
Estruturas Aeroespaciais II – 10373/15095

2023/2024

Trabalho de Estudo

Dimensionamento de uma secção da fuselagem em compósito de uma aeronave de 9 lugares

1. OBJETIVO

Dimensionar a estrutura de uma secção de uma fuselagem de uma aeronave de nove lugares fabricada em compósito sujeita a restrições de resistência e de rigidez usando o método da idealização estrutural. Obter uma solução numérica (tensões e deslocamentos) da configuração obtida recorrendo a um programa comercial de análise estrutural pelo método dos elementos finitos. Comparar as duas soluções. Fabricar e ensaiar à tração provetes característicos da casca. Escrever um relatório.

2. DESCRIÇÃO

É necessário dimensionar uma secção da fuselagem de uma aeronave de nove lugares com uma massa máxima de descolagem de $m = 3680$ kg e um fator de carga máximo de operação de $n = 4$.

A geometria aproximada e a definição dos parâmetros da secção da fuselagem estão mostradas na Figura 1. A secção tem uma altura h e uma largura w e é duplamente simétrica. A secção da fuselagem tem uma janela de cada lado. As dimensões específicas do problema estão na Tabela 1.

A estrutura da secção da fuselagem é constituída por uma secção fechada de paredes finas unicelular. A casca da secção (exceto na zona das janelas) tem uma espessura t_1 e casca na zona das janelas tem uma espessura t_2 . As áreas da secção transversal dos tensores são $A_3 = b_3 t_3$, onde b_3 e t_3 são o comprimento do contorno e a espessura da secção transversal, respetivamente. Os parâmetros n_1 , n_2 e n_3 , representam o número de camadas dos laminados da casca superior e inferior (laminado 1), casca lateral (laminado 2) e tensores (laminado 3), respetivamente. Uma face da secção da fuselagem encontra-se encastrada enquanto a outra está livre.

Podem ser usados materiais compósitos diferentes no fabrico da secção da fuselagem: fibra de carbono/epóxi unidirecional (CE-1D), fibra de vidro/epóxi unidirecional (GE-1D), tecido de fibra de carbono/epóxi (CE-2D) e tecido de fibra de vidro/epóxi (GE-2D), sendo todos os materiais ortotrópicos e estando as suas propriedades indicadas nas Tabela 2 e Tabela 3.

O carregamento a aplicar na secção da fuselagem resulta de uma condição de voo não

simétrica com $n = 4$ e velocidade $V = 127$ m/s e inclui: uma força vertical, S_y , resultante da força de balanceamento na empenagem horizontal; uma força horizontal, $S_x = \pm S_y$, resultante de uma guinada; momentos fletores, M_x e M_y , produzidos pelas forças anteriores; e um momento torsor, T , também produzido pelas forças anteriores. Os valores destas forças e momentos estão apresentados na Tabela 4.

Pretende-se realizar as seguintes tarefas:

- Usando o método da idealização estrutural e a teoria de laminados, determinar os valores de t_1 , t_2 e A_3 (e correspondentes número de camadas e empilhamento) que minimizam a função $f = 0,6M + 0,4C/100$, onde M é a massa e C é o preço do material da secção da fuselagem, tendo em conta os esforços aplicados na estrutura, os dados das Tabelas 1 a 4, e garantindo que a estrutura não falha (usando um fator de segurança $FS = 1,5$ e um fator de qualidade $FQ = 1,25$), que as curvaturas máximas da secção, $d\theta_x/dz$ e $d\theta_y/dz$, não excedem $0,042^\circ/\text{m}$ e que a taxa de torção, $d\theta_z/dz$, não excede $0,045^\circ/\text{m}$. Neste processo, deve idealizar-se totalmente a secção. Nota: Como critérios adicionais de rigidez devido a instabilidade à compressão, pode considerar-se que a tensão direta longitudinal em qualquer *boom* não pode exceder o valor de $\sigma_x = \pi E_x B / (4L^2)$, onde E_x é o módulo elástico longitudinal e B a área transversal do *boom*, e que a tensão direta longitudinal em qualquer casca não pode exceder o valor de $\sigma_x = 4\pi^2 E_x t^2 / [3b^2(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})]$, onde t é a espessura da casca, b é o perímetro da casca entre *booms* e ν_{xy} e ν_{yx} são os coeficientes de Poisson maior e menor, respetivamente.
- Usando o método dos elementos finitos num programa comercial (ANSYS[®]), estimar as deflexões e o campo de tensões/critérios de falha da estrutura obtida recorrendo a elementos tipo casca lineares e a uma análise estática. Nesta análise deve usar-se o módulo de compósitos ACP para criar e analisar os laminados.
- Fabricar provetes representativos de um dos laminados da casca e ensaiá-los à tração para obter as suas propriedades mecânicas e compará-las com os valores assumidos.
- Comparar e comentar de forma crítica os resultados obtidos.
- Escrever um relatório.

