UNIVERSIDADE BEIRA INTERIOR

Fabrico e Ensaio à Tração de Laminados

Estruturas Aeroespaciais II (10373/15095)

1º Ciclo/Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica

2024

Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais

Faculdade de Engenharia

1. Introdução

- Existem muitos processos de fabrico de compósitos, que é assunto de outra(s) unidade(s) curricular(es) do curso
- Aqui vamos abordar apenas o processo de laminação manual (hand lay-up)
- Com o objetivo de preparar o trabalho experimental vão ser abordados os seguintes tópicos:
  - Fabrico de compósitos laminados usando a técnica hand lay-up
  - Aspetos de segurança
  - Ensaios mecânicos

2. Fabrico de compósitos laminados

- Impregnação com resina:
  - Deve garantir-se que a resina flui adequadamente entre as fibras de reforço
  - A viscosidade, a tensão superficial e o efeito de capilaridade são os parâmetros principais a atender nesta fase
- Processamento por deposição de camadas (lay-up):
  - O processo de lay-up pode ser dividido em duas vertentes:
    1. Com uso de resina líquida (wet hand lay-up);
    2. Com uso de pré-impregnados (prepreg lay-up).
  - Deposição das várias camadas de acordo com a orientação e espessura pretendidas
  - Esta técnica permite a obtenção uma maior fração volúmica de fibras de reforço
  - Podem fabricar-se peças com geometrias complexas (por exemplo, dupla curvatura)
  - Trata-se de um processo em molde aberto com uma baixa cadência produtiva

2. Fabrico de compósitos laminados

- Hand lay-up:
  - Técnica muito simples e versátil, não necessitando de ferramentas elaboradas
  - A qualidade do produto final depende em grande medida da experiência do operador
- Sequência do processo:
  1. Molde (metálico, polimérico, compósito, madeira,…)
  2. Aplicação do desmoldante e gel coat para melhorar acabamento final
  3. Aplicação do tecido (só com fibras de reforço!) em camadas, uma de cada vez
  4. Aplicação da resina líquida (com catalisador)
  5. Distribuição da resina com pincel, rolo ou espátula
  6. Facultativo: saco de vácuo e adição de calor
- Vídeo Exemplo: https://www.youtube.com/watch?v=fnRAshCRaQs

2.2. Segurança, Saúde e Meio Ambiente

- Ao contrário dos materiais convencionais, fabricar e reparar partes em compósito envolve o manuseamento de diferentes tipos de fibras, matrizes, solventes, etc.
- Durante a cura de compósitos, solventes e produtos voláteis são libertados. Desta forma é necessária a toma de precauções adicionais quando se trabalham com estes produtos.
- Por forma a evitar estes perigos, devem ser tomadas algumas precauções, tais como:
  - Trabalhar compósitos numa área bem ventilada.
  - Usar máscara, óculos e luvas de segurança.

2.2. Segurança, Saúde e Meio Ambiente

- Alguns dos perigos associados às substâncias envolvidas no fabrico de compósitos:

Resina	• Muito irritante para a pele, olhos e mucosas nasais. • Devido à sua toxicidade e absorção pela pele o contacto deve ser evitado. • O contacto prolongado pode provocar reacções alérgicas graves. • Pó ou vapor podem causar irritação nos olhos, nariz e garganta.
Fibras	• Possível irritação da pele devido ao tamanho das fibras. • A inalação de fibras que ficam suspensas no ar provocam irritação no nariz, garganta e olhos.
Solventes	• Irritante para a pele, olhos e membranas mucosas pode provocar dores de estomago e vómitos.

2.2. Segurança, Saúde e Meio Ambiente

- A fabricação de materiais compósitos apresenta riscos potenciais para o ambiente e para as pessoas envolvidas no processo, devendo ser tomadas as medidas apropriadas para reduzir ou eliminar os riscos:
  - As resinas e solventes podem causar danos à pele e resinas reações alérgicas
  - As fibras de carbono e de vidro podem causar irritação da pele e das vias respiratórias
  - As fibras de carbono são condutores, assim equipamentos elétricos e eletrónicos devem ser protegidos de qualquer contaminação
- Ao considerar o uso de energia por toda a vida do produto, os compósitos e plásticos podem ser ambientalmente mais amigáveis do que metais ou outros materiais:
  - Muitas vezes requerem menos energia para a fabricação
  - Estruturas em compósitos são geralmente mais leves do que estruturas metálicas, o que poupa combustível

