Métodos Passivos de Redução de Arrasto

Fernanda ***Beatriz*** de Carvalho Cerveira de Sousa

Graduação em Engenharia Naval – UFRJ
Mestrado em Mecânica da Turbulência – Engenharia Mecânica – Coppe/UFRJ

08 de novembro 2011

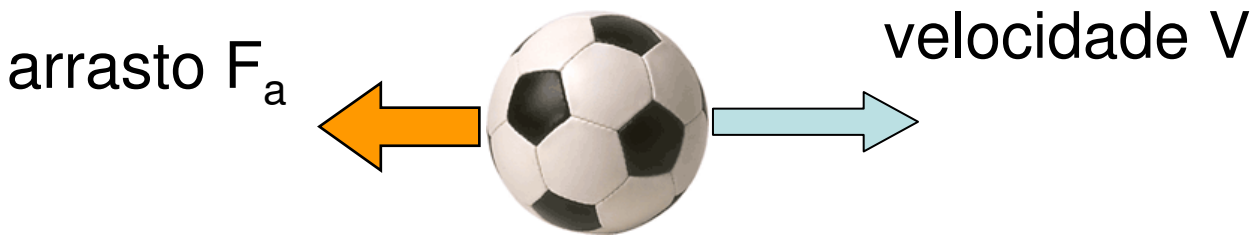
Sumário

- Abordagem geral dos fenômenos físicos da mecânica dos fluidos que envolvem o arrasto;
  - Força de Arrasto
  - Coeficiente de Arrasto
  - Camada Limite (Laminar e Turbulenta)
  - Separação
  - Crise do Arrasto
  - Tipos de Arrasto (Superfície e Forma)
  - Caso da bola de golfe

- Trabalho experimental (Tese de Mestrado). Aborda uma das técnicas de redução de arrasto.

Força de Arrasto

Força de Arrasto – é a força de resistência contrária ao sentido do movimento.



$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho A V^2$$

ρ = densidade do meio
A = área "frontal"
C_a = *coeficiente de arrasto*

Força de Arrasto

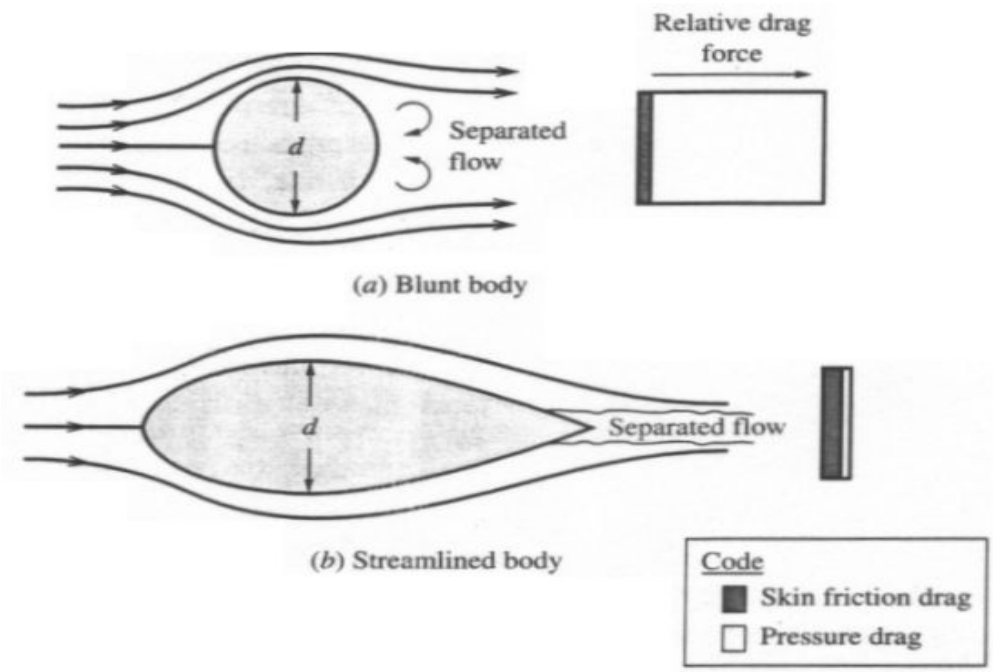
Os principais tipos de arrasto, aqui abordados, são:

- **Arrasto de atrito** (arrasto de superfície ou friccional), e
- **Arrasto de pressão** (arrasto de forma ou esteira)

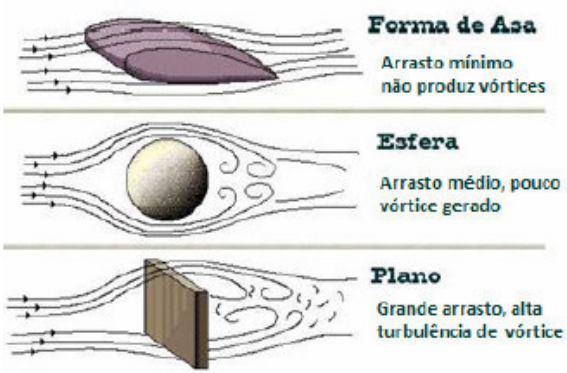
Componentes da Força de Arrasto

- Corpos rombudos têm a maior contribuição do arrasto causada pela esteira.

- Corpos esbeltos tem a maior contribuição do arrasto causada pelo atrito na superfície;



Comparison of flow separation and drag on blunt and streamlined shapes



Coeficiente de Arrasto

- $\rho A V^2$ tem dimensão de força

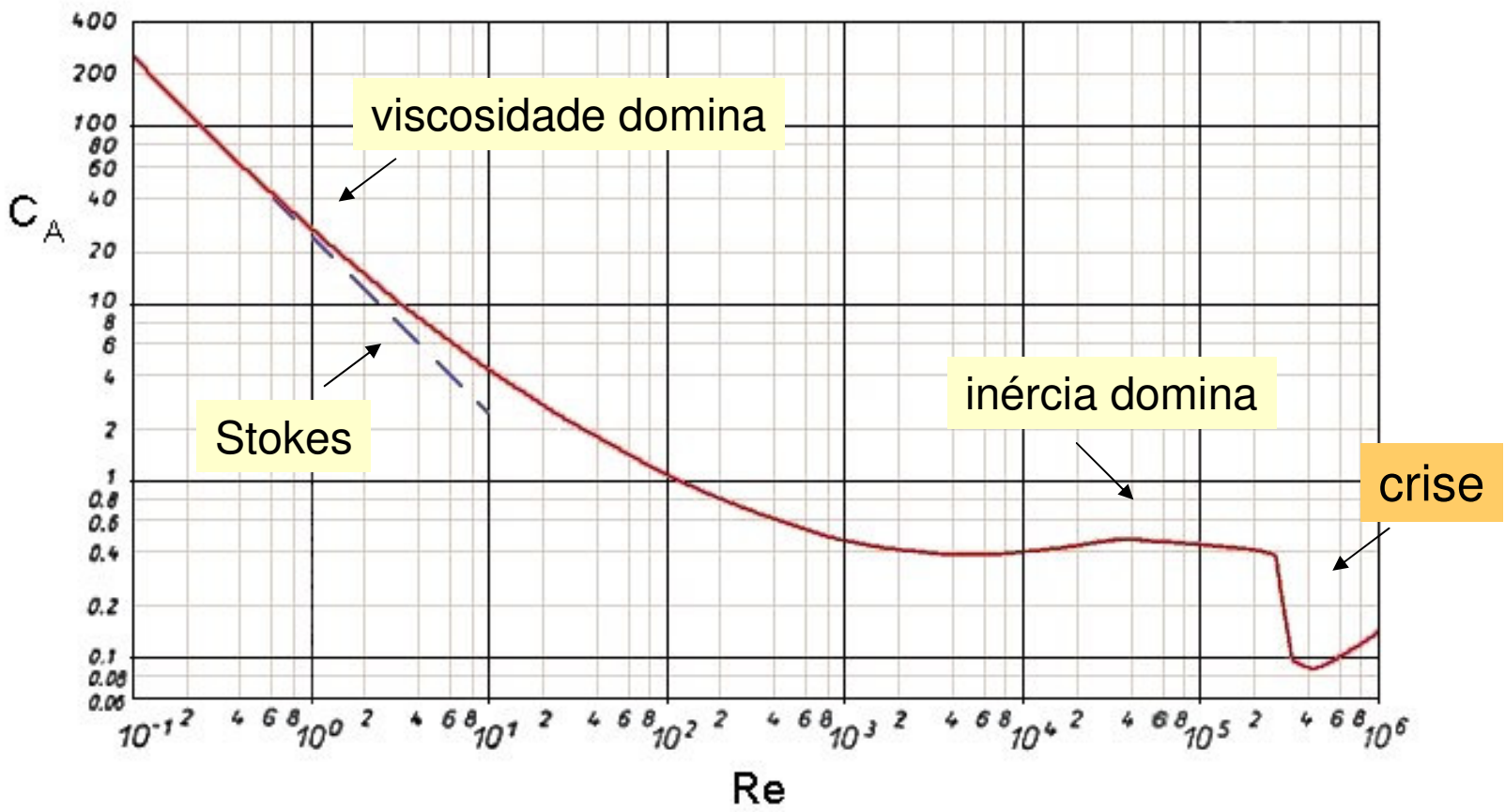
$\Rightarrow$ $C_a = F_a / (\frac{1}{2} \rho A V^2)$ é adimensional

- Em um fluido incompressível ($V << V_{som}$) o adimensional utilizado é o *número de Reynolds*:

$$\boxed{\mathrm{Re} = \frac{\rho D V}{\mu}} \quad \Rightarrow \quad C_a = f(\mathrm{Re})$$

D = dimensão característica (diâmetro da bola), μ = viscosidade do fluido

Coeficiente de Arrasto em uma Esfera



Crise do Arrasto

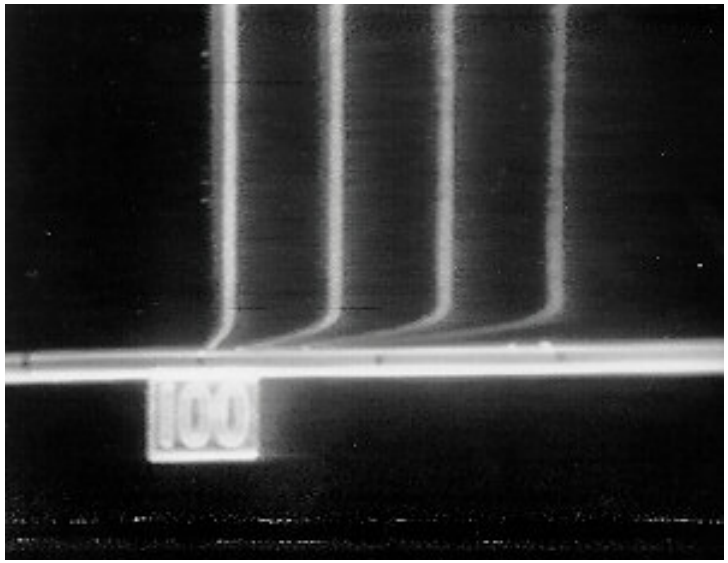
É a variação abrupta sofrida pela resistência do meio quando a velocidade do corpo atinge um valor crítico.

