desenvolvimento de novos materiais tem possibilitado avanços significativos em diversas indústrias que de outro modo não seriam possíveis. Também nesse sentido surgiu a utilização de estruturas *sandwich*, que permitem obter a melhor combinação de propriedades de diferentes materiais tendo em vista a finalidade de cada estrutura. Estas estruturas carecem de estudo aprofundado para obter as suas propriedades combinadas, algo que a nível da previsão do comportamento mecânico pode ser efetuado com recurso ao método de elementos finitos.

Esta dissertação apresenta um estudo do comportamento de estruturas *sandwich* solicitadas à flexão em três e quatro pontos. Os resultados experimentais foram comparados com resultados numéricos obtidos pelo Método de Elementos Finitos com recurso ao *software* Abaqus®. Para o efeito foram estudadas três diferentes configurações de estruturas *sandwich*, nas quais se fez variar a espessura do núcleo e a configuração do laminado que compõe as peles. Os materiais utilizados foram espuma de poliuretano para o núcleo, pré-impregnados de fibra de carbono e matriz de resina epóxi para as peles e um adesivo bi-componente com base de poliuretano para fazer a ligação das peles ao núcleo. Os modelos numéricos foram baseados na utilização de um modelo *crushable foam* para a espuma, o critério de Tsai-Wu para as peles e modelos de dano coesivo para o adesivo.

Com este trabalho foi possível concluir que, para as combinações de materiais estudados e com os modelos utilizados, é possível obter resultados numéricos bastante semelhantes aos resultados experimentais, com vantagens ao nível rapidez para a obtenção desses resultados, especialmente com a modelação em 2D, dado não ser necessário fazer a produção dos provetes para os ensaios mecânicos.

KEYWORDS

Sandwich structures; Structural adhesive; Finite element analysis; Mechanical tests to sandwich structures; Flexure tests; Crushable foam; Tsai-Wu criterion; Cohesive zone models.

ABSTRACT

The constant research and development of new materials has enabled advances made in several industries that would not otherwise be possible. In this sense, the use of sandwich structures also emerges, which allows to obtain the best combination of different material properties, accounting for the end purpose of each structure. These structures require an in-depth study to obtain their combined properties, which can be done using the finite element method for the prediction of mechanical behaviour.

This thesis presents a study of the behaviour of sandwich structures loaded under three- and four-point bending. The experimental results were compared with the numerical results obtained by the Finite Element Method using the Abaqus® software. For this purpose, three different configurations of sandwich structures were studied, in which the core thickness and the configuration of the laminate that makes up the skins were varied. The materials used were polyurethane foam for the core, carbon fibre prepregs and epoxy resin matrix for the skins and a two-component polyurethane-based adhesive to make the skins bond to the core. The numerical models were based on the use of a crushable foam model for the foam, the Tsai-Wu criterion for the skins and cohesive zone models for the adhesive.

With this work it was possible to conclude that, for the specifications of studied materials and with the models used, it is possible to obtain quite similar numerical predictions to the experimental results, with advantages in terms of speed to obtain the results, especially with a 2D modelling approach, given that it is not necessary to produce specimens for mechanical testing.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

| | |
|--------|--|
| COH2D4 | Elementos coesivos bidimensionais com 4 nós |
| CPE4R | Elementos de estado plano de deformação, com integração reduzida e 4 nós |
| MDC | Modelos de dano coesivo |
| MEF | Método dos elementos finitos |
| PEI | Polieterimida |
| PMI | Polimetacrilimida |
| PUR | Poliuretano |
| PVC | Cloreto de polivinilo |
| RTM | <i>Resin transfer moulding</i> |
| SCRIMP | <i>Seemann Composite Resin Infusion Molding Process</i> |
| SRIM | <i>Structural Reaction Injection Moulding</i> |
| VARTM | <i>Vacuum assisted resin transfer molding</i> |

Lista de Símbolos

| | |
|------------|-------------------------------------|
| A | Secção do provete |
| b | Largura da estrutura sandwich |
| c | Espessura do núcleo |
| d | Espessura da estrutura sandwich |
| E | Módulo de elasticidade longitudinal |
| F_{\max} | Valor máximo de força |

| | |
|-----------|------------------------------------|
| G | Modulo de elasticidade transversal |
| G_{IC} | Tenacidade à tração |
| G_{IIC} | Tenacidade ao corte |
| L | Distância entre apoios |
| m | Declive curva P- δ |
| P | Carga |
| t | Espessura das peles |
| δ | Deslocamento |
| σ | Tensão máxima à compressão |
| τ | Tensão de corte |

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Peel ply Camada de sacrifício externa, desmoldante, utilizada para remover excesso de resina e texturizar a superfície do compósito promovendo a adesão.

Honeycomb Estrutura organizada na forma de um favo de mel.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Estrutura <i>sandwich</i> (elaboração própria)..... | 7 |
| Figura 2 – Comparação entre uma estrutura <i>sandwich</i> e uma viga em I [2]..... | 8 |
| Figura 3 - Tipos de núcleo (elaboração própria)..... | 8 |
| Figura 4 – Processo de moldação manual [7]..... | 9 |
| Figura 5 – Processo de moldação manual com saco de vácuo [4] | 9 |
| Figura 6 – Processo de moldação por projeção [7] | 10 |
| Figura 7 – Moldação de pré-impregnados sem autoclave [6]..... | 12 |
| Figura 8 – Moldação de pré-impregnados com autoclave [6]..... | 12 |
| Figura 9 – Processo de RTM [6] | 14 |
| Figura 10 – Processo VARTM [6] | 15 |
| Figura 11 – Laminagem contínua [4] | 16 |
| Figura 12 – Ligação adesiva de uma estrutura <i>sandwich</i> [8]..... | 17 |
| Figura 13 – Estruturas <i>sandwich</i> Airbus A380 [12]..... | 19 |
| Figura 14 – Exemplo de componente indústria aeronáutica (<i>flap</i>) [3]..... | 19 |
| Figura 15 – Exemplo de aplicações de estruturas <i>sandwich</i> numa carruagem de passageiros [14] | 20 |
| Figura 16 – Estruturas <i>sandwich</i> no projeto do autocarro KLFB [15]..... | 20 |
| Figura 17 – Compartimento de carga refrigerado construído com painéis <i>sandwich</i> [16] | 21 |
| Figura 18 – Produção de compartimento de carga refrigerado construído com painéis <i>sandwich</i> [16] ... | 21 |
| Figura 19 – Conceito de carroçaria com painéis <i>sandwich</i> [18] | 21 |
| Figura 20 – Koenigsegg Agera R [19] | 22 |
| Figura 21 – Turanor Planet Solar [20]..... | 22 |
| Figura 22 – Prancha de surf em estrutura <i>sandwich</i> [3]..... | 23 |
| Figura 23 – Componentes hélice de turbina eólica [21]..... | 23 |
| Figura 24 – Pannel <i>sandwich</i> para cobertura de pavilhões industriais [23] | 24 |
| Figura 25 – Exemplo de um ensaio de tração [26] | 25 |
| Figura 26 – Exemplo de ensaio de compressão de estrutura <i>sandwich</i> [28] | 26 |
| Figura 27 – Exemplo de ensaio de flexão em 3 pontos [30]..... | 27 |
| Figura 28 – Provete para ensaio de tração: (a) ASTM D 3039 a 0° (b) ASTM D 3039 a 90° [33] | 28 |
| Figura 29 – Dimensões do provete para ensaio de compressão axial (ASTM C364) [31] | 29 |
| Figura 30 – Exemplo de ensaio de compressão axial de acordo com a norma ASTM C364 [34] | 29 |
| Figura 31 – Exemplo de ensaio de corte núcleo pela norma ASTM C273 [36]..... | 30 |
| Figura 32 – Ensaio de flexão pela norma ASTM C393: (a) 3 pontos; (b) 4 pontos com carga aplicada a $\frac{1}{4}$ do comprimento; (c) 4 pontos com carga aplicada a $\frac{1}{3}$ do comprimento [38] | 31 |
| Figura 33 – Indentação em teste de flexão [31]..... | 31 |
| Figura 34 – Exemplo de ensaio de compressão do núcleo pela norma ASTM C365 [39]..... | 32 |
| Figura 35 – Exemplos de análise estrutural [44] | 34 |
| Figura 36 – Exemplo de análise modal [45]..... | 34 |
| Figura 37 – Exemplo de análise de fadiga [46] | 35 |
| Figura 38 – Exemplo de análise de transferência de calor [47]..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 39 – Exemplo de análise de processo de fabrico (arranque de apara) [48] | 36 |
| Figura 40 – Exemplo de análise de processo de fabrico (dobragem de tubos) [49]..... | 36 |
| Figura 41 – Exemplo de análise de fluxo (turbina) [50]..... | 37 |
| Figura 42 – Indentação de painel <i>sandwich</i> após teste de indentação quase estática mostrando (a) quebra de fibra e rachaduras no laminado (b) esmagamento do núcleo [53] | 39 |
| Figura 43 – Modelo de <i>crushable foam</i> com endurecimento isotrópico: superfície de cedência e potencial de fluxo no plano de tensão p-q [54] | 41 |
| Figura 44 – Configurações dos painéis <i>sandwich</i> testados | 47 |
| Figura 45 – Camadas de pré-impregnado cortadas nas dimensões finais (300×300 mm ²) | 48 |
| Figura 46 – Colagem das camadas de pré-impregnado | 48 |
| Figura 47 – Rolo de <i>peel ply</i> | 49 |
| Figura 48 – Colocação das peles na prensa de pratos quentes | 49 |
| Figura 49 – Peles de pré-impregnado de fibra de carbono após cura..... | 50 |
| Figura 50 – Adesivo SikaForce 7710 L100 e catalisador SikaForce 7010..... | 50 |
| Figura 51 – Impregnação das peles com adesivo | 51 |
| Figura 52 – Junção das peles ao núcleo..... | 51 |
| Figura 53 – Colocação do painel <i>sandwich</i> na prensa de pratos quentes com espaçadores | 51 |
| Figura 54 – Corte dos provetes com uma serra elétrica..... | 52 |
| Figura 55 – Medição e numeração dos provetes | 52 |
| Figura 56 – Curvas $P-\delta$ resultantes do ensaio de compressão do núcleo | 54 |
| Figura 57 – Dimensão entre apoios no ensaio de flexão em 3 pontos [37] | 54 |
| Figura 58 – Configuração do ensaio de flexão em 3 pontos..... | 55 |
| Figura 59 – Dimensões características no ensaio de flexão em 4 pontos [37]..... | 55 |
| Figura 60 – Configuração do ensaio de flexão em 4 pontos..... | 56 |
| Figura 61 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 3 pontos, configuração A | 56 |
| Figura 62 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 3 pontos, configuração B..... | 57 |
| Figura 63 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 3 pontos, configuração C..... | 57 |
| Figura 64 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 4 pontos, configuração A | 58 |
| Figura 65 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 4 pontos, configuração B..... | 58 |
| Figura 66 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 4 pontos, configuração C..... | 59 |
| Figura 67 – Definição da geometria 2D dos provetes | 64 |
| Figura 68 – Detalhe da partição na zona de contacto de um dos punções..... | 64 |
| Figura 69 – Geometria 2D dos punções | 64 |
| Figura 70 – Montagem dos componentes do ensaio de flexão em 3 e 4 pontos para a configuração A... 65 | 65 |
| Figura 71 – Parâmetros de computação utilizados nos modelos numéricos | 66 |
| Figura 72 – Interação entre os punções e o provete..... | 66 |
| Figura 73 – Condições fronteira no ensaio de flexão em 3 pontos | 67 |
| Figura 74 – Condições fronteira no ensaio de flexão em 4 pontos | 67 |
| Figura 75 – Malha utilizada nos modelos numéricos | 68 |
| Figura 76 -MDC triangular implementado no <i>software Abaqus</i> ® | 69 |
| Figura 77 -Tensões de von Mises no estudo numérico de flexão em 3 pontos | 70 |
| Figura 78 – Critério de Tsai-Wu no estudo de flexão em 3 pontos | 71 |
| Figura 79 – Curvas $P-\delta$ do estudo de flexão em 3 pontos, software Abaqus® | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 80 – Curvas P - δ flexão em 3 pontos, configuração A | 72 |
| Figura 81 – Curvas P - δ flexão em 3 pontos, configuração B | 72 |
| Figura 82 – Curvas P - δ flexão em 3 pontos, configuração C | 73 |
| Figura 83 – Curvas P - δ flexão em 4 pontos, configuração A | 73 |
| Figura 84 – Curvas P - δ flexão em 4 pontos, configuração B | 74 |
| Figura 85 – Curvas P - δ flexão em 4 pontos, configuração C | 74 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Configurações <i>sandwich</i> restadas | 45 |
| Tabela 2 – Propriedades da espuma de poliuretano..... | 46 |
| Tabela 3 – Propriedades de uma camada de pré-impregnado CIT HS 160 REM na direção das fibras [57] | 46 |
| Tabela 4 – Propriedades mecânicas aproximadas SikaForce®-7710 L100 [58] | 47 |
| Tabela 5 – Ciclo para compactação das peles na prensa de pratos quentes | 49 |
| Tabela 6 – Ciclo para compactação do painel <i>sandwich</i> na prensa de pratos quentes | 52 |
| Tabela 7 – Valores médios de espessura e largura dos provetes para as diferentes configurações..... | 53 |
| Tabela 8 – Dimensões dos provetes para ensaio de compressão do núcleo | 53 |
| Tabela 9 – Parâmetros do ensaio à flexão em 3 pontos..... | 54 |
| Tabela 10 – Parâmetros do ensaio à flexão em 4 pontos..... | 55 |
| Tabela 11 – Resultados do cálculo das propriedades mecânicas do núcleo | 60 |
| Tabela 12 – Resultados do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 3 pontos | 61 |
| Tabela 13 – Resultados do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 4 pontos | 62 |
| Tabela 14 – Definição dos tipos de material, comportamento e tipo de secção para os modelos numéricos | 64 |
| Tabela 15 – Espessura atribuída aos modelos numéricos..... | 65 |
| Tabela 16 – Resultados experimentais e numéricos do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 3 pontos | 75 |
| Tabela 17 – Resultados experimentais e numéricos do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 4 pontos | 75 |

ÍNDICE

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.1 | Contextualização | 3 |
| 1.2 | Objetivos | 3 |
| 1.3 | Organização do relatório | 4 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 2.1 | Estruturas <i>sandwich</i> | 7 |
| 2.1.1 | Conceito e motivação para utilização das estruturas <i>sandwich</i> | 7 |
| 2.1.2 | Métodos de fabrico de estruturas <i>sandwich</i> | 8 |
| 2.1.2.1 | Moldação manual | 9 |
| 2.1.2.2 | Moldação por projecção..... | 10 |
| 2.1.2.3 | Moldação de pré-impregnados (prepregs)..... | 11 |
| 2.1.2.4 | Moldação por injeção a baixa pressão e por transferência | 14 |
| 2.1.2.5 | Laminagem contínua | 16 |
| 2.1.2.6 | Ligação adesiva | 17 |
| 2.1.3 | Aplicações de estruturas <i>sandwich</i> | 18 |
| 2.2 | Caraterização experimental de materiais | 24 |
| 2.2.1 | Ensaio de tração..... | 24 |
| 2.2.2 | Ensaio de compressão | 25 |
| 2.2.3 | Ensaio de flexão | 26 |
| 2.2.4 | Outros tipos de ensaios mecânicos..... | 27 |
| 2.3 | Ensaio característicos de estruturas <i>sandwich</i> | 28 |
| 2.3.1 | Ensaio de tração | 28 |
| 2.3.2 | Ensaio de compressão lateral..... | 29 |
| 2.3.3 | Ensaio de corte do núcleo | 30 |
| 2.3.4 | Ensaio de flexão..... | 30 |
| 2.3.5 | Ensaio de compressão do núcleo | 32 |
| 2.4 | Modelação numérica de estruturas | 33 |
| 2.4.1 | Método de Elementos Finitos aplicado a projeto | 33 |
| 2.4.2 | Projeto de estruturas compósitas e <i>sandwich</i> | 37 |
| 2.4.3 | Modos de falha de estruturas compósitas e <i>sandwich</i> | 39 |
| 2.4.4 | Modelação do dano e rotura..... | 40 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 45 |
| 3.1 | Trabalho experimental | 45 |
| 3.1.1 | Configurações <i>sandwich</i> testadas | 45 |
| 3.1.2 | Materiais utilizados | 45 |
| 3.1.2.1 | Núcleos | 45 |
| 3.1.2.2 | Peles | 46 |
| 3.1.2.3 | Adesivos | 47 |
| 3.1.3 | Geometria das estruturas <i>sandwich</i> | 47 |
| 3.1.4 | Processo de fabrico | 47 |
| 3.1.4.1 | Produção das peles | 48 |
| 3.1.4.2 | Adesão das peles ao núcleo | 50 |
| 3.1.4.3 | Obtenção dos provetes | 52 |
| 3.1.5 | Ensaio de compressão do núcleo | 53 |
| 3.1.6 | Ensaio de flexão | 54 |
| 3.1.6.1 | Flexão em 3 pontos | 54 |
| 3.1.6.2 | Flexão em 4 pontos | 55 |
| 3.1.7 | Resultados obtidos | 56 |
| 3.1.7.1 | Curvas $P-\delta$ | 56 |
| 3.1.7.2 | Propriedades mecânicas do núcleo e estruturas <i>sandwich</i> | 59 |
| 3.1.7.3 | Análise dos resultados obtidos | 63 |
| 3.2 | Trabalho numérico | 63 |
| 3.2.1 | Condições da análise numérica | 63 |
| 3.2.2 | Modelo de dano triangular | 68 |
| 3.2.3 | Análise de tensões das estruturas <i>sandwich</i> | 70 |
| 3.2.4 | Previsão da resistência | 71 |
| 3.2.5 | Análise dos resultados obtidos | 76 |
| 4 | CONCLUSÕES | 79 |
| 5 | REFERÊNCIAS | 83 |

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As estruturas *sandwich* caracterizam-se pela possibilidade de conjugar propriedades de diferentes materiais, sendo tipicamente compostas por camadas exteriores num material fino e de maior rigidez e por um núcleo num material mais leve e flexível, dependendo da finalidade da estrutura. Sendo as estruturas *sandwich* particularmente interessantes para inúmeras aplicações nas mais diversas indústrias, este tipo de estruturas destaca-se em aplicações estruturais sujeitas ao mais diverso tipo de cargas. Nesse sentido, e no caso particular das cargas de flexão, torna-se importante o estudo de técnicas que permitam efetuar a previsão do comportamento das estruturas quando submetidas a cargas.

No caso das estruturas *sandwich*, é particularmente exigente a previsão do comportamento devido aos diferentes materiais envolvidos e também as ligações entre eles.

Com a finalidade de efetuar a previsão do comportamento das estruturas, torna-se naturalmente interessante verificar a capacidade dos métodos numéricos atualmente existentes e comprovar a sua adequabilidade, para que estes possam ser posteriormente aplicados com confiança no dimensionamento de estruturas *sandwich*.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é verificar a adequabilidade do Método de Elementos Finitos (MEF) para a previsão do comportamento à flexão de estruturas *sandwich*. Com vista ao cumprimento do objetivo proposto, será efetuada a obtenção de valores de referência, obtidos através de ensaios práticos que serão utilizados para posteriormente efetuar uma comparação com os valores obtidos pelo estudo numérico. Serão analisadas diferentes configurações de painéis *sandwich*, todos eles compostos pelos mesmos materiais, fazendo-se variar a espessura do núcleo e a configuração das peles, de modo a validar o estudo numérico para diferentes situações. O estudo numérico será baseado em métodos já referenciados em artigos para a modelação dos diferentes materiais. Para a elaboração do estudo numérico será utilizado o *software* Abaqus®. Serão utilizados modelos de dano coesivo (MDC) para a modelação do adesivo, *crushable foam* na modelação do núcleo em espuma de poliuretano e o critério de Tsai-Wu para as peles.

1.3 Organização do relatório

De forma a fazer uma correta distribuição dos conteúdos apresentados, esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

No primeiro capítulo, denominado de Introdução, é efetuado um enquadramento global do tema em que se baseia a dissertação, dando a conhecer os objetivos que foram delineados.

No segundo capítulo, denominado Revisão Bibliográfica, são apresentados todos os conceitos teóricos importantes para o desenvolvimento do tema em questão. Assim abordam-se as estruturas *sandwich*, incluindo a sua utilização e métodos de produção, e o MEF, abordando o estado da arte para a sua aplicação na modelação de estruturas *sandwich*.

O terceiro capítulo diz respeito ao Desenvolvimento, incluindo a parte experimental e a parte numérica. Relativamente à parte experimental, são apresentadas as configurações testadas, o processo de produção dos provetes, e a obtenção e tratamento dos dados resultantes dos ensaios de flexão em 3 e 4 pontos. Na parte numérica, é apresentado o processo de modelação das estruturas *sandwich*, a obtenção e tratamento dos dados resultantes da simulação e é efetuada uma comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

No quarto capítulo apresentam-se as Conclusões retiradas do trabalho desenvolvido. Com base nas conclusões apresentadas, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estruturas *sandwich*

- 2.1.1 Conceito e motivação para utilização das estruturas *sandwich*
- 2.1.2 Métodos de fabrico de estruturas *sandwich*
- 2.1.3 Aplicações de estruturas *sandwich*

2.2 Caraterização experimental de materiais

- 2.2.1 Ensaios de tração
- 2.2.2 Ensaios de compressão
- 2.2.3 Ensaios de flexão
- 2.2.4 Outros tipos de ensaios mecânicos

2.3 Ensaios característicos de estruturas *sandwich*

- 2.3.1 Ensaio de tração
- 2.3.2 Ensaio de compressão lateral
- 2.3.3 Ensaio de corte do núcleo
- 2.3.4 Ensaio de flexão
- 2.3.5 Ensaio de compressão do núcleo

2.4 Modelação numérica de estruturas

- 2.4.1 Método de Elementos Finitos aplicado a projeto
- 2.4.2 Projeto de estruturas compósitas e *sandwich*
- 2.4.3 Modos de falha de estruturas compósitas e *sandwich*
- 2.4.4 Modelação do dano e rotura

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estruturas *sandwich*

O termo *sandwich* é facilmente entendido por qualquer indivíduo, uma vez que a grande generalidade das pessoas já terá saboreado algo que dá por esse nome. Se na gastronomia esse termo indica duas camadas exteriores de pão com um conteúdo diferente no seu interior, também quando se fala de estruturas *sandwich* se fala de algo que tipicamente é composto por duas camadas externas idênticas entre si que acomodam um núcleo no seu interior possuidor de diferentes propriedades (Figura 1). Este tipo de estrutura permite um conjunto infindável de combinações de materiais e geometrias.

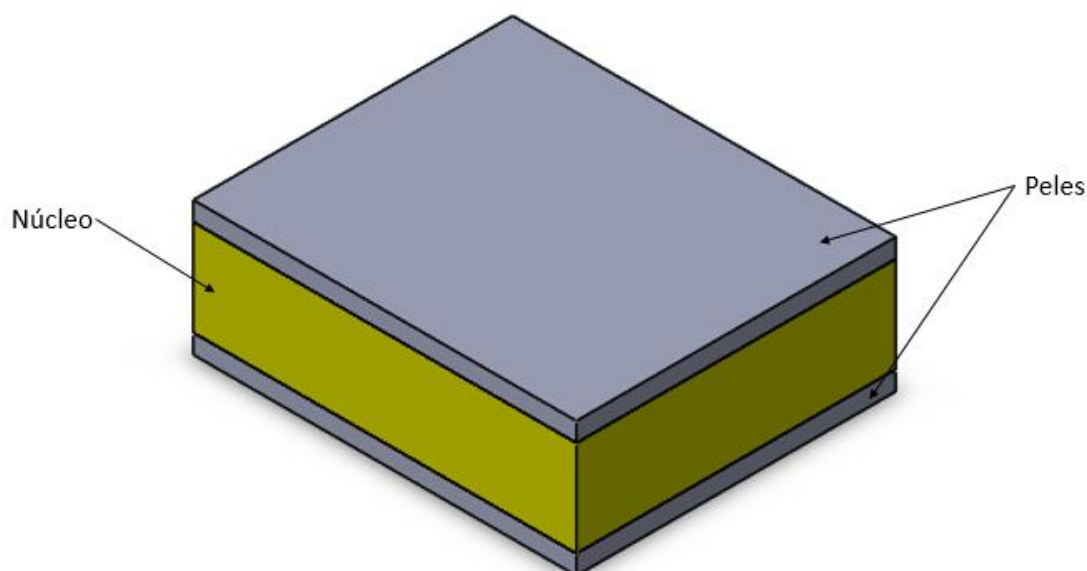


Figura 1 - Estrutura *sandwich* (elaboração própria)

Pensa-se que a primeira pessoa a descrever as estruturas *sandwich* terá sido Fairbairn em 1849 [1], embora seja natural que a ideia de contruir estruturas *sandwich* já tenha surgido anteriormente a outros engenheiros.

2.1.1 Conceito e motivação para utilização das estruturas *sandwich*

As estruturas *sandwich* têm vindo a ser mais usadas a cada dia. Isto deve-se principalmente ao seu excelente rácio resistência à flexão versus peso. Por este motivo, quando comparadas com outro tipo de construções, as estruturas *sandwich* resultam geralmente em estruturas com menor peso do que as estruturas mais tradicionais. A configuração de uma estrutura *sandwich* assemelha-se a uma viga em I relativamente

ao modo como resiste à flexão, devido a existência do núcleo que faz aumentar a distância existente entre as peles (Figura 2).

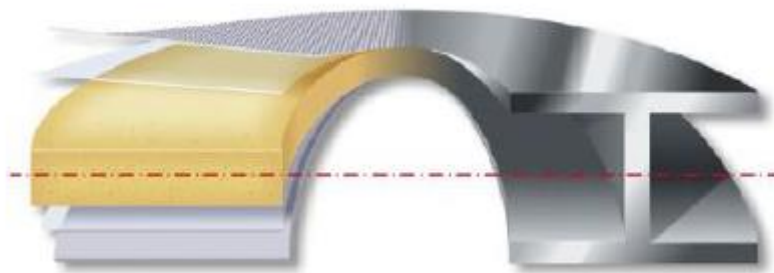


Figura 2 – Comparação entre uma estrutura *sandwich* e uma viga em I [2]

A resistência à flexão deste tipo de estruturas advém da espessura adicionada pelo núcleo, que faz aumentar a inércia da secção. Tipicamente, o núcleo é formado por um material com baixa densidade, podendo ser homogêneo, do qual são exemplo as espumas de poliuretano, ou heterogêneo, como os núcleos em formato *honeycomb* [3] (Figura 3).

