

# ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL SOBRE MODELOS BIDIMENSIONAIS EM TÚNEL DE VENTO

**Giuliana Arruda Pessoa**

Embraer – GSO/SEO Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170, F-56 3º andar, São José dos Campos- SP.  
giuliana.pessoa@embraer.com.br.

**Prof. Dr. Roberto da Motta Girardi**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Pça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, CEP 12228-910, [girardi@ita.br](mailto:girardi@ita.br)

**Resumo.** *Este trabalho está focado na compreensão e no tratamento dos efeitos tridimensionais que surgem em ensaios de aerofólio (modelo 2D) instalados em túnel de vento de baixa velocidade. Tais efeitos provocam consideráveis erros nas medidas de coeficientes aerodinâmicos principalmente a altos ângulos de ataque. A aplicação dos métodos até então desenvolvidos, tais como soprimento ou sucção da camada limite na parede do túnel através de slots, tem se mostrado uma técnica onerosa. Por esse motivo, este trabalho tenta atacar o problema da tridimensionalidade empregando apenas elementos simples como fences, geradores de vórtices e placas energizadoras.*

*Em princípio, adotou-se a hipótese de que a tridimensionalidade do escoamento sobre o modelo é devida principalmente à ação da camada limite da parede do túnel e à interação entre modelo e parede. A fim de comprovar esta hipótese e avaliar o surgimento e desenvolvimento da tridimensionalidade, foram desenvolvidas técnicas adequadas de visualização que empregam óleo e fios de lã. Os resultados mostraram que as hipóteses adotadas concordam com o observado na prática. Observou-se ainda que o emprego correto de fences, geradores de vórtice e pequenas placas podem ser muito úteis na redução do efeito tridimensional.*

**Palavras-chave:** Túnel de Vento, Ensaios Bidimensionais, Geradores de Vórtice, Fences.

## 1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa é parte de um grande projeto que tem o objetivo de atribuir qualidade e produtividade a ensaios aerodinâmicos em túnel de vento. O projeto foi financiado pela Embraer e pela FAPESP e conta com a participação do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e com o Dpto. de Engenharia Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos (USP/SC).

A proposta deste trabalho é estudar o mecanismo de geração e desenvolvimento do efeito tridimensional do escoamento sobre um perfil aerodinâmico bidimensional em um túnel de vento de baixa velocidade e minimizá-lo, de modo que se aumente significativamente a região bidimensional do escoamento na região em torno da linha média do modelo. A presente pesquisa deteve-se exclusivamente ao emprego de elementos simples tais como *fences*, geradores de vórtice e pequenas placas. Ainda faz parte do objetivo desenvolver e aplicar métodos adequados à avaliação do escoamento, como técnicas de visualização com óleo e fios de lã.

Ensaio anteriores mostraram que, em alto ângulo de ataque, o descolamento no extradorso de um aerofólio (modelo 2D) tem início nas extremidades do modelo, como pode ser visto na Figura 3, na qual a parte escura representa a região descolada. Este fenômeno ocorre devido à interferência da camada limite na parede do túnel de vento. Para compreender tal fenômeno, é interessante fazer a análise a seguir.

Uma partícula do fluido que escoar sobre um perfil aerodinâmico está submetida basicamente a duas forças na direção transversal da linha de corrente: a força de inércia ( $I$ ) das partículas do fluido, que pode ser a força centrífuga devido à curvatura da linha de corrente, e a forças de pressão ( $P$ ). Em condições normais, como por exemplo na linha média do perfil onde não há interferência da camada limite da parede, essas duas forças se compensam, acarretando em linhas de corrente paralelas à superfície do modelo.



Figura 1: Campo de escoamento na seção transversal do modelo.

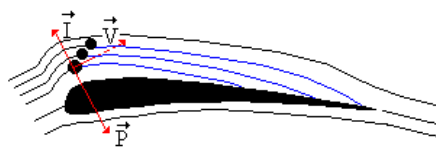


Figura 2: Campo de escoamento na extremidade do modelo.

Como a velocidade das partículas dentro da camada limite são inferiores à velocidade do escoamento fora dela e não se verifica diminuição significativa no gradiente de pressão nessa região, as forças de pressão superam as de inércia. Consequentemente, as partículas do escoamento recaem sobre a superfície do aerofólio (vide Figura 2) na região da junção. Este comportamento altera o escoamento na superfície do modelo na região próxima à extremidade do mesmo. Em alto ângulo de ataque, onde o gradiente de pressão é mais intenso, a tridimensionalidade na extremidade do modelo é agravada e se propaga em direção à seção transversal do modelo através da esteira do aerofólio. O resultado do efeito da camada limites é que as linhas de corrente se deslocam como na Figura 3.