Para entender a crise:

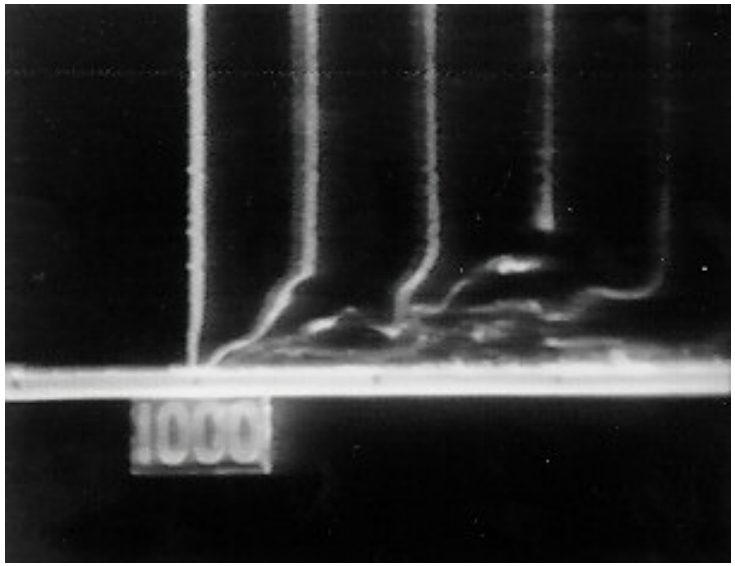
- Camada limite
- Separação da camada limite
- Turbulência na camada limite

Introdução

Camada Limite – é a região do escoamento adjacente a uma superfície onde os efeitos viscosos possuem a mesma ordem de grandeza dos efeitos inerciais. (Prandtl, 1904)



camada limite laminar (1960)



camada limite turbulenta

Gradiente de Pressão

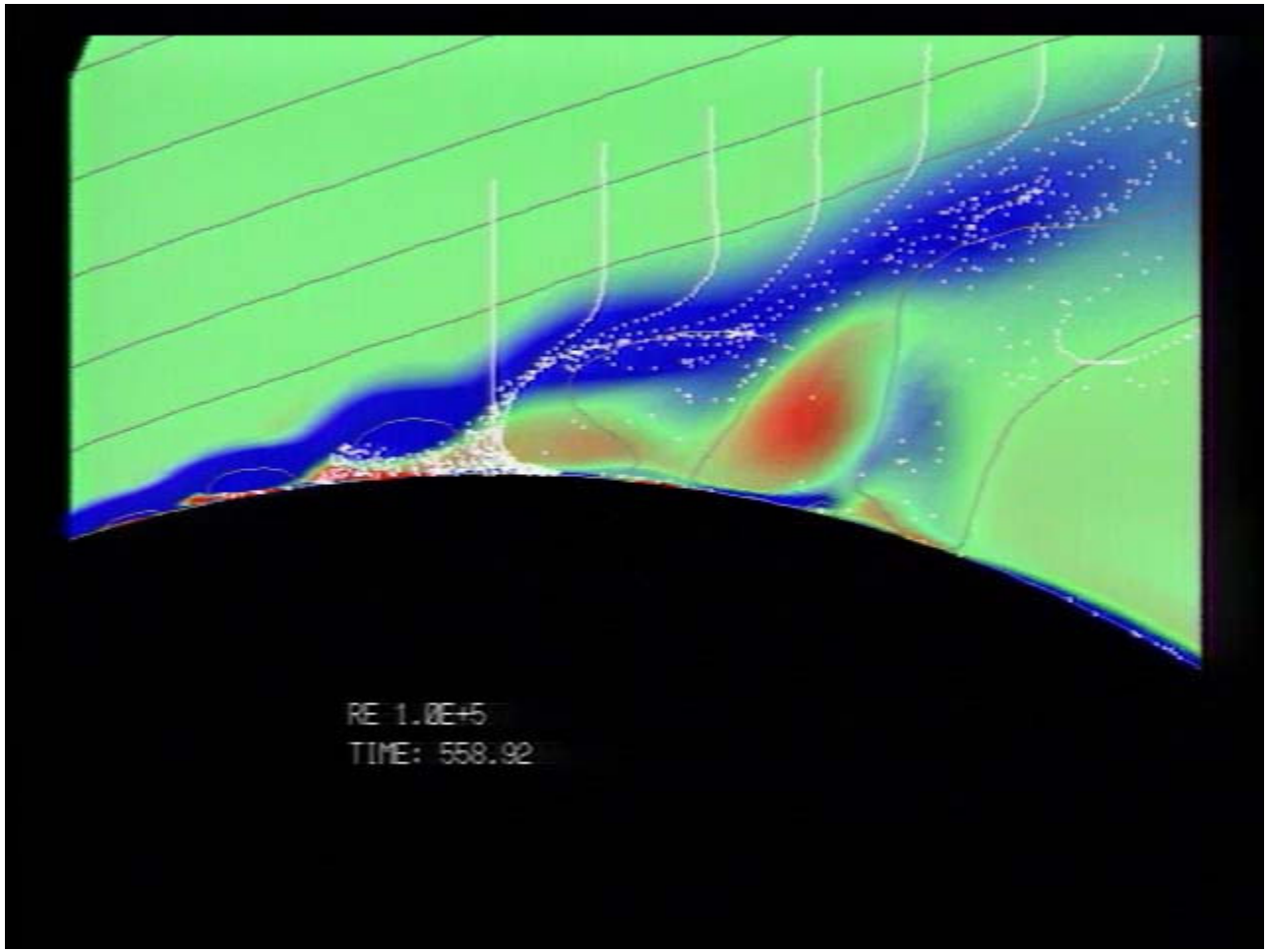
- Em uma superfície plana o gradiente de pressão é sempre favorável e o escoamento sempre estará aderido a superfície;

- Já em superfícies curvas, ou irregulares haverá regiões onde o gradiente de pressão será adverso, e assim o escoamento pode descolar da superfície.

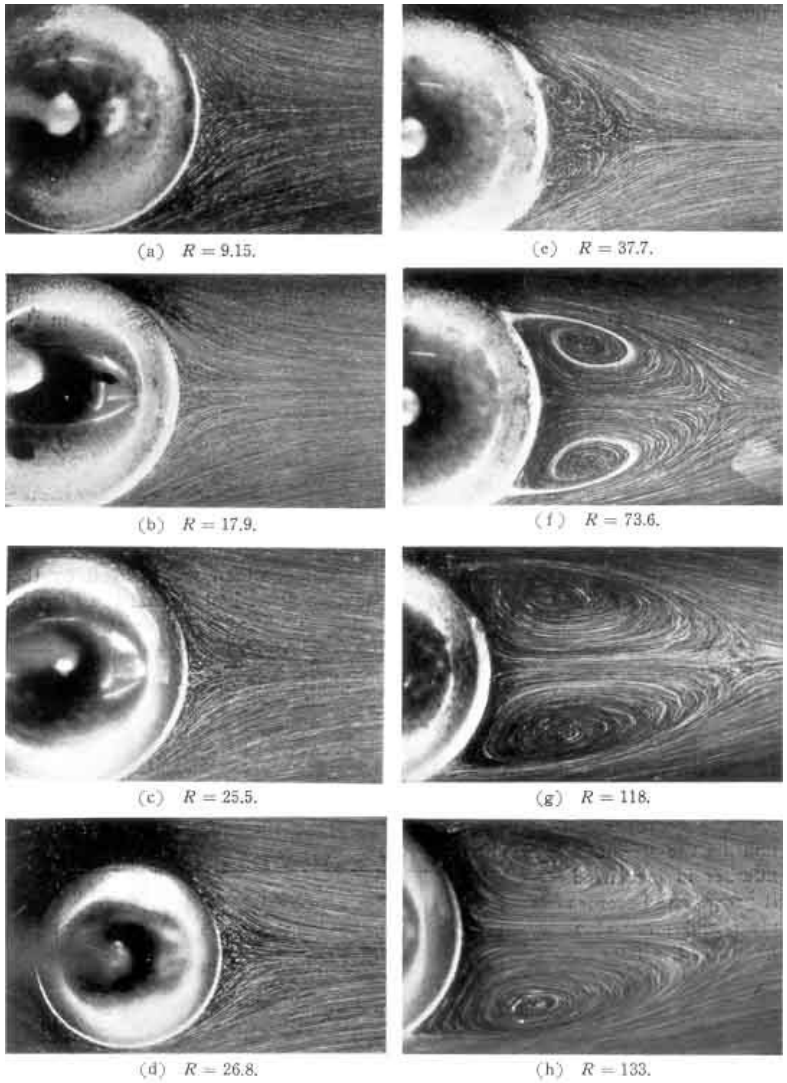
Separação da Camada Limite

- Quem provoca a separação é a pressão (gradiente de pressão adverso);
- Havendo um aumento de pressão as partículas mais próximas a parede têm mais dificuldades em avançar;
- A região próxima a parede é a região mais sensível ao aumento de pressão, pois a velocidade é baixa, e assim sendo, a energia cinética das partículas é baixa;
- As partículas acima continuam a viajar corrente abaixo, mas as partículas próximas a parede tendem a voltar (recirculação);
- O ponto de separação é o ponto exato que o escoamento descola da parede (tensão igual a zero);
- A turbulência para existir precisa de energia, para isso ela tira energia de todos os lugares disponíveis (campo depressão e campo de velocidade). Por isso as pressões e velocidades são muito baixas na região da esteira.

