

Estudo experimental de *endplates* para asas finitas

Experimental study of the endplates for finite wings

Tiago Rocha¹ | André Oliveira¹ | Luís Eça¹ | André Marta¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Portugal,
Emails: tiago.pereira.rocha@tecnico.ulisboa.pt; andrerochaoliveira@tecnico.ulisboa.pt; luis.eca@tecnico.ulisboa.pt; andre.marta@tecnico.ulisboa.pt

resumo

Os apêndices aerodinâmicos dos carros *Formula Student* têm-se tornado cada vez mais complexos. No entanto, devido às velocidades relativamente baixas atingidas pelos carros e aos constrangimentos impostos pelas regras das competições, a força de sustentação (*downforce*) que os carros produzem acarreta consigo elevados valores da força de resistência. Um conceito alternativo para as *endplates* da asa traseira de um *Formula Student* é apresentado com o objetivo de reduzir a força de resistência global da mesma. Para esse efeito, perfis alares são usados como secção das *endplates*. Um modelo à escala 1:2,5 foi construído para testar em túnel de vento. Três configurações geométricas foram testadas: asa sem placas; asa com placas planas e placas com perfil. A utilização de duas instalações experimentais permitiu avaliar a influência do número de Reynolds no desempenho da solução proposta. Os resultados obtidos confirmaram o potencial do conceito e mostraram efeitos de escala significativos associados aos baixos números de Reynolds.

Palavras-chave: Formula Student, Asas finitas, Endplates, Túnel de vento, Sustentação e resistência

abstract

Formula Student cars use aerodynamic appendages that are becoming too complex. However, the limitations imposed by the rules (low aspect ratio wings) and the relatively low speeds that the cars attain lead to large drag forces to obtain a significant downforce. The goal of this study is to reduce the drag force of the rear wing of a Formula Student by using a new design of the endplates that uses airfoils sections. A model at the scale 1:2.5 is tested in two wind tunnels to evaluate the aerodynamic performance of the new design and compare it with the traditional use of flat plates for the endplates and a wing without endplates. The two wind tunnels allow to check the influence of the Reynolds number that has a significant impact on the performance of the new design. At the desired range of Reynolds numbers, the results confirm the potential of the new design to reduce the drag force generated by the rear wing. The experimental data also show significant scale effects at low Reynolds numbers with a decrease of the lift to drag ratio.

Keywords: wings endplates, wind tunnel tests, formula student

1- INTRODUÇÃO

As características aerodinâmicas no desporto automóvel têm sido um fator diferenciador do desempenho desde a década de 1960, quando asas foram usadas pela primeira vez na Fórmula 1 (Katz 2003). O uso de superfícies sustentadoras aumenta a carga vertical nos pneus, reduzindo o escorregamento μ necessário para a mesma força horizontal (Eq. (1)).

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (1)$$

onde F_x é uma componente da força paralela ao chão, e F_z é a força vertical. A carga aerodinâmica gerada pelas superfícies sustentadoras tem como efeito aumentar os limites de desempenho do automóvel sem acrescentar massa ao mesmo. A carga aerodinâmica é normalmente gerada recorrendo ao uso de asas, venturis e fundos planos (Trzesniowski 2014).

1.1. Aerodinâmica na Formula Student

A Formula Student é uma competição mundial para estudantes de engenharia em que estes projetam, constroem e competem com protótipos em diferentes eventos estáticos e dinâmicos (FSG 2020). Um sistema de pontos é usado para classificar as equipas concorrentes, com ênfase no desempenho dos protótipos na pista.

Os apêndices aerodinâmicos têm cada vez mais preponderância para o desempenho dos protótipos, pelo que se têm tornado cada vez mais complexos. As asas produzem cerca de 75% de toda a sustentação dos carros, sendo a asa traseira responsável pela maior parte da resistência dos mesmos (ver Tabela 1).

Os regulamentos técnicos da Formula Student limitam as dimensões dos apêndices aerodinâmicos usados pelas equipas. Isto resulta em asas traseiras com muito baixo alongamento, sendo a causa dos elevados valores de resistência como ilustrado na Tabela 1. Ao tentarem aumentar a carga aerodinâmica das asas traseiras, é frequente as equipas recorrerem ao uso de *gurney flaps* no bordo de fuga não só do hiper-sustentador da asa, mas também no das *endplates* (Fig. 1). Estes originarão ali uma zona de separação, acarretando uma penalização em termos de resistência.

Tabela 1 | Distribuição das forças por componente de um carro FS. Valores cedidos pela FST Lisboa.