Ainda na região do aerofólio, outro fato importante a ser considerado são os vórtices em ferradura (*horseshoe vortex*) que ocorrem nesta região. Esse efeito ocorre da seguinte forma: considerando a linha de corrente próxima à parede e que passa pelo ponto de estagnação do bordo de ataque do aerofólio, verifica-se que a pressão ao longo da mesma aumenta em módulo, de maneira que a camada limite da parede fica sujeita a um gradiente adverso de pressão. Por este motivo, a camada limite descola, o que provoca a formação de vórtices que são arrastados pelo escoamento e se dividem no ponto de estagnação, formando o vórtice em ferradura, que atua no sentido de afastar do perfil as linhas de corrente da parede. O vórtice em ferradura pode ser observado nas figuras abaixo. As Figuras 8 e 9 mostram esse efeito a partir de visualização com óleo.

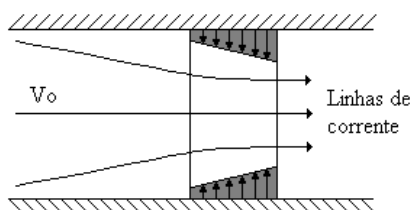


Figura 3: Vista superior. Verifica-se deslocamento das linhas de corrente devido à camada limite da parede.

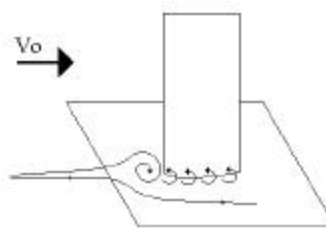


Figura 4: Formação de vórtice em ferradura.

## 2. APARATO EXPERIMENTAL

O túnel de vento no qual foram realizados os ensaios é da empresa inglesa Plint&Partners e está instalado no Laboratório de Engenharia Aeronáutica Prof. Feng do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Este túnel é do tipo circuito aberto. Sua seção de teste mede 457mm x 457 mm. Como não há difusor, o ar é jogado diretamente na atmosfera. Em virtude disso, a pressão na seção de teste é bem próxima à atmosférica e consequentemente não há problema de vedação. Ademais o ar do jato livre que deixa a seção de teste pode ser usado para experimentos. Isso foi feito nesse trabalho para estudar o escoamento na parede através de visualização com óleo, como será descrito mais adiante.

A máxima velocidade que se pode atingir nos ensaios é 33m/s e verifica-se (com anemometria de fio quente) baixo nível de turbulência (6,5%) e boa uniformidade na seção de teste, garantindo uma boa qualidade nos ensaios.

Como a pressão na seção de teste é bem próxima à pressão atmosférica, utilizou-se o escoamento que deixa a seção de teste para realizar os ensaios de visualização com óleo. Para tanto, foi projetada uma mesa onde foi instalado o perfil e que ficava posicionada na saída do túnel como se fosse o prolongamento da parede inferior.

A conexão entre a mesa e o túnel foi feita de maneira suave mantendo o cuidado de não deixar qualquer desnível que pudesse perturbar o escoamento. Uma placa de acrílico que dava continuidade à parede superior do túnel também foi instalada de maneira a evitar o surgimento de *dowwash* na extremidade superior do modelo e impedir a formação de uma camada de cisalhamento livre na fronteira do fluxo de ar.

A mesa possui uma parte circular (*turntable*) com raio  $r=200\text{mm}$  onde é fixado verticalmente o modelo. A determinação de ângulos de ataque é feita a partir de marcações existentes ao redor da parte circular e têm precisão de  $0,5^\circ$ . O perfil foi instalado na vertical para viabilizar o estudo do escoamento na superfície do túnel com a técnica de visualização com óleo.

Nesta pesquisa, deseja-se trabalhar em condições nas quais a tridimensionalidade seja bastante evidente. Assim, a principal característica que levou à escolha do perfil NACA 6716 é que seu arqueamento grande eleva o valor da força de sucção ( $P$ ) agravando o problema da camada limite. Além do mais, a envergadura do perfil é pequena em relação à corda e, portanto, explicita ainda mais a tridimensionalidade. O fato de ele possuir um arqueamento grande e faz com que ele se comporte semelhante a um perfil dotado de *flap* e *slap*.

O perfil foi confeccionado em madeira e com corda de 200mm e envergadura de 450 mm. Para fins de visualização com fios de lã no extradorso, foram colados fios finos. A cola utilizada foi do tipo secagem rápida adequada para madeira e sua aplicação foi feita com uma seringa para inseri-la no ponto correto. As protuberâncias nos pontos de colagem foram lixadas de modo a diminuir a rugosidade.