Separação da Camada Limite



Separação da Camada Limite



(a) $R = 9.15$.

(b) $R = 17.9$.

(c) $R = 25.5$.

(d) $R = 26.8$.

(e) $R = 37.7$.

(f) $R = 73.6$.

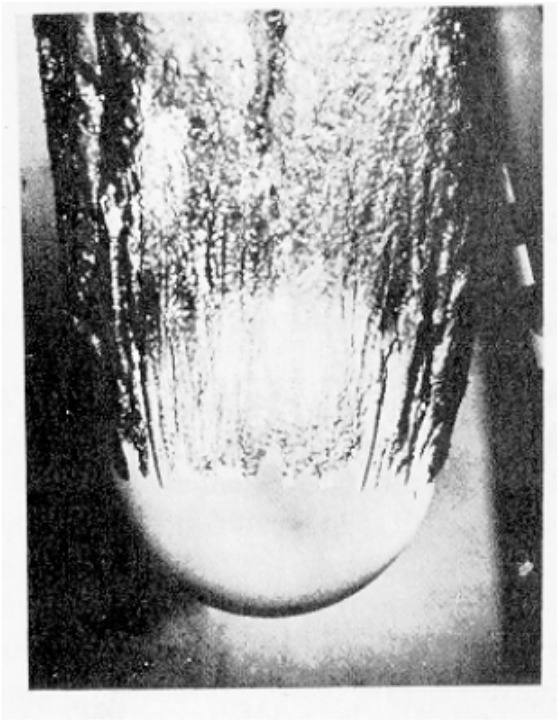
(g) $R = 118$.

(h) $R = 133$.

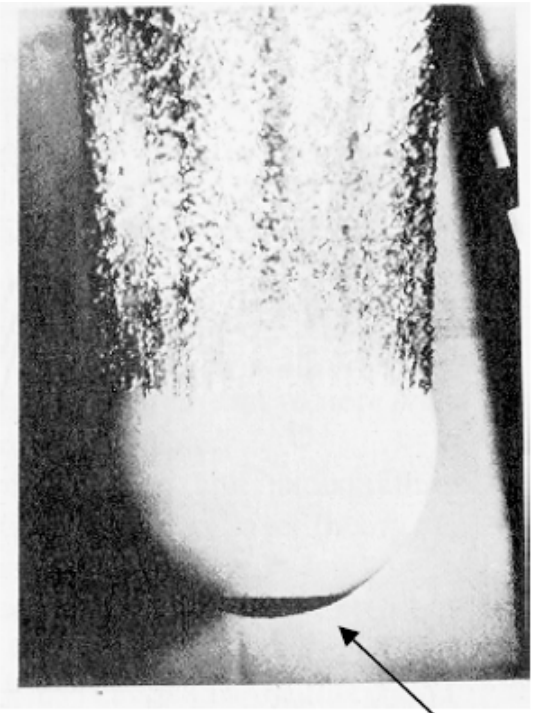
Separação da Camada Limite

Separação da Camada Limite

- Diferença entre os pontos de separação laminar (a) e turbulento (b) em uma bola de boliche de 216mm de diâmetro entrando na água com 7,6m/s.



(a)



(b)

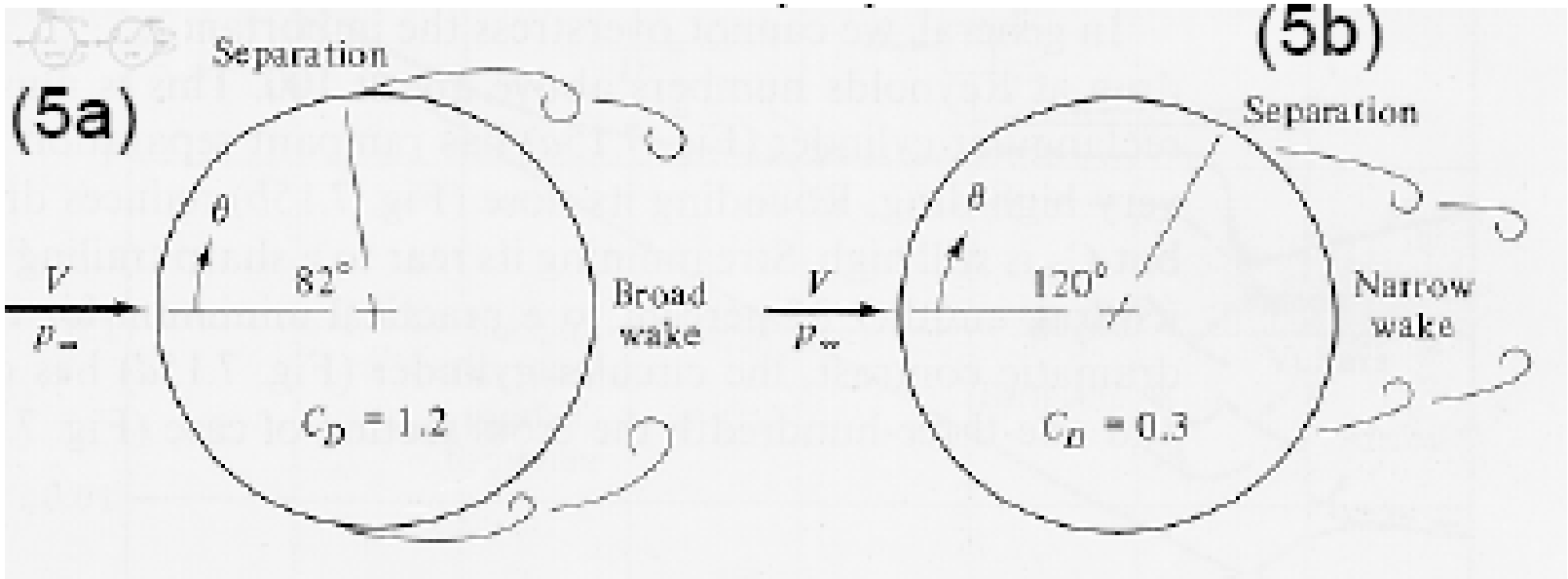
Papel lixa

A rugosidade aumenta o arrasto superficial e diminui o arrasto de esteira

O que acontece quando o escoamento passa do regime laminar para o regime turbulento

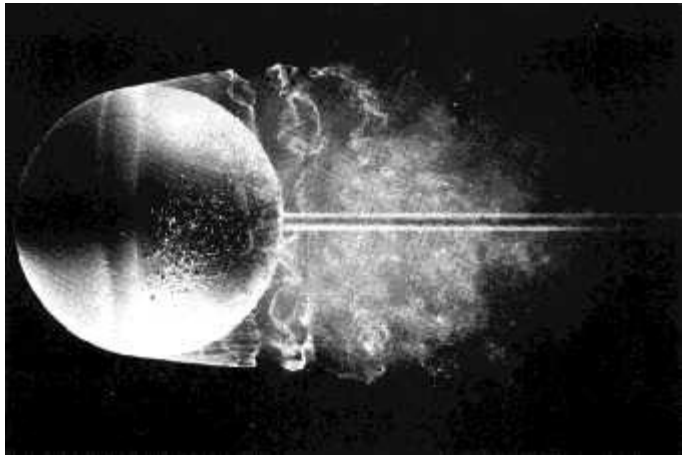
- No regime laminar a troca vertical da quantidade de movimento é baixa, já no regime turbulento essa troca é alta. Isso provoca um achatamento do perfil de velocidade da camada limite turbulenta, ou seja, as partículas próximas a parede possuem mais energia cinética, com isso, resistem melhor a separação (retarda o descolamento).

Representação esquemática do ponto de separação do escoamento ao redor de um cilindro em regime laminar (5a) e turbulento (5b).



