
Estruturas Aeroespaciais II – 10373/15095

2024/2025

Trabalho de Estudo

Dimensionamento do cone de cauda da fuselagem em compósito de uma aeronave de 2 lugares

1. OBJETIVO

Dimensionar a estrutura do cone de cauda de uma fuselagem de uma aeronave de dois 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 o cone de cauda da fuselagem de uma aeronave de dois lugares com uma massa máxima de descolagem de $m = 650$ kg e um fator de carga máximo de operação de $n = 4$.

A geometria aproximada e a definição dos parâmetros do cone de cauda estão mostradas na Figura 1. O cone de cauda tem uma altura $h(z)$ e uma largura $w(z)$ e é simétrica relativamente ao plano vertical longitudinal. O cone de cauda tem uma janela de cada lado com dimensões l_w e h_w (largura e altura) e com posição do canto inferior dianteiro z_w e y_w . As dimensões específicas do problema estão nas Tabelas 1.

A estrutura da secção da fuselagem é constituída por uma secção fechada de paredes finas unicelular. A casca lateral e superior tem uma espessura t_1 e a casca inferior 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 lateral e superior (laminado 1), casca inferior (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 do cone de cauda: 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 no cone de cauda resulta de uma condição de voo não simétrica com $n = 4$ e velocidade $V = 135$ 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.

As seguintes tarefas são necessárias para realizar o trabalho:

- 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 $0,25^\circ/\text{m}$ e que a taxa de torção, $d\theta_z/dz$, não excede $0,5^\circ/\text{m}$. 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 é 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. Pode ser necessário adicionar elementos estruturais para tornar a estrutura realista e viável.
- 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	17/ 03	24/ 03	31/ 03	07/ 04	14/ 04	21/ 04	28/ 04	07/ 05	12/ 05	19/ 05	26/ 05	02/ 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, dos 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: apreciação global do trabalho e dos resultados obtidos tendo em conta os objetivos. [10 pontos]

A data-limite para entrega do trabalho é 6 de junho de 2025. O relatório em formato pdf deve ser enviado via e-mail para o endereço pgamboa@ubi.pt.

4. DADOS

Tabela 1a – Especificações do cone de cauda dependentes do número de grupo.

Grupo	L , m	h , m	w , m
$i = 1,16$	$4 - 0,02(i - 1)$	$0,65 - 0,325 \left(\frac{z}{l}\right)$	$0,85 - 0,51 \left(\frac{z}{l}\right)$

Tabela 1b – Dimensões fixas.