A instalação do perfil na seção de teste do túnel de vento foi feita com o cuidado de vedar as extremidades do modelo. Assim, evitou-se que, na região da junção, houvesse fluxo de ar do intradorso para o extradorso devido à diferença de pressão entre estas duas regiões.

O papel dos *fences* não é evitar o surgimento de um fluxo longitudinal, mas atuar como obstáculo para esse fluxo, impedindo que este continue a se propagar sobre o perfil e obrigando-o a seguir a direção correta. Dessa forma, pretende-se que, ao menos uma região significativa do modelo, em torno de sua linha média, apresente escoamento rigorosamente bidimensional.

Para que os *fences* atuem de maneira eficiente, suas dimensões devem ser maiores que a camada limite do modelo. Além disso, ele deve estar posicionado em uma estação do perfil cuja distância seja maior que a espessura da camada limite da parede do túnel. É preciso também ter o cuidado de não superdimensioná-los, porque isso pode provocar uma perda de carga no escoamento entre o *fence* e a parede obrigando o fluxo a passar por fora e seguindo em direção ao meio o perfil e aumentando a tridimensionalidade. Os testes mostraram ainda que a tridimensionalidade é intensa no extradorso, ao

passo que no intradorso o escoamento é bastante bidimensional com ou sem a presença do *fence*. Portanto sua altura a partir do intradorso não foi considerada um parâmetro importante. Por fim, deve-se evitar que a esteira do escoamento que passa entre o *fence* e a parede, induzam alguma perturbação sobre o modelo. Por isso, suas dimensões devem se estender por uma distância considerável para trás do perfil. Com base nas considerações acima, foram adotadas as medidas mostradas na Figura 5:

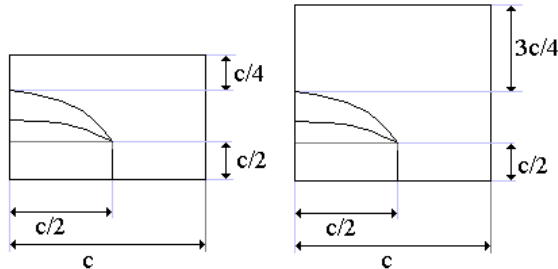


Figura 5: Dimensão dos *fences*

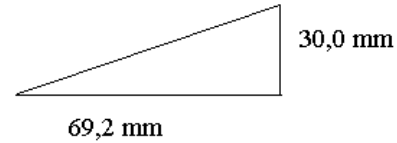


Figura 6: Dimensões do gerador de vórtices.

Conforme foi visto, verifica-se o surgimento de vórtices em ferradura no bordo de ataque, que provocam inicialmente o afastamento das linhas de corrente na parede em relação ao perfil. Este comportamento é contrário ao do efeito da interação entre o pico de sucção do aerofólio com a camada limite da parede, que provoca o fluxo das partículas fluidas no interior da camada limite das paredes em direção à superfície do modelo. A tentativa de empregar geradores de vórtice consiste em utilizar os vórtices emitidos (no mesmo sentido dos vórtices em ferradura) para afastar as linhas de corrente que avançam sobre o perfil.

O gerador de vórtice testado neste trabalho foi projetado de modo que suas dimensões fossem maiores que a espessura da camada limite da parede do túnel, do contrário, sua eficiência estaria comprometida. As dimensões são mostradas na Figura 6.

Durante os vários experimentos, verificou-se que o estol do modelo não é regular, mas se inicia próximo à junção e propaga-se em direção à linha média como mostra a Figura 3.

O uso de placas adequadamente posicionadas pode alterar o ângulo de ataque efetivo de forma a retardar o estol naquela seção do perfil, fazendo com que este ocorra de forma mais regular ao longo da envergadura. Além disso, pode-se formar um canal convergente que aumenta a velocidade do fluxo que passa por ele fazendo com que o descolamento nessa região aconteça a um ângulo de ataque maior (ver Figura 7), o que também contribui para a uniformização do estol.

Como já haviam sido feitos testes de visualização com os geradores de vórtice, optou-se por dar às placas retangulares, dimensões semelhantes como mostrado na Figura 8.



Figura 7: Posicionamento da placa.

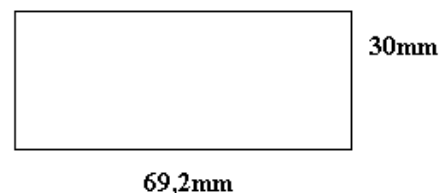


Figura 8: Dimensões da placa.

Para a medida de pressão dinâmica do túnel de vento foi utilizado um transdutor de pressão do tipo *strain gage*. O sinal elétrico proveniente do transdutor de pressão é amplificado em um condicionador de sinais e, em seguida, enviado para uma placa de aquisição de dados.