Componente	C_D	C_D (%)	C_L	C_L (%)	C_L/C_D
Asa Dianteira	-0,175	13,7	-1,165	39,8	6,669
Asa Traseira	-0,487	38,1	-1,010	34,5	2,072
Fundo Plano	-0,140	10,9	-0,697	23,8	4,994
Rodas Dianteiras	-0,066	5,1	0,051	-1,7	-0,780
Rodas Traseiras	-0,074	5,8	0,037	-1,2	-0,495
Sidepod	0,013	-1,0	0,105	-3,6	8,154
Outros	-0,350	27,4	-0,247	8,4	0,706
Total	-1,278	100	-2,926	100	2,289



Fig. 1 | *Gurney flap* na *endplate* de um carro FS.

Este trabalho propõe a utilização de perfis aerodinâmicos como secção das *endplates* como alternativa ao uso de *gurney flaps*. A *endplate* é assim convertida numa superfície sustentadora, reduzindo o ângulo de ataque induzido da asa α_i e consequentemente a resistência induzida D_i , aumentando a eficiência da asa e, por conseguinte, do carro.

Este trabalho foi feito em contexto de duas tese de mestrado, (Rocha 2020), em que a solução foi primeiro analisada em simulações numéricas no programa Star-CCM+. Diferentes perfis foram testados, bem como várias dimensões das *endplates*. Mais tarde, um modelo à escala com placas planas e outras com o perfil NACA 2402 foi construído e testado em túnel de vento. Este artigo descreve a parte experimental deste trabalho apresentando e discutindo os resultados obtidos nos testes efetuados em túnel de vento.

2- TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes foram realizados primeiro no Laboratório de Mecânica de Fluidos do Instituto Superior Técnico (IST) e no túnel Aero-acústico do laboratório de Engenharia Aeroespacial do IST que se encontram ilustrados na figura 2. Foi construído um modelo à escala 2:5 com recurso à impressão 3D, com base na geometria da asa desenvolvida no trabalho de simulação feito previamente. É importante referir que a comparação feita entre as diferentes geometrias testadas destina-se a identificar tendências nos coeficientes aerodinâmicos devido a alterações da geometria e não à caracterização quantitativa dos coeficientes aerodinâmicos.

2.1. Túnel do Laboratório de Mecânica de Fluidos

Três configurações geométricas diferentes foram testadas: uma configuração de referência sem placas; placas planas como *endplates*; e asas com o perfil NACA 2402 como *endplates*. Os

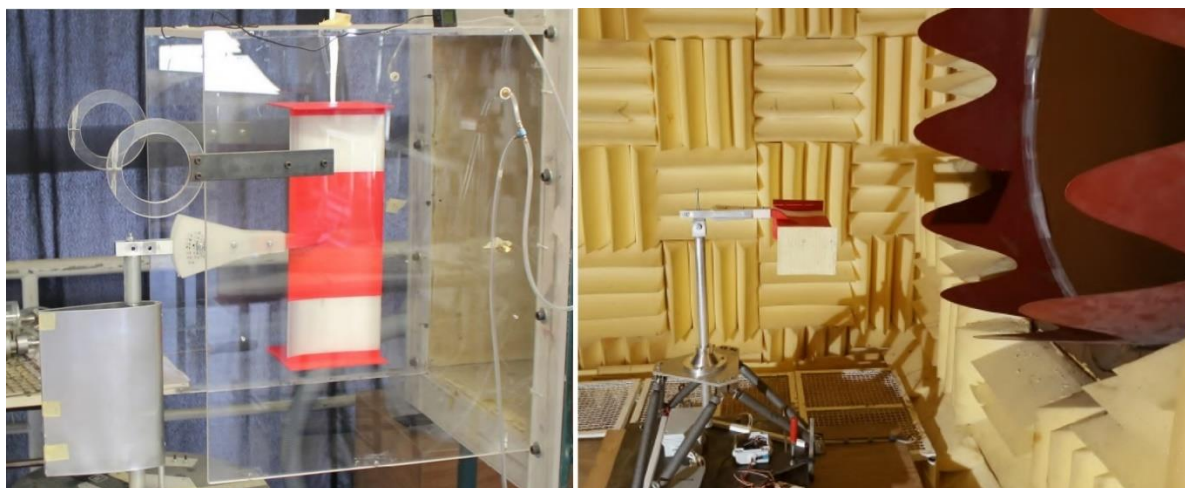


Fig. 2 | Túnel do Laboratório de Mecânica dos Fluidos (esquerda) e túnel aero-acústico (direita)

dados foram registados para duas velocidades diferentes: 7,5 e 15 m/s. Para cada configuração, vinte aquisições foram realizadas, cada uma durante 20s a 150Hz.