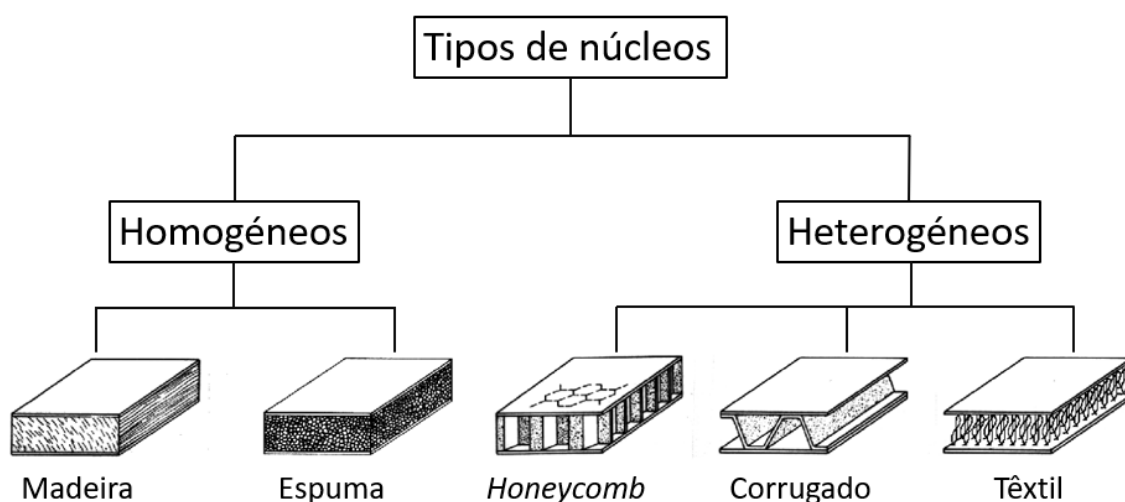


Figura 3 - Tipos de núcleo (elaboração própria)

Apesar das vantagens, existem também alguns fatores que tem atrasado uma maior utilização deste tipo de estruturas: métodos de produção ainda em desenvolvimento, dificuldade no controlo de qualidade, dificuldades na junção a outros materiais e estruturas e falta de conhecimento relativamente aos modos de propagação do dano [4]. É espectável que com o evoluir da tecnologia de fabrico associada às estruturas *sandwich* estas venham a ganhar cada vez mais preponderância.

2.1.2 Métodos de fabrico de estruturas *sandwich*

Atualmente existem muitas opções de materiais diferentes no que toca às resinas utilizadas como matriz, às fibras e ao núcleo, todos com seu próprio conjunto de propriedades tais como resistência, rigidez, tenacidade, resistência ao calor, custo, taxa de produção, entre outras. No entanto, as propriedades finais de uma peça em material compósito, produzida a partir desses materiais diferentes não são apenas uma função

das propriedades individuais dos diferentes constituintes, mas também são uma função da maneira como os próprios materiais são projetados e também da maneira como são processados, devendo ter sempre em vista a finalidade. Segue-se a descrição de alguns dos processos mais utilizados atualmente para o fabrico de estruturas *sandwich*.

2.1.2.1 Moldação manual

É um dos métodos mais utilizados na produção de estruturas *sandwich*, apesar de já ser um dos mais antigos [4].

Sendo este um método bastante flexível e com um investimento bastante reduzido, acaba também por ter uma cadencia bastante reduzida e a qualidade final da estrutura está bastante dependente da perícia do operador. Este método pode ser utilizado para produzir tanto estruturas pequenas e com complexidade reduzida como estruturas de maior envergadura e maior complexidade [5]. Como exemplos de aplicação deste método referem-se as pás das turbinas eólicas, embarcações, estruturas arquitetónicas, compartimentos refrigerados de camiões, entre outros [4, 6].

Este método de fabrico consiste em fazer a impregnação manual das fibras de reforço. Este processo ocorre tipicamente com o auxílio de rolos para que seja feita uma mistura homogénea da resina no material de reforço. Após a impregnação, os laminados são deixados a curar sobre condições padrão de pressão e temperatura [6]. Na Figura 4 encontra-se uma representação do processo de moldação manual.

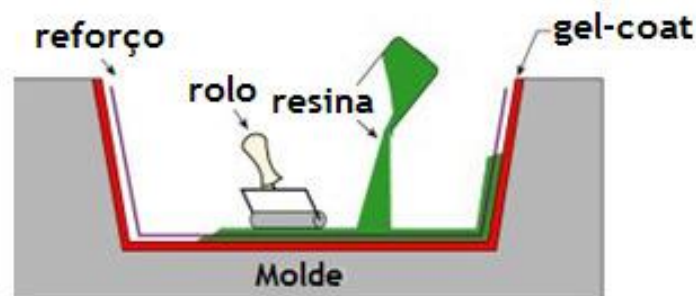


Figura 4 – Processo de moldação manual [7]

Adicionalmente, pode ser promovida uma melhor homogeneização da estrutura com o auxílio de um saco de vácuo [4] (Figura 5).

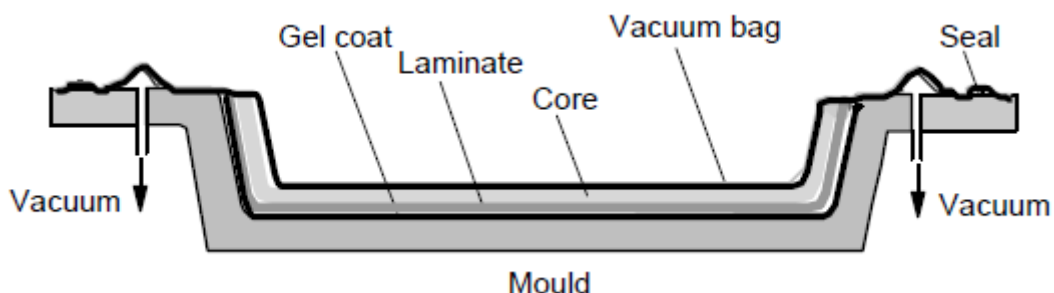


Figura 5 – Processo de moldação manual com saco de vácuo [4]

Segue-se uma listagem para uma melhor comparação das principais vantagens e desvantagens deste processo [6].

- Vantagens:
 - a) Amplamente utilizado há muitos anos;
 - b) Princípios simples de ensinar;
 - c) Baixo investimento em ferramentas;
 - d) Ampla escolha de fornecedores e tipos de materiais;
 - e) Maior teor de fibras e fibras mais longas do que com a pulverização.
- Desvantagens:
 - a) A mistura de resina, o conteúdo de resina laminada e a qualidade do laminado dependem muito das habilidades dos operadores. Geralmente, os laminados com baixo teor de resina não podem ser produzidos sem a existência de quantidades excessivas de vazios;
 - b) Considerações relativas à saúde e segurança devido à manipulação manual das resinas;
 - c) Necessidade de utilizar sistemas de extração dispendiosos para limitar a concentração de substâncias tóxicas no ar;
 - d) As resinas precisam ter baixa viscosidade para serem trabalhadas manualmente, o que pode comprometer as suas propriedades mecânicas e térmicas devido à necessidade de altos níveis de diluente ou estireno.

2.1.2.2 Moldação por projeção

No processo de moldação por projeção (Figura 6), como o próprio nome indica, é feita a projeção de um composto de fibras descontínuas e resina num molde unilateral, que deve sofrer uma pré-aplicação de *gel-coat*. A mistura proveniente da projeção pode ser também combinada com materiais previamente colocados no molde [8]. Para obter uma maior eficiência no processo e obter eliminar o ar retido, pode também ser necessário recorrer à passagem de rolos [4, 5].

Como neste processo são utilizadas fibras descontínuas que são depositadas de forma aleatória, as propriedades mecânicas finais são dependentes da contração e da orientação das fibras [4, 9].

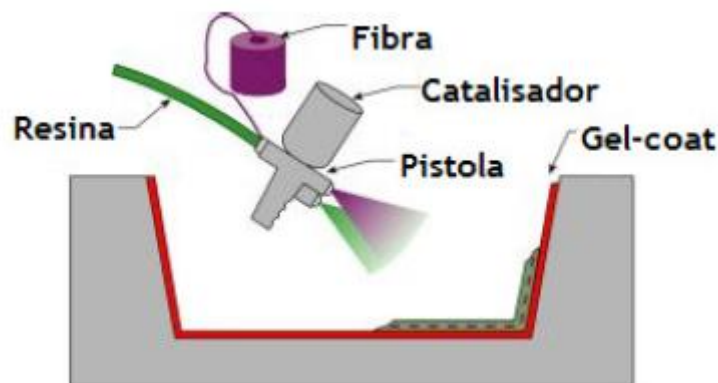


Figura 6 – Processo de moldação por projeção [7]

Tipicamente pode encontrar-se este processo no fabrico de pequenas embarcações, painéis estruturais que sofram esforços reduzidos, carroçarias para caravanas e banheiras [6].

De seguida apresenta-se um resumo das principais vantagens e desvantagens do processo [6].

- Vantagens:
 - a) Amplamente utilizado há muitos anos;
 - b) Método de baixo custo e elevada cadência para a deposição de fibras e resinas;
 - c) Ferramentas de baixo custo.
- Desvantagens:
 - a) Os laminados tendencialmente possuem um elevado teor de resina e, portanto, tornam-se excessivamente pesados;
 - b) Apenas podem ser utilizadas fibras curtas, o que limita severamente as propriedades mecânicas do laminado;
 - c) As resinas devem ter baixa viscosidade para serem pulverizáveis, algo que tendencialmente compromete suas propriedades mecânicas e térmicas;
 - d) O alto conteúdo de estireno das resinas para aplicação em spray geralmente significa que elas têm potencial para ser mais prejudiciais para a saúde dos operadores e para o meio ambiente.

2.1.2.3 Moldação de pré-impregnados (prepregs)

A incorporação de pré-impregnados em estruturas *sandwich* pode ser feita através da aplicação direta sobre o núcleo ou com o recurso a um material adesivo, como será apresentado seguidamente [4].

O uso de pré-impregnados garante que o reforço seja adequadamente impregnado e, tipicamente, as resinas usadas em pré-impregnados também tendem a apresentar melhores propriedades do que as disponíveis para a moldação manual. No entanto, as resinas pré-impregnadas normalmente requerem condições de reticulação bem controladas, o que significa que a temperatura deve ser aumentada acima da temperatura ambiente [4].

Tipicamente este tipo de processo, com auxílio apenas a um saco de vácuo (Figura 7), é utilizado para fabricar componentes como pás de turbinas eólicas de alto desempenho, grandes iates de corrida e cruzeiro, embarcações de resgate e componentes para comboios [6].

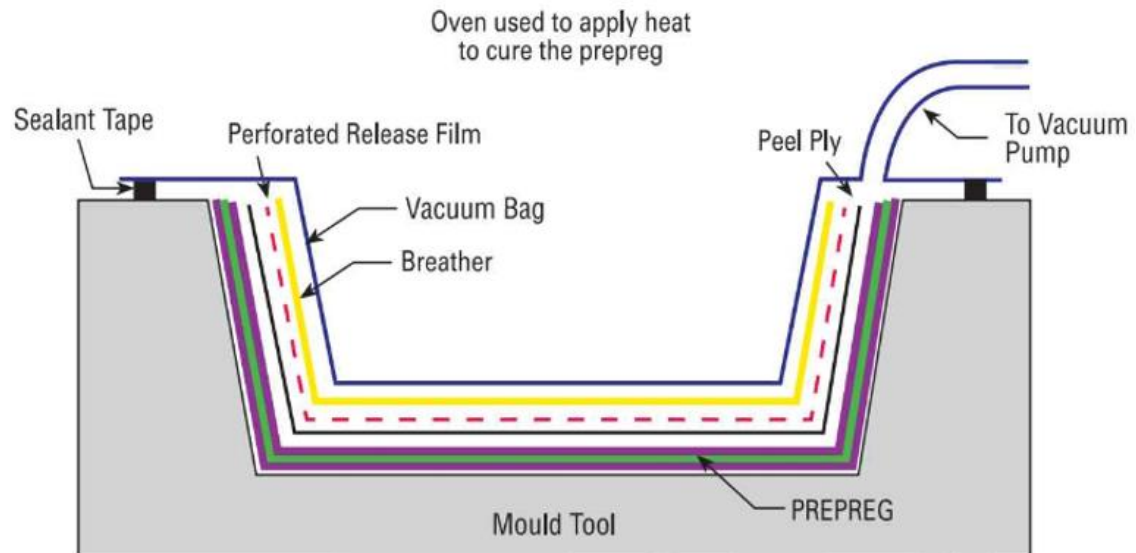


Figura 7 – Moldagem de pré-impregnados sem autoclave [6]

No processo sem auxílio a autoclave são utilizadas resinas com temperatura de cura de 60°C a 120°C. Se o processo for efetuado em autoclave, tipicamente são utilizadas resinas com temperaturas de cura compreendidas entre 120°C e 180°C [6].

O auxílio a autoclave (Figura 8) possibilita a obtenção de estruturas com melhores propriedades mecânicas que tipicamente se destinam a aplicações mais avançadas, como é o caso de componentes para a indústria aeronáutica e para a incorporação em viaturas de Fórmula 1 [4].

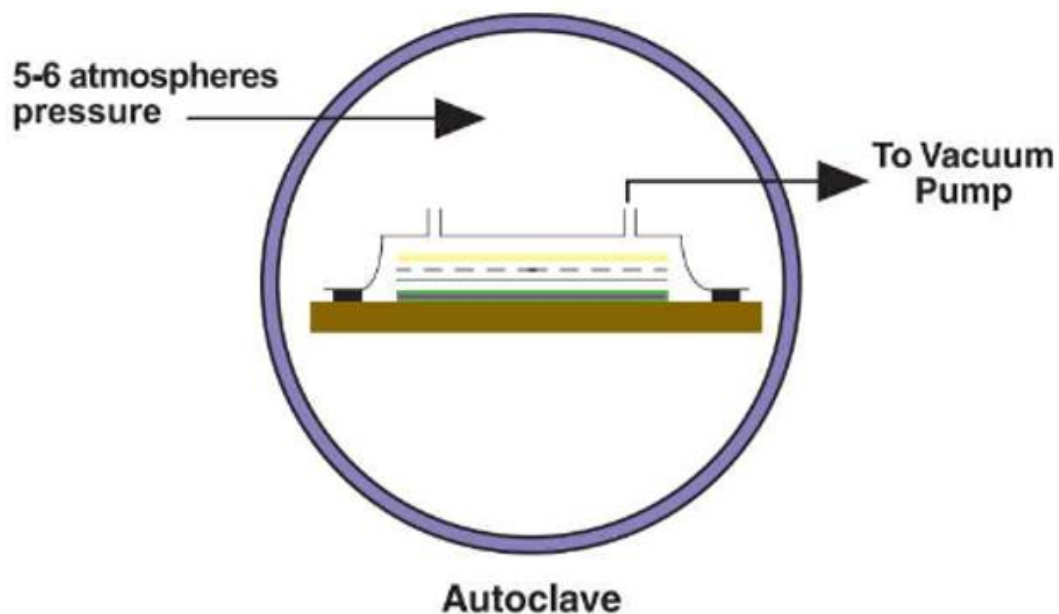


Figura 8 – Moldagem de pré-impregnados com autoclave [6]

Apresenta-se seguidamente um resumo das principais vantagens e desvantagens do processo [6].

- Vantagens com utilização de autoclave:
 - a) Os níveis de resina / catalisador e o teor de resina na fibra são definidos com precisão pelo fabricante dos materiais. Pode ser alcançado um alto conteúdo de fibra com segurança com baixo conteúdo de vazios;
 - b) Os materiais têm excelentes características relativas à segurança e saúde durante o seu manuseamento;
 - c) As resinas utilizadas podem ser otimizadas com vista a um melhor desempenho mecânico e térmico, sendo possível utilizar resinas de alta viscosidade neste processo;
 - d) Potencial de automação e poupança em mão de obra.
- Vantagens sem utilização de autoclave:
 - a) Todas as vantagens de a) a d) relativas aos pré-impregnados com auxílio de autoclave são também aplicadas aos pré-impregnados sem a utilização dessa ferramenta;
 - b) Podem ser utilizadas ferramentas mais baratas devido à mais baixa temperatura de cura envolvida;
 - c) Podem ser obtidas estruturas de maior envergadura, uma vez que a pressão do saco de vácuo suficiente e para efetuar o aquecimento a essas temperaturas inferiores podem ser utilizados fornos simples de circulação de ar quente, geralmente construídos no local sobre o componente;
 - d) Materiais comuns como espumas podem ser usados no núcleo;
 - e) Menor gasto com energia do que o processo com autoclave.
 - f) Processo bastante robusto, com um alto nível de tolerância e repetibilidade de dimensões.
- Desvantagens com utilização de autoclave:
 - a) Geralmente é necessário que os autoclaves efetuem a cura do componente. Esses autoclaves em específico são caros, mais lentos de operar e de tamanho limitado;
 - b) As ferramentas precisam de suportar as temperaturas envolvidas e os componentes da estrutura *sandwich* necessitam de conseguir suportar as temperaturas e pressões inerentes ao processo;
 - c) Para laminados mais espessos, os pré-impregnados precisam de ser pré-aquecidos durante o processo de preparação para garantir a remoção de ar entre as camadas.
- Desvantagens sem utilização de autoclave:
 - a) O custo dos materiais ainda é superior do que para os tecidos não pré-impregnados, embora os custos de resina sejam inferiores aos exigidos para aplicações estruturais mais exigentes, como as que são tipicamente usadas em autoclave;

- b) As ferramentas necessitam de suportar temperaturas mais elevadas do que as temperaturas típicas dos processos de moldação com o molde aberto (como no caso da moldação manual e por projeção).

2.1.2.4 Moldação por injeção a baixa pressão e por transferência

A cada dia, os processos de moldação por injeção a baixa pressão e por transferência têm vindo a ganhar importância na produção de componentes compósitos de matriz termoendurecível. A utilização deste processo deve-se à possibilidade de efetuar o reforço por fibras contínuas, o que traz enormes benefícios ao nível das propriedades mecânicas, e também devido ao facto de as pressões envolvidas serem relativamente baixas (1 a 5 bar), permitindo a utilização de equipamentos não muito dispendiosos. A estes fatores alia-se ainda o bom acabamento superficial, a fácil reprodutibilidade e a possibilidade de produzir peças de grandes dimensões [10].

Um dos processos de moldação por injeção a baixa pressão e por transferência é o RTM (*Resin Transfer Moulding*). Este processo apresenta cadências produtivas limitadas e baixas taxas de esforço. No entanto, tem vindo a desenvolver-se fortemente nos anos mais recentes. Atualmente, este processo apresenta tempos de ciclo de uma a duas horas quando se trata de componentes de grandes dimensões e geometria complexa, mas no caso de componentes de dimensões reduzidas são já conseguidos tempos de ciclo inferiores a três minutos e percentagens de fibra superiores a 50%. É ainda espectável que, com a evolução do processo, no futuro se venham a conseguir tempos de ciclo inferiores a um minuto e percentagens de fibra na casa dos 60% [8, 10].

O processo de RTM (Figura 9) é vulgarmente utilizado na indústria aeronáutica, competindo com o processo em autoclave, apresentando custos inferiores [10]. Neste processo é feito um pré-empilhamento que é colocado na cavidade inferior do molde, podendo por vezes esse empilhamento sofrer uma prensagem anterior já com a na forma do molde. Após a colocação do empilhamento na metade inferior do molde, o molde é fechado e a resina é injetada. Posteriormente a resina cura, dando-se a formação do compósito [6, 8, 10].

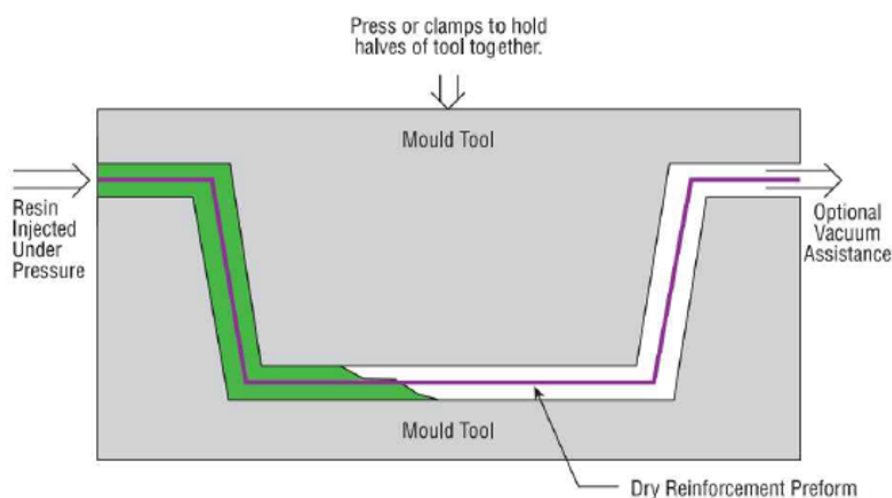


Figura 9 – Processo de RTM [6]

As principais vantagens e desvantagens do processo RTM são as seguintes [6, 8]:

- Vantagens:
 - a) Podem ser obtidos laminados com alto teor de fibra;
 - b) Mais benéfico para a saúde e ambiente do que outros métodos em que o molde se encontra aberto;
 - c) Mão de obra reduzida, podendo ser um processo semiautomático;
 - d) Bom acabamento superficial em ambos os lados do laminado.
- Desvantagens:
 - a) Ferramentas com custo elevado e robustas para suportarem as pressões inerentes ao processo;
 - b) Podem surgir partes da peça que não foram corretamente impregnadas, resultando em elevados custos de sucata.

O processo de RTM tem uma derivação na qual é utilizado vácuo, o VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) (Figura 10). O recurso ao vácuo permite que a resina impregne mais facilmente o reforço, reduzindo assim as porosidades e aumentando os teores de fibra para valores que podem chegar aos 70%. Existe uma versão do método VARTM patenteada desde 1980 com o nome de SCRIMP (*Seemann Composite Resin Infusion Molding Process*). Este processo tem vindo a ser utilizado em diversas áreas, desde a produção de pás de turbinas eólicas até à indústria automóvel [8, 10].

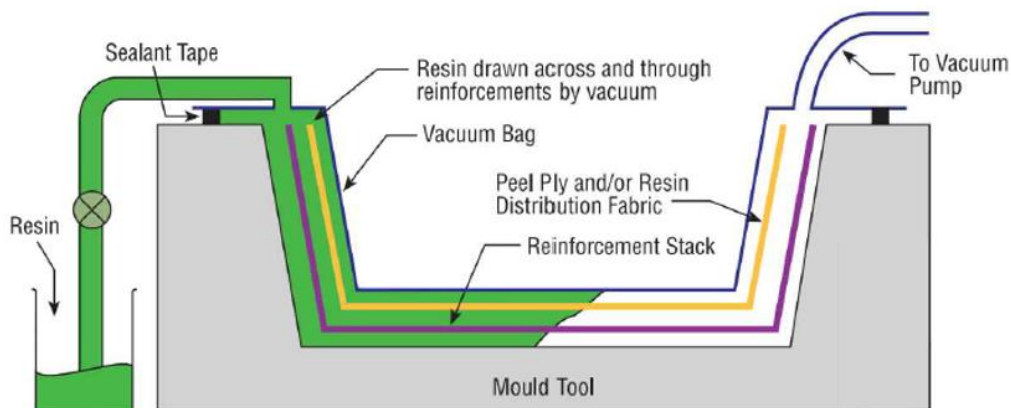


Figura 10 – Processo VARTM [6]

Apresenta-se seguidamente um resumo das principais vantagens e desvantagens do processo VARTM [4, 6]:

- Vantagens:
 - Custo de ferramentas mais reduzido, principalmente por a metade superior ser um saco de vácuo e por o molde não ter de aguentar pressões elevadas;
 - Possibilidade de fabricar componentes de grande envergadura com teores altos de fibra e poucos vazios;
 - As ferramentas utilizadas no processo de moldação manual podem ser modificadas para este processo;
 - Podem ser produzidas estruturas tubulares numa única operação.

- Desvantagens:
 - Processo relativamente complexo para a execução de grandes estruturas de forma consistente o suficiente para obter uma estrutura homogênea;
 - As resinas devem ter viscosidade muito baixa, o que pode comprometer as propriedades mecânicas;
 - Podem surgir partes da peça que não foram corretamente impregnadas, resultando em elevados custos de sucata.

Um outro processo de moldação por injeção é o SRIM (*Structural Reaction Injection Moulding*). Neste processo é utilizada uma resina de baixa viscosidade composta por isocianato e polioli. A mistura destes componentes é feita imediatamente antes de a mistura ser injetada na cavidade do molde, que tem o reforço previamente colocado. Os constituintes da resina utilizada neste método fazem com que o tempo de cura seja curto, promovendo assim uma diminuição do tempo de ciclo quando comparado com o processo RTM. As restantes características do método SRIM são bastante idênticas ao RTM. As estruturas obtidas por este método apresentam tipicamente grandes dimensões, boa resistência ao choque e leveza, e são bastante utilizadas na indústria automóvel [8, 10].

2.1.2.5 Laminagem contínua

O processo de laminagem contínua (Figura 11) é aquele que apresenta um custo de produção mais baixo sendo também o tipicamente mais automatizado. Este processo é bastante usado para a produção de painéis *sandwich* que são utilizados na construção civil, tipicamente na cobertura de edifícios industriais [10].

Os materiais utilizados nas faces neste processo podem ser chapas metálicas, polímeros não reforçados e compósitos laminados ou pré-impregnados. De forma a obter um núcleo contínuo é tipicamente feita a produção do núcleo em paralelo, como no caso da utilização do núcleo de PUR [8].

Tipicamente, os constituintes do laminado passam entre um tapete que aplica pressão e uma temperatura elevada, de modo a promover a ligação dos diferentes constituintes. Seguidamente o laminado é arrefecido, ainda sobre pressão, de modo a ser corretamente consolidado [8].

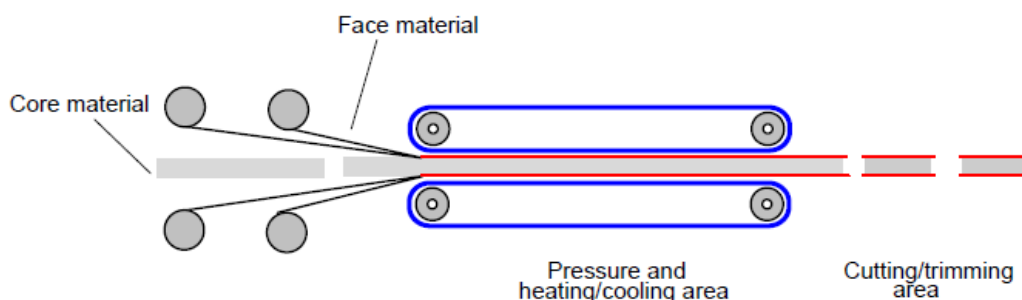


Figura 11 – Laminagem contínua [4]

Apresenta-se de seguida um resumo das principais vantagens e desvantagens do processo de laminagem contínua [10]:

- Vantagens:
 - Processo completamente automatizado;
 - Bom acabamento superficial e boa resistência ao envelhecimento (mediante aplicação de *gel coat*).
- Desvantagens:
 - Elevado investimento inicial em ferramentas;
 - Necessidade de uma área de trabalho de grandes dimensões.