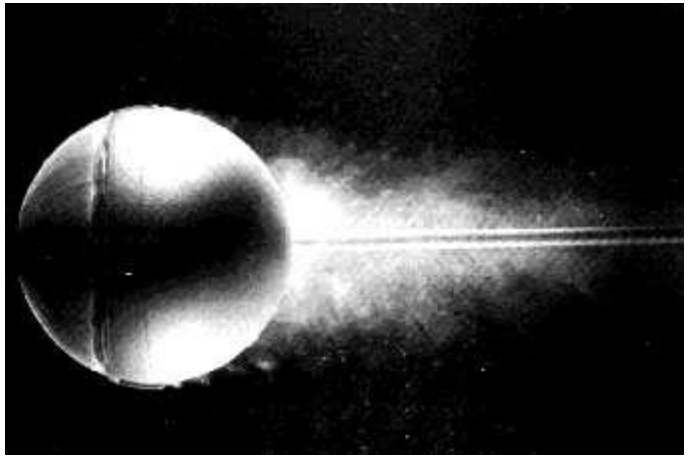
A Camada Limite e a Crise do Arrasto

Antes da crise



camada limite laminar

Depois da crise

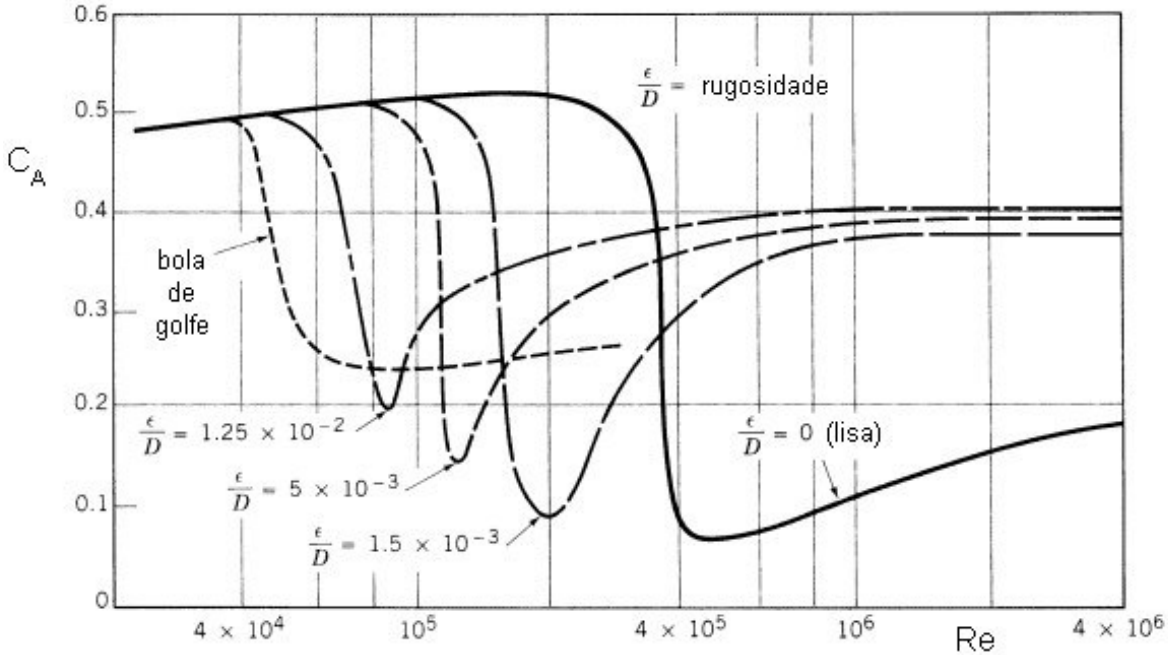


camada limite turbulenta

Rugosidades da bola de golfe

- As primeiras bolas de golfe eram lisas. Jogadores experientes perceberam que, após algum tempo de uso, quando elas adquiriam pequenos cortes, talhos e furos, as trajetórias eram mais longas e precisas. Então, esses atletas começaram a fazer pequenos cortes em suas bolas. Posteriormente, os fabricantes passaram a produzir bolas com sulcos.

Rugosidades da bola



A crise do arrasto ocorre mais cedo para esferas de superfície irregular.

A rugosidade precipita a turbulência na camada limite.

bola de golfe

bola de futebol "rugosa"

Número de Reynolds

O número de Reynolds é o adimensional que relaciona a dimensão do objeto com as condições de contorno do escoamento.

$$\mathrm{Re} = \frac{1}{\mu} \rho V D$$

O gráfico de arrasto mostra que há uma significativa mudança no arrasto de uma esfera com número de Reynolds aproximadamente 3×10^5.

Abaixo deste Re, o coeficiente de arrasto é constante em 0,5.

Acima deste Re, o coeficiente de arrasto torna-se quase constante em aproximadamente 0,1.

Reynolds da Bola da Golfe

$$\rho = 1{,}225 \quad kg/m^3$$

$$\upsilon = 1{,}74x10^{-5} \quad m^2/s$$

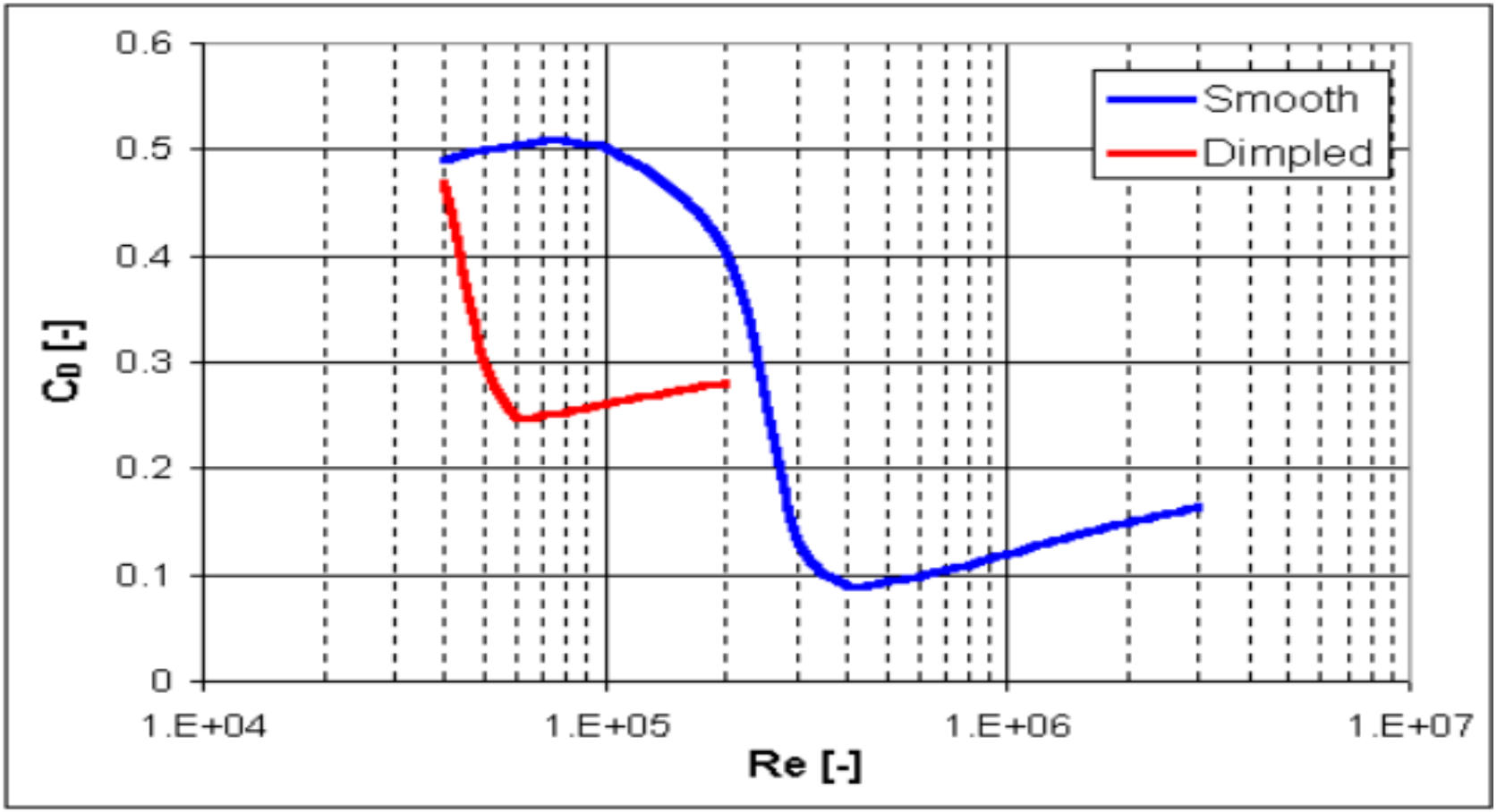
$$D = 0{,}04267 \quad m$$

$$V = 30 \sim 70 \quad m/s \quad (108km/h \sim 250km/h)$$

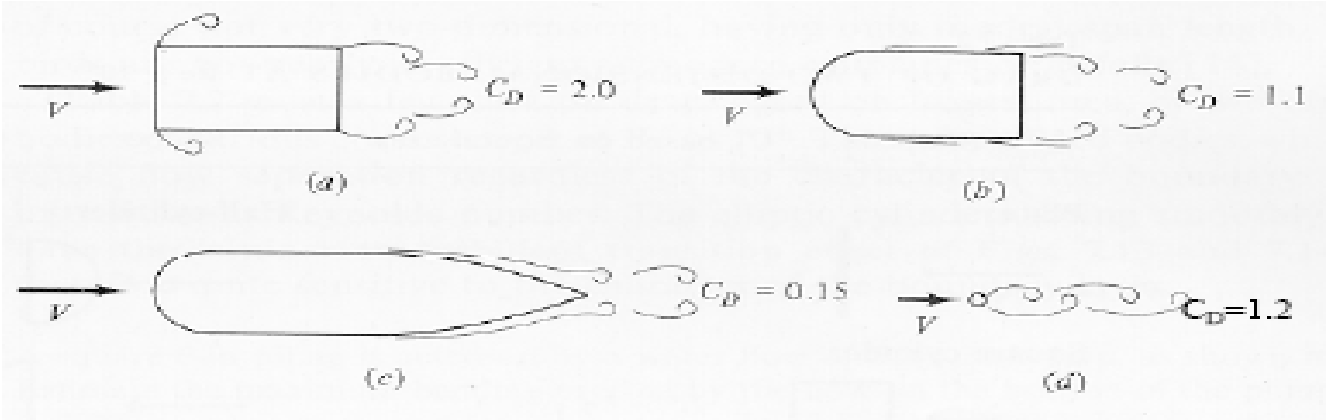
$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \qquad \mathrm{Re} = \frac{1}{\upsilon} VD$$

$$\boxed{\mathrm{Re} = 7{,}3x10^4 \sim 1{,}7x10^5}$$

Reynolds da Bola da Golfe



Alguns Coeficientes de Arrasto



• Coeficientes de arrasto para corpos de formas geométricas diferentes em escoamentos com Re > 10000.

• Os corpos rombudos (não delgados), representados em (a), (b) e (d), tem valores entre 2 e 1,1.

• Já para o corpo com uma traseira delgada, que previne melhor a separação do escoamento, Fig.(c), há uma substancial redução do arrasto.

• Isto é, se o cilindro da Fig. (a) é a referência, nota-se que ao arredondar a frente do cilindro, Fig. (b), reduz-se o arrasto em 45%; com a introdução de uma carenagem na parte traseira, a redução do arrasto chega a 93%, Fig. (c).