2.2. Segurança, Saúde e Meio Ambiente

- Gestão de risco:
  - Após a cura, as fibras tornam-se muito rígidas e podem sobressair das superfícies mal acabadas. Estas superfícies devem ser manuseados com cuidado, devido ao elevado potencial de laceração.
  - Devem ser sempre utilizadas luvas para prevenir a penetração das fibras, bem como o contacto com resinas.
  - A proteção contra as poeiras de fibra de carbono é fundamental. Os operadores devem usar óculos completos e uma máscara de pó para evitar a inalação das poeiras. Roupas de proteção devem ser usados sempre, e principalmente na fase de acabamento com abrasivos. O vestuário de proteção deve cobrir todo o corpo para evitar a exposição a fibras de carbono ou resinas e solventes.
  - As fibras de carbono são condutoras elétricas. Devem ser utilizados aspiradores concebidos especificamente para a extração de substâncias condutoras. Se a poeira de fibra de carbono penetrar em interruptores ou equipamentos elétricos, podem ocorrer curto-circuitos ou choques elétricos.

2.2. Segurança, Saúde e Meio Ambiente

- Boas práticas:
  - Qualquer pessoa envolvida na fabricação ou reparação de compósitos deve ter formação específica
  - Tarefas que envolvam a maquinação a seco de fibra de carbono ou vidro deverão ser efetuadas num espaço com um sistema de extração ou ventilação adequada
  - As tarefas que envolvem a utilização de solventes e resinas devem ser feitas em áreas bemventiladas
- Na maquinação de fibra de carbono, minimizar a poeira ou a geração de partículas:
  - Por processamento húmido do material
  - Utilizando ferramentas manuais sem motor
  - Cortar o material enquanto ainda 'verde' ou parcialmente curado
  - Deve estar disponível um kit de primeiros socorros em cada área de trabalho
  - Deve ser evitado o contato com a pele e olhos

2.2. Segurança, Saúde e Meio Ambiente

- Primeiros socorros:
  - Irritação e erupções cutâneas da pele - Lave com água fria ou morna com sabão ou usar fita adesiva para ajudar a remover as fibras da pele;
  - Olhos - lavar os olhos com água corrente limpa por aproximadamente 15 minutos. Procurar assistência médica;
  - Ingestão - Lave a boca imediatamente com água limpa e fresca. Procurar assistência médica;
  - Inalação - Poeira e fibras finas ao serem inaladas causam irritação do sistema respiratório. Deslocar a vítima para uma zona não contaminada e procurar assistência médica.

3. Ensaio de compósitos laminados

- Para determinar as propriedades de um material, são feitos ensaios comparativos com um padrão ou especificação. Estas normas ou standards foram testados e comprovados para fornecer resultados seguros e adequados. Algumas das propriedades incluem resistência à tração, resistência à flexão, módulo de Young, etc.
- Benefícios de Normas Internacionais:
  - As Normas Internacionais permitem harmonizar as especificações técnicas dos produtos e materiais, permitindo às indústrias em todo o mundo trabalhar com os mesmos padrões.
  - Permitem igualmente ultrapassar as barreiras técnicas do comércio internacional causado por diferenças entre normas e regulamentos desenvolvidos de forma independente por cada nação (organismo nacional de normalização, ou empresa).

3. Ensaio de compósitos laminados

- Os benefícios incluem:
  - Economias de custos – Optimização de operações;
  - Satisfação do cliente - Melhoria da qualidade e aumento da satisfação do cliente;
  - Novos mercados - Evitam barreiras ao comércio e abrem as portas dos mercados globais;
  - Benefícios ambientais - Ajudam a reduzir os impactos sobre o meio ambiente.

3.1. Métodos e normas de ensaio

- Um dos standards mais utilizados na indústria dos compósitos, são os publicados pela ASTM International, (American Society for Testing and Materials), que possuem no seu portefólio uma panóplia enorme de testes e ensaios.
- Abaixo apresentam-se alguns exemplos de testes padronizados.