z_w , mm	y_w , mm	l_w , mm	h_w , mm
50	50	300	250

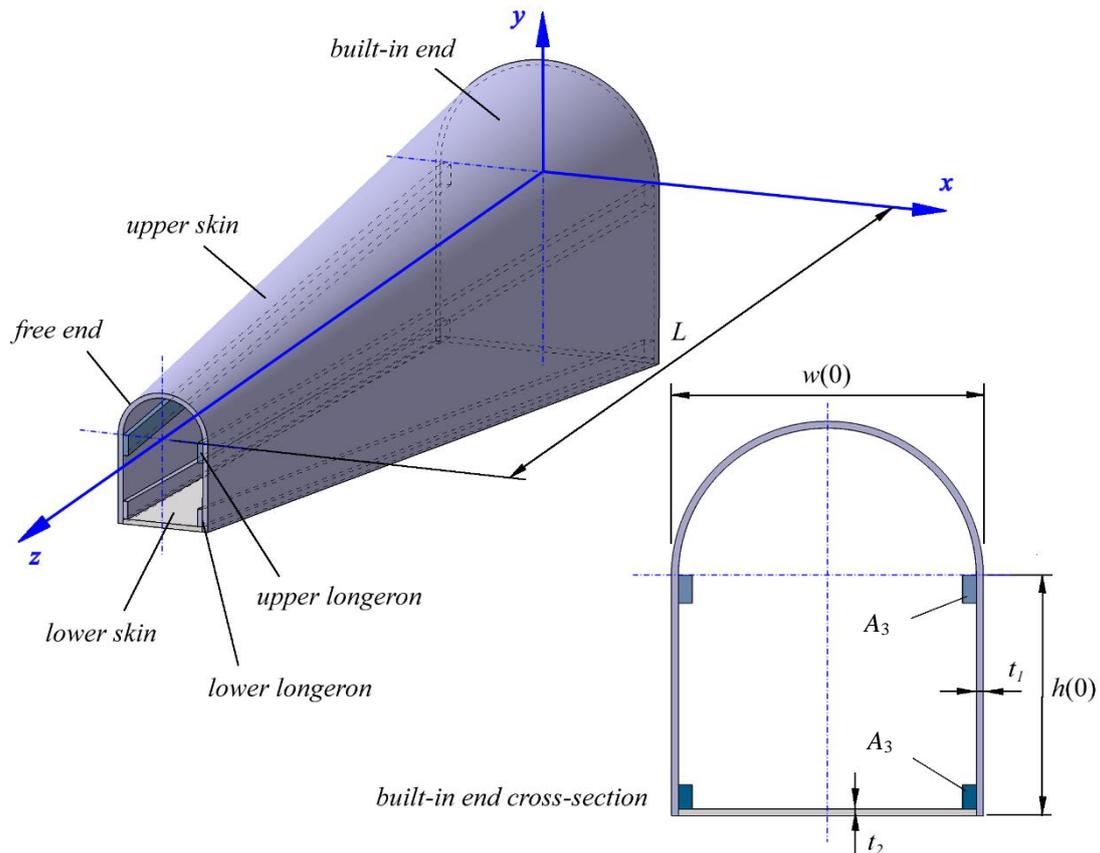


Figura 1 – Geometria e parâmetros do cone de cauda.

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 4 – Carregamento.

Grupo	S_y , N	S_x , N	M_x , Nm	M_y , Nm	T , Nm
$i = 1,16$	$-1925 + 44(i - 1)$	$\pm S_y$	$-S_y(L - z)$	$-S_x(L - z)$	$0,8(S_y - S_x)$

Tabela 5 – Grupos.

Grupo	Aluno 1	Aluno 2	Aluno 3	Aluno 4	Turno
1	Daniela Pereira 49428	Samuel Macedo 49552	José Prata 49563	José Bizarro 49904	1
2	Francisco Ribeiro 48089	Leonor Almeida 48507	Gustavo Domingues 49620	Joana Quelhas 50177	1
3	Patrícia Soares 49521	Maria Pina 49547	Simão Serra 49553	José Barros 49616	1
4	Joana Sousa 49496	Orlando Fortunato 49672	Alex Burdujan 49989	Nicole Silva 50022	1
5	Gonçalo Coimbra 49495	Afonso Salvador 49818	André Azevedo 50930	Daniel Santo 50949	2
6	Leonardo Ferreira 49538	Luís Gonçalves 49557	Max Filho 49598	Pedro Simões 49781	2
7	Manuel Pereira 49535	Jéssica Oliveira 49721	Dmytro Kovalchuk 50140	Gonçalo Tavares 53063	2
8	Nuno Riscado 49681	João Branco 49935	Rafael Andrade 50298	Manuel Bernardo 50666	2
9	Rui Teixeira 45442	Carolina Gomes 49561	Beatriz Massano 49796	Maria Rebelo 50345	3
10	David Simões 49384	Bernardo Piteira 49399	Luís Calmeiro 49636	Miguel Robalo 49646	3
11	Vasco Castro 49551	Romeu Daniel 49895	Rodrigo Matos 50053	João Rodrigues 50061	3
12	Raquel Loureiro 49406	Margarida Guerreiro 49588	André Teixeira 49858	Rúben Marçal 50508	3
13	Beatriz Santos 49536	Bruno Bernardino 50257	Rodrigo Condeço 50498	Tiago Sequeira 50873	4

14	Paulo Rosa 48150	José Costa 48214	João Silva 48733	Tomás Saraiva 50180	4
15	Christian Delgado 48824	David Andrade 49560	Rafael Ferreira 49855	Jorge Vicente 54957	4
16					4