Sugere-se o calendário da Tabela 6 para realização destas tarefas, para que seja possível concluir com sucesso o trabalho.

Tabela 6 – Calendário.

Tarefa \ Semana	18/ 03	25/ 03	01/ 04	08/ 04	15/ 04	22/ 04	29/ 04	06/ 05	13/ 05	20/ 05	27/ 05	03/ 06
a) Projeto												
b) Análise FEM												
c) Ensaios												
d) Análise resultados												
e) Relatório												

3. RELATÓRIO

Cada grupo de 4 alunos (cada grupo da Tabela 5, usando dados diferentes das Tabelas 1 e 4) deve apresentar os resultados do seu trabalho num relatório escrito, **com um máximo de 16 páginas**. Nele deverá explicar-se com o detalhe adequado todos os passos associados à resolução do problema (características dos laminados obtidos na idealização estrutural,

geometria, sistema de unidades adotado, condições de fronteira, carregamento, tipo de elementos, malha, etc.), bem como os resultados finais, onde deverá constar especificamente os valores de f , t_1 , t_2 e A_3 (e correspondente definição dos empilhamentos), as taxas de rotação, a variação do campo de tensões/critérios de falha no componente e os resultados dos ensaios experimentais. Deve ser feita uma análise crítica dos resultados onde deverão ser propostas alterações da estrutura para melhorar a eficiência estrutural.

O relatório deve seguir a seguinte estrutura:

- Introdução: apresentação do problema, objetivos e da geometria. [10 pontos]
- Otimização da Estrutura: apresentação do modelo matemático (análise dos laminados, análise da estrutura e problema de otimização), descrição da implementação do modelo numérico e apresentação dos resultados. [45 pontos]
- Análise por Elementos Finitos: apresentação do modelo no ANSYS[®], (ACP e *Static Structural*) e apresentação dos resultados. [45 pontos]
- Ensaio de Provetes: descrição do procedimento experimental (fabrico e ensaio dos provetes) e apresentação dos resultados. [45 pontos]
- Análise e Discussão: apreciação dos resultados, comparação dos mesmos quando relevante e sugestões concretas de correções/melhorias a aplicar à estrutura. [45 pontos]
- Conclusões: tendo em conta os objetivos, apreciação global do trabalho e dos resultados obtidos. [10 pontos]

A data-limite para entrega do trabalho é 7 de junho de 2024. O relatório em formato pdf deve ser enviado via e-mail para o endereço pgamboa@ubi.pt.

4. DADOS

Tabela 1a – Especificações da secção da fuselagem dependentes do número de grupo.

Grupo	h , mm	w , mm	α , deg	R_1 , mm	R_2 , mm
$i = 1,14$	$1550 - 2(i - 5)$	h	20	h	$\frac{h}{2}\sqrt{4(1 - \cos\alpha) + 1}$

Tabela 1b – Dimensões fixas.