3.1. Métodos e normas de ensaio

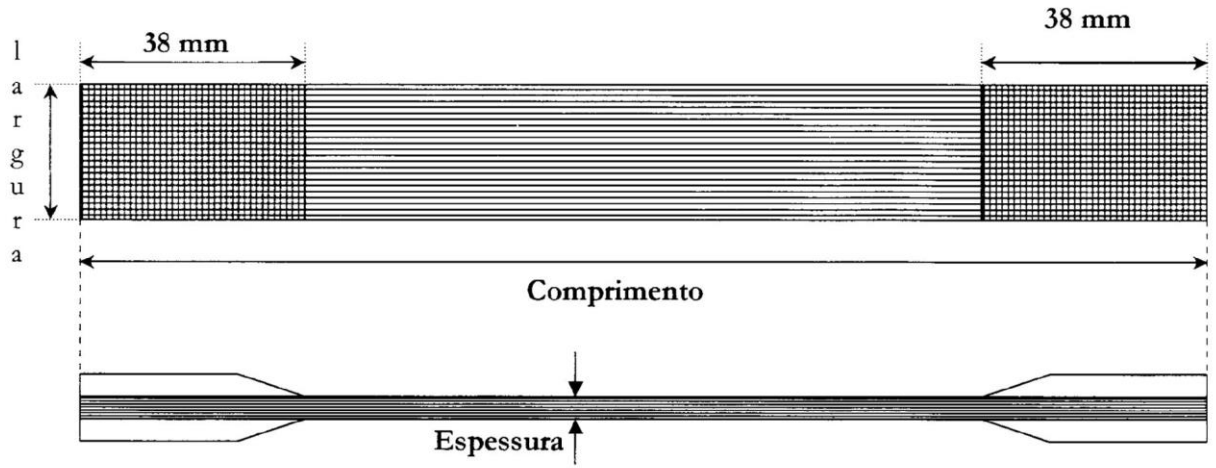
- Tração:
  - Composite Materials ASTM D3039
  - Sandwich Core Materials ASTM C297
  - Open-Hole ASTM D5766
  - Plastics ASTM D638
- Vídeo Exemplo - “Carbon Fiber Tensile Test”: https://www.youtube.com/watch?v=aH9vcV7jzG0; - Tensile Testing Composite Laminate Specimens to ASTM D3039: https://www.youtube.com/watch?v=Ij3lg7jv6pg

3.1.1. Provetes (ASTM D3039)

- Geometria e dimensões:

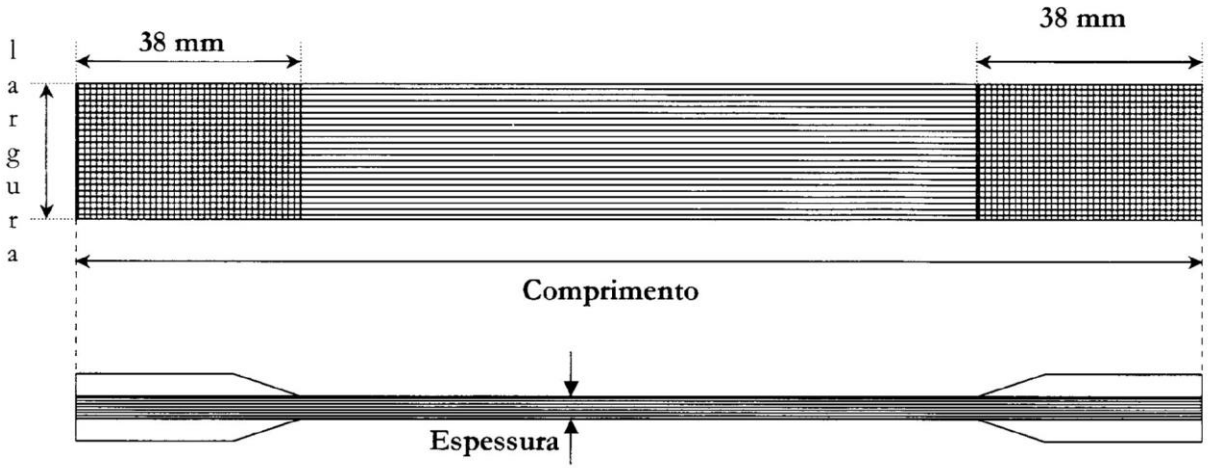
TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations[A]