Alguns Coeficientes de Arrasto

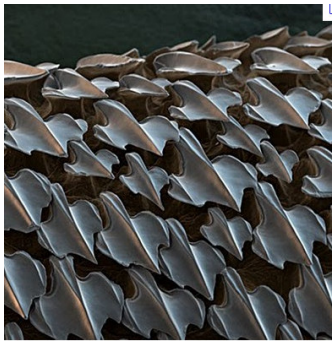
Carro esporte	0.3 – 0.4
Carro de passeio	0.4 – 0.5
Avião subsônico	0.12
Paraquedista	1.0 - 1.4
Homem ereto	1.0 – 1.3
Cabos e fios	1.0 – 1.3
Torre Eiffel	1.8 – 2.0

Asas de Avião

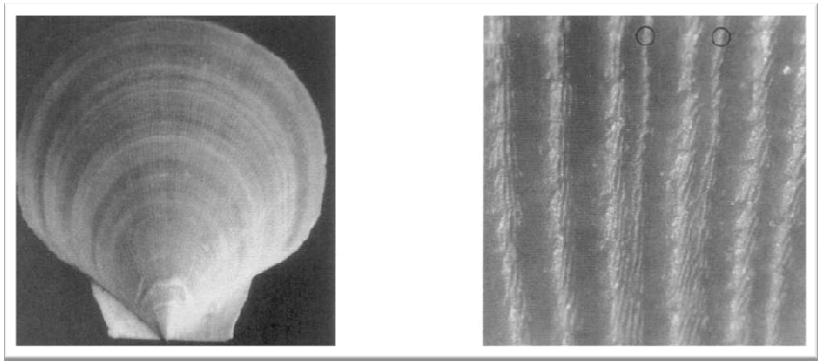
- Geradores de vórtice;
- Os aerofólios trabalham em regime turbulento. As asas dos aviões comerciais trabalham no regime turbulento, induzido;
- Como no caso da bola de golfe, a camada limite turbulenta ajuda o escoamento a superar o gradiente de pressão adverso permanecendo aderido a superfície por mais tempo se não os tivessem.

A Natureza

- A natureza é constate fonte de inspiração para as novas tecnologias.



  - Pele de tubarão (roupas de natação);
  - Escama dos peixes;
  - Estrias das baleias, conchas, etc;
  - Textura das plantas;
  - Asas dos pássaros (asas de aviões);
  - Forma dos peixes (casco de embarcações)
  - Etc.



Tese de Mestrado

Métodos Passivos de Redução de Arrasto

Este trabalho dedicou-se ao **estudo experimental do controle passivo de arrasto por inserção de micro-ranhuras longitudinais**, alinhadas com a direção do escoamento principal;

Introdução

- Uma das áreas de interesse da Mecânica dos Fluidos é a busca em compreender os fenômenos relacionados a redução de arrasto e reduzir os custos envolvidos.

- De todos os componentes da resistência aero/hidrodinâmica, a contribuição do arrasto viscoso é a mais significativa no arrasto total:
  - ~50% em aviões comerciais,
  - ~90% em veículos aquáticos,
  - ~100% em tubulações

Introdução

- A questão de como o escoamento turbulento próximo a parede pode ser relativamente controlado, a um custo razoável, com o propósito de diminuir o arrasto viscoso, vem sendo investigada empregando diferentes técnicas de redução de arrasto, classificadas em ativas e passivas, são elas:
  - Injeção ou sucção normal de fluido na parede
  - Injeção tangencial de fluido por abertura na parede
  - Utilização de material rugoso para prevenção de separação
  - Otimização de forma para o controle do gradiente de pressão
  - Adição de polímeros

Entretanto, três técnicas têm recebido importância crescente em aplicações navais:

- **Inserção de estrias longitudinais**
- **Inserção de micro-bolhas**
- **Utilização de tintas especiais (material polimérico)**

Observando a Natureza...

- É o maior ser vivo existente na Terra
- Comprimento: ~33,6 metros
- Peso: ~200 toneladas

Observando a Natureza...

A baleia azul é um **cruzador rápido**

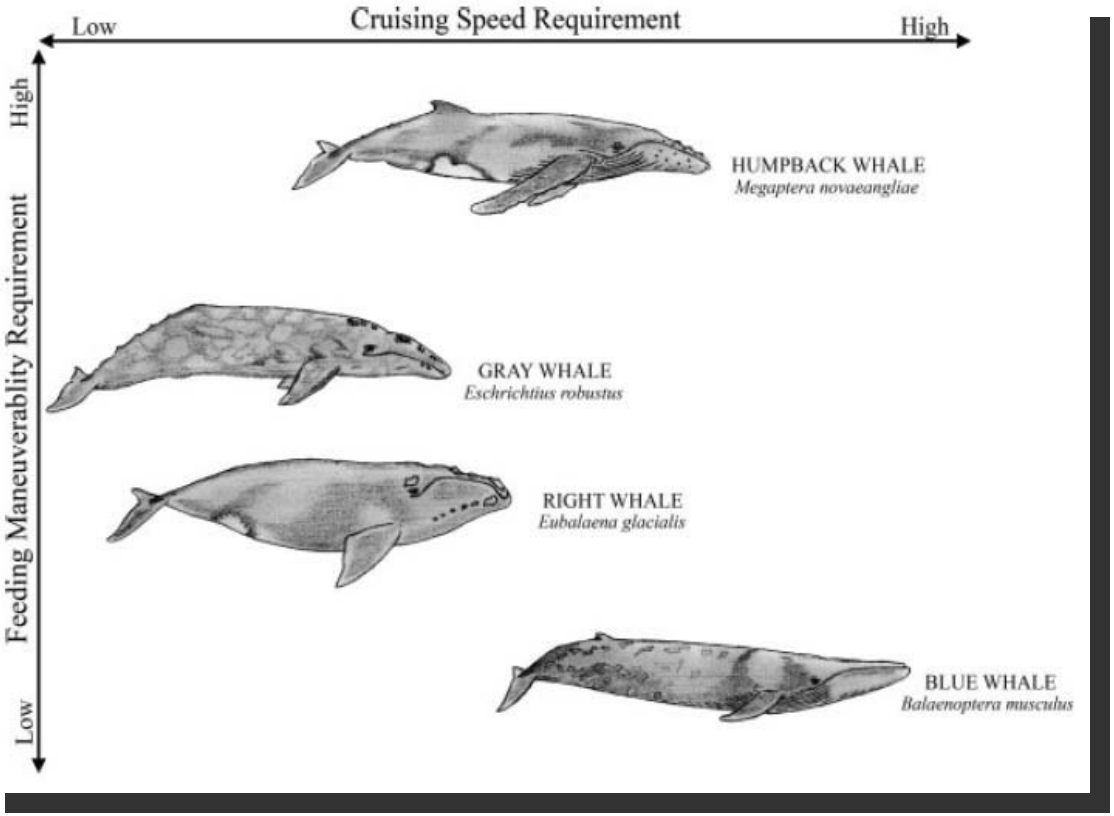
Possui formas altamente hidrodinâmicas , projetadas para a **natação constante**.

Velocidade de cruzeiro: 8,3 m/s

Balanço energético bem resolvido, forma otimizada.

Na tentativa de aplicar o **desenvolvimento da natureza à ciência moderna** buscamos formas otimizadas; esculpidas pela natureza a mais de **50 milhões de anos.**

Classificação das baleias baseada na velocidade de cruzeiro e manobrabilidade (Woodward, 2006)



Metodologia Experimental

Característica dos Modelos

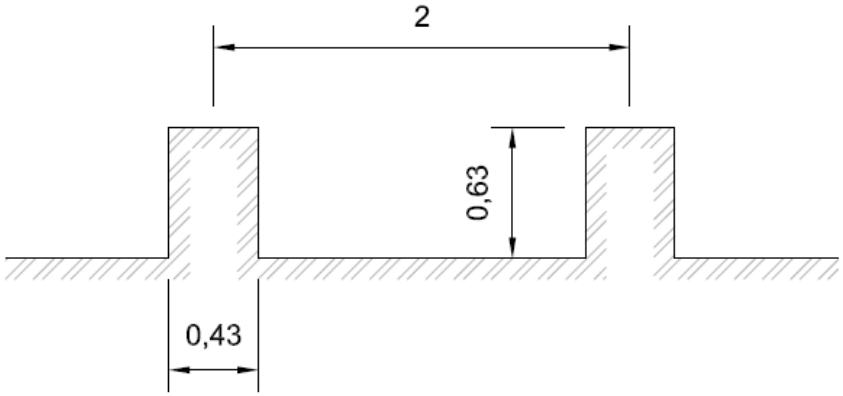
- Divinycell 130 kg/m³
- Usinado com CNC – 3 eixos (LTO)
- Fabricação das formas (Holos)
- Laminação de vários modelos (Holos)