2.1.2.6 Ligação adesiva

Processar toda a estrutura compósita numa só operação é um processo nem sempre possível. Alternativamente, pode dar-se a junção do núcleo e das peles numa operação separada [4]. O processo de ligação adesiva do núcleo às peles (Figura 12) é um processo bastante simples e que não está dependente dos materiais que compõem a estrutura [4]. As peles utilizadas neste processo podem ser pré-impregnadas ou compósitos obtidos por qualquer outro método de fabrico, podendo também ser utilizados outros materiais, como chapas metálicas. Em aplicações mais avançadas, as peles tipicamente são de resina epóxi reforçada com fibras e os núcleos formados por estruturas em favo de mel de Nomex ou alumínio, ou então de espumas de alta performance e elevada resistência à temperatura, como é o caso das PMI (polimetacrilimida) e PEI (polieterimida). Em adesivos com peles em chapas metálicas, tipicamente os núcleos são em espuma de PUR (poliuretano) ou PVC (cloreto de polivinilo). Usualmente são usados adesivos termoendurecíveis, podendo também ser utilizados adesivos termoplásticos em alternativa [8].

Este processo consiste em colocar uma camada de adesivo entre o material do núcleo e o material das peles, sendo posteriormente esse empilhamento sujeito a condições de temperatura e pressão de acordo com os requisitos do adesivo utilizado. Tipicamente este processo é auxiliado por um saco de vácuo ou por uma prensa para promover uma correta compactação do empilhamento. No caso de a estrutura se destinar a uma utilização que exija um melhor desempenho, pode ser necessário recorrer a um saco de vácuo e um autoclave [8].

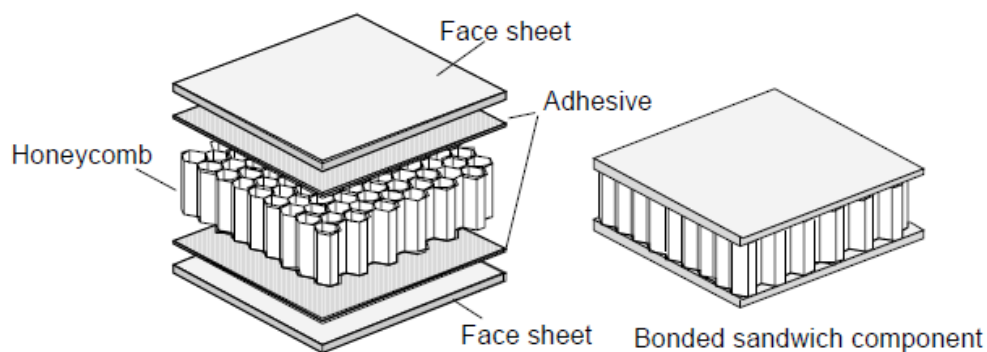


Figura 12 – Ligação adesiva de uma estrutura *sandwich* [8]

Este processo apresenta normalmente a seguinte sequência de etapas [8]:

1. Remover os *peel plies*, lixar as superfícies e lavar com solvente;
2. Aplicar o adesivo nas faces e colocar sobre o núcleo;
3. Organizar a montagem do saco de vácuo no molde;
4. Aplicar vácuo (ou prensar o empilhamento);
5. Aplicar a pressão especificada e remover o vácuo;
6. Aumentar a temperatura para a temperatura especificada;
7. Manter a temperatura e pressão pelo período especificado;
8. Arrefecer o empilhamento na taxa especificada.

Este método de fabrico é normalmente utilizado em estruturas para a indústria aeroespacial [4]. Apresenta-se de seguida um resumo das principais vantagens e desvantagens do processo [4]:

- Vantagens:
 - a) Requer um pequeno / médio investimento (mais elevado no caso do uso de autoclave);
 - b) É um processo ágil e adequado a produções de pequenas séries;
 - c) As estruturas em *sandwich* produzidas por este método apresentam excelentes propriedades mecânicas;
 - d) Permite ter superfícies com bom aspeto.
- Desvantagens:
 - a) Tipicamente utiliza resinas que requerem temperaturas e pressão elevadas para atingir as propriedades pretendidas;
 - b) Exige bastante mão de obra e não apresenta grande potencial para automatização;
 - c) Potencial para a existência de falhas parciais na ligação em secções curvas devido a incompatibilidades geométricas entre as peles e o núcleo.

2.1.3 Aplicações de estruturas *sandwich*

Atualmente é possível observar a aplicação de estruturas *sandwich* em diversas áreas, dada a possibilidade de obter diferentes combinações de materiais e propriedades tendo em conta a sua utilização. Nesse sentido, apresentam-se seguidamente algumas das possíveis aplicações de estruturas *sandwich*.

- **Aeroespacial e aeronáutica**

Exemplos das indústrias que mais beneficiam das propriedades das estruturas *sandwich* são indústrias aeroespacial e aeronáutica, devido à excelente relação entre a resistência mecânica e a leveza que é possível obter com este tipo de estruturas. Sendo mais específico, é possível encontrar estruturas *sandwich* na aviação militar e civil, em helicópteros e em aplicações para a indústria espacial [11].

Na Figura 13 e Figura 14 podem observar-se alguns exemplos de aplicações de estruturas *sandwich* nas indústrias aeroespacial e aeronáutica.

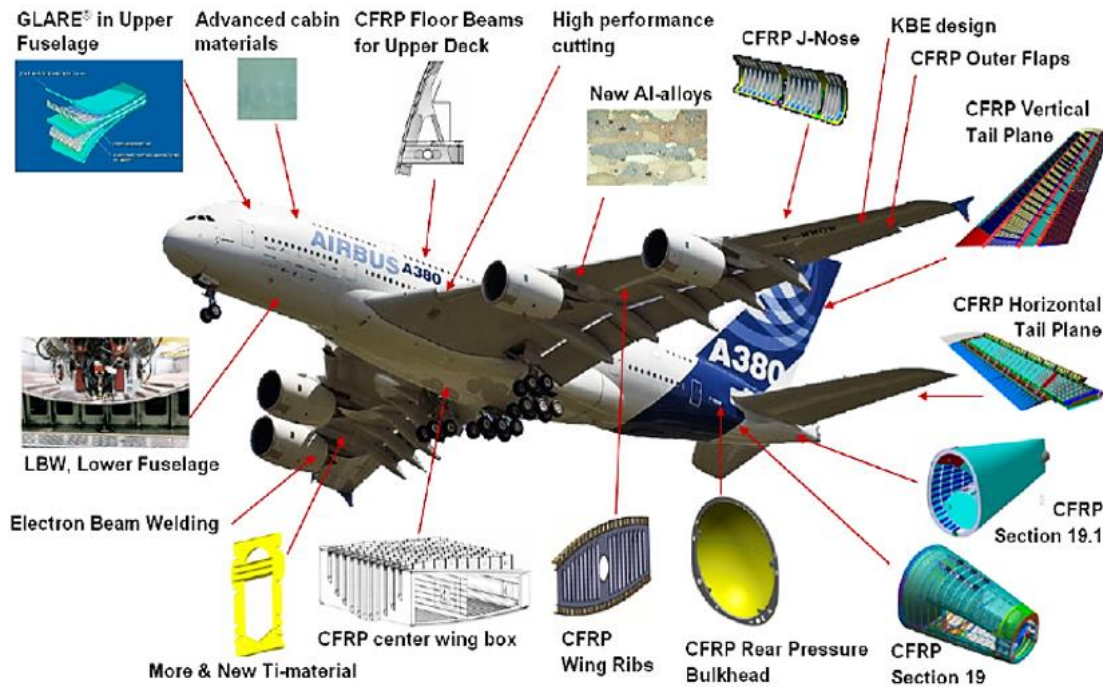


Figura 13 – Estruturas *sandwich* Airbus A380 [12]

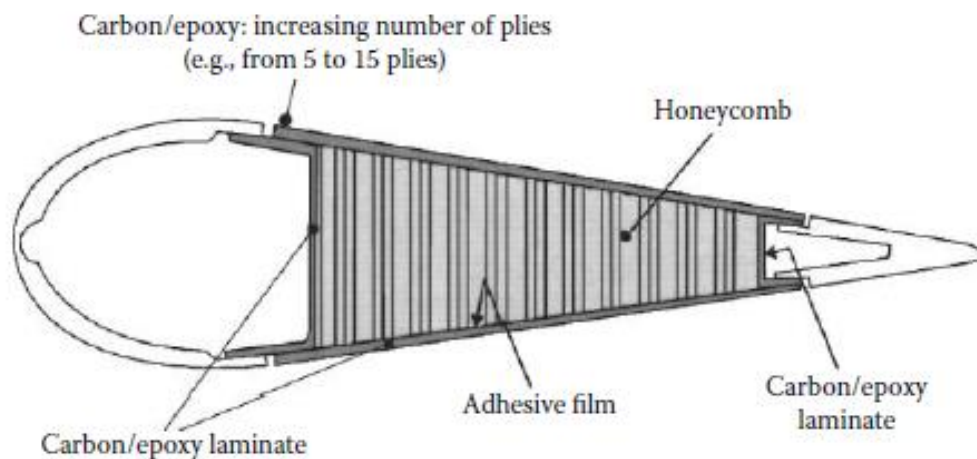


Figura 14 – Exemplo de componente indústria aeronáutica (*flap*) [3]

- **Transportes**

As estruturas *sandwich* podem ser encontradas atualmente em veículos utilizados para o transporte de passageiros, como é o caso de comboios e autocarros.

No caso dos comboios (Figura 15), desde a década de 80 do século passado que são construídas cabines em estruturas *sandwich*, devido à alta resistência das estruturas *sandwich* e boas propriedades de impacto e absorção de energia. Alguns exemplos são os comboios XPT na Austrália, ETR 500 em Itália, TGV em França e IC 2000 na Suíça [13].

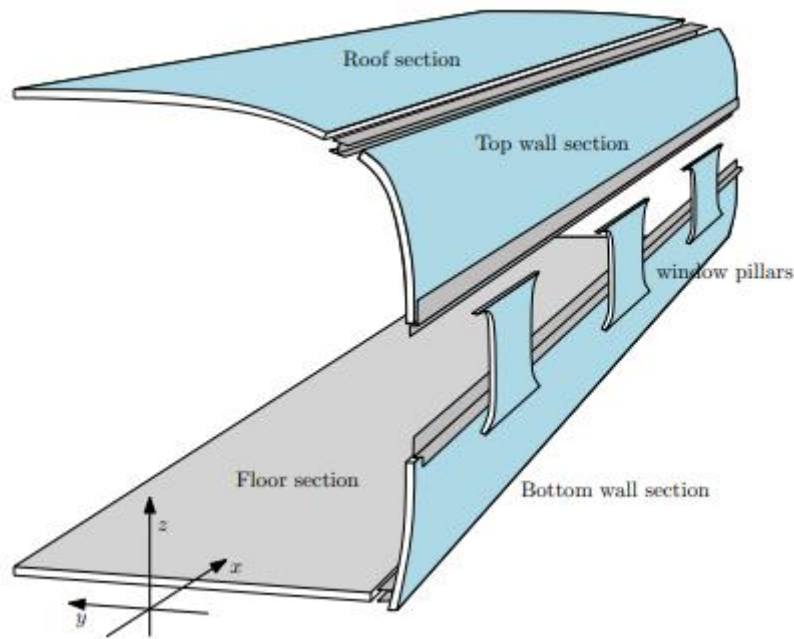


Figura 15 – Exemplo de aplicações de estruturas *sandwich* numa carruagem de passageiros [14]

Relativamente à utilização de estruturas *sandwich* em autocarros, também já é possível verificar a sua existência em alguns projetos. Um desses exemplos é o *Korean low floor bus* (KLFB) [15] (Figura 16).

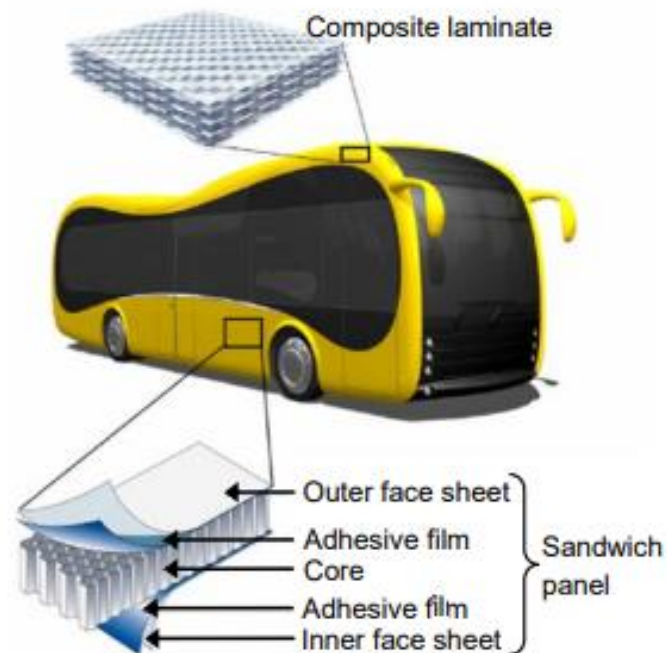


Figura 16 – Estruturas *sandwich* no projeto do autocarro KLFB [15]

Também na área da movimentação de cargas as estruturas *sandwich* são bastante usadas, nomeadamente nos camiões frigoríficos (Figura 17 e Figura 18), fazendo uso de propriedades de isolamento térmico que podem ser conferidas por este tipo de estrutura [4].

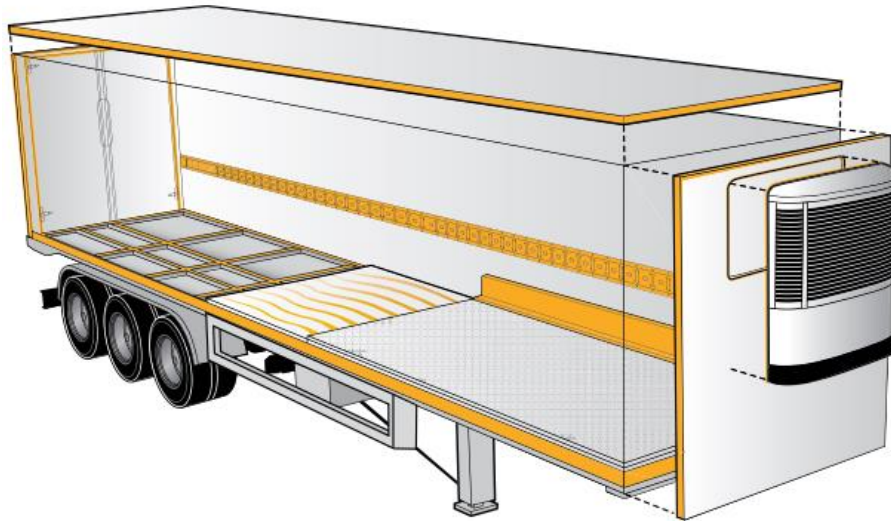


Figura 17 – Compartimento de carga refrigerado construído com painéis *sandwich* [16]



Figura 18 – Produção de compartimento de carga refrigerado construído com painéis *sandwich* [16]

- **Automóvel**

Atualmente quando falamos de produções de automóveis em grande escala, as estruturas *sandwich* ainda não são consideradas. No entanto é possível já visualizar a sua consideração em diversos estudos como é o caso do estudo “*Investigation of weight reduction of automotive body structures with the use of sandwich materials*” [17] e do estudo “*Development of a lightweight car body, using sandwich-design*” [18] (Figura 19), que abordam a integração das estruturas *sandwich* especialmente tendo em consideração a redução do peso dos automóveis.

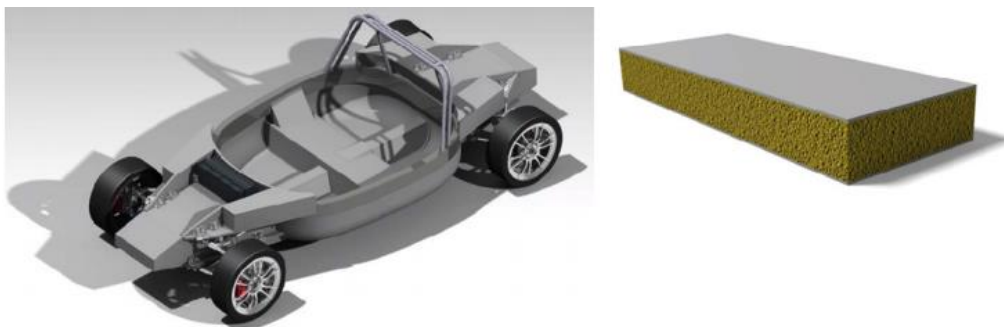


Figura 19 – Conceito de carroçaria com painéis *sandwich* [18]

As estruturas *sandwich* na indústria automóvel cingem-se aos desportivos produzidos em pequenas séries, como é o caso do Koenigsegg Agera R [19] (Figura 20).



Figura 20 – Koenigsegg Agera R [19]

- **Náutica**

Já desde há vários anos que a indústria náutica faz uso das estruturas *sandwich*, tipicamente utilizando fibras de vidro com matriz de poliéster e núcleo de esponja polimérica, essencialmente no fabrico de embarcações de recreio e de tamanho médio [3].

Na figura 17 pode-se observar, a título de exemplo, a embarcação “Turanor Planet Solar” (Figura 21). Esta embarcação foi construída com recurso a painéis *sandwich* com peles de fibra de carbono e núcleo com espumas de alta densidade [20].



Figura 21 – Turanor Planet Solar [20]

Também os desportos aquáticos fazem bastante uso das estruturas *sandwich*, como é o caso dos caiaques e das pranchas de surf [3] (Figura 22).

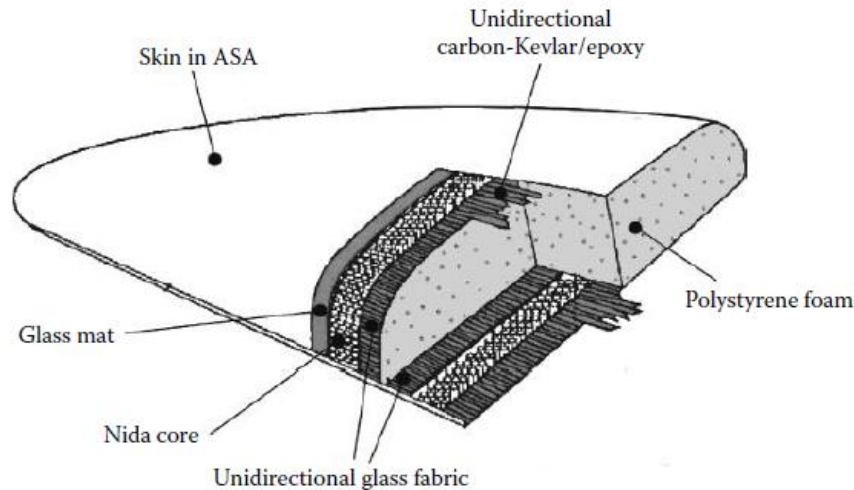


Figura 22 – Prancha de surf em estrutura *sandwich* [3]

• Turbinas eólicas

A indústria eólica tem apresentado um crescimento muito grande, sendo espectável que essa tendência se mantenha. Nesse sentido, esta indústria é de grande importância para o desenvolvimento das estruturas *sandwich* [3].

De facto, as estruturas *sandwich* são bastante usadas nas lâminas das estruturas eólicas (Figura 23), conferindo uma elevada rigidez sem introduzir um peso elevado [21].

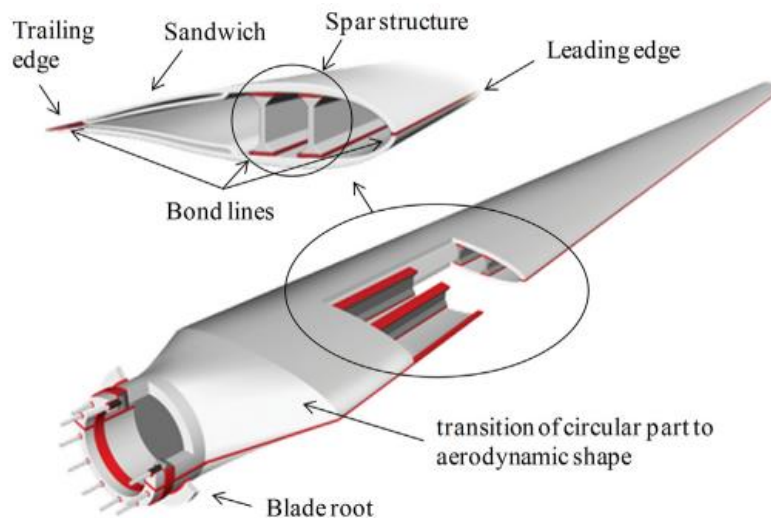


Figura 23 – Componentes hélice de turbina eólica [21]

• Construção civil

Atualmente, é possível observar bastantes exemplos de estruturas *sandwich* na construção civil. O exemplo mais comum a cobertura dos pavilhões industriais nos quais são tipicamente utilizadas estruturas *sandwich* com núcleo em espuma polimérica e peles em chapas de material metálico (Figura 24). Desta forma, é

possível obter uma boa resistência ao desgaste provocado pelo meio ambiente e também isolamento térmico [22].

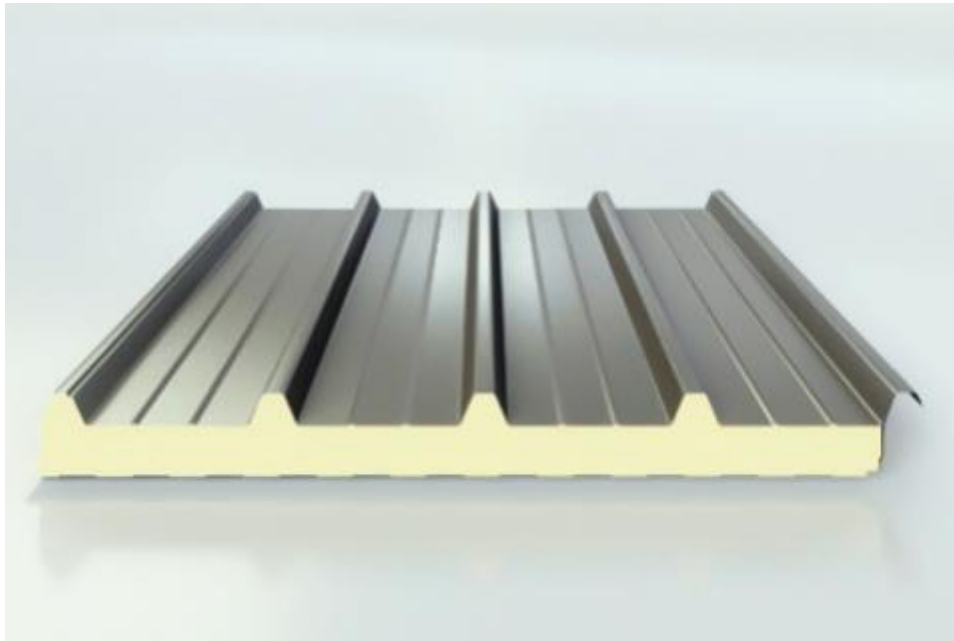


Figura 24 – Painel *sandwich* para cobertura de pavilhões industriais [23]

2.2 Caracterização experimental de materiais

Uma correta determinação das propriedades mecânicas é crucial para que se obtenha os dados necessários para auxiliar o projeto tanto de estruturas *sandwich* como de qualquer outra estrutura. Para a obtenção desses dados recorre-se a ensaios mecânicos que seguem procedimentos definidos em normas. Após o devido tratamento de informação, é possível obter as propriedades mecânicas do material ou conjunto de matérias em estudo. Os ensaios mecânicos podem também ter como propósito fazer o controlo qualitativo de um material ou processo. Seguem-se os ensaios mecânicos utilizados no caso dos materiais compósitos e estruturas *sandwich*.

2.2.1 Ensaios de tração

O ensaio de tração (Figura 25) é um dos testes mais usados para avaliar materiais. Na sua forma mais simples, o ensaio de tração é realizado segurando as extremidades opostas de um provete dentro da estrutura de carga de uma máquina de teste. Posteriormente, é aplicada uma força de tração pela máquina, resultando no alongamento gradual e eventual fratura do provete. Durante esse processo, os dados de deslocamento e força são monitorados e registados. Quando realizado adequadamente, o ensaio de tração fornece dados permitem quantificar várias propriedades mecânicas importantes de um material. Essas propriedades mecânicas determinadas a partir de ensaios de tração incluem, entre outras propriedades, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, tensões de cedência e de rotura e propriedades de ductilidade [24, 25].



Figura 25 – Exemplo de um ensaio de tração [26]

Os resultados obtidos nos testes de tração são tipicamente usados para controlo de qualidade na produção, para classificar o desempenho de materiais estruturais, para avaliar ligas recém-desenvolvidas, entre outros aspetos [24]. O princípio básico do ensaio de tração é bastante simples, mas inúmeras variáveis afetam os resultados. As fontes gerais de variação nos resultados dos testes mecânicos incluem vários fatores, como metodologia, fatores humanos, equipamentos e condições ambientais [24]. Para efetuar os ensaios de tração são utilizados provetes que deverão ter diferentes dimensões e geometrias, dependendo do material a ser testado. Usualmente existem normas que especificam a dimensão dos provetes [27].

2.2.2 Ensaios de compressão

A compressão pode ocorrer em uma ampla variedade de aplicações de materiais, como pilares de edifícios e de pontes de betão, bem como no processamento de materiais. Caracterizar a resposta dos material a essas cargas requer testes que medem o comportamento dos materiais quando sujeitos a cargas de compressão [24].

O ensaio de compressão (Figura 26) pode ter vantagens sobre outros métodos de teste. Sendo o ensaio de tração de longe o ensaio mais amplamente desenvolvido e amplamente utilizado para o comportamento do material, e podendo ser usado para determinar todos os aspetos do comportamento mecânico de um material sob cargas de tração, incluindo sua deformação elástica e plástica. Para entender o comportamento de materiais como metais sob grandes deformações plásticas durante o processamento da deformação, é necessário fazer medições além do limite de estrição. Nesse sentido, os ensaios de compressão e torção são abordagens alternativas que superam essa

limitação. Além disso, as amostras utilizadas nos testes de compressão apresentam uma geometria mais simples, não requerem extremidades aumentadas para agarrar e usam menos material do que as amostras para ensaios de tração. Portanto, os ensaios de compressão são frequentemente utilizados para testes em subescala e para componentes, onde amostras provetes com uma geometria muito específica seriam difíceis de obter [24, 27].

Também para caracterizar o comportamento mecânico de materiais anisotrópicos geralmente são utilizados ensaios de compressão. Para materiais policristalinos isotrópicos, o comportamento compressivo é corretamente considerado idêntico ao comportamento à tração em termos de deformação elástica e plástica. No entanto, em materiais altamente texturizados que se deformam por geminação, em oposição ao deslizamento de deslocamento, as características de deformação por compressão e tração diferem amplamente. Da mesma forma, a resistência de materiais compósitos reforçados unidireccionalmente, particularmente ao longo da direção do reforço, é muito diferente na compressão do que na tração [24].