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle,°
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—



3.1.1. Provetes (ASTM D3039)

- Geometria e dimensões:



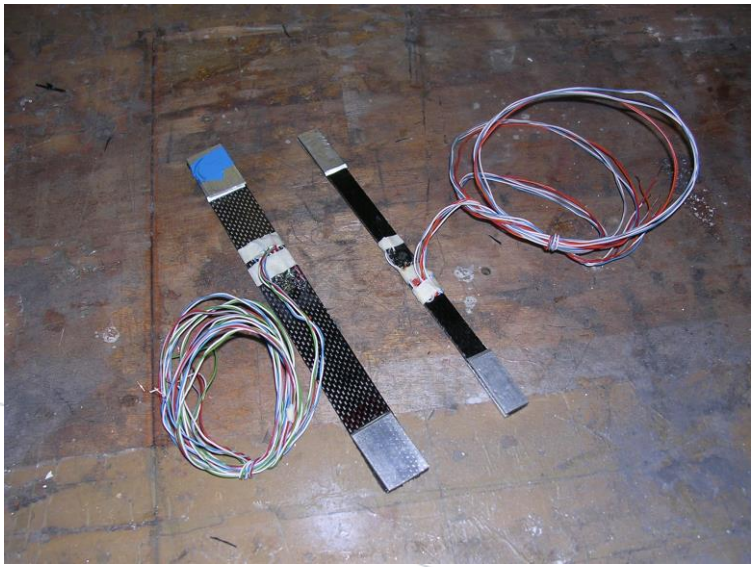
Norma	Orientação das Fibras	Espessura, mm	Comprimento, mm	Largura, mm
ASTM D3039	0º	0,508 a 2,54	228,4	12,7
	0º/90º	0,508 a 2,54	253,8	25,4

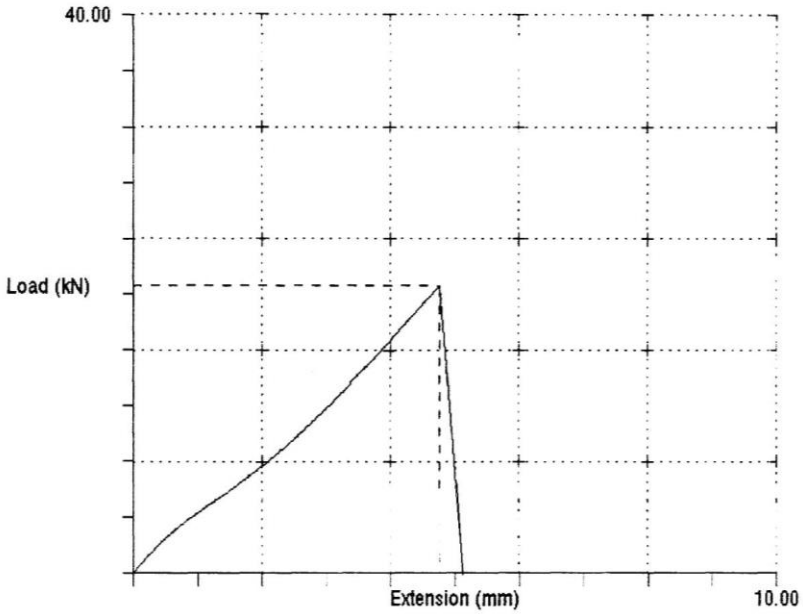
3.1.2. Máquina de ensaios

- Shimadzu AG-1C:
  - Célula de carga de 50 kN

3.1.1. Provetes (ASTM D3039)

- Resultados:





F_{max} (kN)	ΔL_{max} (mm)	F_B (kN)	ΔL_B (mm)
20.59	4.757	20.59	4.757

$$\sigma_x = \frac{P_x}{A} \qquad \varepsilon_x = \frac{u_x}{L}$$

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}$$

3.1. Métodos e normas de ensaio

- Compressão:
  - Composites ASTM D3410
  - Matrix Laminates ASTM D6742
  - Compressive Properties of Polymer Matrix Composite (CLC) ASTM D6641
  - Sandwich Beam ASTM D5467
  - Sandwich Cores ASTM C365
- Vídeo Exemplo - “Carbon Fiber Sandwich Panel Compressive Test”: https://www.youtube.com/watch?v=hezdzBTUnfk