Para calibrar este equipamento é necessário a utilização de um manômetro tipo Betz (cuja menor divisão é 0,1mmH<sub>2</sub>O) e de um equipamento capaz de variar a pressão no transdutor e no Betz dentro da faixa de pressões dinâmicas usadas nos ensaios.

O manômetro Betz foi o manômetro utilizado na calibração de pressão do transdutor de pressão. O Betz é um manômetro em U, cujo fluido manométrico é água destilada. Seu alinhamento vertical é feito com auxílio de um nível de bolha. A leitura de pressão é fornecida por uma escala transparente presa a uma espécie de bóia que elimina o efeito de menisco (erro de Paralax). A escala que indica a pressão é amplificada com o auxílio de luz e de uma lente e a menor divisão da escala do instrumento é de 0,1mm H<sub>2</sub>O.

A técnica de visualização com óleo foi empregada para visualizar o escoamento da parede do túnel. Ela tem a vantagem de evidenciar de forma clara as linhas de corrente sobre uma superfície mesmo após cessado o escoamento sobre o modelo. Essa técnica já era utilizada pela EMBRAER em ensaios no túnel de vento do IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço). No entanto, a técnica precisou ser adaptada visto que, no túnel de vento Plint&Partners, a velocidade do escoamento varia entre 10 e 33 m/s ao passo que, no túnel do IAE, essa velocidade geralmente ultrapassa bastante esses valores.

A mistura adequada foi encontrada variando a concentração das substâncias e fazendo ensaios sucessivos até que se chegasse a uma boa visualização. A composição encontrada é apresentada a seguir (considerando porcentagem em massa): 61,2% de óleo de baixa viscosidade (do tipo Velocity 3); 16% de pigmento concentrado (tinta para pintura a óleo da marca Gato Preto); 22,8% de dióxido de titânio (pó); e aproximadamente uma gota de ácido oléico para cada grama de pigmento concentrado para que este seja diluído na mistura.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1. Ensaios para Compreensão do Efeito Tridimensional

Os primeiros testes a serem realizados focaram-se na compreensão dos fenômenos que geram a tridimensionalidade. Para tanto, foram realizados ensaios de visualização com óleo na parede inferior do túnel. Como o efeito tridimensional é mais intenso para altos ângulos de ataque, foi testado  $\alpha = 20^\circ$ , sendo que o ângulo de estol era de  $24^\circ$ . O Reynolds foi mantido em  $2,2 \cdot 10^5$  (baseado na corda do aerofólio), o que corresponde a uma pressão dinâmica de 35mmH<sub>2</sub>O. A única variação da pressão dinâmica era inerente ao túnel de vento usado e não excedia 2mmH<sub>2</sub>O e eram provenientes da variação do motor. Os resultados são mostrados logo abaixo na forma de fotografias:

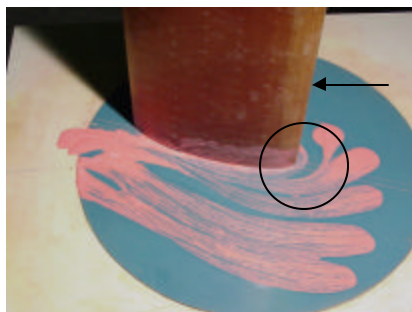


Figura 9: Visualização do extradorso para ensaio padrão e  $\alpha=20^\circ$ .

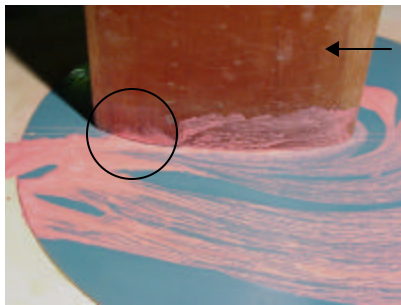


Figura 10: Visualização do extradorso para ensaio padrão e  $\alpha=20^\circ$ .

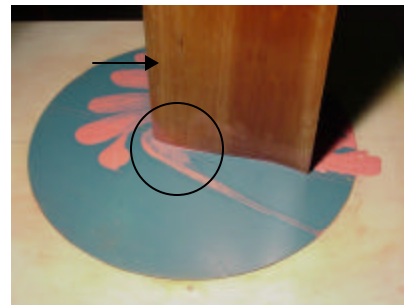


Figura 11: Visualização do intradorso para ensaio padrão e  $\alpha=20^\circ$ .