L , mm	L_f , mm	y_w , mm	l_w , mm	h_w , mm
815	500	300	450	325

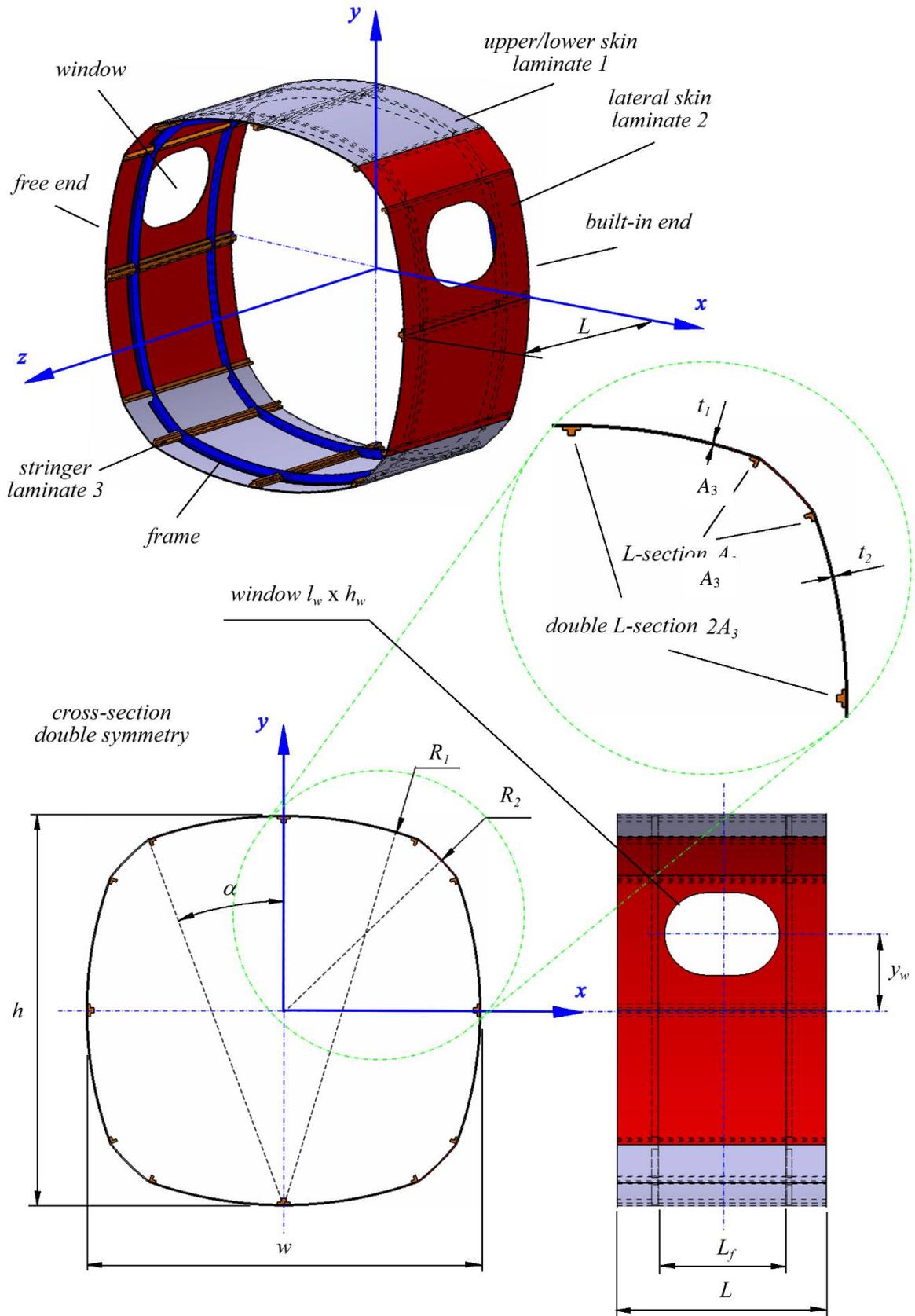


Figura 1 – Geometria e parâmetros da secção da fuselagem.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais para os tensores.

Propriedade	parâmetro	unidade	CE-1D*	GE-1D*	CE-1D**	GE-1D**
		e				
Massa volúmica	ρ	kg/m ³	1600	2080	1530	1930
Módulo elástico longitudinal	E_1	GPa	140	40	105	30
Módulo elástico transversal	E_2	GPa	10	8	7,5	6
Módulo de corte	G_{12}	GPa	5	4	3,75	3
Coefficiente de Poisson maior	ν_{12}	-	0,30	0,25	0,30	0,25
Resistência longitudinal à tração	X_t	MPa	1500	1000	1125	750
Resistência longitudinal à compressão	X_c	MPa	1200	600	900	450
Resistência transversal à tração	Y_t	MPa	50	30	38	23
Resistência transversal à compressão	Y_c	MPa	250	110	188	83
Resistência ao corte	S	MPa	70	40	53	30
Preço	C_s	€/kg	210	60	140	40
Fração volúmica da fibra	V_f	%	60	60	50	50
Fração mássica da fibra	W_f	%	71	78	62	70
Massa por unidade de área da fibra	γ_f	g/m ²	150	150	150	150
Espessura por camada	t_0	mm	0,132	0,093	0,16	0,11

Nota: * Laminados pré-impregnados com cura em autoclave. ** Laminados pré-impregnados com cura em saco de vácuo e estufa.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais para as cascas.