3.1. Métodos e normas de ensaio

- Flexão:
  - Matrix Composites ASTM D7264
  - Four-Point Bending ASTM D6272
  - Core Shear ASTM C393
  - Plastics ASTM D790
- Vídeo Exemplo - “Carbon Fiber Tube Test”: https://www.youtube.com/watch?v=hhjRIB5z7Zc

3.1. Métodos e normas de ensaio

- Módulo de rigidez:
  - Short Beam Shear ASTM D2344
  - In-Plane Shear ASTM D3518
  - Beam Flexural ASTM C397
  - V-Notched Rail Shear ASTM D7078
  - Shear Pull-Through ASTM D7332
- Vídeo Exemplo - “Interlaminar Shear Failure”: https://www.youtube.com/watch?v=PTgnCSKYAdg

3.1. Métodos e normas de ensaio

- Impacto:
  - Damage Resistance ASTM D7136
  - Multiaxial Impact ASTM D3763
- Vídeo Exemplo - “Choosing Composite Reinforcements for Impact Strength; Kevlar, Carbon, Innegra, Diolen”: https://www.youtube.com/watch?v=wPFDBT41SEU

3.1. Métodos e normas de ensaio

- Tenacidade:
  - Fracture Toughness ASTM D6671
  - Fracture Toughness Mode I ASTM D5528
- Vídeo Exemplo - “Drop Testing: Carbon Fiber, Steel, Aluminum Comparison”: https://www.youtube.com/watch?v=khJQgRLKMUo

3.1. Métodos e normas de ensaio

- Humidade:
  - Water Absorption ASTM C272
  - Moisture Conditioning ASTM D5229

4. Procedimento experimental

Fabrico dos provetes:

- Preparar 3 provetes de acordo com a norma ASTM D3039:
  - Selecionar os tecidos de acordo com a especificação do laminado (informar o docente na semana antes das necessidades)
  - Cortar os tecidos com a área e a orientação necessárias para todas as camadas (aproximadamente 300 mm x 100 mm)
  - Ter em conta que a força máxima da máquina de ensaios é 50 kN (selecionar as dimensões largura e espessura em conformidade)
  - Pesar o conjunto das camadas (anotar valor da massa)
  - Preparar camadas de peel-ply, saco perfurado, camada absorvente, e saco de vácuo com medidas adequadas (se aplicável)
  - Aplicar desmoldante na superfície
  - Preparar resina e endurecedor nas proporções corretas para obter a fração volúmica indicada no protocolo (anotar valor da massa)
  - Proceder à laminação (resina + tecido) com o empilhamento especificado

4. Procedimento experimental

- Aplicar o saco de vácuo e ligar a bomba de vácuo (se aplicável)
- Pesar resina sobrante (anotar o valor da massa)
- Aguardar 24 horas
- Desmoldar
- Pesar placa final (anotar valor da massa)
- Cortar os 3 provetes com as medidas necessárias (garantir que as medidas permitem a falha antes de se atingir a força de 50 kN)
- Identificar cada um dos provetes com número de grupo e número de provete (ex. G03-1)
- Pesar cada um dos provetes (anotar os valores das massas)
- Medir cada um dos provetes (anotar os valores do comprimento, da largura média e da espessura média e estimar a área da secção transversal)
- Aplicar os tabs de alumínio para as garras da máquina de ensaios
- Estimar a fração volúmica

4. Procedimento experimental

Ensaio dos provetes:

- Ensaiar 1 provete falso à tração na máquina Shimadzu:
  - Fixar o provete nas garras da máquina
  - Ligar a máquina
  - Ligar o PC
  - Abrir o software de ensaio
  - Zerar a força e o deslocamento
  - Proceder ao ensaio com 1mm/min de velocidade de deslocamento
- Ensaiar os 3 provetes à tração na máquina Shimadzu:
  - Proceder da mesma forma que no caso anterior
  - Fazer o ensaio de cada um dos provetes (anotar força de rutura e alongamento de rutura e guardar os ficheiros de dados)
  - Calcular a resistência à tração longitudinal
  - Calcular o módulo elástico longitudinal