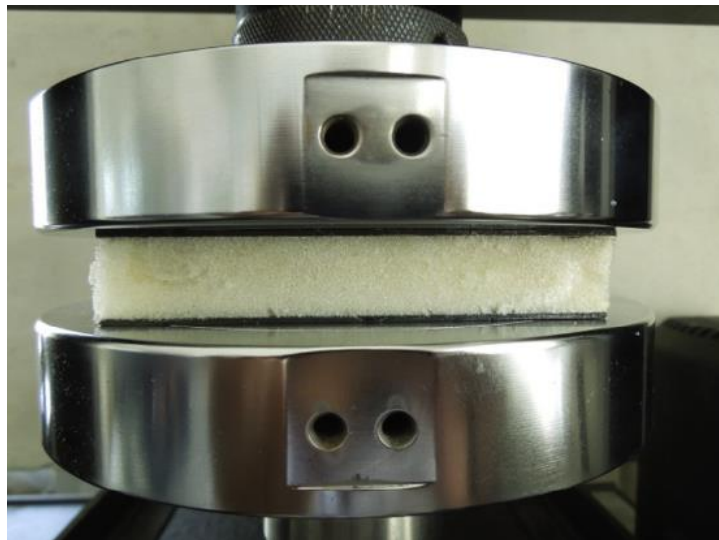


Figura 26 – Exemplo de ensaio de compressão de estrutura *sandwich* [28]

2.2.3 Ensaios de flexão

O comportamento de tensão-deformação dos materiais também pode ser determinado através de testes de flexão. Embora esses testes possam ser realizados em diversos tipos diferentes de materiais, geralmente são usados em materiais frágeis para determinar a tensão e flecha de rotura [27, 29].

Os ensaios de flexão (Figura 27) podem ser realizados em amostras com secções retangulares ou circulares. A amostra pode ser submetida a flexão em três pontos ou em quatro pontos. Uma desvantagem dos testes de flexão é que a magnitude e o tipo de tensão não são constantes na amostra, pois para uma configuração típica, o topo da amostra é submetido a compressão e a parte inferior submetida à tração [27, 29].

Vários fatores podem afetar os resultados dos ensaios de flexão, especialmente em matérias frágeis, como o tipo e velocidade de aplicação da força de ensaio, o comprimento do vão entre apoios e as dimensões da secção transversal do provete [27].



Figura 27 – Exemplo de ensaio de flexão em 3 pontos [30]

2.2.4 Outros tipos de ensaios mecânicos

Para além dos ensaios mencionados existem alguns ensaios mecânicos comumente usados para a obtenção de diferentes propriedades mecânicas, apresentados seguidamente. Os ensaios de torção permitem obter propriedades como o módulo de rigidez, a tensão de cedência à torção e a tensão de rotura, podendo ser efetuados quer a partir de provetes, quer a partir de peças acabadas. Estes ensaios, ao contrário de outros já mencionados, não estão normalizados e raramente são indicados nas especificações sobre as propriedades mecânicas dos materiais [27]. Para avaliar o tipo de rotura existente num material usualmente são utilizados ensaios de tenacidade. Eles utilizam diferentes métodos em função do tipo de solicitação. No caso de uma solicitação dinâmica, utilizam-se tipicamente ensaios de choque Charpy e Izod. Já no caso de solicitações de carácter quase estático, utilizam-se metodologias desenvolvidas mais recentemente no âmbito da mecânica da fratura [27]. No caso de se pretender avaliar o comportamento de um componente mecânico sujeito a solicitações dinâmicas ou repetitivas são utilizados ensaios de fadiga. Os ciclos aplicados ao longo do ensaio levam a que o material sofra um enfraquecimento progressivo, levando-o a suportar esforços inferiores àqueles que suportaria no caso de ser apenas submetido a forças estáticas [24, 27].

2.3 Ensaios característicos de estruturas *sandwich*

Os ensaios de estruturas *sandwich* existem desde que estas começaram a ser utilizadas como materiais estruturais em aplicações que exigem elevado desempenho. No entanto, o refinamento destes mesmos ensaios é bastante mais recente [31]. Segue-se a apresentação dos ensaios mecânicos mais usados no caso das estruturas *sandwich*.

2.3.1 Ensaio de tração

É importante compreender que quando se trata de materiais compósitos, existem dois objetivos separados e possivelmente distintos ao realizar um teste de materiais. O primeiro é estabelecer propriedades fundamentais do material para uso subsequente com análise estrutural e técnicas de projeto. Essas propriedades, às vezes referidas como 'dados de camada única', são obtidas de compósitos com fibras unidirecionais bem alinhadas carregadas em diferentes direções. Se as fibras estiverem alinhadas na direção de carregamento, isso representa uma condição de teste final onde as tensões desenvolvidas serão mais altas do que é possível com qualquer outra disposição das mesmas fibras. Por outro lado, se as fibras estiverem orientadas a 90° relativamente à direção de carregamento, corresponde a direção para a qual o laminado apresenta menor resistência à tração. O segundo objetivo é determinar as propriedades ou investigar o comportamento de uma configuração de empilhamento. Neste caso, tipicamente envolve o ensaio de laminados com fibras dispostas em vários ângulos em relação à direção principal de carregamento [10, 32].

As especificações do provete de teste e os procedimentos de teste são detalhados em várias normas ou guias publicados, sendo as referências mais conhecidas as normas ASTM D3039, BS2782 e ISO 527 e o relatório técnico CRAG [32]. No caso da norma ASTM D3039 [33], esta apresenta várias indicações e recomendações, tais como condições de humidade e temperatura, tamanho da amostra, dimensões (Figura 28) e configurações dos provetes e, naturalmente, o procedimento de ensaio.

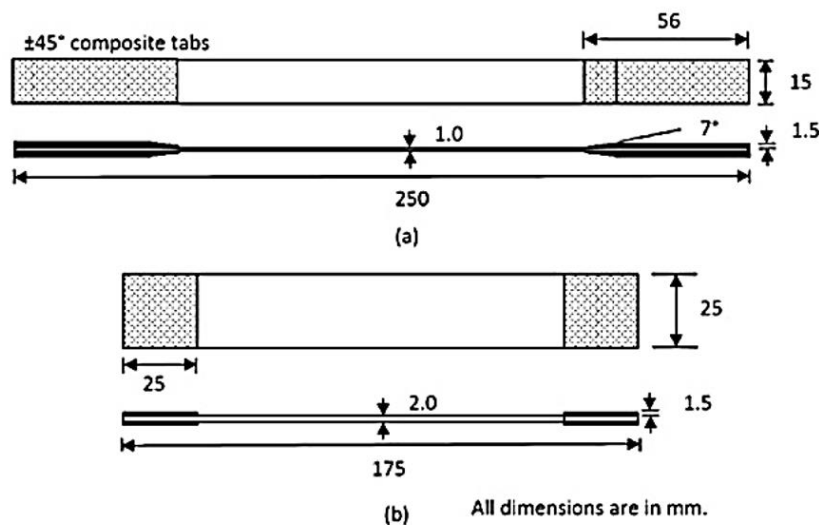


Figura 28 – Provette para ensaio de tração: (a) ASTM D 3039 a 0° (b) ASTM D 3039 a 90° [33]

2.3.2 Ensaio de compressão lateral

O ensaio de compressão lateral tem como finalidade obter os valores relativos à resistência à compressão em painéis *sandwich* carregados uniaxialmente no plano longitudinal, podendo ser efetuado de acordo com a norma ASTM C364 [31, 34].

Este ensaio utiliza um provete de geometria retangular e com pequenas dimensões, obtido a partir de uma placa *sandwich* maior. Relativamente às dimensões (Figura 29), de acordo com a norma ASTM C364, é definida a largura (w), o comprimento (L) e a espessura (h), seguindo os seguintes critérios [34]:

- $L \leq 8h$;
- $5 \text{ cm} \leq w \leq L$;
- $w \geq 2h$ ($w \geq 4 \times$ tamanho da célula, no caso de núcleos em favo de mel).

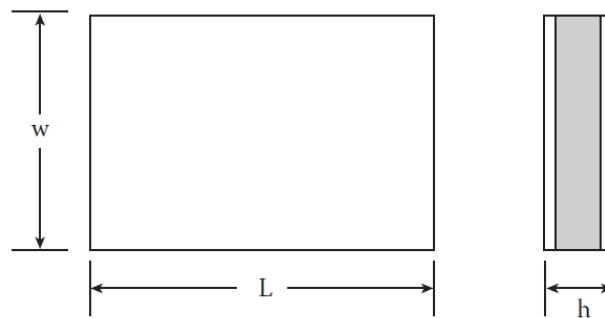


Figura 29 – Dimensões do provete para ensaio de compressão axial (ASTM C364) [31]

O procedimento do teste consiste em posicionar e fixar o provete obtido entre as placas da máquina de teste e posteriormente aplicar uma carga de compressão no provete (Figura 30). A carga deve ser mantida até que ocorra a falha por compressão do provete [31].

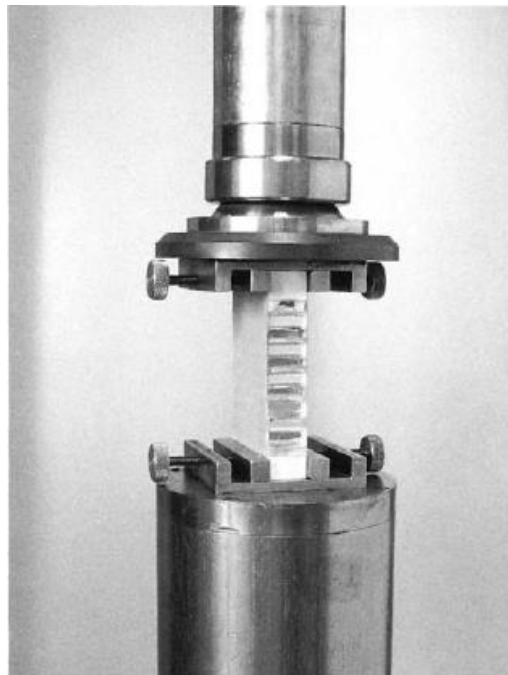


Figura 30 – Exemplo de ensaio de compressão axial de acordo com a norma ASTM C364 [34]

2.3.3 Ensaio de corte do núcleo

A resistência ao corte é uma propriedade bastante importante para os núcleos das estruturas *sandwich*, sendo particularmente relevante para os núcleos com a configuração em favo de mel [35]. Este ensaio fornece informações sobre a resistência máxima ao corte e o módulo de corte (módulo de Kirchhoff). Essas propriedades são extremamente importantes para o projeto de estruturas *sandwich* [31, 35].

O teste pode ser realizado de acordo com a norma ASTM C273 em duas variantes. Na primeira a resistência ao corte é obtida por compressão do núcleo, na segunda por tração. Em ambos os casos, as amostras têm as mesmas dimensões, diferindo apenas o modo de aplicação da força. É possível testar apenas o material do núcleo individualmente, ou estruturas *sandwich* completas. As amostras com largura não inferior a 50 mm e comprimento não inferior a 12 vezes a espessura (normalmente 12,7 mm), devem ser coladas a placas de metal, através das quais é aplicada a solitação do ensaio. Dependendo da orientação do núcleo, é possível obter resistência ao corte na direção longitudinal ou transversal [36]. Na Figura 31 encontra-se uma representação esquemática do ensaio de corte núcleo pela norma ASTM C273.

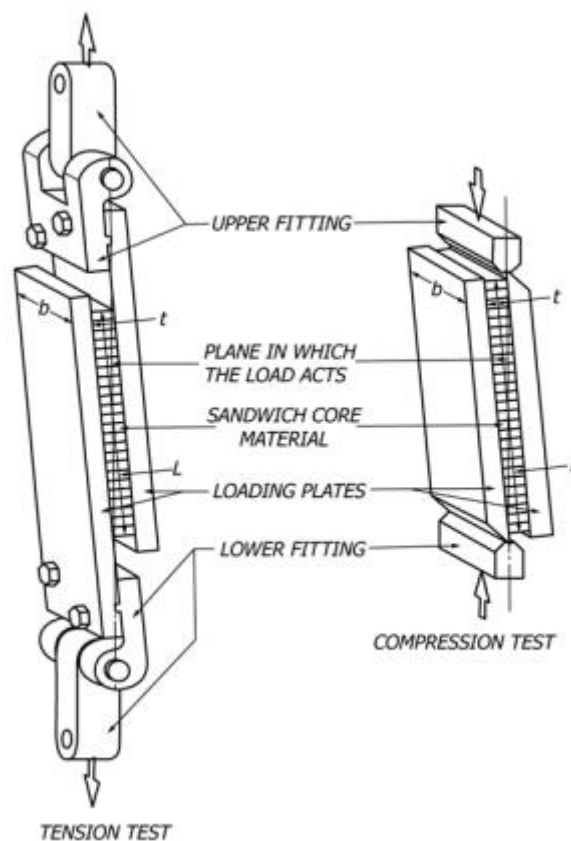


Figura 31 – Exemplo de ensaio de corte núcleo pela norma ASTM C273 [36]

2.3.4 Ensaio de flexão

No caso do ensaio à flexão, a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C393 (2011) transmite indicações para a determinação das propriedades de

corte do núcleo em estruturas *sandwich*. Esta norma aplica-se a núcleos de madeira e espuma, bem como núcleos na configuração favo de mel, podendo ser o ensaio de flexão ser efetuado com 3 ou com 4 pontos de apoio [31, 37] (Figura 32).

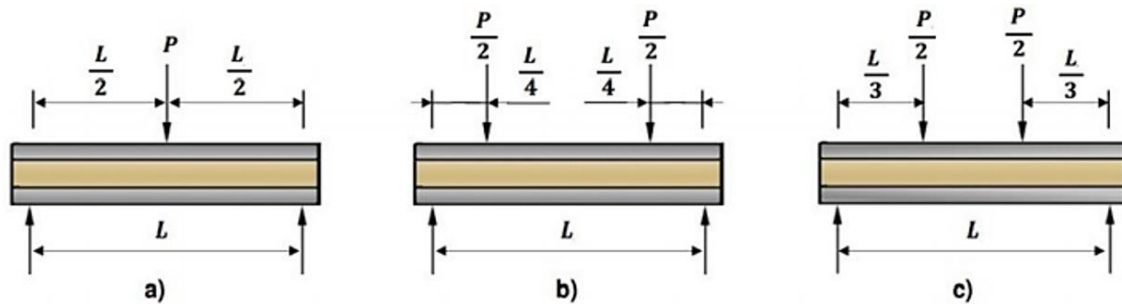


Figura 32 – Ensaio de flexão pela norma ASTM C393: (a) 3 pontos; (b) 4 pontos com carga aplicada a $\frac{1}{4}$ do comprimento; (c) 4 pontos com carga aplicada a $\frac{1}{3}$ do comprimento [38]

O provete padrão é uma barra de 20 cm de comprimento e 7,5 cm de largura com secção transversal retangular. Para amostras fora do padrão, a largura deve estar pelo menos duas vezes superior à altura e não mais do que seis vezes superior, para evitar deformações laterais. Além disso, a largura deve exceder três vezes o tamanho da célula do núcleo e ser inferior à metade do comprimento do vão. O comprimento total do provete deve exceder o comprimento do vão em 5 cm ou metade da espessura total do provete, o que for maior [31, 37].

No caso do ensaio de flexão em 3 pontos de estruturas *sandwich* com peles finas e um núcleo com pouca rigidez, pode ocorrer indentação nas localizações dos contactos dos punções (Figura 33). Para estruturas *sandwich* com núcleo em material que não está a todo o comprimento em contacto com as peles, como por exemplo núcleo em material corrugado, o efeito da indentação poderá ser mais acentuado [31].

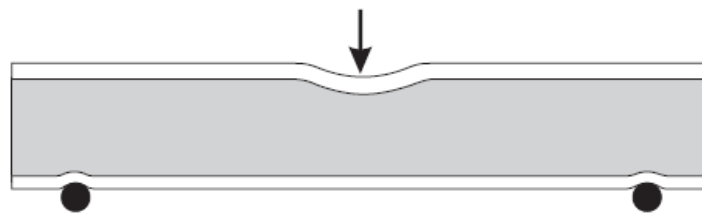


Figura 33 – Indentação em teste de flexão [31]

Na flexão em 3 pontos, tipicamente a indentação no ponto de aplicação da carga é mais severa do que nos apoios, porque essa carga é duas vezes maior do que as cargas do apoio. Se a deformação local for esperada ou detetada em pré-testes, a norma ASTM C393 recomenda colocar almofadas de pressão de borracha de 25 mm de largura e 3 mm de espessura no ponto de contacto entre os punções e a estrutura *sandwich* para distribuir a carga por uma maior área. A norma ASTM C393 também fornece algumas instruções gerais para a seleção de máquinas de teste, fixação e instrumentação e algumas instruções sobre o dispositivo de carregamento de flexão. É procedimento comum o uso de punções cilíndricos de aço com diâmetro de 25 mm nas regiões de

aplicação da carga e nos apoios. O ensaio de flexão para estruturas *sandwich* deve ser realizado a uma velocidade constante de 6 mm/min [31].

2.3.5 Ensaio de compressão do núcleo

O módulo de compressão e a resistência do núcleo são propriedades fundamentais que determinam o tipo de falha que pode ocorrer na estrutura *sandwich* e a resistência a cargas localizadas [31]. A norma ASTM C365 descreve um método de teste bastante utilizado para a obtenção das propriedades mecânicas do núcleo à compressão. O método descrito pode incidir apenas sobre o material do núcleo ou numa estrutura *sandwich*. A amostra para teste deve ter uma secção transversal circular ou quadrada. A área mínima da secção transversal deve ser de pelo menos 625 mm² para núcleos de espuma ou madeira. Já para núcleos em favo de mel com tamanho de célula abaixo de 6 mm, a área da secção transversal deve ser pelo menos de 2500 mm². Para células de dimensões superior a 6 mm, a área deve ser pelo menos 5625 mm². Para evitar o esmagamento das extremidades dos núcleos em favo de mel, as extremidades devem ser reforçadas [39].

A amostra deve ser comprimida entre duas placas paralelas (Figura 34) a uma velocidade de 0,5 mm/min. As placas de carga devem ser automaticamente alinhadas por meio de uma junta esférica, para promover uma distribuição uniforme da tensão de compressão nas superfícies das extremidades. O deslocamento da amostra durante o carregamento pode ser monitorizado usando um extensómetro encaixado nas extremidades superior e inferior da secção de medição da amostra [33, 39].

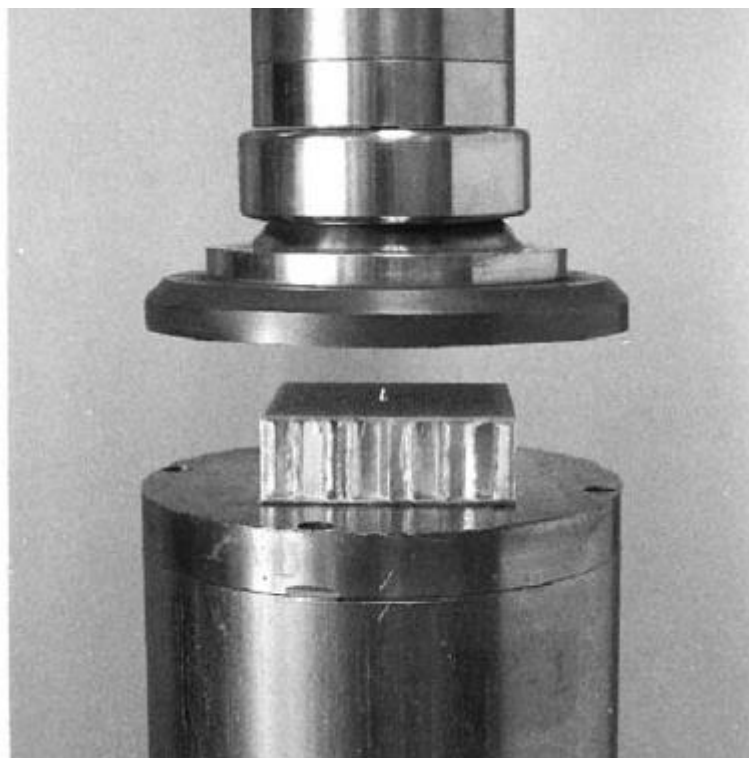


Figura 34 – Exemplo de ensaio de compressão do núcleo pela norma ASTM C365 [39]

2.4 Modelação numérica de estruturas

A aplicação de princípios físicos, como equilíbrio de massa, conservação de energia e equilíbrio, naturalmente resultam em muitas situações de análise de engenharia a equações diferenciais. Vários métodos foram desenvolvidos para obter soluções exatas para várias classes de equações diferenciais. No entanto, esses métodos não se aplicam a muitos problemas práticos, porque as suas equações diferenciais não se enquadram nessas classes ou envolvem geometrias complexas. Encontrar soluções analíticas que também satisfaçam as condições de fronteira especificadas em regiões bidimensionais e tridimensionais arbitrárias torna-se uma tarefa muito difícil. Os métodos numéricos são, portanto, amplamente usados para a solução de problemas práticos em todos os ramos da engenharia [40].

O método dos elementos finitos (MEF) é um dos métodos numéricos para obter solução aproximada de equações diferenciais ordinárias e parciais. É particularmente útil para lidar com condições de contorno definidas em geometrias complexas que são comuns em aplicações práticas. Outros métodos numéricos, como métodos de diferenças finitas e elementos de fronteira, podem ser competitivos ou mesmo superiores ao método dos elementos finitos em alguns casos em particular. No entanto, devido à sua versatilidade em lidar com domínios arbitrários e disponibilidade de software comercial sofisticado de elementos finitos, nas últimas décadas, o método dos elementos finitos tornou-se o método preferido para a solução de muitos problemas práticos [40].

2.4.1 Método de Elementos Finitos aplicado a projeto

O método de elementos finitos foi desenvolvido como um método numérico de análise de tensão, tendo sido posteriormente difundido de forma mais ampla como um método geral de solução para muitos problemas complexos de engenharia e ciências físicas. Nas últimas décadas, o MEF foi desenvolvido como uma tecnologia indispensável na modelação e simulação de vários sistemas de engenharia. No desenvolvimento de um sistema de engenharia avançado, os engenheiros passam por um processo muito rigoroso de modelação, simulação, visualização, análise, projeto, prototipagem, teste e, finalmente, produção. Assim, as técnicas relacionadas à modelação e simulação de forma rápida e eficaz desempenham um papel cada vez mais importante na construção de sistemas avançados de engenharia e, portanto, a aplicação do MEF tem-se propagado rapidamente [41].

O MEF permite analisar diversos tipos de problemas diferentes, podendo, entre outros, tratar de deslocamentos físicos, temperatura, transferência de calor e de velocidade de fluidos. Seguem-se alguns exemplos de aplicação do MEF em diferentes tipos de projetos [42, 43]:

- **Análise estrutural:** é usada para determinar o deslocamento e a tensão sob condições de carregamento estático. Pode-se considerar uma análise linear ou não linear. Uma análise linear assume que o material trabalha no domínio elástico e não ocorre deformação plástica. Quando se pretende avaliar a

deformação plástica recorre-se a modelos não lineares, sendo que as tensões no material variam em função da deformação (Figura 35).

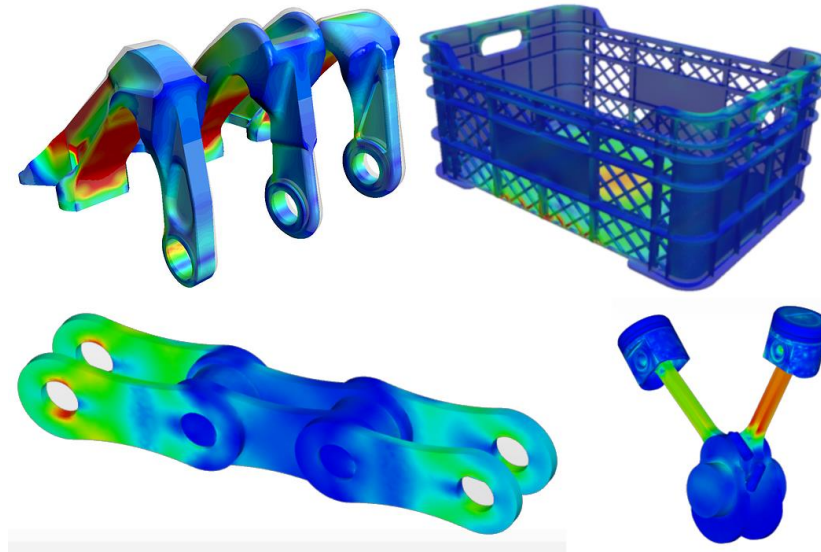


Figura 35 – Exemplos de análise estrutural [44]

- **Análise modal:** é utilizada para avaliar as frequências naturais e formas modais de uma estrutura, podendo ser utilizados diferentes métodos de extração modal para resolver as equações características da estrutura. Esta análise é particularmente importante pois as estruturas tendem a falhar quando uma excitação externa tem uma frequência próxima de uma das suas frequências naturais (Figura 36).

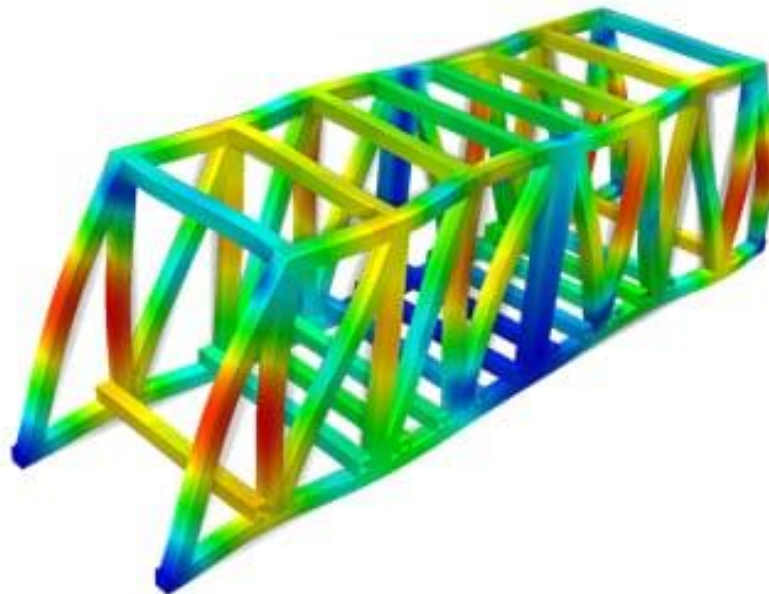


Figura 36 – Exemplo de análise modal [45]

- **Análise de fadiga:** serve para prever a vida útil de uma peça ou componente num modelo, tendo em conta as solicitações cíclicas a que esse componente estará sujeito. A fadiga é responsável por aproximadamente 80% de todas as falhas

estruturais. A simulação prevê a vida à fadiga e o fator de segurança rotura por fadiga (Figura 37).