Fios de lã foram adicionados às superfícies da asa para que o comportamento do escoamento sobre a asa pudesse ser visualizado e comparado com as simulações CFD. Numa fase posterior, tiras de lixa foram coladas nas superfícies do modelo. A rugosidade provoca a transição, fixando o local de transição do escoamento (Barlow 1999) e tentando evitar quaisquer bolhas de separação laminar (Traub 2011) que podem ocorrer aos baixos números de Reynolds a que se realizaram os ensaios.

2.1.1. Endplates sem rugosidade

O número de Reynolds Re e os coeficientes aerodinâmicos obtidos para a asa com *endplates* sem rugosidade são apresentados na Tabela 2. Os valores de referência correspondem ao ensaio sem *endplates* à velocidade mais baixa. Para o Reynolds mais baixo, as diferenças entre os coeficientes aerodinâmicos das três geometrias são significativas. As *endplates* com secção NACA 2402 tem menos sustentação e mais resistência que a placa plana. No entanto, as diferenças entre os dois tipos de *endplates* diminuem significativamente com o aumento de Re . A variação de C_D com Re mostra uma influência mais forte dos efeitos de escala para as *endplates* com secção NACA 2402 do que para as placas planas.

Tabela 2 | Número de Reynolds Re e coeficientes de sustentação C_L e resistência C_D . *Endplates* sem rugosidade. Valores de referência obtidos da asa sem *endplates* ao Re mais baixo

<i>Endplates</i>	Velocidade (m/s)	Re	$C_L/C_{L_{ref}}$	$C_D/C_{D_{ref}}$	$(C_L/C_D)/(C_L/C_D)_{ref}$
Sem Placas	7,823	$8,50 \times 10^4$	1	1	1
	14,781	$1,61 \times 10^5$	1,032	0,778	1,309
Plana	7,851	$8,53 \times 10^4$	1,312	0,944	1,377
	14,800	$1,61 \times 10^5$	1,392	0,833	1,688
NACA 2402	7,872	$8,56 \times 10^4$	1,167	1,278	0,905
	14,833	$1,61 \times 10^5$	1,328	0,889	1,480

2.1.2. Endplates com rugosidade

A rugosidade introduzida pela lixa tem uma influência considerável nos resultados, que são apresentados na Tabela 3 utilizando condições de referência iguais às da secção anterior. A variação do coeficiente de sustentação C_L com o números de Reynolds Re diminui com a aplicação de rugosidade, mas as tendências observadas nos resultados experimentais não estão de acordo com as obtidas nas simulações de CFD. No entanto, os resultados numéricos foram obtidos sem efeitos de bloqueamento e a um número de Reynolds mais elevado. Os valores obtidos para a razão C_L/C_D mostram que os efeitos de escala não conseguem ser evitados com a utilização de *endplates* rugosas, especialmente para a geometria que utiliza o perfil NACA 2402.

Tabela 3 | Número de Reynolds Re e coeficientes de sustentação C_L e resistência C_D . *Endplates* com rugosidade. Valores de referência obtidos da asa sem *endplates* ao Re mais baixo.

<i>Endplates</i>	Velocidade (m/s)	Re	$C_L/C_{L_{ref}}$	$C_D/C_{D_{ref}}$	$(C_L/C_D)/(C_L/C_D)_{ref}$
Plana	8,040	$8,74 \times 10^4$	1,005	1,167	0,863
	14,948	$1,63 \times 10^5$	1,134	0,889	1,216
NACA 2402	8,001	$8,70 \times 10^4$	0,968	1,333	0,698
	14,989	$1,63 \times 10^5$	1,070	0,889	1,157

2.1.3. Ângulos de Guinada – Escoamento Lateral

Dois ângulos de guinada (β) foram testados para as duas configurações com *endplates* (planas e com o perfil NACA 2402) para analisar o comportamento da asa numa condição de curva. Os ângulos escolhidos foram 4 e 8 graus, com base na documentação da FST Lisboa. Esses dois valores cobrem toda a gama de ângulos em situação de curva num evento de Formula Student. Os coeficientes aerodinâmicos e os números de Reynolds são apresentados na Tabela 4.

Também neste caso há uma diferença significativa entre os dois números de Reynolds testados. As *endplates* com o perfil NACA 2402 exibem geralmente valores menores de C_L e maiores de C_D do que as *endplates* planas. Para as duas geometrias e números de Reynolds testados os valores de C_D aumentam com o ângulo de guinada com a exceção das *endplates* planas ao Re mais baixo. O

Tabela 4 | Número de Reynolds Re e coeficientes de sustentação C_L e resistência C_D . Escoamento com ângulo de guinada β . Valores de referência obtidos da asa sem *endplates* com escoamento alinhado ao Re mais baixo.