Metodologia Experimental

Definição das estrias

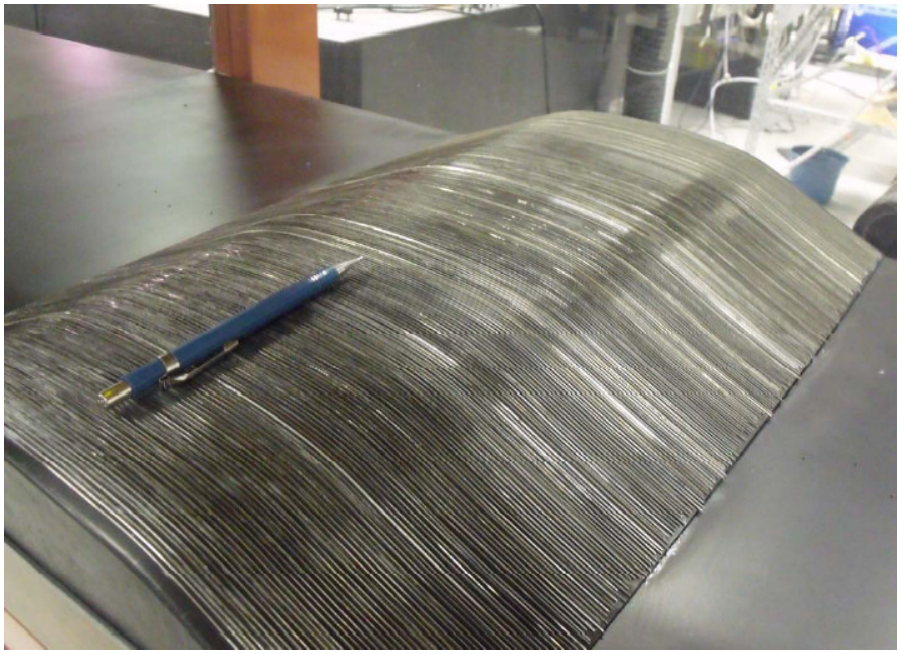
$$s^+ = \frac{s u_\tau}{\nu}$$

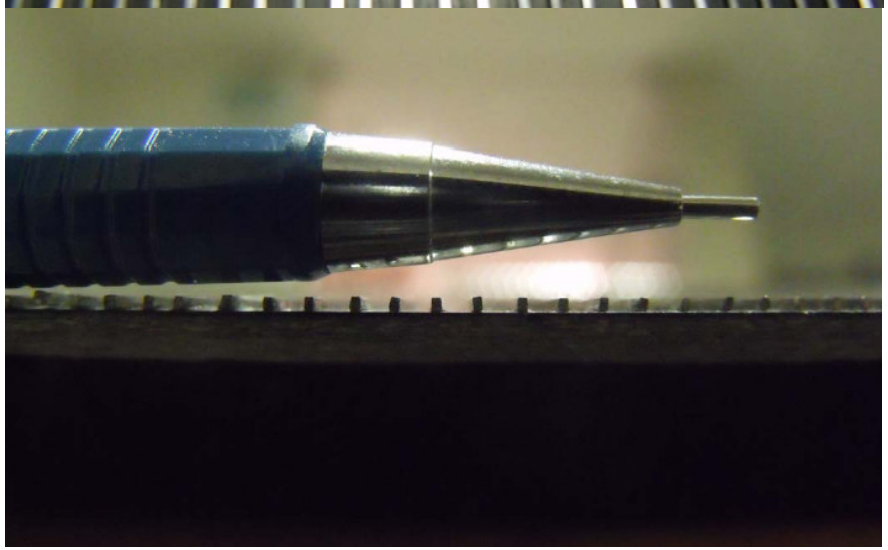
Espaçamento entre as ranhuras (s)	2,00 mm
Altura das ranhura (h)	0,43 mm
Espessura da ranhura (t)	0,63 mm
Velocidade de atrito (u_τ)	0,114 m/s
Velocidade do escoamento livre (U)	2,5 m/s
s^+	15



Metodologia Experimental

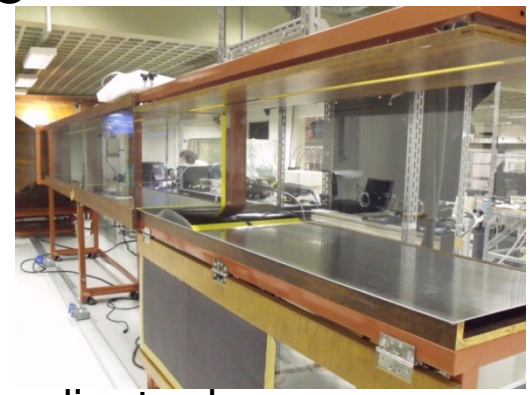
Detalhe das estrias



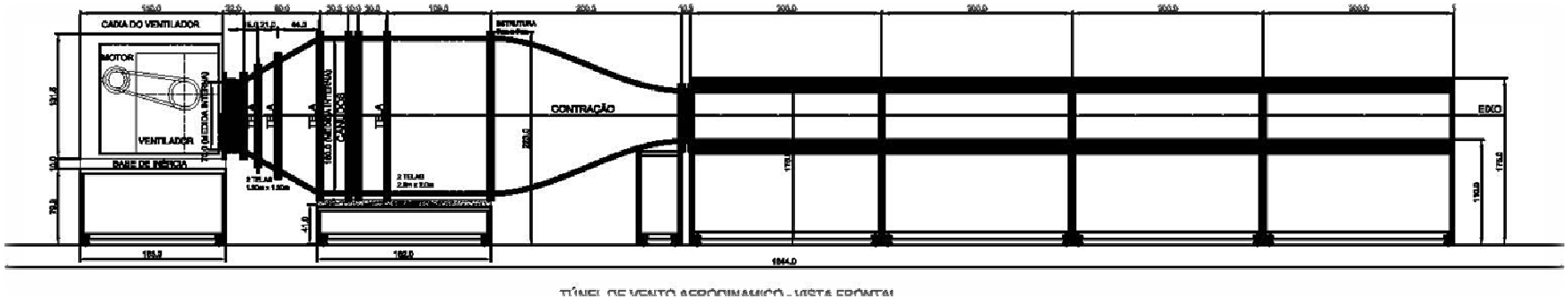


Metodologia Experimental

Túnel aerodinâmico de circuito aberto



- Laboratório de Velocimetria de Fluidos do Inmetro
- Comprimento: 6 metros
- Seção de teste: 0,5 x 0,5 metro
- Velocidade máxima: 23 m/s
- Paredes laterais de acrílico
- Teto de chapas de madeira, regulável (ajuste do gradiente de pressão)
- Contração 3,2 : 1

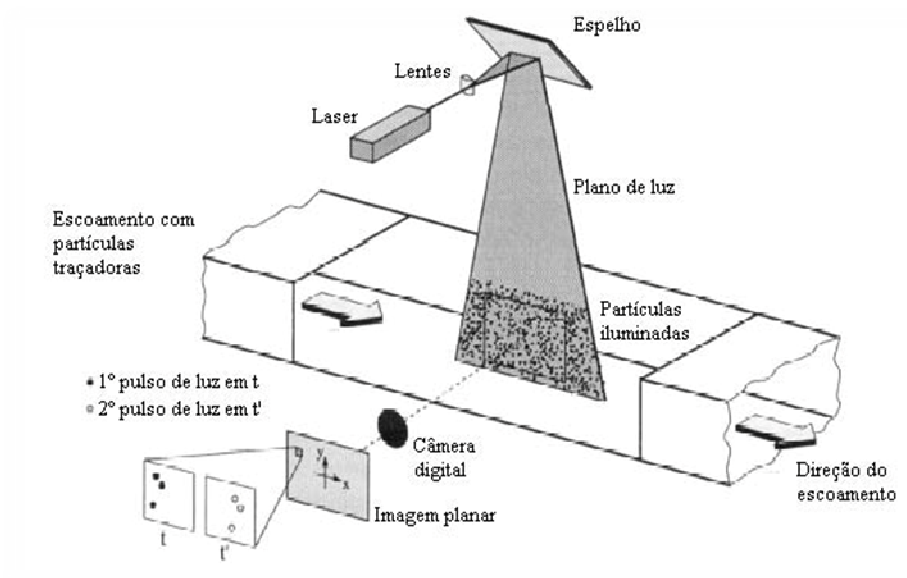


Metodologia Experimental

Métodos experimentais

Velocimetria por Imagem de Partículas

- Iluminar uma seção com plano de laser pulsátil;
- Aquisição de pares de imagens, com partículas traçadoras;
- Através de correlação cruzada entre duas imagens consecutivas calcula-se o deslocamento sofrido entre as partículas;
- Boa resolução espacial;
- O tempo entre os pulsos de laser é determinado pela velocidade do escoamento.



Metodologia Experimental

Métodos experimentais

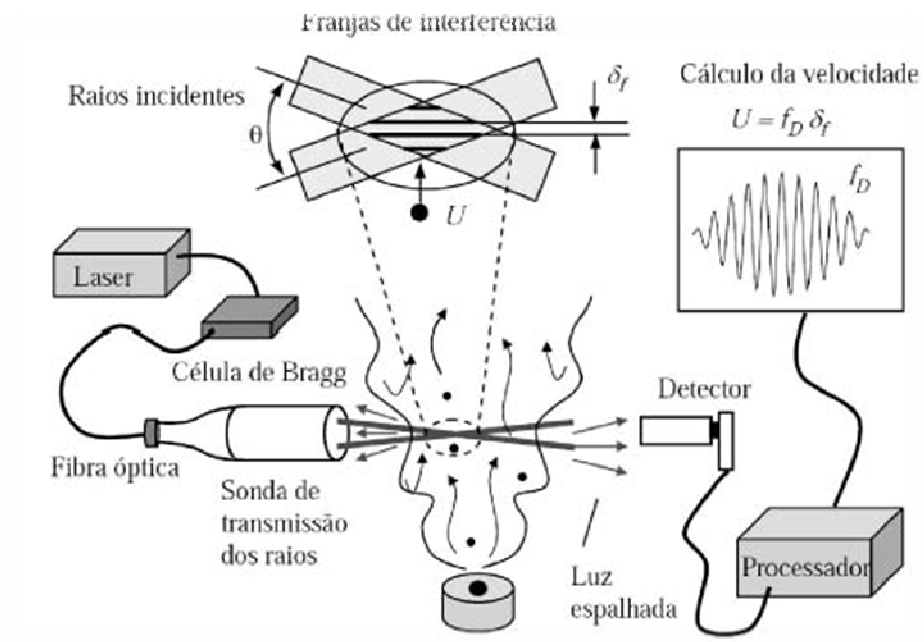
Anemometria Laser- Doppler

- Uma fonte de luz coerente (propriedades invariantes no tempo e no espaço) gera dois raios que se cruzam, gerando as franjas de interferência, caracterizando assim, o volume de controle

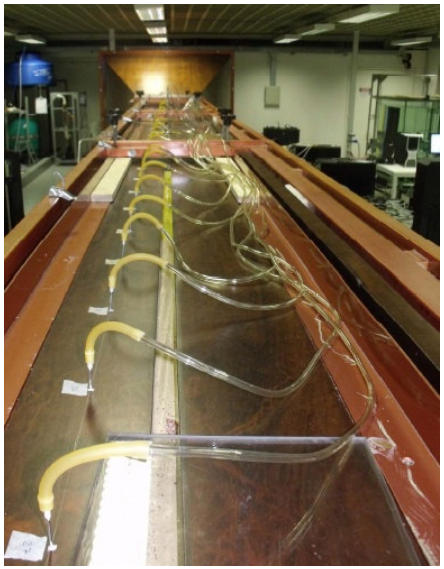
- A distância entre as franjas depende do ângulo entre os raios, e do comprimento de onda: $\delta_f = \lambda / 2sen(\theta/2)$