As visualizações acima mostram que, a altos ângulos de ataque ( $20^\circ$ ) o vórtice em ferradura faz com que o fluxo se afaste do modelo até  $c/4$  (um quarto de corda) conforme mostrado na Figura 9. A



partir de  $c/4$ , a interação do pico de sucção no bordo de ataque com a camada limite da parede ganha força e faz as linhas de corrente da parede avançarem sobre o modelo, provocando uma tridimensionalidade capaz de fazer com que o óleo suba em direção à superfície do perfil (Figura 110 dentro do círculo).

No intradorso, o pico de sucção do perfil é baixo. Por esse motivo, as forças de pressão no escoamento são menores. Como consequência, o problema da camada limite é bem menor que o do vórtice em ferradura e é suficiente para comandar o escoamento em toda a extensão da corda, isto quer dizer que o fluxo não avança sobre o perfil. Desta forma, a variação de pressão ao longo da envergadura é pequena [3] e a tridimensionalidade é bastante reduzida. Por este motivo, esta pesquisa foca-se na bidimensionalização do escoamento no extradorso.

Os resultados acima sugerem que o *fence* deve atuar principalmente a partir de  $c/2$  para trás (onde fluxo longitudinal sobre o modelo). Já o gerador de vórtice e a placa podem ser usadas para energizar o escoamento próximo à junção e contribuir com o vórtice em ferradura de forma que as linhas de corrente se afastem do perfil. Vale lembrar que a utilização de novos elementos pode gerar uma série de novos fenômenos capazes de prejudicar a qualidade do escoamento conforme explicado em [3].

### 3.2. Ensaios com Fences

Os ensaios de visualização com óleo dos *fences* ocorreram na mesmas condições dos ensaios padrão. Os *fences* foram posicionados alinhados com o escoamento e optou-se por variar o tamanho dos *fences* e sua distância em relação à parede do túnel nas seguintes configurações: *fence* grande a 3cm da parede; *fence* grande a 4cm da parede; *fence* pequeno a 3cm da parede; *fence* pequeno a 4cm da parede. Os resultados são mostrados a seguir:



Figura 12: *Fence* grande,  $h=3\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

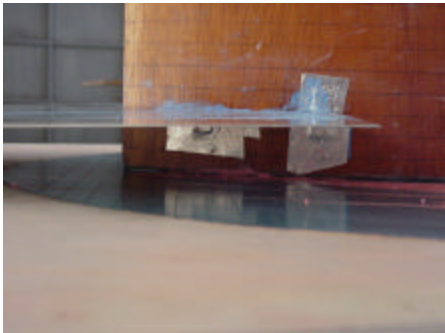


Figura 13: *Fence*,  $h=3\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

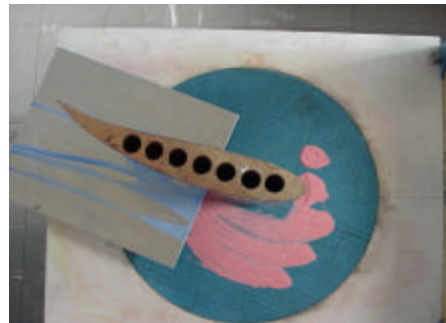


Figura 14: *Fence* grande,  $h=4\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

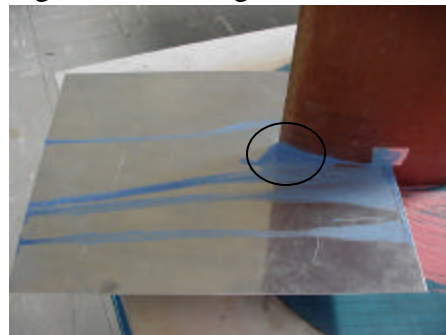


Figura 15: *Fence* grande,  $h=4\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

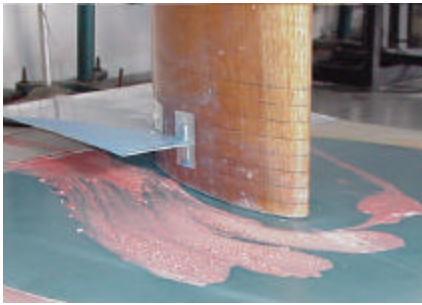


Figura 16: *Fence* pequeno,  $h=3\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

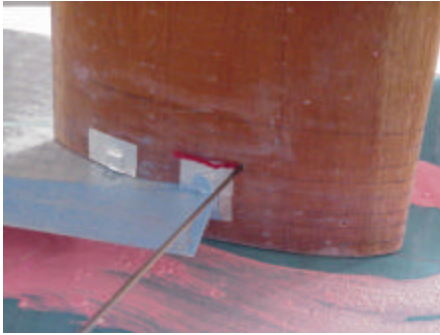


Figura 17: *Fence* pequeno,  $h=3\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