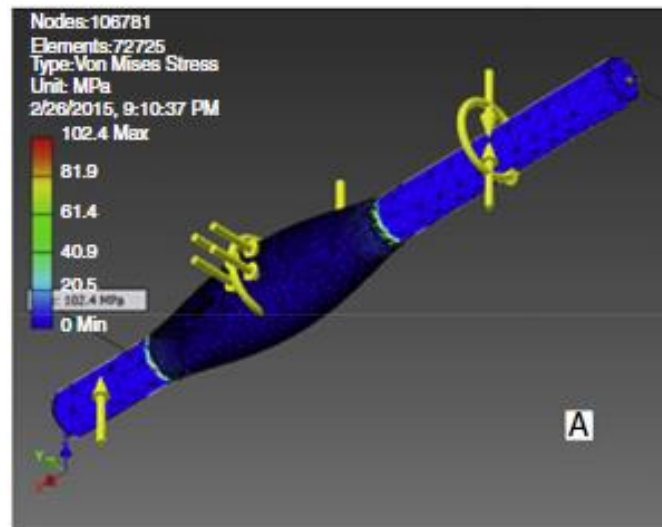


Figura 37 – Exemplo de análise de fadiga [46]

- Análise de transferência de calor: considera os comportamentos de transferência de calor, incluindo condução, convecção e radiação dentro de um sistema definido. Uma análise de transferência de calor pode ser estável ou transitória. A transferência de estado estacionário refere-se a propriedades térmicas constantes que produzem difusão linear de calor, não variando a difusão com o tempo. Em contraste, a transferência transitória de calor diz respeito ao conjunto das mudanças de temperatura. Uma análise de transferência de calor também pode ser executada num modelo não linear que envolve tempo, radiação e/ou alteração das propriedades térmicas no material ou por convecção (Figura 38).

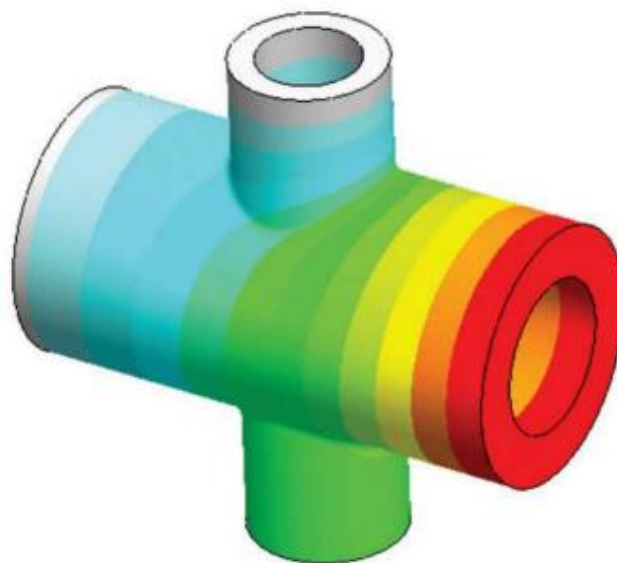


Figura 38 – Exemplo de análise de transferência de calor [47]

- **Análise de processo de fabrico:** esta análise avalia a resposta de materiais em processos de formação, como por exemplo, processos de maquinagem (Figura 39), injeção, forjamento e deformação (Figura 40). Este tipo de análise envolve a mudança geométrica de um objeto, sendo a deformação nos materiais dominada pela deformação plástica. As propriedades não lineares dos materiais devem ser definidas e o processo de análise é principalmente transitório, uma vez que o estado dos materiais, incluindo a geometria, muda com o tempo. Essa análise requer um esforço computacional elevado.

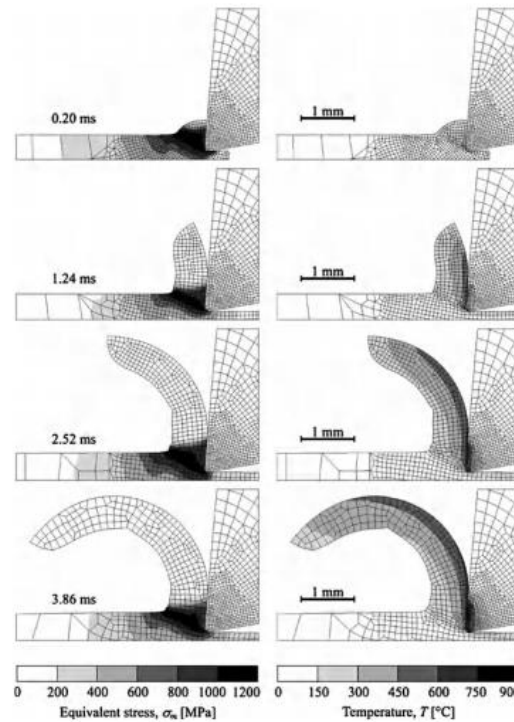


Figura 39 – Exemplo de análise de processo de fabrico (arranque de apara) [48]

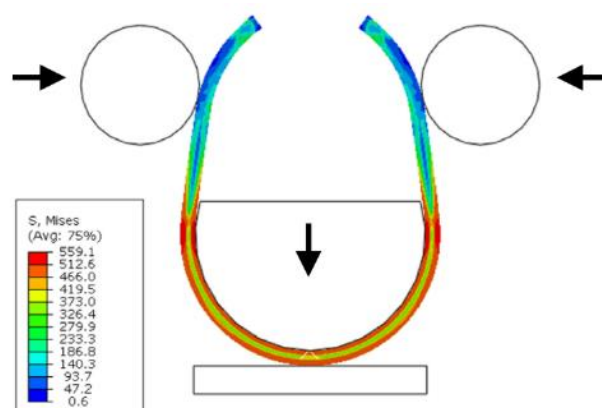


Figura 40 – Exemplo de análise de processo de fabrico (dobragem de tubos) [49]

- **Análise de fluxo:** serve para simular o fluxo de líquido ou gás em condições reais. Esta análise prevê a distribuição de pressão e velocidade sob cargas externas. Tomando um exemplo de projeto de um automóvel, uma simulação de fluxo pode ser usada para determinar a força de arrasto pelo fluxo de ar. Como

resultado, o formato do corpo pode ser otimizado para melhorar a eficiência aerodinâmica e assim melhorar o desempenho do ponto de vista da estabilidade, velocidade máxima e consumo de combustível. Na Figura 41 observa-se um exemplo de análise de fluxo.

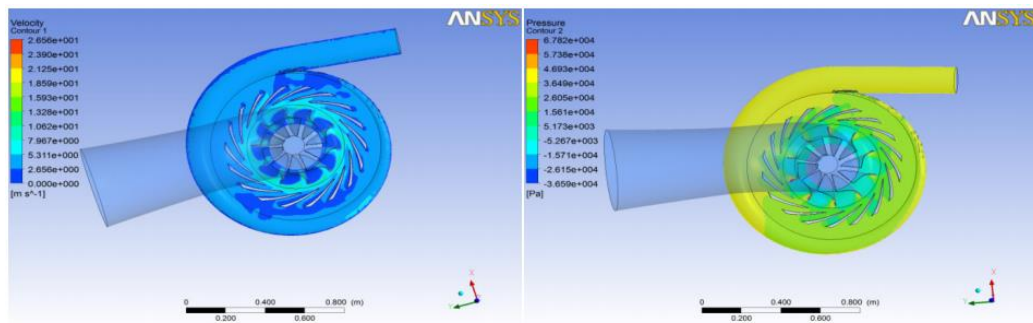


Figura 41 – Exemplo de análise de fluxo (turbina) [50]

- **Análise do modo de falha:** consiste na determinação da falha que ocorre numa peça, componente ou estrutura. Nem todas as falhas de design podem ser eliminadas com sucesso durante o desenvolvimento do produto. Algo especialmente verdadeiro para produtos produzidos em pequenas séries, dado que é impraticável e tem custos proibitivos, especialmente para empresas de menores dimensões, a realização de um processo de verificação e validação completo para todos os novos produtos. Neste caso, o MEF pode ser usado como uma ferramenta de diagnóstico para identificar possíveis falhas de projeto quando ocorrem falhas em produtos.

2.4.2 Projeto de estruturas compósitas e *sandwich*

Como qualquer componente mecânico, os componentes em matérias compósitos devem ir de encontro as especificações definidas. Além disso, o projeto de estruturas compósitas tem em si um conjunto mais abrangente de tarefas, dado que é necessário definir o reforço, a matriz e o processo de fabrico do componente. Em componentes feitos de um material isotrópico, o projetista tem apenas de efetuar a seleção do material e dimensionar a peça [3]. Assim, no caso do projeto de estruturas *sandwich* usualmente ocorrem os sete passos a seguir detalhados [51]:

1. Criação das especificações:

Um componente em material compósito pode ser um componente independente ou parte de uma estrutura maior. No caso dos componentes independentes, ou seja, um componente que tem um uso final próprio, as especificações de design são obtidas diretamente das necessidades dos consumidores. Por exemplo, uma embarcação de recreio totalmente produzida em material compósito será projetada para especificações de acordo com o gosto e preferência dos consumidores. Por outro lado, um grande número de produtos compósitos são usados como peças ou subconjuntos de outras estruturas maiores. Nestes casos, as especificações dos produtos compósitos são ditadas pelas especificações da estrutura geral. Um exemplo disso é o leme de

uma aeronave, que é uma parte crítica que pode ser projetada com materiais compósitos, cujas especificações resultam das especificações gerais da aeronave. Claramente, as especificações de projeto de um produto derivam da sua necessidade básica e das cargas estruturais e ambientais às quais este provavelmente estará sujeito durante a sua vida útil. Assim, as especificações de projeto são tipicamente especificações geométricas, funcionais e estruturais.

2. Seleção do material: é uma tarefa crítica em qualquer exercício de projeto estrutural, sendo ainda mais relevante em estruturas compósitas devido à complexidade adicional associada à combinação de diferentes materiais.

No caso das estruturas compósitas é feita a seleção do material de reforço, incluindo a sua configuração, e da sua matriz. Quando se fala de estruturas *sandwich* a complexidade aumenta pois é ainda necessário efetuar a seleção do material do núcleo e do adesivo de ligação do núcleo aos laminados.

Naturalmente, para a seleção dos materiais constituintes são tidos em conta diversos fatores em função das especificações do componente, como as propriedades mecânicas, densidade, dilatação térmica, condutividade térmica, condutividade elétrica, resistência ao desgaste, resistência ao fogo, métodos de processamento e, naturalmente, custo.

3. Definição da geometria: este processo resulta na seleção da forma e tamanho da estrutura, envolvendo a escolha do tipo de elementos estruturais e das ligações quando se está a falar de conjuntos.

Os elementos mais comumente utilizados no projeto de estruturas compósitas são haste, coluna, viga, placa e casca, podendo também ser utilizados outro tipo de sólidos. Podem também ser utilizados elementos estruturais mais complexos, que são essencialmente variações dos elementos básicos mencionados. Além disso, em muitas aplicações estruturais com requisitos de alta rigidez ou respeitantes à condutividade térmica são utilizadas estruturas *sandwich*.

Deste processo, normalmente, resulta a definição da forma inicial da estrutura e o a sua dimensão, assim como os elementos estruturais a utilizar. A forma e o tamanho de cada elemento são escolhidos por meio de um processo iterativo que envolve cálculo e seleção, e a estrutura final é obtida como um conjunto de vários elementos estruturais.

4. Análise da estrutura: serve para perceber qual o comportamento da estrutura relativamente às solicitações que irá sofrer durante o seu tempo de vida. Esta análise estrutural pode ser estática, dinâmica, de estabilidade ou térmica. A análise estrutural é feita em diferentes níveis de detalhes, sob diferentes tipos de cargas e com diferentes objetivos. Usualmente recorre-se à modelação pelo MEF para a análise de qualquer estrutura da vida real. No entanto, pode-se notar que cálculos manuais simples, especialmente para elementos estruturais básicos, ainda desempenham um papel importante.

5. Seleção do processo de fabrico: é um aspeto crítico numa estrutura compósita e deve ser tida em consideração durante a fase de projeto. Esta escolha está dependente de várias variáveis, como a forma e tamanho do componente, necessidade e disponibilidade de mão de obra qualificada para determinado

método, tamanho da série, possibilidade de automatização, confiabilidade e repetibilidade do processo, requisitos estruturais, tempo de ciclo e custo.

6. Testagem e avaliação não destrutiva: também esta etapa deve ser tida em conta durante a fase de projeto. Num projeto de desenvolvimento de produto são conduzidos testes em materiais tanto para a obtenção de dados de projeto como para fins de controlo de qualidade em processo. Os testes também devem ser feitos ao produto para aprovação final.
7. Projeto dos laminados e das uniões: é uma das tarefas de maior importância no projeto de estruturas compósitas.

Sendo um laminado um elemento estrutural composto em camadas feito por uma série de empilhamentos, a orientação e sequência desses mesmos empilhamentos define a resposta estrutural do laminado às cargas. Outra variável de fundamental importância é a fração do volume da fibra, que depende principalmente do processo de produção adotado.

2.4.3 Modos de falha de estruturas compósitas e *sandwich*

Os materiais compósitos poliméricos avançados estão sujeitos a um grande número de tipos de defeitos e danos. Esses defeitos e tipos de danos emanam dos processos de fabrico do material constituinte, da produção do componente compósito e do uso em serviço do componente compósito. Os defeitos devido ao uso em serviço podem ser generalizados ainda como fissuras transversais da matriz, delaminações e quebras nas fibras. Os modos de falha em estruturas *sandwich* são numerosos e podem ser influenciados por muitos fatores. Em laminados multidirecionais, a previsão dos modos de falha é muito difícil e geralmente ocorre uma combinação de vários modos de falha unidirecionais sob os vários espectros de carregamento. Na maioria dos casos, o modo de falha é determinado pelo exame posterior da superfície da fratura [52].

Estão identificados à volta de cinquenta tipos de defeitos distintos aos quais as estruturas compósitas estão sujeitas. Estes variam de falhas microscópicas de fibra até grandes falhas perceptíveis a olho nu [52]. Um exemplo de defeitos que podem ocorrer nas estruturas *sandwich* são as indentações (Figura 42).

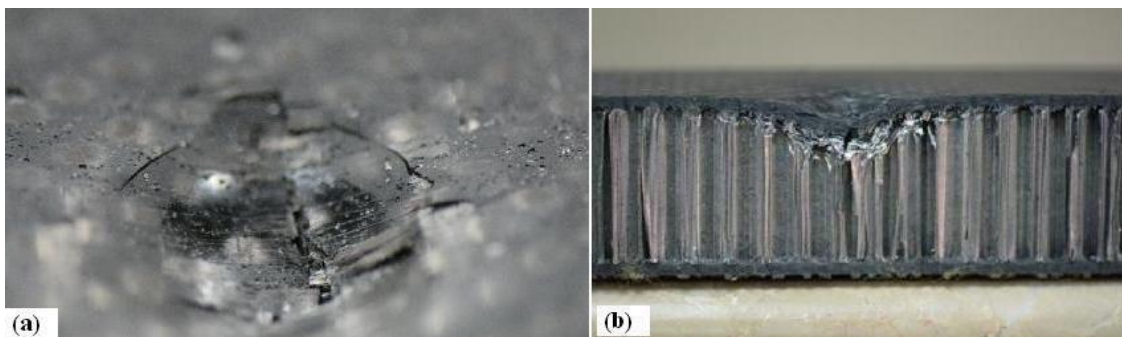


Figura 42 – Indentação de painel *sandwich* após teste de indentação quase estática mostrando (a) quebra de fibra e rachaduras no laminado (b) esmagamento do núcleo [53]

2.4.4 Modelação do dano e rotura

Sendo uma estrutura *sandwich* um combinado de vários materiais, para fazer uma correta modelação da sua estrutura é necessário considerar diferentes modelos e modos de falha, que devem ser adequados a cada um dos materiais utilizados. Neste capítulo são abordados diferentes modos de modelação do dano e da rotura para os constituintes das estruturas *sandwich*.

- **Critério de Tsai-Wu:** é um critério de falha utilizado para os laminados de material compósitos. Este critério de falha é baseado na tensão e assume valores maiores ou iguais a 0.0, sendo que valores maiores ou iguais a 1.0 implicam a falha do material. O critério considera duas direções para o caso de materiais ortotrópicos, sendo a direção 1 a direção do alinhamento das fibras e a direção 2 a direção transversal ao alinhamento das fibras [54, 55]. O critério de Tsai-Wu requer a seguinte condição [54]:

$$I_F = F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} < 1.0, \quad (1)$$

sendo os coeficientes do critério de Tsai-Wu os seguintes:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}, F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}, F_{11} = -\frac{1}{(X_t X_c)}, \\ F_{22} &= -\frac{1}{(Y_t Y_c)}, F_{66} = \frac{1}{S_p^2}, F_{12} = f^* \sqrt{(F_1 F_2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

O valor de f^* é compreendido entre 0 e 1, inclusive, sendo 0 o valor padrão. X_t , X_c , Y_t , Y_c e S_p são, respetivamente, limite de tensão à tração na direção das fibras, limite de tensão à compressão na direção das fibras, limite de tensão à tração na direção transversal às fibras, limite de tensão à compressão na direção transversal às fibras e resistência máxima ao corte no plano X-Y [54].

- **Crushable foam:** é um modelo utilizado para espumas, que são um material que apresenta baixa rigidez. Este modelo pode ser utilizado com dois tipos de endurecimento diferente. Pode ser considerado endurecimento volumétrico, no qual é utilizada uma superfície de escoamento com uma dependência elíptica da tensão desviante na tensão de pressão e assume que a evolução da superfície de cedência é controlada pela deformação plástica de compactação volumétrica sofrida pelo material. O outro método de endurecimento é o isotrópico, que considera uma superfície de escoamento que é uma elipse centrada na origem no plano de tensão $p - q$ (Figura 43). A superfície de escoamento evolui de maneira autossemelhante, sendo a evolução regulada pela deformação plástica equivalente [54]. A superfície de cedência para o modelo de endurecimento isotrópico é definida como [54]:

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2 p^2} - B = 0 \quad (3)$$

sendo:

$$p = -\frac{1}{3} \text{traço } \sigma, \text{ tensão de pressão} \quad (4)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} S : S}, \text{ tensão de Mises} \quad (5)$$

$$S = \sigma + pI, \text{ tensão desviante} \quad (6)$$

$$B = \alpha p_c = \sigma_c \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2}, \text{ comprimento do eixo } q \text{ da elipse de cedência.} \quad (7)$$

α é o fator de forma da elipse de cedência que define a magnitude relativa dos eixos; p_c é a tensão de cedência em compressão hidrostática e σ_c é o valor absoluto de tensão de cedência em pressão uniaxial.

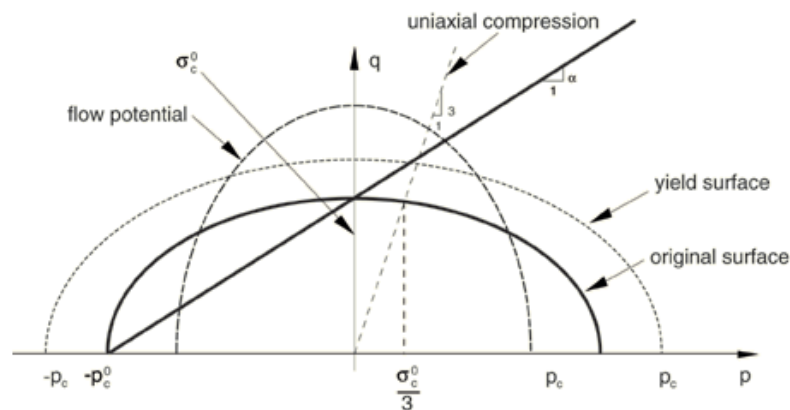


Figura 43 – Modelo de *crushable foam* com endurecimento isotrópico: superfície de cedência e potencial de fluxo no plano de tensão p-q [54]

Relativamente a estudos já efetuados quanto à modelação de estruturas *sandwich*, foi possível identificar dois particularmente interessantes: *Behaviour of PU-foam/glass-fibre composite sandwich panels under flexural static load* [56] e *Experimental, Theoretical and Numerical Investigation of the Flexural Behaviour of the Composite Sandwich Panels with PVC Foam Core* [55]. Em ambos os estudos o material das peles foi modelado com elementos de casca contínuos (SC8R) e o material do núcleo como elementos sólidos contínuos (C3D8R). As peles foram modeladas como um material bi-linear elástico e o núcleo com o modelo plástico de *Crushable Foam* com endurecimento isotrópico. A interação entre as superfícies de contacto foi modelada com recurso a interação do tipo *surface-to-surface*. Para a ligação entre as peles e o núcleo, as peles foram consideradas a *master surface* e o núcleo a *slave surface*. A interação entre as peles e o núcleo foi modelada usando a interação de propriedade coesiva para definir o comportamento de descolamento entre as duas superfícies coincidentes.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

- 3.1.1 Configurações *sandwich* testadas
- 3.1.2 Materiais utilizados
- 3.1.3 Geometria das estruturas *sandwich*
- 3.1.4 Processo de fabrico
- 3.1.5 Ensaio de compressão do núcleo
- 3.1.6 Ensaio de flexão
- 3.1.7 Resultados obtidos

3.2 Trabalho numérico

- 3.2.1 Condições da análise numérica
- 3.2.2 Modelo de dano triangular
- 3.2.3 Análise de tensões das estruturas *sandwich*
- 3.2.4 Previsão da resistência
- 3.2.5 Análise dos resultados obtidos

3 DESENVOLVIMENTO

No capítulo referente ao desenvolvimento é feita a divisão entre o trabalho experimental e o trabalho numérico. Na parte experimental serão abordados os materiais utilizados, o processamento dos painéis *sandwich* e a obtenção dos resultados. Na parte relativa ao trabalho numérico serão abordados os modelos utilizados para a modelação pelo método dos elementos finitos com recurso ao *software* Abaqus.

3.1 Trabalho experimental

3.1.1 Configurações *sandwich* testadas

Neste trabalho foram consideradas três configurações diferentes, tendo sido utilizadas as mesmas matérias primas em todas elas. As únicas diferenças induzidas foram ao nível da sequência de empilhamento das peles e da espessura do núcleo, sendo as peles compostas de um pré-impregnado de fibras de carbono e resina epóxico e o núcleo num bloco de espuma de poliuretano.

Tabela 1 – Configurações *sandwich* testadas

| Configuração | Peles | Sequência de empilhamento das peles | Adesivo | Núcleo |
|--------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| A | Pré-impregnado HS 160 REM | $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ | SikaForce®- 7710 L100 | PUR, espessura 10 mm |
| B | Pré-impregnado HS 160 REM | $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ | SikaForce®- 7710 L100 | PUR, espessura 15 mm |
| C | Pré-impregnado HS 160 REM | $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ | SikaForce®- 7710 L100 | PUR, espessura 15 mm |

3.1.2 Materiais utilizados

3.1.2.1 Núcleos

Para material de núcleo, foi utilizada uma espuma de poliuretano (PUR) rígido, cuja principal aplicação é o uso para isolamento térmico.

Na Tabela 2 apresentam-se as propriedades da espuma de poliuretano utilizada.

Tabela 2 – Propriedades da espuma de poliuretano

| Propriedade | Valor |
|---|----------------------|
| Densidade | 40 Kg/m ³ |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 |
| Módulo de elasticidade longitudinal | 7,5 MPa |
| Resistência à compressão // (ASTM D 1621) | 294,2 kPa |
| Resistência à compressão ⊥ (ASTM D 1621) | 176,5 kPa |
| Resistência à tração // (ASTM D 1623) | 441,3 kPa |
| Resistência à tração ⊥ (ASTM D 1623) | 294,2 kPa |

3.1.2.2 Peles

Para as peles, foi utilizado um pré-impregnado unidirecional de alta resistência, formado por fibras de carbono e matriz de resina epóxida. Este compósito é produzido pela CIT com o nome comercial HS 160 REM [57] (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades de uma camada de pré-impregnado CIT HS 160 REM na direção das fibras [57]

| Propriedade | Valor |
|-------------------------------------|----------------------|
| Quantidade de fibra | 60% |
| Módulo de elasticidade longitudinal | 136 GPa |
| Resistência à tração | 2549 MPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,34 |
| Módulo à flexão | 149 GPa |
| Resistência à flexão | 2063 MPa |
| Tensão de corte interlaminar | 81,5 MPa |
| Resistência ao impacto (Charpy) | 800 J/m ² |

3.1.2.3 Adesivos

Como adesivo foi utilizado o SikaForce®-7710 L100. Trata-se de um adesivo bi-componente com base de poliuretano, apresentado pelo fabricante como um adesivo para painéis de *sandwich* de uso geral, estando as suas propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 4. Este adesivo tem como principais vantagens a cura à temperatura ambiente, ser isento de solventes e um tempo de abertura longo conjugado com um tempo de prensagem curto, sendo indicado para colagem de metais, madeira, fibra de vidro e fibrocimento a espuma de poliuretano ou poliestireno e lã de rocha no fabrico de painéis *sandwich* ou de outro tipo de tipologias [58].

Tabela 4 – Propriedades mecânicas aproximadas SikaForce®-7710 L100 [58]

| Propriedade | Valor |
|-----------------------------|--------|
| Dureza Shore D | 80 D |
| Resistência à tração | 13 MPa |
| Alongamento à rotura | 8% |
| Resistência ao arrancamento | 9 MPa |

3.1.3 Geometria das estruturas *sandwich*

Para a realização dos ensaios foram produzidos painéis *sandwich* com uma área de 300×300 mm², que foram posteriormente cortados para produzir provetes com uma largura de 30 mm. Segue-se uma representação esquemática das 3 configurações utilizadas (Figura 44).



Figura 44 – Configurações dos painéis *sandwich* testados

3.1.4 Processo de fabrico

A produção dos provetes pode ser dividida em duas fases. Na primeira fase são produzidas as peles na segunda fase é feita a adesão das peles ao núcleo. Será também retratada a obtenção dos provetes a partir da placa de *sandwich*. Em todas as configurações foi utilizado o mesmo processo produtivo.