- Ao passar pelo VC, as partículas espalham a luz que é detectada por fotomultiplicador

- A freqüência da luz espalhada é diretamente proporcional a velocidade do fluido $f_D = U_\perp / \delta_f$



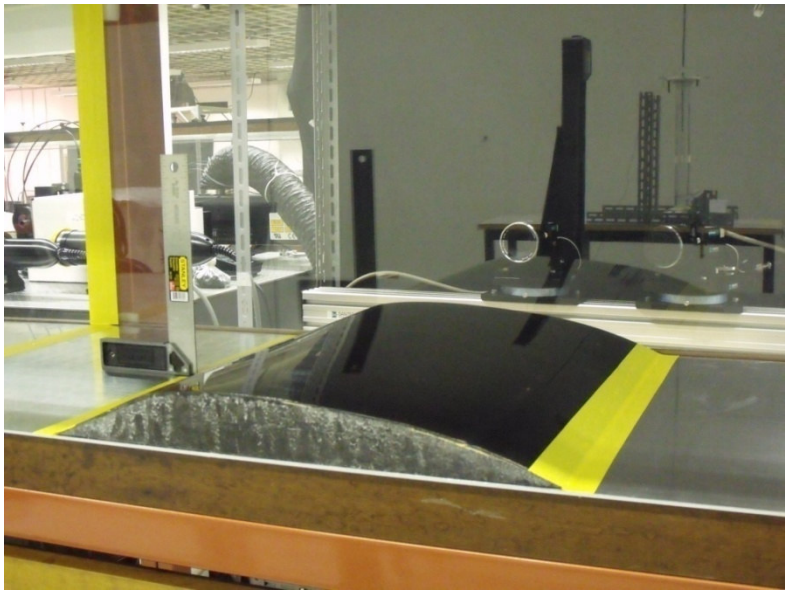
Condições Experimentais



- Ajuste do gradiente de pressão estática através do teto (27 tomadas espaçada de 20cm);
- 33 tomadas de pressão estática no modelo (Φ = 0,8 mm);
- Caixa seletora de 60 canais (Pressure Scanner)
- Transdutor de pressão (Micromanometer)

Metodologia Experimental

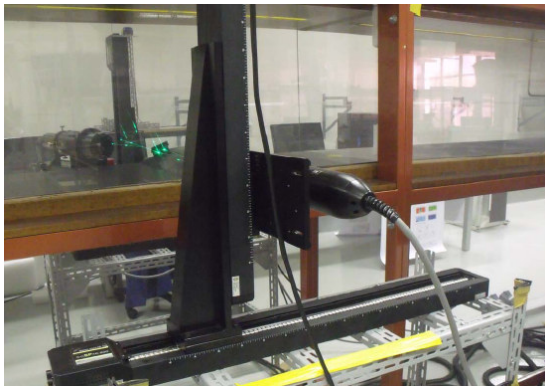
- A 1ª fase se resumiu a uma visualização do escoamento utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas, **VIP 3D da Dantec**;
- O mapeamento foi dividido em 3 partes, para cada um foram aquisitadas 10.000 pares de imagens.

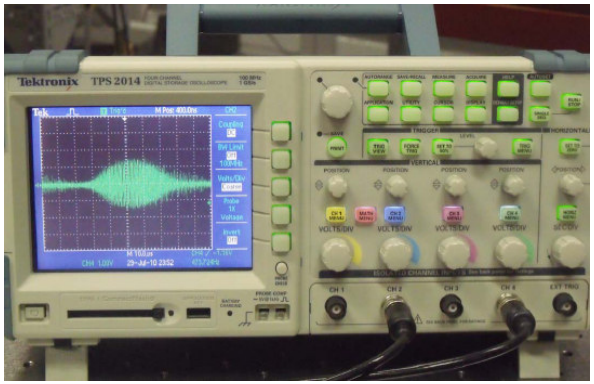


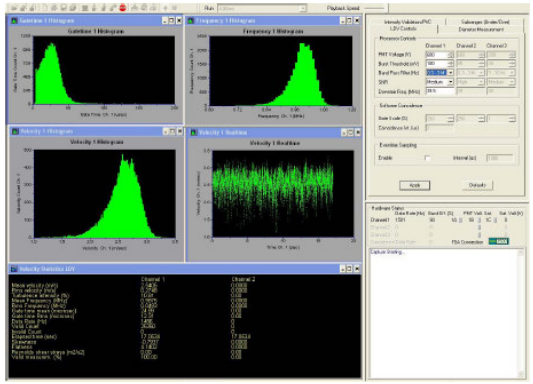
Metodologia Experimental

- A 2ª técnica foi anemometria laser-Doppler, técnica que possui excelente resolução temporal;
- Caracterização detalhada do perfil de velocidade muito próximo a parede.

Sistema	LDA TSI
Arranjo de sonda	Forward scatter
Comprimento de onda (λ)	514,5 nm
Meio ângulo de cruzamento dos raios	2,8º
Diâmetro do feixe	2,65 mm
Distância focal da lente	512,3 mm
Espaçamento entre as franjas	5,2778 μm
Freqüência da célula de Bragg	40 MHz
Amostragem	100.000
Taxa de aquisição média	10 kHz





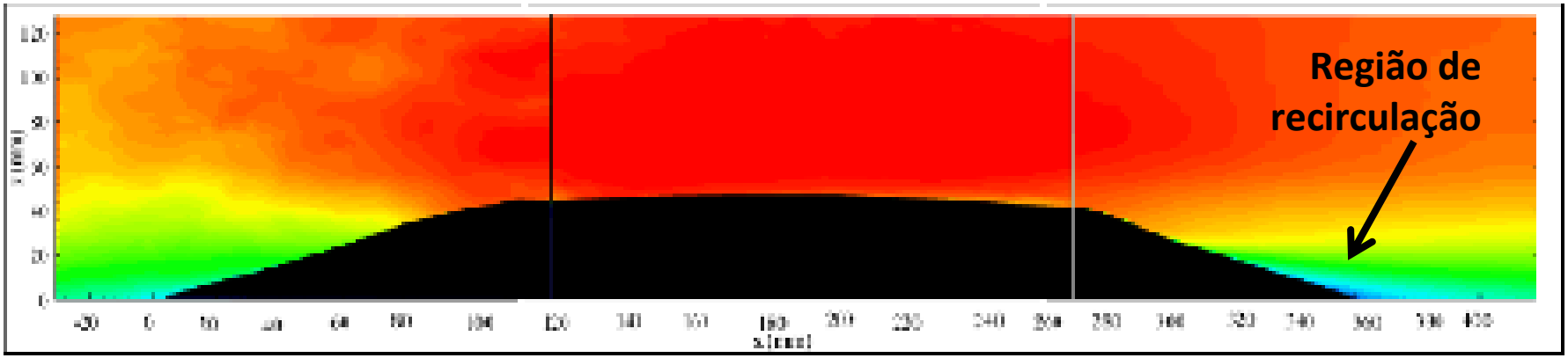


Resultados

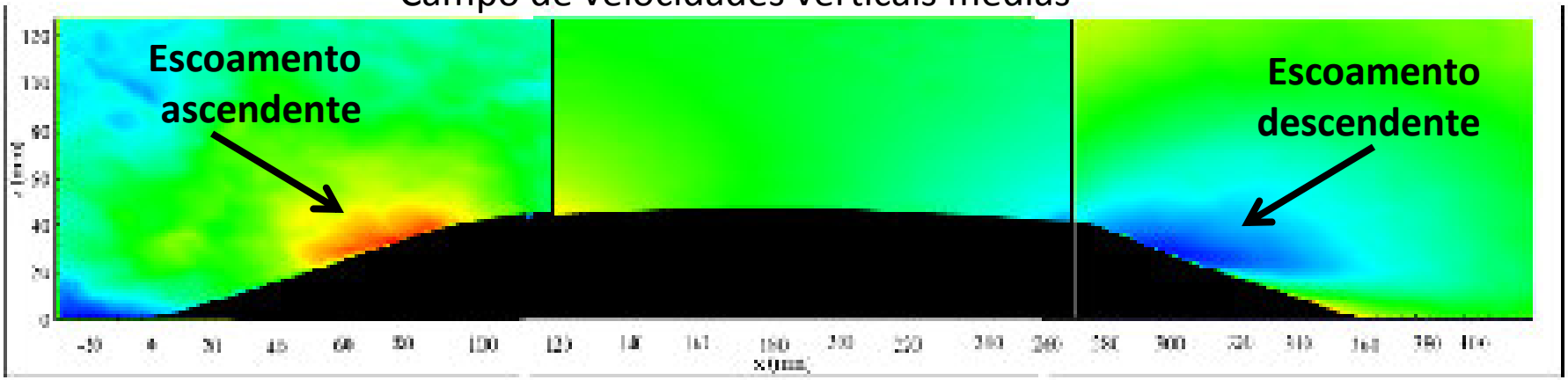
Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP)