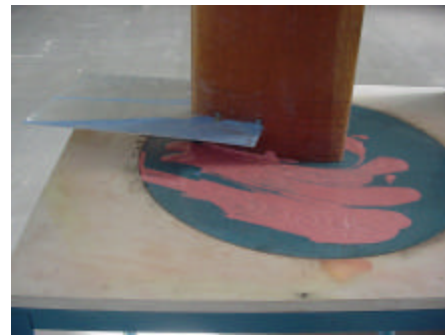


Figura 18: *Fence* pequeno,  $h=4\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

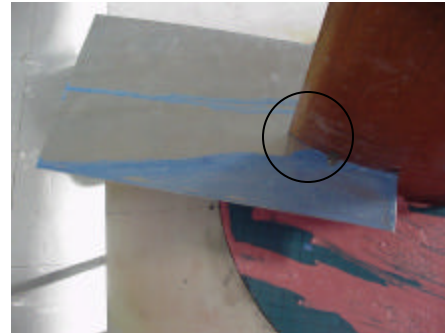


Figura 19: *Fence* pequeno,  $h=4\text{cm}$ ,  $\alpha=20^\circ$ .

De uma maneira geral, os resultados para afastamento de 4cm foram bastante parecidos com os de 3cm. Entretanto [3] os experimentos com medida de  $C_p$  ao longo de três estações, mostram que há uma distância ótima para a qual a eficiência de um determinado *fence* é máxima.

Em todos os casos mostrados acima, verifica-se que, no volume compreendido entre o *fence* e a parede, as linhas de corrente avançam sobre o modelo assim como no escoamento padrão, porém agora isto ocorre com menor intensidade, porque o *fence* induz o fluxo a seguir linhas de corrente com componente longitudinal menor.

Com o emprego do *fence* as linhas de corrente passaram a apresentar uma tendência de acompanhar a forma do modelo, exceto na região da esteira quando se afastam dele. Isto ocorre porque a  $20^\circ$ , existe uma esteira no bordo de fuga onde o coeficiente de pressão é pouco negativo ( $C_p$  em torno de  $-0,7$  segundo [3]). Como essa região é de baixa pressão, a mistura que nela adentra não encontra um gradiente de pressão tal que possa se deslocar em direção a outra região de pressão menor e, portanto, permanece acumulada ali. Como estas mesmas linhas de corrente já não avançam em direção ao modelo (ao contrário do ensaio padrão) percebe-se uma redução da tridimensionalidade e conseqüente melhora na qualidade do escoamento tanto na parede quanto sobre o perfil. Os resultados de medida de  $C_p$  realizados em [3] comprovam a eficácia do *fence*.

### 3.3. Ensaios Qualitativos com Geradores de Vórtice

Os ensaios com geradores de vórtice ocorreram nas mesmas condições dos ensaios padrão. Várias posições foram testadas com o intuito de encontrar aquela que ocasionasse a maior bidimensionalização. As figuras a seguir comparam o efeito deste elemento com o caso padrão.

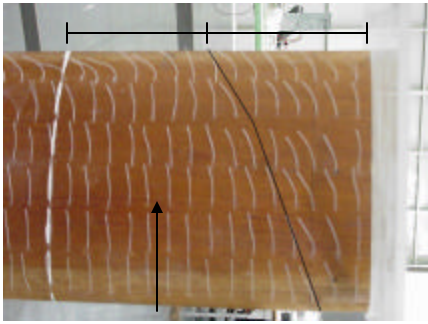


Figura 20: Escoamento padrão  $\alpha=22^\circ$ .

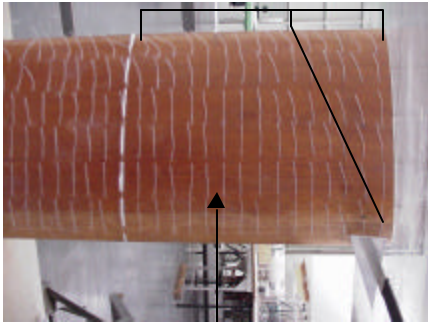


Figura 21: Ensaio com gerador de vórtice.  $\alpha= 22^\circ$ , posição 1.

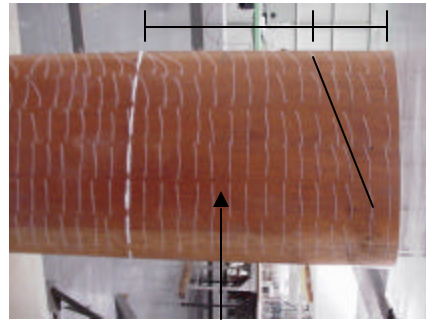


Figura 22: Gerador de vórtice.  $\alpha= 22^\circ$ , posição 2.

