

## Comparação do Efeito de Rugosidades na Transição da Camada Limite

Rafael Estorniollo

Victor Barcelos Victorino

Marcello Augusto Faraco de Medeiros

Escola de Engenharia de São Carlos - USP

rafael.estorniollo@usp.br

### Objetivos

O arrasto viscoso compromete o desempenho aerodinâmico ao aumentar consumo de combustível, emissões e ruído, sendo a camada limite turbulenta uma de suas principais origens. Em escoamentos bidimensionais, a transição é geralmente associada ao crescimento de ondas de Tollmien–Schlichting (TS). Irregularidades superficiais, como degraus, ressalto e cavidades, podem modificar esse processo, induzindo em alguns casos a transição *bypass*. Estudos recentes relacionaram cavidades a modos instáveis que interagem de forma não linear, antecipando a turbulência. Este trabalho investiga como ressalto e cavidades de mesma altura adimensional ( $h/\delta^*$ ) desencadeiam transição via ondas TS ou *bypass*, utilizando análises espectrais e no domínio do tempo para identificar mecanismos dominantes e seus regimes de atuação.

### Métodos e Procedimentos

Os experimentos foram conduzidos no túnel de vento de baixo ruído acústico e turbulência

(LANT) da EESC-USP, a uma velocidade de escoamento livre de 20 m/s. O modelo experimental corresponde a uma placa plana de alumínio com dimensões de 2 m × 1 m × 10 mm, equipada com um ressalto retangular de arestas vivas, posicionado a 0,6 m do bordo de ataque. Esse ressalto apresenta comprimento de 30 mm, estende-se por uma envergadura de ±0,3 m em torno da linha de centro do modelo e possui altura ajustável de forma remota, variando entre 0 e 20 mm. As medições de velocidade média e de flutuações foram obtidas com um anemômetro de fio quente modelo AN-1002, acoplado a uma sonda de camada limite 55P15 (Dantec). A conversão de tensão em velocidade foi realizada por meio de calibração com a velocidade do escoamento livre do túnel, determinada através de um tubo de Pitot estático. Para medições de pressão foi utilizado um tubo de Preston.

### Resultados

Tabela 1: Casos abordados e seus respectivos locais e mecanismos de transição.

Caso	Irregularidade	$h/\delta^*$	Transição $x$ [m]	$Re_x(10^6)$	Mecanismo de Transição
G3	Cavidade	-3.22	0.64	0.74	Bypass
G2	Cavidade	-1.29	1.90	1.28	TS
G1	Cavidade	-0.64	-	-	TS
S	Liso	0	-	-	TS
B1	Ressalto	0.64	1.60	1.86	TS
B2	Ressalto	1.29	0.70	0.82	TS ou Bypass
B3	Ressalto	3.22	0.64	0.74	Bypass

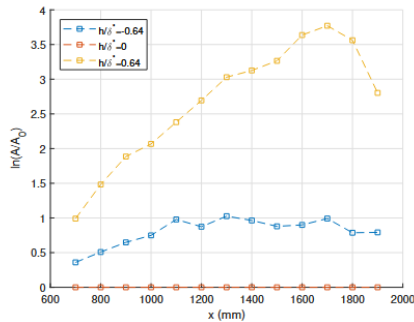


Figura 1: Razão de amplitude entre o caso liso, o ressalto com  $h/\delta^* = 0.64$  e a cavidade com  $h/\delta^* = -0.64$

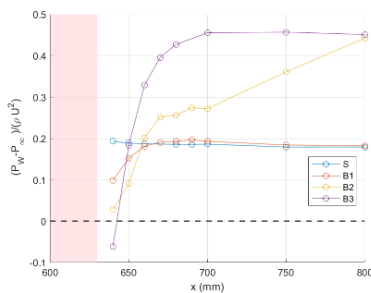


Figura 2: Medições do tubo de Preston mostrando a formação e o crescimento de uma bolha de separação a jusante do ressalto

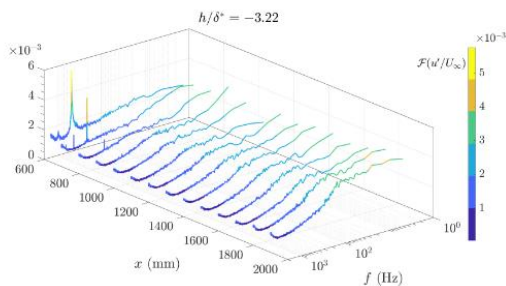


Figura 3: Evolução da velocidade de perturbação ao longo da direção do escoamento do caso G3 gap ( $h/\delta^* = -3, 22$ ), exibindo a presença do modo Rossiter perto da cavidade.

## Conclusões

Os resultados mostraram que ressaltos exercem maior influência na amplificação de ondas de Tollmien-Schlichting, deslocando a transição mais a montante. Para cavidades, identificou-se uma instabilidade do tipo Rossiter, cuja frequência dominante coincidiu com o segundo modo (R2) previsto pelo modelo semiempírico de Rossiter (1966). No caso dos ressaltos, a altura crítica necessária para iniciar a transição por bypass revelou-se menor que a profundidade crítica correspondente em cavidades. Medidas com tubo de Preston indicaram a formação de uma bolha de separação no bordo de ataque do ressalto, sugerindo que essa estrutura desempenha papel fundamental na promoção da transição.

## Agradecimentos (opcional)

O autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de iniciação científica.

## Referências

- CROUCH, J. D.; KOSORYGIN, V. S. Surface step effects on boundary-layer transition dominated by tollmien–schlichting instability, 2020.
- WANG, Y. X.; GASTER, M. Effect of surface steps on boundary layer transition. Experiments in Fluids,, 2005.
- VICTORINO, V. B.; AGUIRRE, F. O.; MEDEIROS, M. A. F. de. Gap induced boundary layer transition., 2023.
- ROSSITER, J. E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds, 1966.