<i>Endplates</i>	β (°)	Velocidade (m/s)	Re	$C_L/C_{L_{ref}}$	$C_D/C_{D_{ref}}$	$(C_L/C_D)/(C_L/C_D)_{ref}$
Plana	0	8,040	$8,74 \times 10^4$	1,005	1,021	0,863
		14,948	$1,63 \times 10^5$	1,134	0,889	1,216
	4	7,726	$8,40 \times 10^4$	1,070	1,389	0,759
		15,127	$1,64 \times 10^5$	1,102	0,944	1,160
	8	7,927	$8,62 \times 10^4$	1,038	1,333	0,770
		14,765	$1,61 \times 10^5$	1,070	1,111	0,942
NACA 2402	0	8,001	$8,70 \times 10^4$	0,968	1,333	0,698
		14,989	$1,63 \times 10^5$	1,070	0,889	1,157
	4	8,022	$8,72 \times 10^4$	0,995	1,444	0,669
		14,987	$1,63 \times 10^5$	1,038	1,000	1,011
	8	7,990	$8,69 \times 10^4$	0,973	1,556	0,611
		14,985	$1,63 \times 10^5$	1,005	1,111	0,877

coeficiente de sustentação C_L exibe pequenas variações com o ângulo β que nem sempre são monótonas. Os resultados obtidos no túnel de vento do Laboratório de Mecânica de fluidos mostram uma forte influência do número de Reynolds na eficiência aerodinâmica (C_L/C_D) da solução proposta para as *endplates*. Esta influência dos baixos números de Reynolds e dos efeitos de bloqueamento foram confirmadas em simulações de CFD (Rocha 2020).

2.1. Túnel Aero-acústico

2.2.1. Ensaios com escoamento alinhado

O modelo da asa com e sem *endplates* foi também testado no Túnel de Vento Aeroacústico do Laboratório de Engenharia Aeroespacial (Oliveira 2020). As duas grandes vantagens proporcionadas por este túnel é a redução significativa do bloqueamento e o aumento do número de Reynolds que permitiu alcançar os valores de Re da escala real dos Fórmula Student. No entanto, tal como ilustrado na figura 1, o suporte do modelo e a balança do túnel aero-acústico estão expostos ao escoamento pelo que os valores dos coeficientes aerodinâmicos não correspondem apenas ao modelo. Nestas condições não faz sentido determinar a razão C_L/C_D , mas pode continuar a comparar-se o desempenho relativo entre as três geometrias testadas. Foram testadas quatro velocidades diferentes do escoamento, 15, 22,5, 30 e 37,5m/s. Os números de Reynolds e os coeficientes aerodinâmicos são apresentados na Tabela 5.

Os resultados mostram um forte efeito do número de Reynolds nas três geometrias com os valores de C_L mais elevados para os dois Re mais baixos. Estes resultados são explicados por bolhas de separação laminar que foram visualizadas nos ensaios realizados no túnel do Laboratório de Mecânica dos Fluidos (Rocha 2020). Para os dois Re mais altos, há uma queda significativa do C_L e do C_D que sugere o desaparecimento das bolhas de separação laminar. No entanto devido à configuração do túnel, não foi possível confirmar este resultado.

Tabela 5 | Número de Reynolds Re e coeficientes de sustentação C_L e resistência C_D obtidos no Túnel Aeroacústico. *Endplates* sem rugosidade. Valores de referência obtidos da asa sem *endplates* ao Re mais baixo.

<i>Endplates</i>	Velocidade (m/s)	Re	C_L/C_{Lref}	C_D/C_{Dref}
Sem Placas	14,653	1,59E+05	1,000	1,000
	22,072	2,40E+05	1,060	0,870
	29,542	3,21E+05	0,479	0,500
	37,011	4,02E+05	0,516	0,401
Plana	14,653	1,59E+05	0,916	1,229
	22,072	2,40E+05	0,903	0,563
	29,542	3,21E+05	0,762	0,518
	37,011	4,02E+05	0,633	0,423
NACA 2402	14,653	1,59E+05	0,823	1,539
	22,072	2,40E+05	0,823	0,479
	29,542	3,21E+05	0,933	0,496
	37,011	4,02E+05	0,689	0,408

Os ensaios realizados aos quatro números de Reynolds diferentes confirmam que a comparação entre as três geometrias e em particular os dois tipos de *endplates* é fortemente dependente do número de Reynolds. Para os Reynolds mais baixos as *endplates* planas produzem mais sustentação e menos resistência do que as *endplates* com o perfil NACA 2402. Estes resultados confirmam as tendências obtidas no túnel do Laboratório de Mecânica de Fluidos. No entanto, tal como ilustrado na Tabela 6, para os Re mais elevados a tendência inverte-se e coincide com os resultados obtidos em CFD (Rocha 2020).