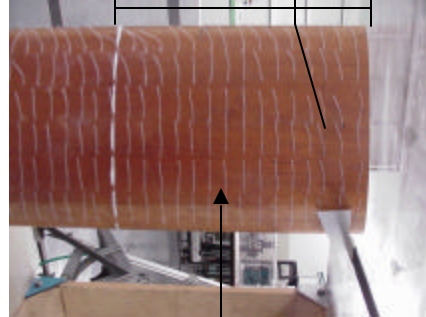


Figura 23: Ensaio com gerador de vórtice.  $\alpha= 22^\circ$ , posição 3.

Durante os experimentos, verificou-se que existe uma certa liberdade no posicionamento dos geradores de vórtice, ou seja, para tornar o escoamento mais bidimensional, não é preciso encontrar uma posição restrita para o gerador de vórtice. Em todos os casos acima os vórtices gerados tinham o mesmo sentido do vórtice em ferradura e são estes vórtices os principais responsáveis pela melhora do escoamento. Os resultados mostram que, principalmente nas posições 2 e 3 há uma diminuição significativa da tridimensionalidade (basta comparar as escalas das Figuras 22 e 23 com a da Figura 20).

### 3.4. Ensaios Qualitativos com Placas Energizadoras

Os ensaios com placas ocorreram na mesmas condições dos ensaios padrão. As figuras abaixo mostram experimentos com as melhores posições encontradas que acarretam numa bidimensionalização substancial do escoamento. Apresenta-se também o escoamento padrão que deve ser comparado às fotos dos testes com placas.

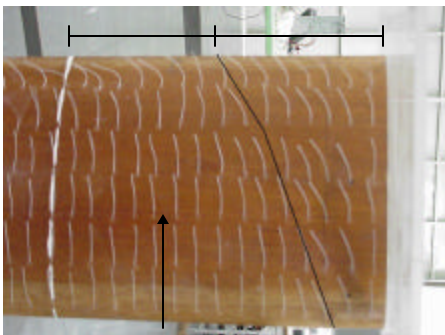


Figura 24: Escoamento padrão  $\alpha=22^\circ$ .

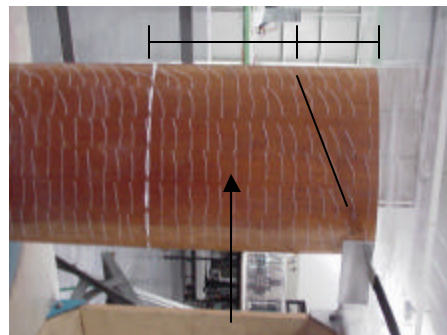


Figura 25: Ensaio placa, posição 1,  $\alpha= 22^\circ$ .



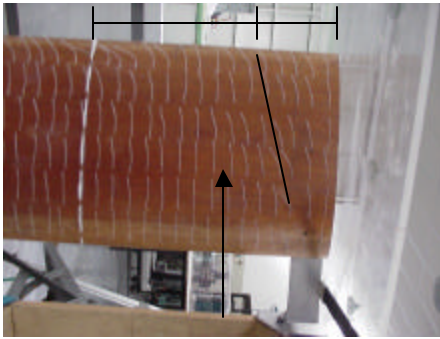


Figura 26: Ensaio placa, posição 2,  $\alpha = 22^\circ$ .

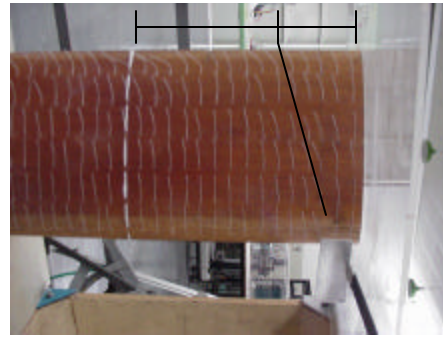


Figura 27: Ensaio placa, posição 3,  $\alpha = 22^\circ$ .

Em todas as posições mostradas acima, a placa formava um canal convergente com o perfil como mostrado na Figura 7. Além de provocar os efeitos descritos no item 2, o fato de a placa estar inclinada em relação ao escoamento a montante dela, esta terá sustentação. Isso significa que na lateral da placa que não se apoia na parede, há emissão de vórtices característicos de ponta de asa. Tais vórtices apresentam o mesmo sentido dos vórtices em ferradura e, portanto contribuem para a bidimensionalização.

Em todos os casos acima houve melhora na qualidade do escoamento, principalmente na posição 3. Durante os experimentos verificou-se que, para tornar o escoamento mais bidimensional, não é preciso encontrar uma posição restrita para a placa. No entanto, essa liberdade no posicionamento é menor que no caso do gerador de vórtice.