Propriedade	parâmetro	unidade	CE-2D*	CE-2D**	GE-2D**	GE-2D**
Massa volúmica	ρ	kg/m ³	1400	1370	1660	1660
Módulo elástico longitudinal	E_1	GPa	52,5	42	15	15
Módulo elástico transversal	E_2	GPa	52,5	42	15	15
Módulo de corte	G_{12}	GPa	3,75	3	2,4	2,4
Coefficiente de Poisson maior	ν_{12}	-	0,1	0,1	0,2	0,2
Resistência longitudinal à tração	X_t	MPa	450	360	264	264
Resistência longitudinal à compressão	X_c	MPa	428	342	255	255
Resistência transversal à tração	Y_t	MPa	450	360	264	264
Resistência transversal à compressão	Y_c	MPa	428	342	255	255
Resistência ao corte	S	MPa	68	54	24	24
Preço	C_s	€/kg	140	110	60	30
Fração volúmica da fibra	V_f	%	40	35	35	35
Fração mássica da fibra	W_f	%	51	45	55	55
Massa por unidade de área da fibra	γ_f	g/m ²	160	160	83	160
Espessura por camada	t_0	mm	0,226	0,258	0,091	0,176

Nota: * Laminados fabricados com o método *hand-layup* com cura em saco de vácuo. ** Laminados fabricados com o método *hand-layup* com cura à temperatura e pressão ambiente.

Tabela 4a – Carregamento fixo.

S_y, N	S_x, N
-15982	$\pm S_y$

Tabela 4b – Carregamento dependente do número de grupo.

Grupo	M_x, Nmm	M_y, Nmm	T, Nmm
$i = 1,14$	$-[5085 - 163(i - 5)]S_y$	$-[4770 - 163(i - 5)]S_x$	$[1270 - 10(i - 1)](S_y - S_x)$

Tabela 5 – Grupos.

Grupo	Aluno 1	Aluno 2	Aluno 3	Aluno 4	Turno
1	Alexandre Teixeira 47710	Sebastião Ventura 47768	Fernando Afonso 48175	Francisco Albuquerque 48220	1
2	Mafalda Assis 48022	Miguel Ruivo 48147	Afonso Gamboa 48261	Anton Mamus 48618	1
3	Lara Sampaio 47835	Tomás Carneiro 47964	Guilherme Rebelo 48107	Gonçalo Moreira 48327	1
4	Pedro Leite 48141	Mariana Peixoto 48161	Diogo Garcia 48587	Pedro Rafeiro 48683	1
5	Isabel Gomes 47822	Guilherme Martins 48007	Breno Cabral 48334	Alexandre Pereira 48502	2
6	André Tomaz 48108	Cristina Martins 48392	Otávio Lopes 48508	Rodrigo Silva 48599	2
7	Diogo Cid Pinho 47801	Miguel Albino 47808	Martim Victorio 48330	Beatriz Gonçalves: 48594	2
8	Ricardo Fonte 31505	David Ponciano 32959	Weila Fernandes 44995	Ludnésia Mata 47093	2
9	Rui Teixeira 45442	João Rosa 45676	Rodrigo Oliveira 45752	Leonardo Santos 47610	2
10	Maria Fernandes 47978	André Sousa 48185	Pedro Moreira 48317	Bernardo Guerreiro 48428	3
11	Daniel Câmara 47795	João Ramalhosa 47946	Fernando Faria 48082	Raúl Santos 48558	3
12	Admir Marques 43871	Henrique Vieira 47797	Gonçalo Dias 48008	Luís Lopes 48808	3
13	António Pimenta 42135	Kissange Muthemba 46713	Jacibela Cardoso 47090		3
14	Jefferson Cardoso 44655	Raquel Serrano 53234	Graciela Peláez 53235		3