Tabela 6 | Razão entre os coeficientes de sustentação C_L e resistência C_D das asa com *endplates* com o perfil NACA 2402 (C_{L2} e C_{D2}) e *endplates* planas (C_{L1} e C_{D1}). Ensaios no Túnel Aeroacústico com escoamento alinhado.

Velocidade (m/s)	C_{L2}/C_{L1}	C_{D2}/C_{D1}
14,653	0,899	1,252
22,072	0,911	0,850
29,542	1,224	0,959
37,011	1,089	0,967

2.2.2. Ângulos de Guinada – Escoamento Lateral

Tendo em consideração que os Fórmula Student operam essencialmente em curva, foram também realizados no túnel aero-acústico ensaios com um ângulo de guinada β . Estes testes foram realizados posteriormente aos apresentados na secção anterior e destinaram-se a comparar o desempenho dos dois tipos de *endplates* testados, pelo que a Tabela 7 apresenta apenas a razão entre os coeficientes aerodinâmicos obtidos aos ângulo de guinada de $\beta = 4^\circ$ e $\beta = 8^\circ$.

Para a maioria das condições testadas as *endplates* com o perfil NACA 2402 conduzem a um aumento do coeficiente de sustentação e uma diminuição do coeficiente de resistência em relação às *endplates* planas. O efeito do Re é menor para os ensaios com ângulo de guinada do que o obtido com o escoamento alinhado. No entanto, para o coeficiente de resistência C_D ainda se observam variações no desempenho com a alteração do número de Reynolds. Estes resultados sugerem que a utilização de perfis sustentadores nas *endplates* é uma solução original e prometedora para a Fórmula Student.

Tabela 7 | Razão entre os coeficientes de sustentação C_L e resistência C_D das asa com *endplates* com o perfil NACA 2402 (C_{L2} e C_{D2}) e *endplates* planas (C_{L1} e C_{D1}). Ensaios no Túnel Aeroacústico com ângulo de guinada β .

Velocidade (m/s)	Ângulo de guinada, β ($^\circ$)			
	4		8	
	C_{L2}/C_{L1}	C_{D2}/C_{D1}	C_{L2}/C_{L1}	C_{D2}/C_{D1}
15	1,028	0,906	0,972	0,898
22,5	0,969	0,805	1,011	0,891
30	1,035	0,879	1,101	1,180
37,5	1,145	1,388	1,037	1,022

3- CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é demonstrar o aumento do desempenho aerodinâmico da asa traseira de um Fórmula Student com a utilização de *endplates* com um perfil alar na sua secção. O conceito foi desenvolvido com simulações de CFD tendo se utilizado *endplates* planas como condição de referência. Os testes realizados no túnel do laboratório de Mecânica de Fluidos não permitiram atingir o número de Reynolds da escala real. Os resultados obtidos mostraram uma forte influência dos efeitos de escala nos coeficientes aerodinâmicos da solução proposta devido à ocorrência de bolhas de separação. Não foi possível evitar os efeitos de baixos números de Reynolds utilizando rugosidade nas *endplates*. O túnel aero-acústico que permite atingir números de Reynolds mais elevados confirmaram a influência dos efeitos de escala e os coeficientes aerodinâmicos obtidos à escala real confirmaram as tendências obtidas nas simulações CFD.

REFERÊNCIAS

- Formula Student Germany. Formula student rules 2020, 2020
- Katz, J. 2003. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers. ISBN 978-0-837-60142-7
- Oliveira A. 2020. Design, Construction, Calibration and Testing of a Wind Tunnel Force Balance. Tese de Mestrado, IST, ULisbon.
- Pope, A., Barlow, J. B., Rae, W. H. 1999. Low-Speed Wind Tunnel Testing, 3rd Edition. John Wiley and Sons, INC..
- Rocha T. 2020. Numerical and Experimental Study of Wing Tip Endplates of a Formula Student Car. Tese de Mestrado, IST, ULisbon.
- Traub, L. 2011. Experimental investigation of the effect of trip strips at low Reynolds number. Journal of Aircraft.
- Trzesniowski, M 2014. Rennwagenteknik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme, chapter Aerodynamik Aerodynamics. Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-04918-8