3.1.4.1 Produção das peles

As peles, constituídas por empilhamento de pré-impregnados de fibra de carbono e curadas numa prensa de pratos quentes, foram obtidas através dos seguintes passos:

1. Cortar o pré-impregnado em camadas com formato quadrangular de 300×300 mm², a partir do rolo no qual se encontra armazenado (Figura 45);

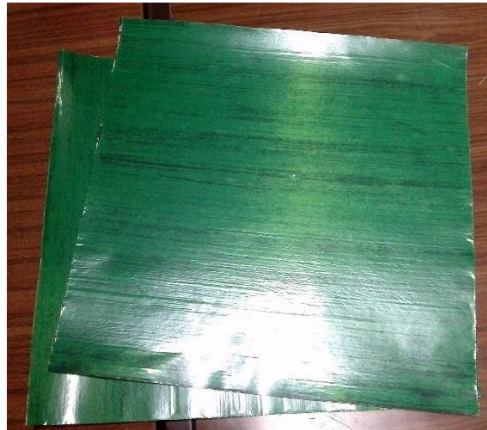


Figura 45 – Camadas de pré-impregnado cortadas nas dimensões finais (300×300 mm²)

2. Remover o filme protetor do lado da camada que se pretende colar e efetuar o empilhamento de acordo com a sequência designada. Prosseguir este processo até a sequência de empilhamento ficar concluída (Figura 46). Durante o empilhamento pode ser necessário recorrer a um rolo para eliminar eventuais bolhas de ar que possam aparecer entre camadas;



Figura 46 – Colagem das camadas de pré-impregnado

3. Após a elaboração de cada um dos empilhamentos, dividir as diferentes peles com uma camada de *peel ply* (Figura 47) de modo a permitir a realização de várias peles em simultâneo. Também as superfícies exteriores do conjunto devem ser revestidas com uma camada de *peel ply* para facilitar a desmoldação após a prensagem;



Figura 47 – Rolo de *peel ply*

4. Colocar as peles, já com as camadas de *peel ply* previamente aplicadas, na prensa de pratos quentes (Figura 48). Para a compactação das peles foi utilizado o ciclo presente na Tabela 5;

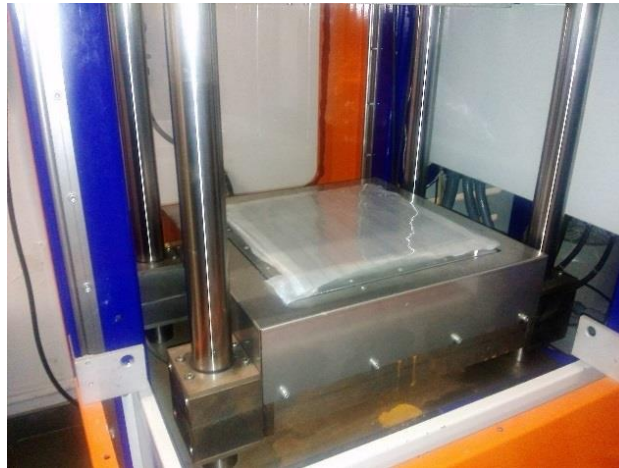


Figura 48 – Colocação das peles na prensa de pratos quentes

Tabela 5 – Ciclo para compactação das peles na prensa de pratos quentes

| Temperatura (°C) | Força (toneladas) | Tempo (minutos) |
|------------------|-------------------|-----------------|
| 25 | 0 | 3 |
| 125 | 0 | 35 |
| 125 | 5 | 60 |
| 70 | 5 | 20 |
| 25 | 1 | 3 |

5. Após o ciclo de cura, retirar as peles da prensa e fazer a separação (Figura 49). A separação ocorre pelas camadas de *peel ply* anteriormente colocadas.



Figura 49 – Peles de pré-impregnado de fibra de carbono após cura

3.1.4.2 Adesão das peles ao núcleo

Este processo consiste em fazer a junção das peles previamente preparadas ao núcleo, através de um adesivo estrutural bi-composto. Inclui-se a preparação do adesivo e consequentes etapas para realizar a adesão, sendo o processo final na obtenção do painel sandwich.

1. Preparar o adesivo. Sendo o adesivo utilizado um bi-componente, existe a necessidade de anteriormente, à utilização do adesivo, efetuar a sua mistura. Esta mistura, entre “componente A” e “componente B” (Figura 50), deve ser feita com uma relação de peso de 100:19, como descrito na ficha técnica do fabricante;



Figura 50 – Adesivo SikaForce 7710 L100 e catalisador SikaForce 7010

2. Impregnar as peles com a mistura de adesivo preparada, de forma uniforme e com o auxílio de uma espátula (Figura 51);

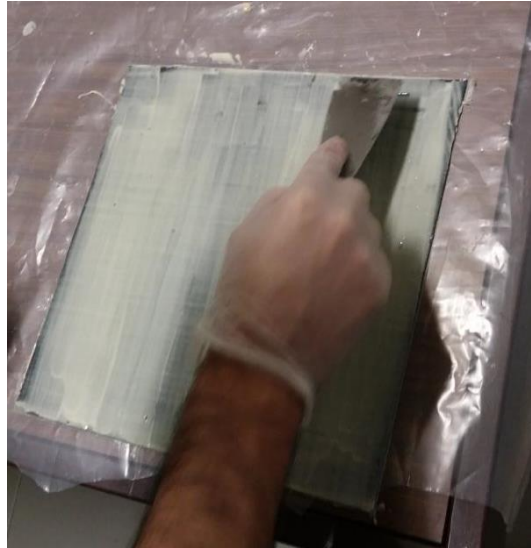


Figura 51 – Impregnação das peles com adesivo

3. Efetuar a junção das peles ao núcleo, aplicando uma ligeira pressão manual de modo a espalhar corretamente o adesivo (Figura 52);



Figura 52 – Junção das peles ao núcleo

4. Colocar o painel *sandwich* na prensa de pratos quentes e utilizar espaçadores para impedir que a pressão exercida não comprima em demasia o núcleo (Figura 53);

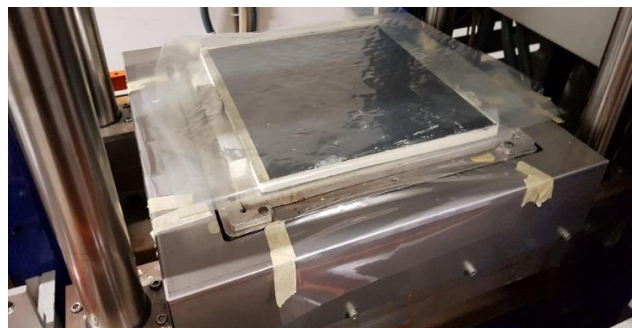


Figura 53 – Colocação do painel *sandwich* na prensa de pratos quentes com espaçadores

5. Aplicar o ciclo presente na Tabela 6 para efetuar a cura do adesivo. De notar que os espaçadores suportam parte da carga induzida pela prensa.

Tabela 6 – Ciclo para compactação do painel *sandwich* na prensa de pratos quentes

| Temperatura (°C) | Força (toneladas) | Tempo (minutos) |
|------------------|-------------------|-----------------|
| 40 | 1 | 3 |
| 70 | 1 | 20 |
| 45 | 1 | 15 |

3.1.4.3 Obtenção dos provetes

Com vista à obtenção dos provetes nas dimensões pretendidas para os ensaios de flexão, forem executados os seguintes passos.

1. Colocação na mesa de uma serra elétrica e, cuidadosamente, executar o corte dos provetes na dimensão pretendida (Figura 54);



Figura 54 – Corte dos provetes com uma serra elétrica

2. Com o auxílio de um paquímetro, efetuar medições dos provetes em 3 diferentes pontos ao longo do seu comprimento e registar (Figura 55) o valor médio para cada um deles (Tabela 7).

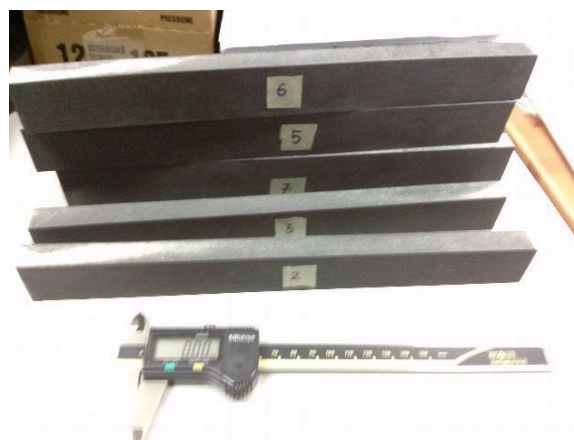


Figura 55 – Medição e numeração dos provetes

Tabela 7 – Valores médios de espessura e largura dos provetes para as diferentes configurações

| Provete | Configuração A | | Configuração B | | Configuração C | |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Largura (mm) | Espessura (mm) | Largura (mm) | Espessura (mm) | Largura (mm) | Espessura (mm) |
| 1 | 22,76 | 11,41 | 34,2 | 15,3 | 31,13 | 15,67 |
| 2 | 22,50 | 11,43 | 34,4 | 15,7 | 31,30 | 15,78 |
| 3 | 22,76 | 11,38 | 32,6 | 15,6 | 29,79 | 15,79 |
| 4 | 22,74 | 11,45 | 32,4 | 15,7 | 31,33 | 15,66 |
| 5 | 22,27 | 11,46 | - | - | 31,54 | 15,61 |
| 6 | 22,62 | 11,49 | - | - | 31,29 | 15,70 |

De notar que para a configuração B não foi possível obter o mesmo número de provetes que para as outras duas configurações devido a defeitos existentes na placa *sandwich*.

3.1.5 Ensaio de compressão do núcleo

Para caracterizar o núcleo quanto à compressão, efetuaram-se ensaios de compressão de acordo com a norma ASTM C365. Estes ensaios foram efetuados com uma velocidade de 0,5 mm / min em três provetes com as dimensões identificadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Dimensões dos provetes para ensaio de compressão do núcleo

| Provete | Altura (mm) | Largura (mm) | Espessura (mm) |
|---------|-------------|--------------|----------------|
| 1 | 14,86 | 31,35 | 29,97 |
| 2 | 14,83 | 31,47 | 30,33 |
| 3 | 14,82 | 31,26 | 30,75 |

Após a execução do ensaio foi possível obter as curvas de força – deslocamento ($P-\delta$) que se apresentam na Figura 56.

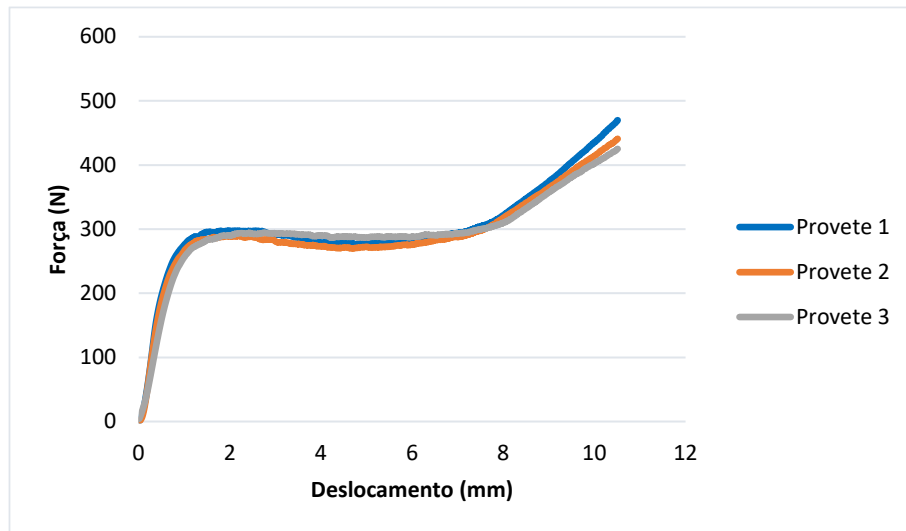


Figura 56 – Curvas $P-\delta$ resultantes do ensaio de compressão do núcleo

3.1.6 Ensaios de flexão

As configurações de painéis *sandwich* foram testadas à flexão em 3 e 4 pontos de acordo com a norma ASTM C393.

3.1.6.1 Flexão em 3 pontos

No ensaio de flexão em 3 pontos foram utilizados diferentes parâmetros para cada uma das configurações testadas, que estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros do ensaio à flexão em 3 pontos

| Parâmetro | Configuração A | Configuração B | Configuração C |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Velocidade (mm / min) | 5 | 3 | 3 |
| Distância entre apoios (mm) | 250 | 250 | 270 |

A dimensão da distância entre apoios (S) entre apoios está indicada na Figura 57.

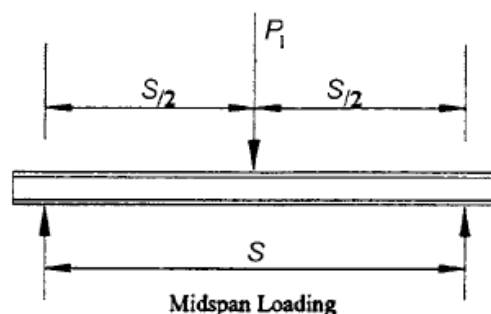


Figura 57 – Dimensão entre apoios no ensaio de flexão em 3 pontos [37]

A configuração do ensaio pode ser observada na Figura 58.

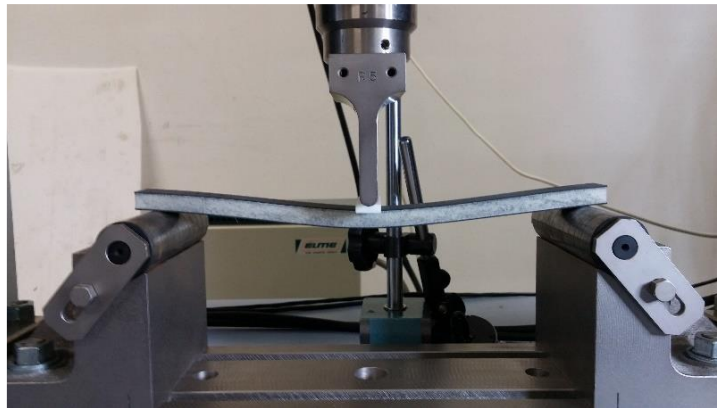


Figura 58 – Configuração do ensaio de flexão em 3 pontos

No ensaio de flexão em 3 pontos foram testados dois provetes para a configuração A e B e três provetes para a configuração C.

3.1.6.2 Flexão em 4 pontos

Também no ensaio de flexão em 4 pontos foram utilizados diferentes parâmetros para cada uma das configurações testadas (Tabela 10).

Tabela 10 – Parâmetros do ensaio à flexão em 4 pontos

| Parâmetro | Configuração A | Configuração B | Configuração C |
|---|----------------|----------------|----------------|
| Velocidade (mm / min) | 3 | 3 | 3 |
| Distância entre apoios (mm) | 260 | 240 | 270 |
| Distância entre pontos de aplicação da carga (mm) | 130 | 120 | 135 |

O ensaio de flexão em 4 pontos tem como dimensões características a distância entre apoios (S) e a distância entre pontos de aplicação da carga ($S/4$) (Figura 59).

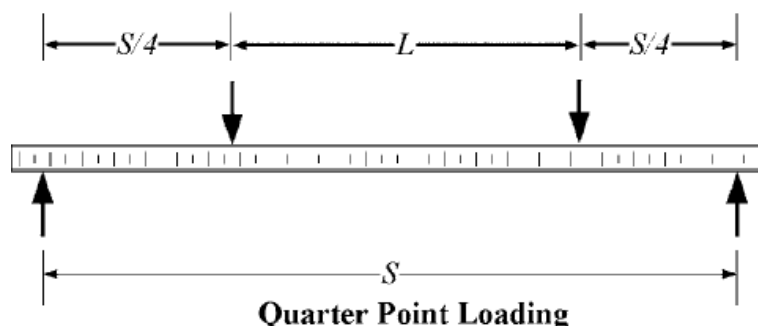


Figura 59 – Dimensões características no ensaio de flexão em 4 pontos [37]

Na Figura 60 observa-se a configuração do ensaio de flexão em 4 pontos.

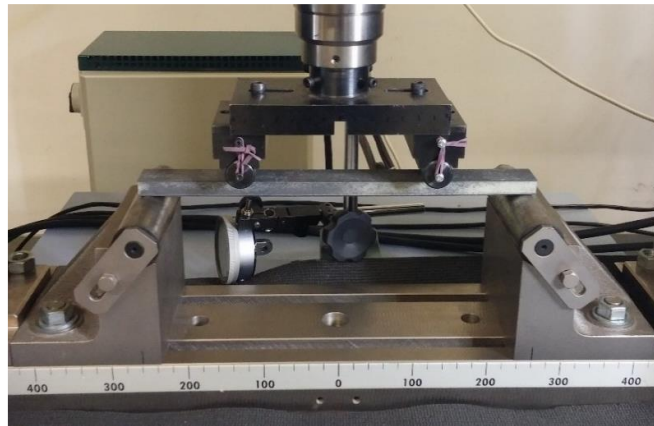


Figura 60 – Configuração do ensaio de flexão em 4 pontos

No ensaio de flexão em 4 pontos foram testados dois provetes para cada uma das configurações.

3.1.7 Resultados obtidos

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente e a respetiva análise.

3.1.7.1 Curvas $P-\delta$

Após a recolha dos dados provenientes dos ensaios de flexão e processamento dos dados obtidos, procedeu-se à representação gráfica da força em relação ao deslocamento, denominada por curva $P-\delta$.

- Flexão em 3 pontos – Configuração A

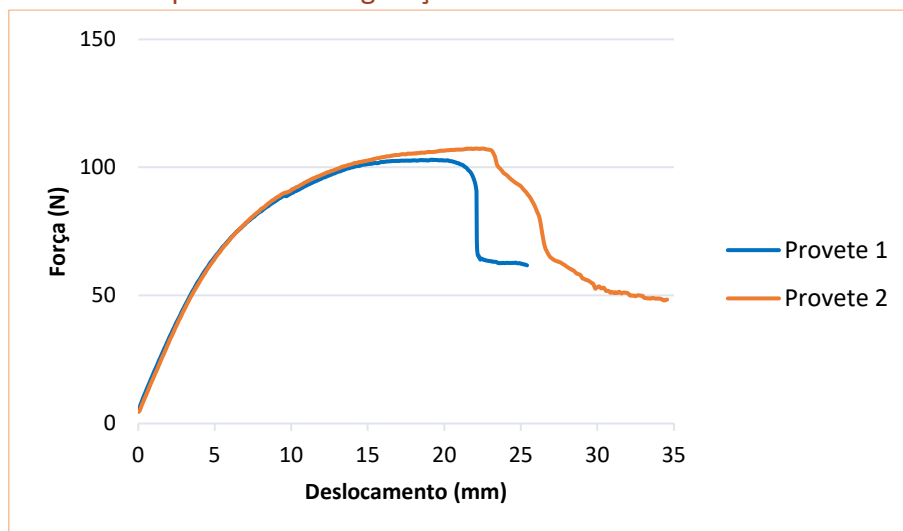


Figura 61 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 3 pontos, configuração A

- Flexão em 3 pontos – Configuração B

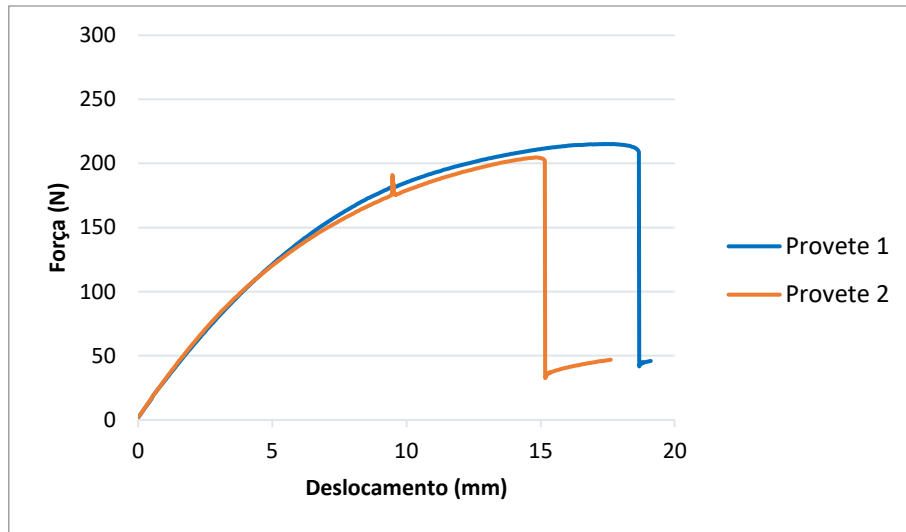


Figura 62 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 3 pontos, configuração B

- Flexão em 3 pontos – Configuração C

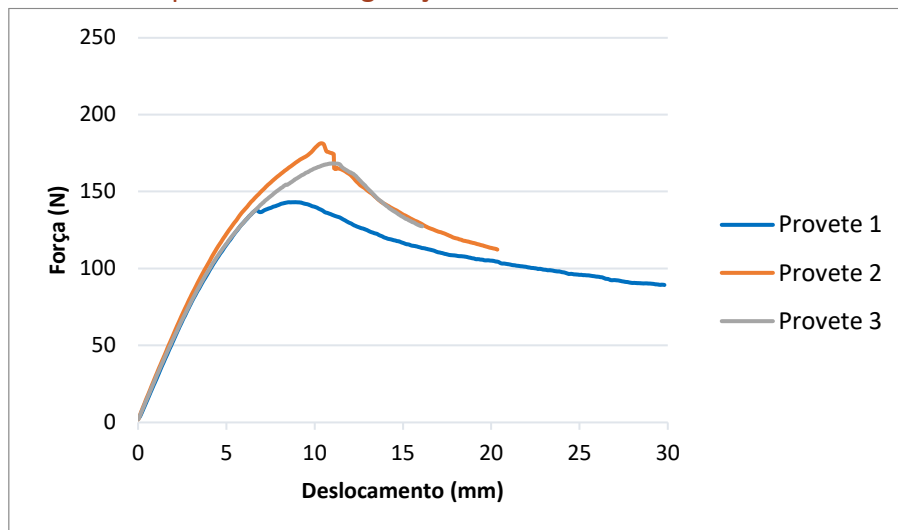


Figura 63 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 3 pontos, configuração C

- Flexão em 4 pontos – Configuração A

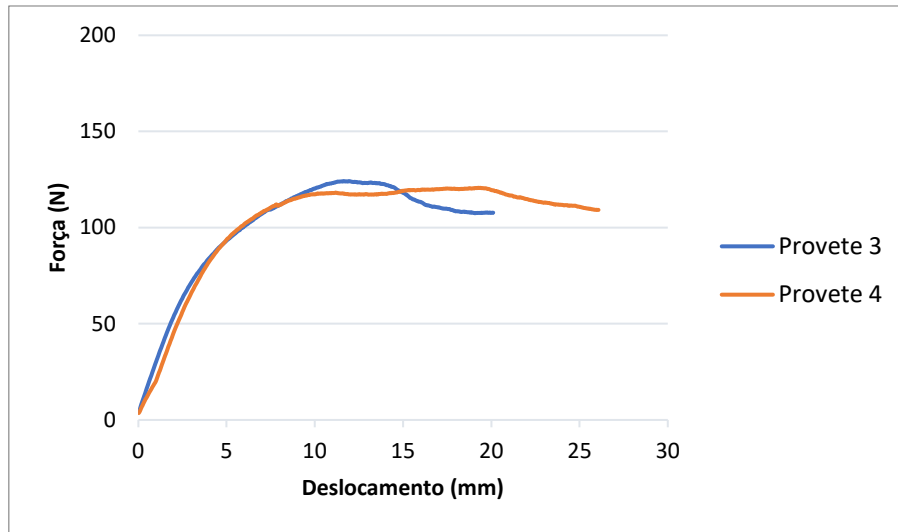


Figura 64 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 4 pontos, configuração A

- Flexão em 4 pontos – Configuração B

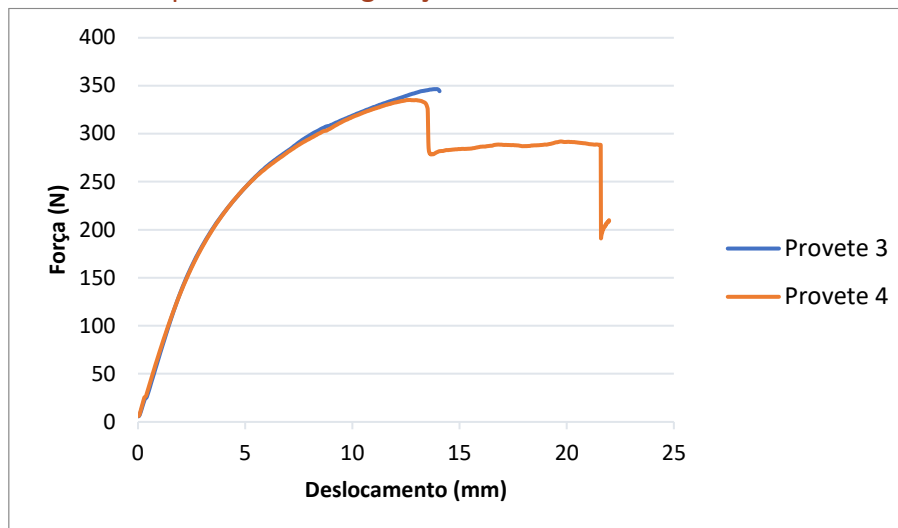


Figura 65 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 4 pontos, configuração B

- Flexão em 4 pontos – Configuração C

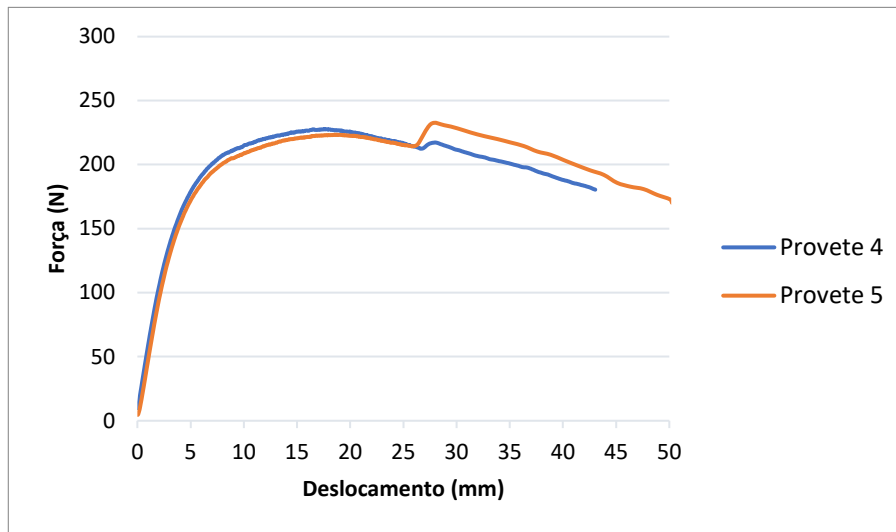


Figura 66 – Curvas $P-\delta$ experimentais flexão em 4 pontos, configuração C

3.1.7.2 Propriedades mecânicas do núcleo e estruturas sandwich

O processamento dos dados obtidos experimentalmente, através dos ensaios efetuados aos provetes produzidos, permite a obtenção de valores para as propriedades mecânicas das placas sandwich. Esses valores apresentam-se de seguida.

- Núcleo

Dos dados recolhidos experimentalmente para o núcleo, é possível obter o valor da tensão máxima à compressão (σ) assim como o módulo de elasticidade do núcleo (E).

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (8)$$

$$E = \frac{m \times t}{A}, \quad (9)$$

sendo,

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \text{ declive da curva } P-\delta \quad (10)$$

F_{\max} o valor máximo de força obtido, A a secção do provete, t a espessura do provete e y e x , respetivamente, a ordenada e a coordenada de um ponto na curva $P-\delta$.

Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 11, assim como o valor médio para os três provetes.

Tabela 11 – Resultados do cálculo das propriedades mecânicas do núcleo

| | σ (N / mm ²) | E (N / mm ²) |
|---------------|---------------------------------|--------------------------|
| Provete 1 | 0,638 | 34,318 |
| Provete 2 | 0,619 | 33,557 |
| Provete 3 | 0,633 | 24,915 |
| Valor médio | 0,630 | 30,930 |
| Desvio padrão | 0,008 | 4,265 |

- Estruturas *sandwich*

No caso das estruturas *sandwich* é possível calcular a tensão de corte (τ) e a tensão de flexão a que as peles são sujeitas (σ). De notar que a forma de calcular a tensão de flexão das peles varia entre flexão em 3 pontos e flexão em 4 pontos.

$$\tau = \frac{P}{(d+c) \times b} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{P \times L}{2t \times (d+c) \times b}, \text{ para flexão em 3 pontos} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{P \times L}{4t \times (d+c) \times b}, \text{ para flexão em 4 pontos} \quad (13)$$

sendo P a carga máxima, L a distância entre apoios, d a espessura da estrutura *sandwich*, c a espessura do núcleo, b a largura da estrutura e t a espessura das peles. Para os ensaios de flexão a obtenção do valor de m é feito da mesma forma que no caso do ensaio de compressão.