#### 4. CONCLUSÕES

Os experimentos de visualização mostraram claramente o comportamento do escoamento sob o efeito tridimensional e confirmaram-se as hipóteses de que o vórtice em ferradura e da interação da camada limite com o pico de sucção determinam a tridimensionalidade.

A partir dos primeiros ensaios de visualização, pôde-se criar estratégias para atacar o problema e os elementos a serem usados foram dimensionados.

Os ensaios com *fence* mostraram que este elemento é capaz de melhorar a qualidade do escoamento tanto sobre o perfil quanto na parede próximo à junção. Com os resultados mostrados neste trabalho, não foi possível determinar qual das configurações testadas é a melhor. No entanto, com o auxílio de medidas de pressão em estações ao longo da envergadura do modelo [3], pode-se verificar que existem posições e tamanhos ótimos que maximizam sua eficiência e praticamente eliminam o efeito tridimensional. Estes resultados serão apresentados em trabalhos futuros.

O emprego dos geradores de vórtice e placas energizadoras também se mostraram uma boa alternativa para a bidimensionalização do escoamento, fato evidenciado pela visualização com *fiões de lã*. Entretanto, o emprego destes elementos requer estudos mais aprofundados. É importante verificar se estes elementos não causam prejuízo ao escoamento em baixos ângulos de ataque e realizar ensaios quantitativos para avaliar sua eficiência como feito para os *fences*. Esta é uma sugestão para pesquisas futuras.

Como mencionado anteriormente, este trabalho faz parte de uma linha de pesquisa cujo objetivo final é realizar ensaios de aerofólios com *flap* e *slat* para as futuras aeronaves da Embraer. Neste caso, a continuação natural deste trabalho será a implementação de *fences* e geradores de vórtice em modelos com *flap* e *slat* e, no momento, tal aparato experimental está em fase de construção e montagem no túnel de vento do ITA.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Reservamos nossos sinceros agradecimentos à FAPESP e à Embraer por financiarem o projeto no qual se insere esta pesquisa e ao Técnico Mário por trabalhar intensivamente na construção de todo o aparato experimental.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Vogelaar, H.L.J. NLR TR 83031 U. “Description and validation of the two-dimensional test setup for multiple airfoils in the pressurized wind tunnel HST”. National Aerospace Laboratory, NLR, The Netherlands.
- [2] Souza, Karina Diogo. CDU 533.6.07 “Estudo de ensaios bidimensionais em túnel de vento.”Trabalho de Graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, SJC SP, 2000.
- [3] Pessoa, Giuliana Arruda. CDU 533.6.07 “Bidimensionalização de Ensaios em Túnel de Vento de Baixa Velocidade.”Trabalho de Graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, SJC SP, 2003.
- [4] Elsenaar, A. NLR Memorandum AC 83-005 U, “Wall blowing requirements for 2-D high lift testing in pressurized wind tunnels, National Aerospace Laboratory, NLR, The Netherlands ”.
- [5] Labrujère, Th.E., NLR TR 84114 U, “Correction for wall interference by means of measured boundary condition method, , National Aerospace Laboratory, NLR, The Netherlands”.

## THREE DIMENSIONAL FLOW OVER A TWO DIMENSIONAL MODEL INSIDE A WIND TUNNEL

**Giuliana Arruda Pessoa**

Embraer – GSO/SEO Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170, F-56 3º andar, São José dos Campos- SP.  
giuliana.pessoa@embraer.com.br.

**Prof. Dr. Roberto da Motta Girardi**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Pça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP,  
CEP 12228-910, girardi@ita.br

**Abstract.** *The purpose of this research is to examine the generation and development of the 3-D effect in a flow over a profile in a low speed wind tunnel at  $Re=2,2.10^5$  and minimize it. Many researchers have already showed that suction and blowing techniques can satisfactory reduce satisfactory this problem, but it is an expensive technique.*

*To work on this problem, it was adopted the hypothesis that the 3-D effect is a consequence of the interaction between the profile, the boundary layer and the horseshoe vortex. Therefore, oil and tufts visualization methods and pressure measurements were used to visualize and understand the phenomenon. These results showed that the hypothesis are in agreement with the reality. The next step was to use the comprehension of the phenomenon to minimize the 3-D effect using and elements such as fences, flat plates and vortex generators strategically positioned. To evaluate the improvement on the quality of the flow, oil and tufts visualization techniques were used. The results showed that 3-D effect can be effectively reduced by using these instruments.*

**Keywords:** *Wind Tunnel, Two-dimensional Tests, Vortex generators, Fences.*