Na Tabela 12 podem observar-se os resultados de tensão de corte, tensão de flexão das peles, rigidez à flexão (m) e o deslocamento correspondente ao valor de carga máxima, para cada uma das configurações testadas, relativamente ao ensaio de flexão em 3 pontos, enquanto na Tabela 13 encontram-se os resultados para os dados obtidos dos ensaios de flexão em 4 pontos.

Tabela 12 – Resultados do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 3 pontos

| Configuração | τ | σ | m | δ carga | |
|--------------|------------------------|------------------------|----------|----------------|--------|
| | (N / mm ²) | (N / mm ²) | (N / mm) | máxima (mm) | |
| A | Provete 1 | 0,214 | 35,593 | 12,374 | 19,143 |
| | Provete 2 | 0,223 | 37,124 | 12,787 | 21,539 |
| | Valor médio | 0,218 | 36,359 | 12,581 | 20,341 |
| | Desvio padrão | 0,005 | 0,766 | 0,207 | 1,198 |
| B | Provete 1 | 0,207 | 27,876 | 26,402 | 17,698 |
| | Provete 2 | 0,197 | 26,521 | 28,108 | 14,838 |
| | Valor médio | 0,202 | 27,198 | 27,255 | 16,268 |
| | Desvio padrão | 0,005 | 0,678 | 0,853 | 1,430 |
| C | Provete 1 | 0,148 | 53,243 | 26,275 | 8,893 |
| | Provete 2 | 0,169 | 60,984 | 27,115 | 10,375 |
| | Provete 3 | 0,161 | 58,001 | 27,379 | 10,976 |
| | Valor médio | 0,159 | 57,410 | 26,923 | 10,081 |
| | Desvio padrão | 0,009 | 3,188 | 0,471 | 0,875 |

Tabela 13 – Resultados do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 4 pontos

| Configuração | τ | σ | m | δ carga | |
|--------------|------------------------|------------------------|----------|----------------|--------|
| | (N / mm ²) | (N / mm ²) | (N / mm) | máxima (mm) | |
| A | Provete 3 | 0,258 | 22,325 | 24,800 | 11,936 |
| | Provete 4 | 0,250 | 21,707 | 22,203 | 19,273 |
| | Valor médio | 0,254 | 22,016 | 23,501 | 15,605 |
| | Desvio padrão | 0,004 | 0,309 | 1,298 | 3,669 |
| B | Provete 3 | 0,350 | 22,560 | 72,150 | 13,923 |
| | Provete 4 | 0,338 | 21,820 | 68,499 | 12,673 |
| | Valor médio | 0,344 | 22,190 | 70,324 | 13,298 |
| | Desvio padrão | 0,006 | 0,370 | 1,826 | 0,625 |
| C | Provete 4 | 0,222 | 39,921 | 50,025 | 17,586 |
| | Provete 5 | 0,215 | 38,706 | 49,751 | 27,528 |
| | Valor médio | 0,218 | 39,313 | 49,888 | 22,557 |
| | Desvio padrão | 0,003 | 0,607 | 0,137 | 4,971 |

3.1.7.3 Análise dos resultados obtidos

A análise dos dados obtidos através das curvas $P-\delta$ permite perceber a de que modo a espessura do núcleo e a configuração das peles influenciam a resistência da estrutura ao corte, a sua rigidez e a capacidade de resistir a tensões de flexão.

A interpretação dos resultados torna perceptível, por comparação da configuração A com a configuração B, que apresentam a mesma configuração para as peles, que o incremento da espessura do núcleo de 10 mm para 15 mm resulta num aumento da rigidez em cerca de duas vezes no caso da flexão em 3 pontos e em cerca de três vezes no caso da flexão em 4 pontos.

Estabelecendo uma comparação entre as configurações com a mesma espessura do núcleo, B e C, observa-se que a configuração C vê as suas peles sujeitas a uma maior tensão provocada pela flexão, resultando assim numa resistência inferior a esforços de flexão.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo descreve-se a análise numérica realizada para averiguar a capacidade dos modelos de dano coesivo (MDC) para modelar o comportamento de estruturas sandwich quando solicitadas a esforços de flexão. Neste caso recorreu-se ao *software* Abaqus®, versão 2017 (*Dassault Systèmes*), para modelar os ensaios de flexão em 3 e 4 pontos. Primeiramente desenhou-se a geometria 2D dos provetes e as respetivas partições e atribuiu-se a profundidade. Posteriormente foram atribuídas propriedades a cada partição da estrutura e definido o tipo de malha. Terminada a modelação e respetiva obtenção dos dados, passou-se ao processamento dos mesmo de modo a obter uma comparação com os valores obtidos experimentalmente.

3.2.1 Condições da análise numérica

Neste subcapítulo abordam-se as condições utilizadas para a modelação dos ensaios de flexão, assim como os passos necessários durante a modelação.

1. Criação da geometria 2D

Nesta etapa inicial é definida a geometria do provete, como ilustrado na Figura 67. Após a definição das dimensões exteriores do provete é necessário criar as partições, de forma a dividir os diferentes constituintes dos painéis *sandwich*. As partições criadas têm ainda em conta a zona de posicionamento dos punções para que essas zonas possam conter um maior refinamento da malha (Figura 68). As dimensões utilizadas foram os valores médios das dimensões dos provetes para cada um dos ensaios. Os provetes foram modelados como sólidos deformáveis.

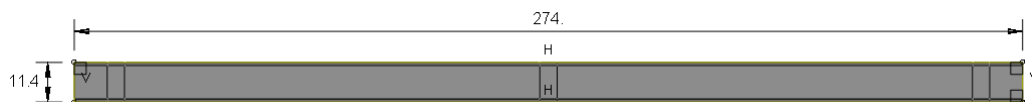


Figura 67 – Definição da geometria 2D dos provetes

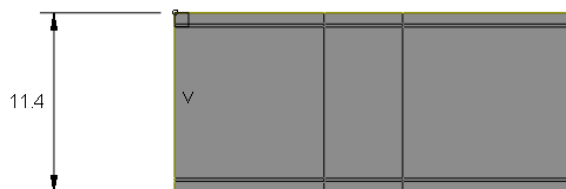


Figura 68 – Detalhe da partição na zona de contacto de um dos punções

Também os punções, que se observam na Figura 69, têm a sua geometria definida nesta etapa. Estes foram modelados como elementos discretos rígidos.

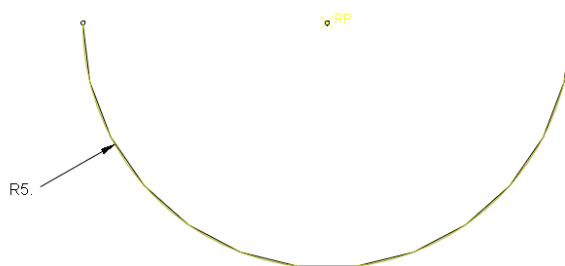


Figura 69 – Geometria 2D dos punções

2. Atribuição das propriedades

Para cada um dos diferentes materiais utilizados neste estudo foi definido um tipo diferente de comportamento e tipo de secção, tendo em conta as suas características, que podem ser observados na Tabela 14. Estes materiais criados foram atribuídos posteriormente a cada uma das partições correspondentes.

Tabela 14 – Definição dos tipos de material, comportamento e tipo de secção para os modelos numéricos

| Material | Comportamento | Tipo de secção |
|----------|--|--|
| Peles | <ul style="list-style-type: none"> Mecânico – Elástico - Fail stress – Critério de Tsai-Wu | <ul style="list-style-type: none"> Sólido - Homogéneo |
| Adesivo | <ul style="list-style-type: none"> Mecânico – Elástico – Tração Mecânico – Danos por leis de separação de tração - QUADS | <ul style="list-style-type: none"> Coesivo – <i>Traction - Separation</i> |
| Núcleo | <ul style="list-style-type: none"> Mecânico – Elástico Mecânico – Plástico – <i>Crushable foam – Isotropic hardening</i> | <ul style="list-style-type: none"> Sólido - Homogéneo |

Também a largura dos provetes é definida neste passo, encontrando-se os valores atribuídos na Tabela 15.

Tabela 15 – Espessura atribuída aos modelos numéricos

| Configuração | Ensaio | Largura (mm) |
|--------------|----------|--------------|
| A | 3 pontos | 22,75 |
| | 4 pontos | 22,63 |
| B | 3 pontos | 34,3 |
| | 4 pontos | 32,5 |
| C | 3 pontos | 30,74 |
| | 4 pontos | 31,44 |

3. Montagem do conjunto

Esta etapa consiste no posicionamento dos punções, estando estes posicionados à mesma distância utilizada para o ensaio prático. A montagem final obtém-se através de operações de translação e rotação das diferentes partes envolvidas, tendo como finalidade replicar as condições do ensaio prático. Na Figura 70 observa-se a montagem dos componentes para uma das configurações testadas a flexão em 3 e 4 pontos.

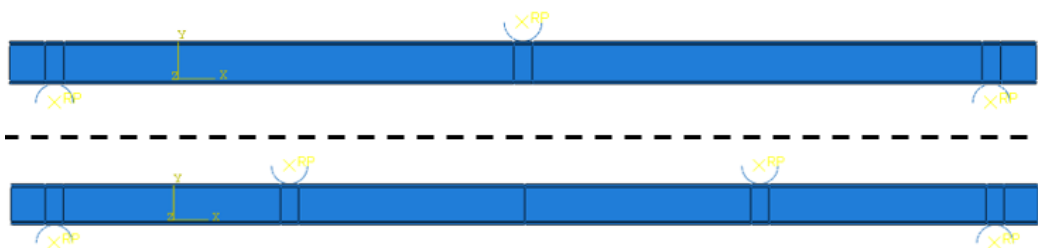


Figura 70 – Montagem dos componentes do ensaio de flexão em 3 e 4 pontos para a configuração A

4. Definição dos parâmetros de computação

Para que a simulação consiga desenvolver o processo incremental de forma correta, é necessário definir um conjunto de parâmetros. Desse conjunto fazem parte o número máximo de incrementos, o tamanho inicial dos incrementos e ainda o valor máximo e mínimo dos incrementos. Neste caso atribui-se um tamanho inicial de 2% e um máximo de igual valor. De grande importância é também o tamanho mínimo do incremento, pois permite a execução de sucessivas iterações caso não seja possível efetuar o incremento no tamanho definido no início de cada passo. Na Figura 71 observam-se os parâmetros de computação utilizados nas simulações.

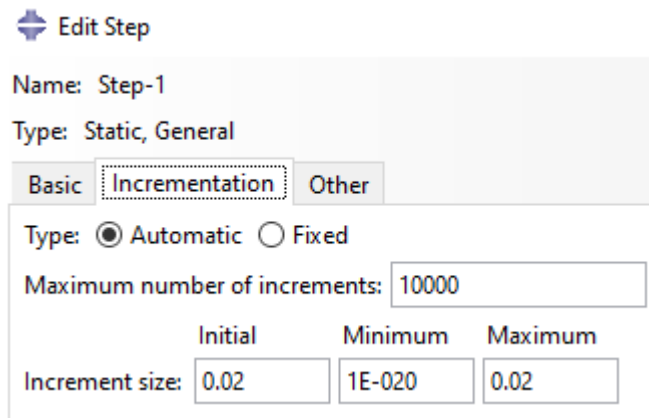


Figura 71 – Parâmetros de computação utilizados nos modelos numéricos

5. Definição da interação entre partes

Sendo este estudo numérico composto por diferentes componentes, existe a necessidade de definir a interação entre eles. Neste caso apenas existe a interação entre os punções e o provete, sendo essa interação do tipo *surface to surface*, como se pode ver na Figura 72.

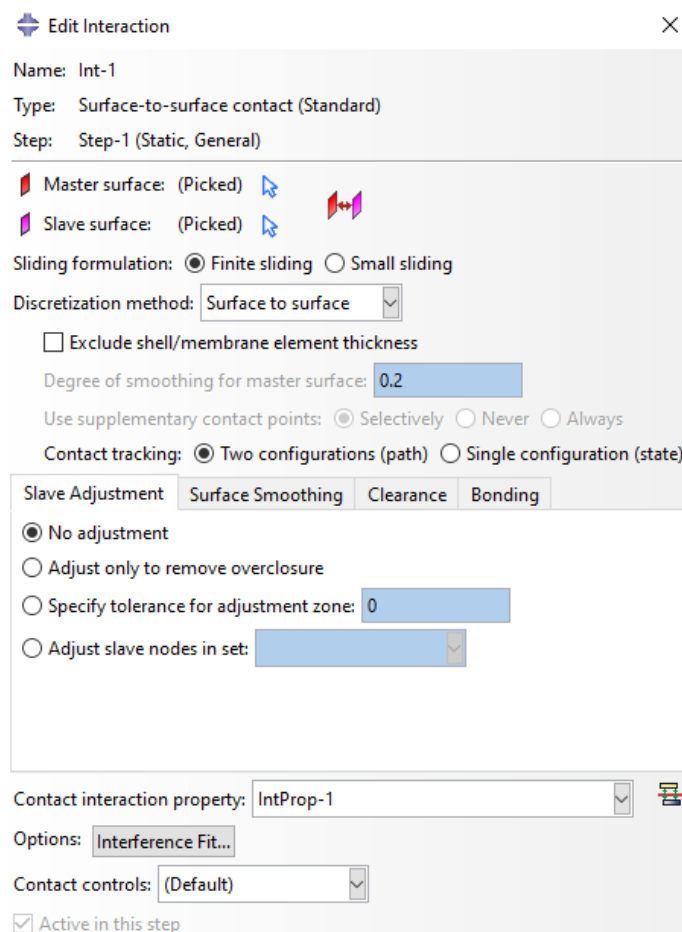


Figura 72 – Interação entre os punções e o provete

As propriedades de interação das superfícies em contacto foram definidas com um comportamento tangencial sem atrito e um comportamento normal do tipo *hard contact*.

6. Definição das condições fronteira

Para este estudo numérico, no caso da flexão em 3 pontos, foi definido um deslocamento vertical descendente de 30 mm, aplicado no punção central, e bloqueou-se o deslocamento desse punção relativamente a x e z, encastrou-se ambos os pontos de apoio e limitou-se o deslocamento do provete no eixo do x, como se pode verificar na Figura 73.

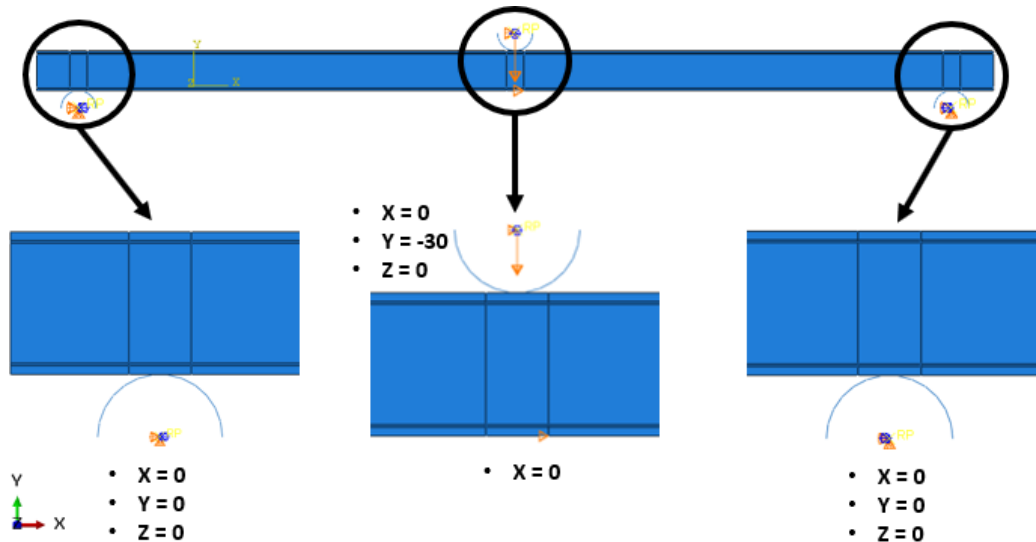


Figura 73 – Condições fronteira no ensaio de flexão em 3 pontos

No caso do ensaio de flexão em 4 pontos as condições fronteira são semelhantes, existindo apenas a necessidade de atribuir o deslocamento vertical também ao outro punção existente, como se verifica na Figura 74.

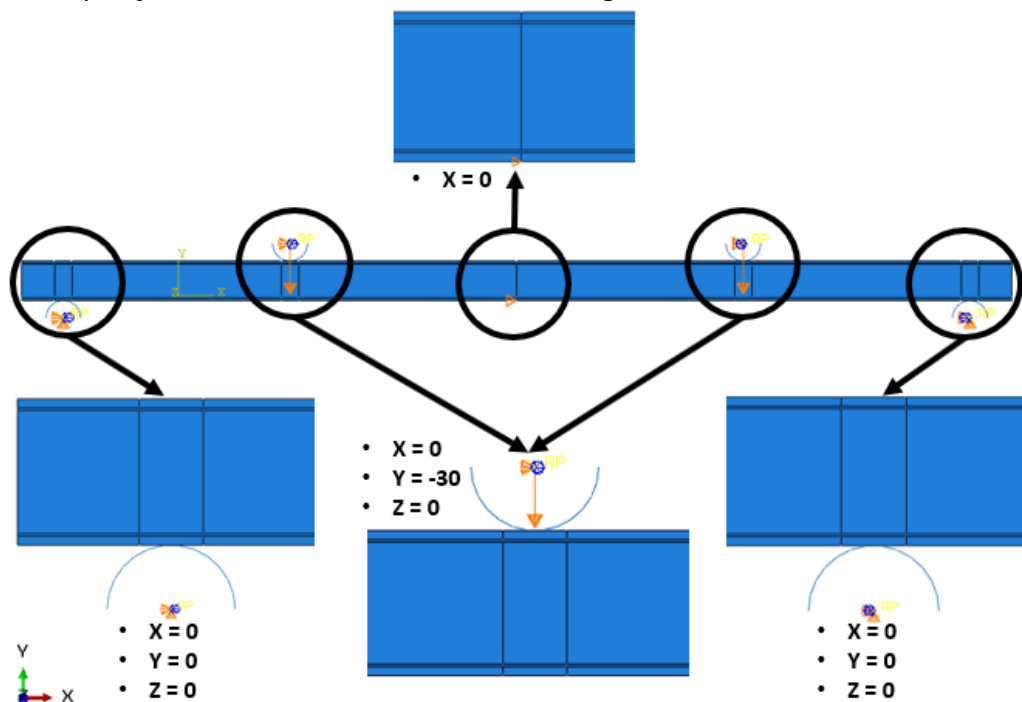


Figura 74 – Condições fronteira no ensaio de flexão em 4 pontos

7. Definição da malha

A malha criada para este estudo numérico é composta por elementos com o tamanho de 1 mm de lado a todo o comprimento exceto para a zona de contacto dos punções, na qual se definiu um tamanho de elemento de 0,05 mm de forma a obter uma área mais refinada. Verticalmente, a definição do tamanho de elemento varia com o tipo de material em questão, apresentando as peles um tamanho de elemento de 0,05 mm de lado e o núcleo um tamanho variável com o mínimo fixado em 0,05 mm de lado e o máximo em 1 mm. O adesivo teve atribuído apenas um elemento coesivo ao longo da espessura. Quanto ao tipo de elemento, as peles e o núcleo foram definidos como elementos do tipo CPE4R (elementos de estado plano de deformação, com integração reduzida e 4 nós) e o adesivo do tipo COH2D4 (elementos coesivos bidimensionais com 4 nós). Os controlos de malha utilizados foram do tipo *structured* para as peles e o núcleo e do tipo *sweep* para o adesivo. O aspeto final da malha, assim como a localização de cada um dos componentes, pode ser observado na Figura 75.

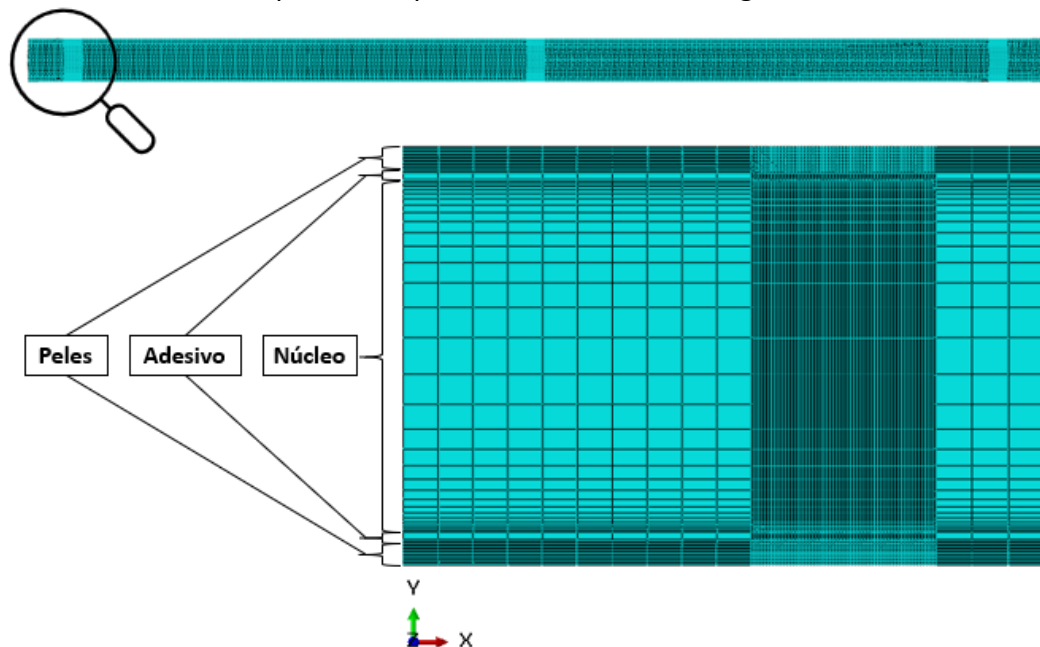


Figura 75 – Malha utilizada nos modelos numéricos

8. Simulação

Após a finalização dos passos anteriores, é necessário dar início à simulação do modelo numérico. Assim, definiu-se a paralelização com 4 processadores e a memória de análise para 90% da memória da máquina. Estando estes parâmetros definidos é apenas necessário iniciar o estudo numérico, existindo a possibilidade de acompanhar o seu desenrolar.

3.2.2 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [59]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [60], linear parabólico [61], exponencial [62], polinomial [63] e trapezoidal [64]. A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido

número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [65]. O modelo triangular 2D implementado no *software* Abaqus® está representado na Figura 76, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo forem anulados na lei coesiva respectiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e corte [66]. Os elementos coesivos estão sujeitos a componentes de deformação normal e de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezadas.

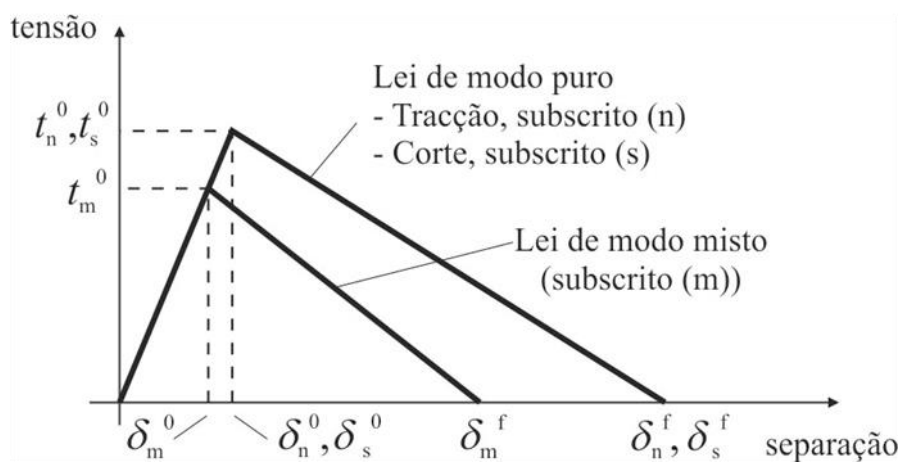


Figura 76 -MDC triangular implementado no *software* Abaqus®

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (14)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja considerada uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [67]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (15)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [66]. Em modo misto, a iniciação do dano pode

ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (16)$$

$\langle \ \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [68]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 76), pela igualdade da equação (16), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 76) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (17)$$

3.2.3 Análise de tensões das estruturas *sandwich*

Os estudos numéricos efetuados permitem extrair diferentes resultados, destacando-se no caso das estruturas *sandwich* em particular, os dados de tensão de von Mises, mostrado na Figura 77, e os dados relativos ao critério de Tsai-Wu, que indica a falha do material quando o valor resultante é igual ou superior a 1 (Figura 78), aplicando-se apenas aos compósitos laminados, no caso deste estudo designados como peles.

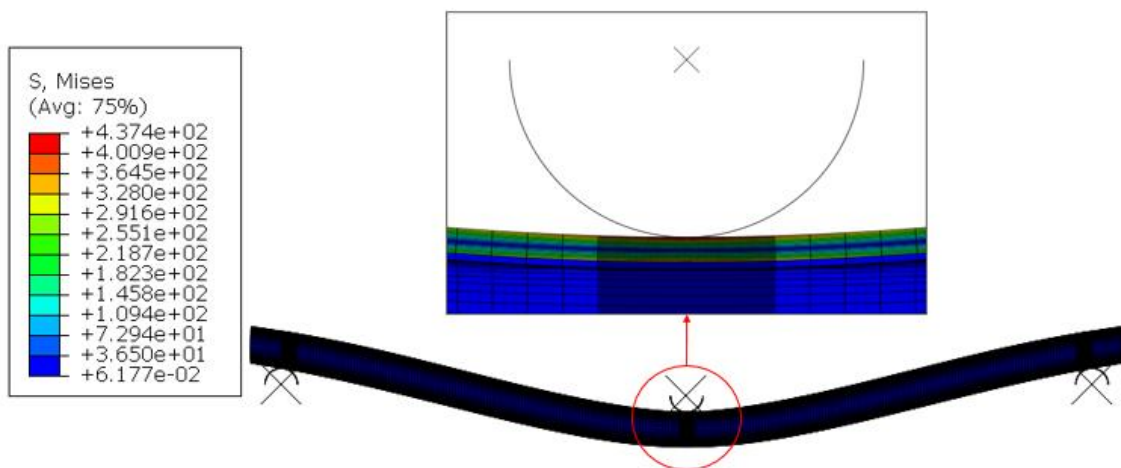


Figura 77 -Tensões de von Mises no estudo numérico de flexão em 3 pontos

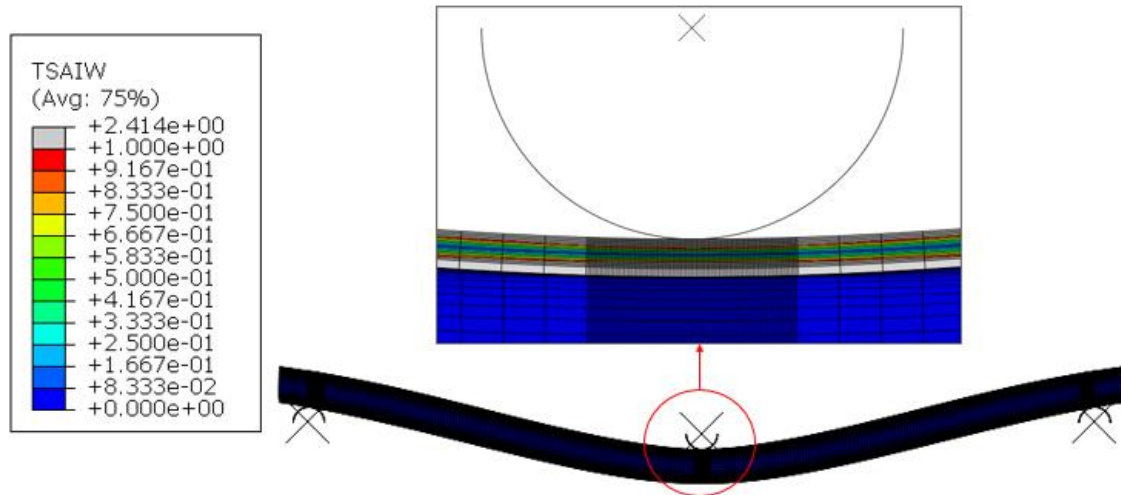


Figura 78 – Critério de Tsai-Wu no estudo de flexão em 3 pontos

Dos estudos numéricos é ainda possível retirar os valores de força e deslocamento, utilizados para compor as curvas $P-\delta$ (Figura 79).

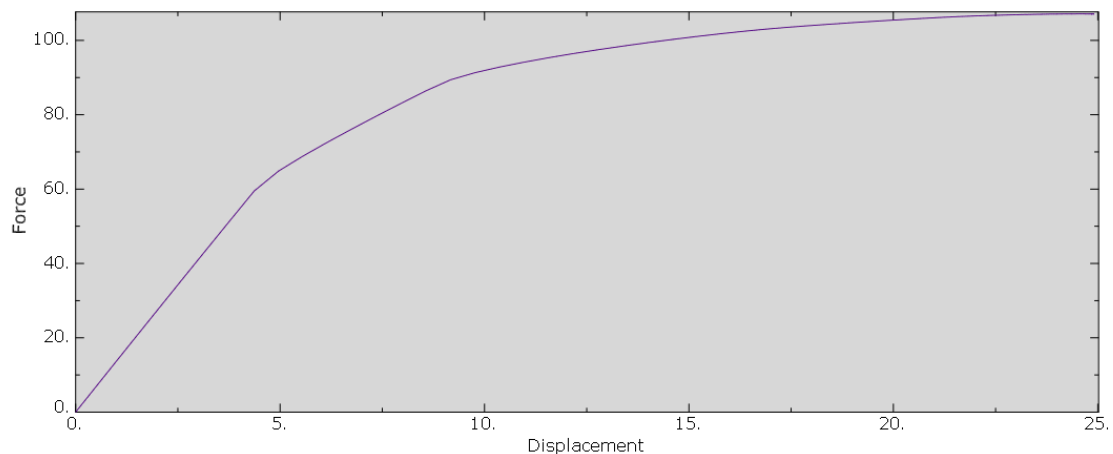


Figura 79 – Curvas $P-\delta$ do estudo de flexão em 3 pontos, software Abaqus®

3.2.4 Previsão da resistência

Os valores obtidos a partir dos modelos numéricos resultam nas curvas $P-\delta$ apresentadas de seguida. É ainda possível verificar a sobreposição das curvas experimentais para permitir uma fácil comparação entre o método experimental e o método numérico.

- Flexão em 3 pontos – Configuração A

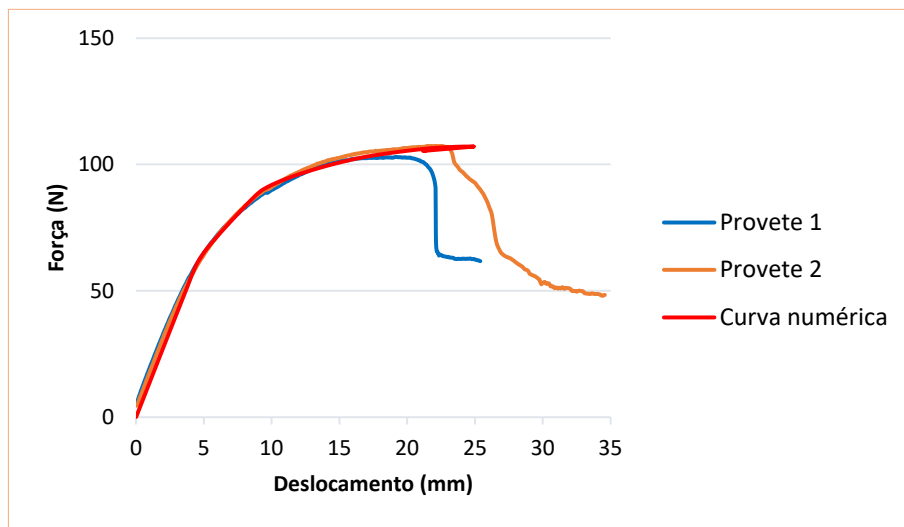


Figura 80 – Curvas $P-\delta$ flexão em 3 pontos, configuração A

- Flexão em 3 pontos – Configuração B

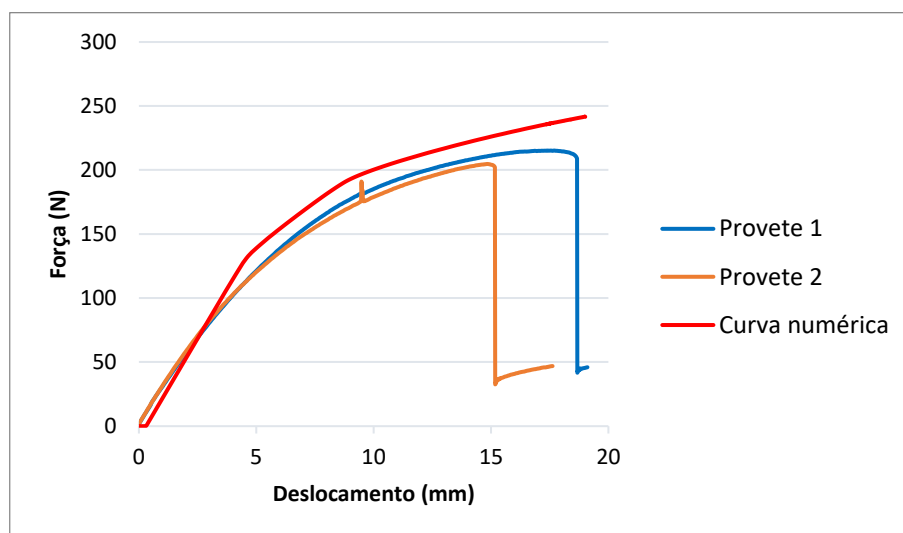


Figura 81 – Curvas $P-\delta$ flexão em 3 pontos, configuração B

- Flexão em 3 pontos – Configuração C

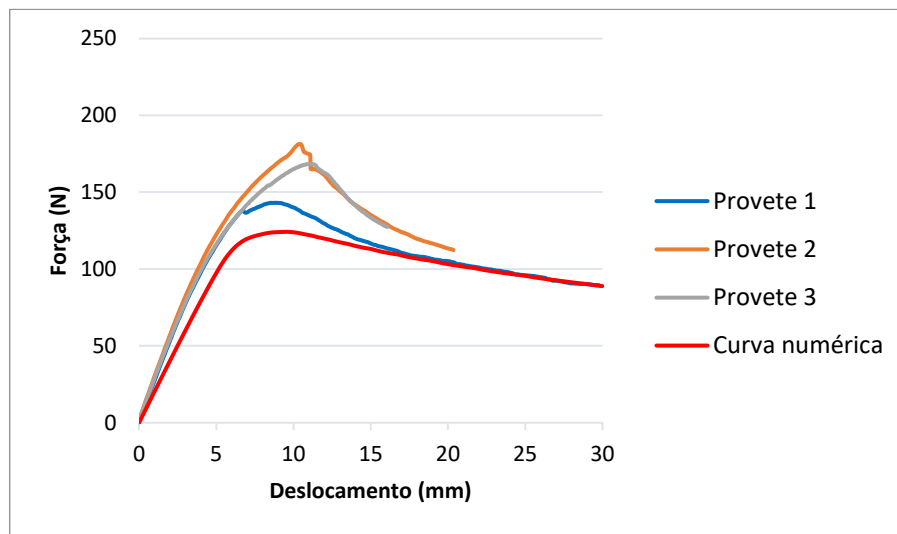


Figura 82 – Curvas $P-\delta$ flexão em 3 pontos, configuração C

- Flexão em 4 pontos – Configuração A

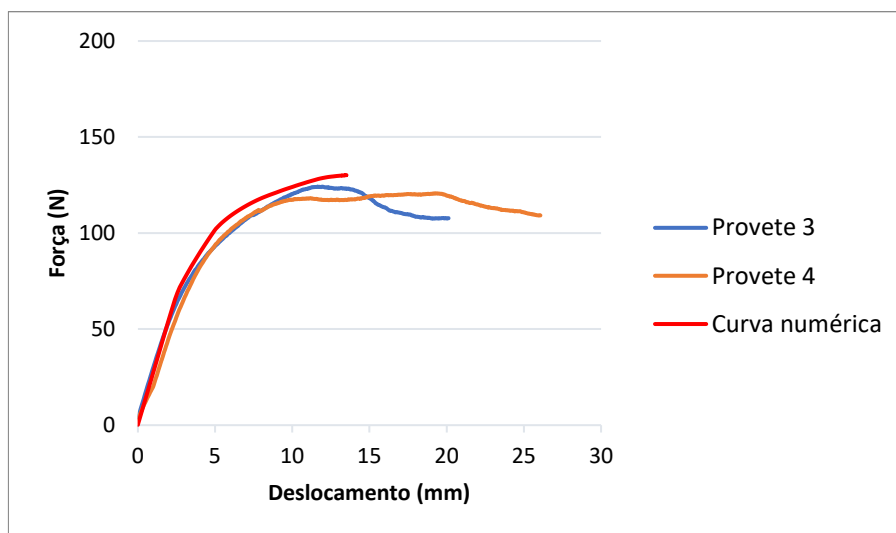


Figura 83 – Curvas $P-\delta$ flexão em 4 pontos, configuração A

- Flexão em 4 pontos – Configuração B

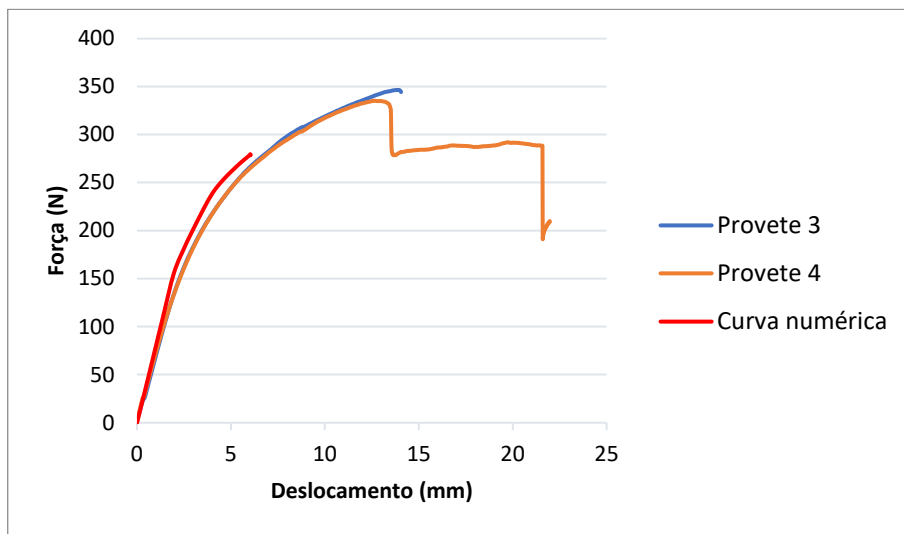


Figura 84 – Curvas $P-\delta$ flexão em 4 pontos, configuração B

- Flexão em 4 pontos – Configuração C

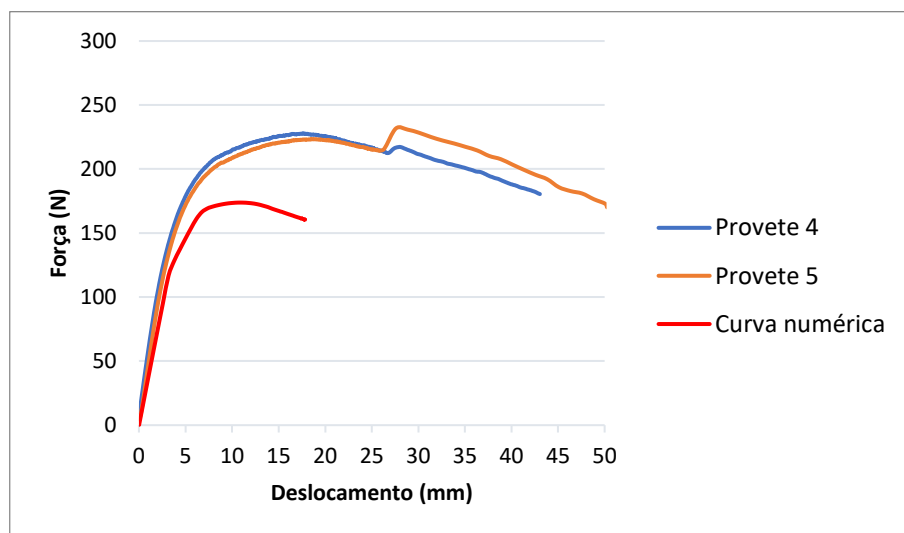


Figura 85 – Curvas $P-\delta$ flexão em 4 pontos, configuração C

Do processamento dos dados obtidos numericamente, é possível obter valores para estabelecer uma comparação entre valores numéricos e experimentais, através das equações apresentadas no capítulo 3.1.7.2. Na Tabela 16 apresentam-se os valores para a flexão em 3 pontos e na Tabela 17 para a flexão em 4 pontos.

Tabela 16 – Resultados experimentais e numéricos do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 3 pontos

| Configuração | | τ (N / mm ²) | σ (N / mm ²) | m (N / mm) | δ carga máxima (mm) |
|--------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------|----------------------------------|
| A | Valor modelo numérico | 0,222 | 37,035 | 13,622 | 24,620 |
| | Valor experimental médio | 0,218 | 36,359 | 12,581 | 20,341 |
| | Desvio percentual | 2% | 2% | 8% | 21% |
| B | Valor modelo numérico | 0,233 | 31,327 | 31,191 | 19,010 |
| | Valor experimental médio | 0,202 | 27,198 | 27,255 | 16,268 |
| | Desvio percentual | 15% | 15% | 14% | 17% |
| C | Valor modelo numérico | 0,130 | 46,899 | 20,009 | 9,490 |
| | Valor experimental médio | 0,159 | 57,410 | 26,923 | 10,081 |
| | Desvio percentual | -18% | -18% | -26% | -6% |

Tabela 17 – Resultados experimentais e numéricos do cálculo das propriedades mecânicas para flexão em 4 pontos

| Configuração | | τ (N / mm ²) | σ (N / mm ²) | m (N / mm) | δ carga máxima (mm) |
|--------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------|----------------------------------|
| A | Valor modelo numérico | 0,270 | 23,398 | 27,129 | 13,150 |
| | Valor experimental médio | 0,254 | 22,016 | 23,501 | 15,605 |
| | Desvio percentual | 6% | 6% | 15% | -16% |
| B | Valor modelo numérico | 0,282 | 18,180 | 81,273 | 6,060 |
| | Valor experimental médio | 0,344 | 22,190 | 70,324 | 13,298 |
| | Desvio percentual | -18% | -18% | 16% | -54% |
| C | Valor modelo numérico | 0,186 | 33,512 | 37,147 | 10,870 |
| | Valor experimental médio | 0,218 | 39,313 | 49,888 | 22,557 |
| | Desvio percentual | -15% | -15% | -26% | -52% |

3.2.5 Análise dos resultados obtidos

A análise dos resultados obtidos permite perceber que a configuração A, detentora de um núcleo com espessura inferior, foi aquela em que os resultados experimentais e numéricos mais se assemelharam, quer para a flexão em 3 quer em 4 pontos. No caso da configuração B, os valores obtidos experimental e numericamente são também muito idênticos, mas torna-se perceptível uma dificuldade mais elevada do modelo numérico em desenvolver o processo incremental. A configuração C apresenta-se como sendo a que apresenta uma maior diferença entre valores teóricos e experimentais, atingindo valores de carga máxima notoriamente inferiores. De notar ainda que é perceptível uma maior dificuldade do modelo numérico em desenrolar o processo incremental para a flexão em 4 pontos.

Avaliando a percentagem de desvio entre os valores experimentais e numéricos é possível perceber que na configuração A existe globalmente um desvio entre os valores mais baixo do que nas restantes duas configurações. O maior desvio dá-se no caso da flexão em 4 pontos no valor de deslocamento máximo, devido à dificuldade incremental do modelo numérico.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

A presente dissertação permite perceber através dos valores obtidos experimentalmente e numericamente que a espessura do núcleo detém elevada relevância na rigidez das estruturas *sandwich* solicitadas à flexão. Relativamente à resistência a cargas fletoras, peles com maior tensão de cedência resultam em valores maiores de resistência à flexão.

Relativamente à validação do estudo numérico foi possível obter bons resultados, particularmente para a configuração A. Foi também perceptível uma maior dificuldade de os modelos numéricos evoluírem incrementalmente no caso da flexão em 4 pontos, que de resto foi a maior dificuldade verificada durante o desenrolar do estudo.

Para futuros trabalhos poderia ser interessante testar diferentes modelos de dano de forma a tentar ultrapassar a limitação incremental verificada. Pode ainda ser executado o mesmo estudo com abordagens diferentes do ponto de vista das configurações e até dos materiais utilizados.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Fairbairn, W., *An Account of the Construction of the Britannia and Conway Tubular Bridges*, ed. J. WEALE. 1849, London.
2. DIAB, *Guideline to Core and Sandwich*. 2018: Laholm, Sweden.
3. Gay, D., *Composite Materials Design and Applications*. 2015, Boca Raton, Florida, EUA: CRC Press.
4. Zenkert, D., *An Introduction to Sandwich Construction*. 1995, Worcester, Inglaterra: Engineering Materials Advisory Services.
5. Lopes, V.H.P., *Estudo numérico e experimental da adesão da SMC e Prepreg*. 2018, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
6. GURIT, *Guide to Composites*. Wattwil, Suíça.
7. Lopes, I.A.F., *Estudo do Processo em Infusão a Vácuo em Materiais Compósitos*. 2009, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
8. Karlsson, K.F. e B. Tomas Åström, *Manufacturing and applications of structural sandwich components*, in Elsevier. 1995: Amsterdão, Países Baixos.
9. Talreja, R. e J.-A.E. Manson, *Comprehensive Composite Materials: Polymer Matrix Composites*. Vol. 2. 2000, Oxford, Reino Unido: Pergamon Press.
10. Morais, A.B., A.G. Magalhães, e M.F.S.F. Moura, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2nd ed. 2011, Porto, Portugal: Publindústria.
11. Mouritz, A., *Introduction to aerospace materials*. 2012, Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing.
12. Ferreira, L.M., *Study of the behaviour of non-crimp fabric laminates by 3D finite element models*. 2012, Tese de Doutoramento. Universidade de Sevilha: Sevilha, Espanha.
13. Vinson, J.R. *Sandwich Structures: Past, Present, and Future*. in *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*. 2005. Dordrecht, Países Baixos Springer.
14. Wennberg, D., *A Light Weight Car Body for High-Speed Trains - Literature study*, in *Department of Aeronautical and Vehicle Engineering*. 2009, KTH Royal Institute of Technology in Stockholm.
15. Lee, J., S.-J. Lee, e K.-B. Shin, *A Study on Low-Velocity Impact Characterization of Various Sandwich Panels for the Korean Low Floor Bus Application*. Transactions of The Korean Society of Mechanical Engineers A, 2007. **31**: p. 506-516.
16. SIKA, *Refrigerated trailers and containers fresh ideas for cool freight*. 2015, Sika Services AG: Zurique, Suíça.
17. Hara, D. e G.O. Özgen, *Investigation of Weight Reduction of Automotive Body Structures with the Use of Sandwich Materials*. Transportation Research Procedia, 2016. **14**: p. 1013-1020.
18. Kriescher, M., S. Brückmann, e G. Kopp, *Development of a lightweight car body, using sandwich-design*. 2014.
19. Koenigsegg. *Agera R*. 26/08/2020]; Available from: www.koenigsegg.com.
20. MaterialsToday. *Sandwich structures deliver core benefits*. [cited 2020 03/08/2020]; Available from: <https://www.materialstoday.com/composite-applications/features/sandwich-structures-deliver-core-benefits/>.
21. Fernandez, G., H. Usabiaga, e D. Vandepitte, *Subcomponent development for sandwich composite wind turbine blade bonded joints analysis*. Elsevire, 2017.

22. Davies, J.M., *Lightweight Sandwich Construction*. 2001, Nova Jersey, EUA: Wiley-Blackwell. 1-370.
23. ISOPAN. 03/08/2020]; Available from: <https://www.isopan.com/roofing/isocop>.
24. Kuhn, H., H. Kuhn, e D. Medlin, *ASM Handbook - Mechanical Testing and Evaluation*. 2000, West Conshohocken, EUA: ASM International.
25. Davis, J.R., *Tensile Testing*. 2004.
26. Raftoyiannis, I.G., *Experimental Testing of Composite Panels Reinforced with Cotton Fibers*. Open Journal of Composite Materials, 2012.
27. Davim, J.P. e A.G. Magalhães, *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*. 2010, Porto, Portugal: Publindústria.
28. Zhang, G., B. Wang, L. Ma, L. Wu, S. Pan, e J. Yang, *Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels*. Composite Structures, 2014. **108**: p. 304-310.
29. Temenoff, J.S. e A.G. Mikos, *Biomaterials - The Intersection of Biology and Materials Science*. 2008, Londres, Inglaterra: Pearson.
30. *Ensaio Mecânicos*. 04/08/2020]; Available from: afinkopolimeros.com.
31. Carlsson, L.A., D.F. Adams, e R.B. Pipes, *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. 4th ed. 2014, Boca Raton, Florida: CRC Press.
32. Hodgkinson, J.M., *Mechanical testing of advanced fibre composites*. 2000.
33. ASTM, *ASTM D3039 / D3039M-00, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. 2000, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
34. ASTM, *ASTM C364 / C364M-16, Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*. 2016, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
35. Jędral, A., *Review of Testing Methods Dedicated for Sandwich Structures with Honeycomb Core*. Transactions on Aerospace Research, 2018.
36. ASTM, *ASTM C273-00e1, Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials*. 2000, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
37. ASTM, *ASTM C393 / C393M-11, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. 2011, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
38. Martins, R.C., *Caracterização experimental e numérica dos campos de deformação de vigas sandwich em flexão*. 2017, Tese Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa: Lisboa, Portugal.
39. ASTM, *ASTM C365 / C365M-11a, Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*. 2011, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
40. Bhatti, M.A., *Fundamental Finite Element Analysis and Applications: with Mathematica and Matlab Computations*. 2005: Wiley.
41. Ebrahimi, F., *Finite Element Analysis: New Trends and Developments*. 2012, Londres, Reino Unido: Intech Publishers.
42. Bi, Z., *Finite Element Analysis Applications: A Systematic and Practical Approach*. 2017: Elsevier Science.
43. Hutton, D.V., *Fundamentals of Finite Element Analysis*. 2004, Nova York, EUA: McGraw-Hill.
44. Giraldo, G. *Structural Analysis Software Without a Large Investment in Hardware*. 2020 15/08/2020]; Available from: <https://www.simscale.com>.
45. Harish, A. *What Is Modal Analysis and Why Is It Necessary?* 2019 15/08/2002]; Available from: <https://www.simscale.com>.
46. Afolabi, S.O., B.I. Oladapo, C.O. Ijagbemi, A.O.M. Adeoye, e J.F. Kayode, *Design and finite element analysis of a fatigue life prediction for safe and economical machine shaft*. Journal of Materials Research and Technology, 2019. **8**(1): p. 105-111.
47. Kurowski, P., *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018*. 2018, Mission, EUA: SDC Publications.

48. Quiza, R., O. López-Armas, e J. Davim, *Hybrid modeling and optimization of manufacturing: Combining artificial intelligence and finite element method*. 2012, Heidelberg, Alemanha: Springer Verlag.
49. Chatzopoulou, G., S.A. Karamanos, e G.E. Varelis, *Finite element analysis of UOE manufacturing process and its effect on mechanical behavior of offshore pipes*. International Journal of Solids and Structures, 2016. **83**: p. 13-27.
50. Singh, T., D. Hariyani, e M. Dadhich, *Flow Simulation & Static Structure Analysis (FEA) of a Radial Turbine*. LAP Lambert Academic Publishing, ed. L. Riga. 2012.
51. Buragohain, M.K., *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. 2017, Boca Raton, Florida: CRC Press.
52. Heslehurst, R.B., *Defects and Damage in Composite Materials and Structures*. 2014, Abingdon, Reino Unido: Taylor & Francis.
53. Shifa, M., F. Tariq, e R. Baloch, *Effect of Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of Honeycomb Sandwich Panels*. The Nucleus, 2017. **54**: p. 1-6.
54. Abaqus®, *Abaqus® Documentation*. 2017, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay, França.
55. Thabet, A., K. Shankar, e E. Morozov, *Experimental, Theoretical and Numerical Investigation of the Flexural Behaviour of the Composite Sandwich Panels with PVC Foam Core*. Applied Composite Materials, 2014. **21**: p. 661-675.
56. Thabet, A., K. Shankar, e E. Morozov, *Behaviour of PU-foam/glass-fibre composite sandwich panels under flexural static load*. Materials and Structures, 2014. **48**(5): p. 1545-1559.
57. CIT, *Rem epoxy matrix*. 2015, CIT COMPOSITE MATERIALS ITALY: Legnano, Italia.
58. SIKA, *SikaForce®-7710 L100*. 2012, Sika Services AG: Zurique, Suíça.
59. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, e A.P.M. Baptista, *Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**: p. 351–376.
60. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**: p. 1701–1736.
61. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111–140.
62. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827–2855.
63. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429–441.
64. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367–4383.
65. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1): p. 147–161.
66. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497–1512.
67. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948–1958.
68. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2009. **29**(2): p. 195–205.