Simétrica Lisa

Campo de velocidades horizontais médias



Campo de velocidades verticais médias

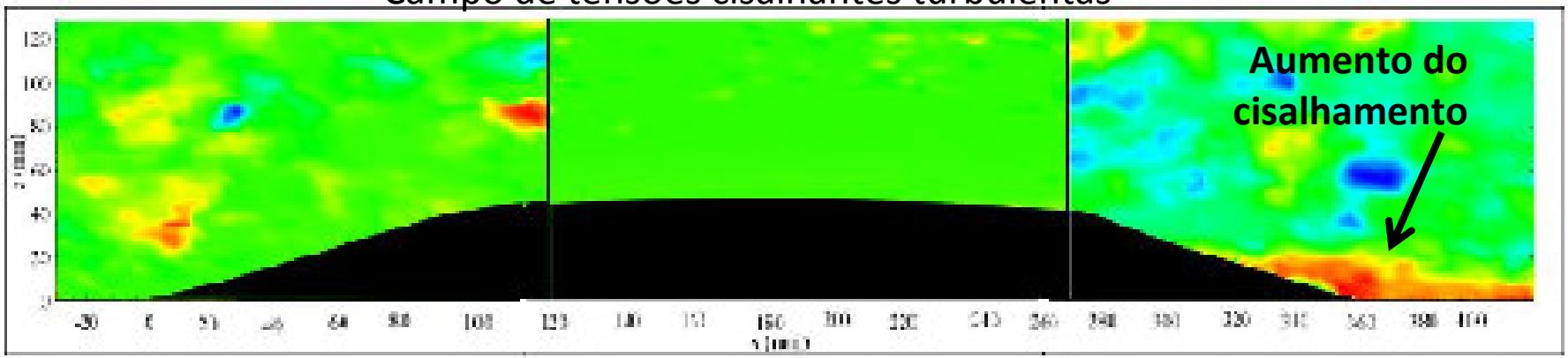


Resultados

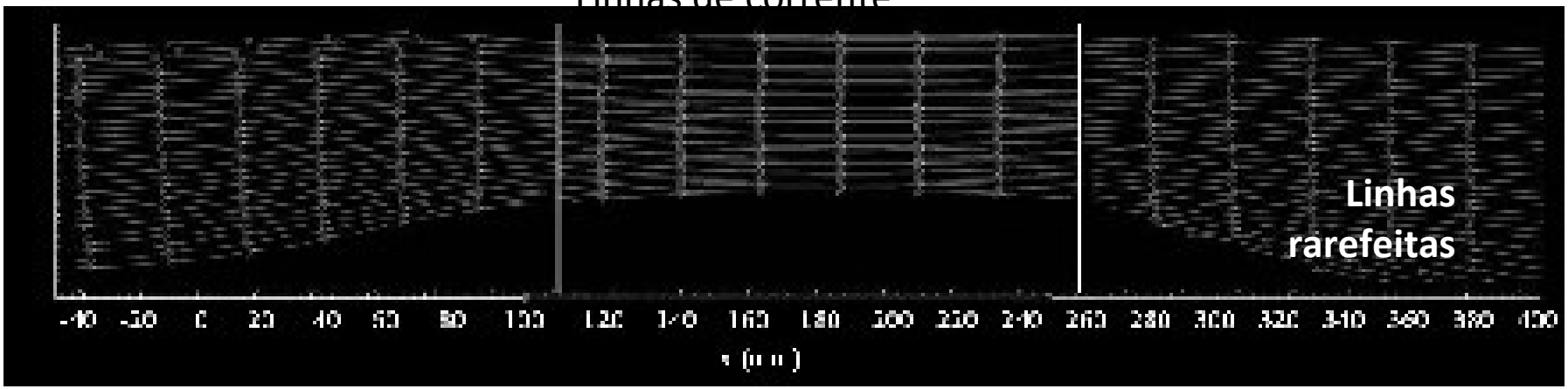
Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP)

Simétrica Lisa

Campo de tensões cisalhantes turbulentas



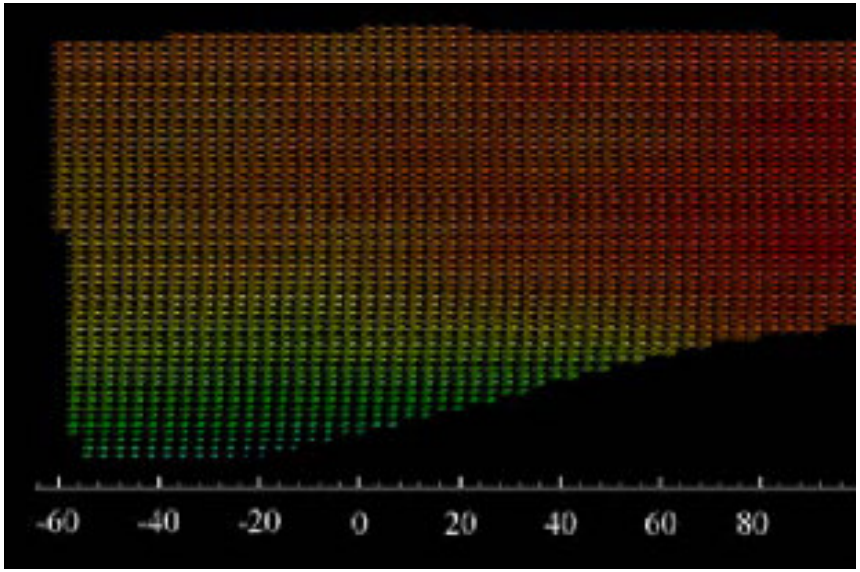
Linhas de corrente



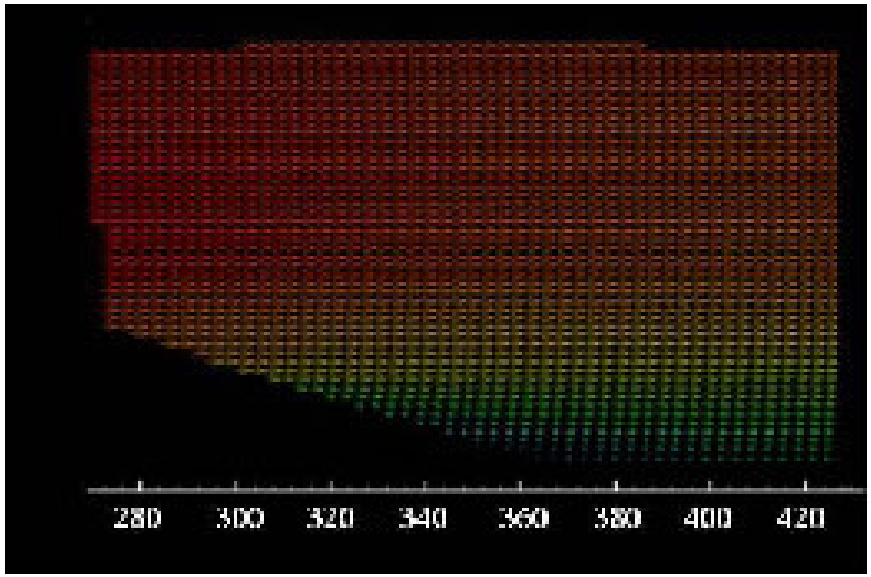
Resultados

Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP)

Simétrica Lisa



Campo de velocidades na encosta montante

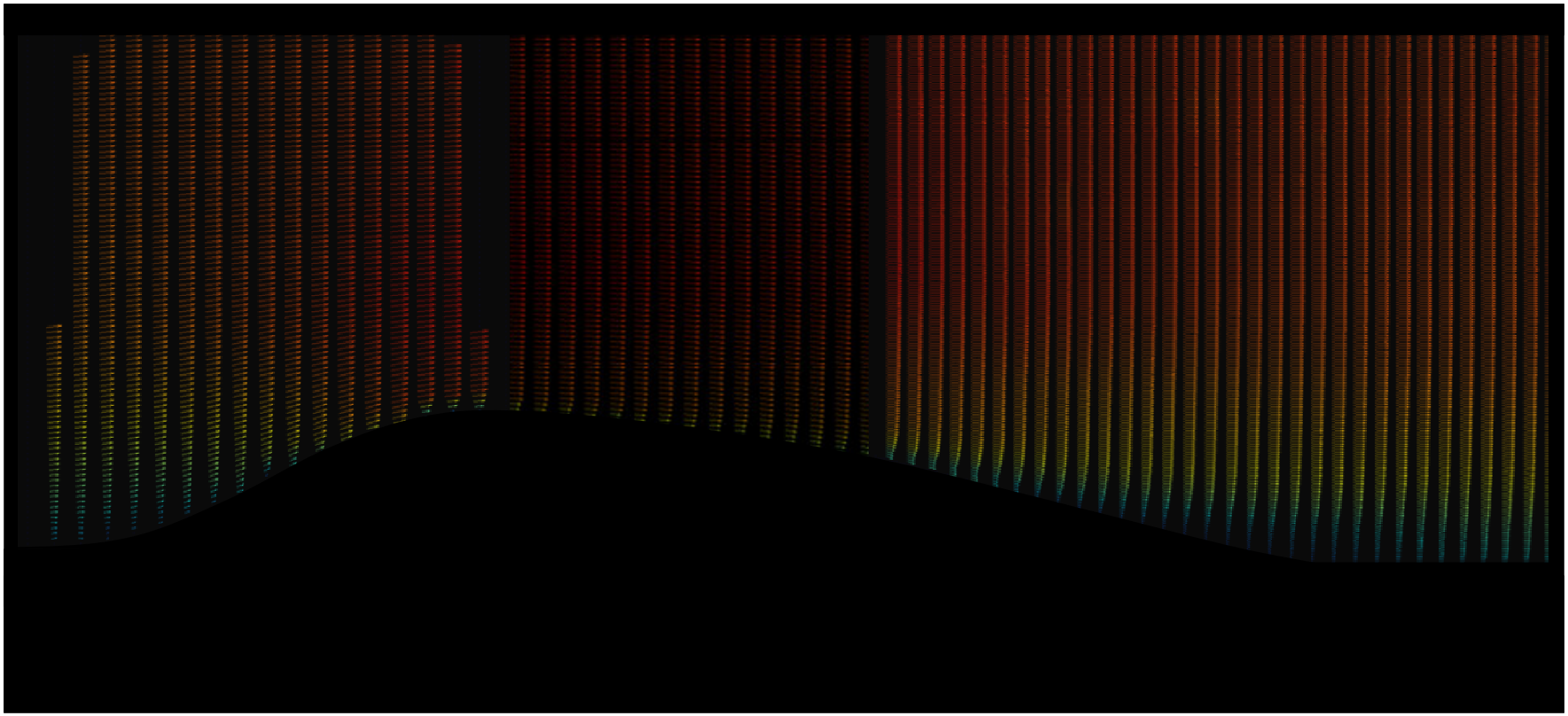


Campo de velocidades na encosta jusante

Resultados

Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP)

Assimétrica Lisa



Campo de velocidades

Resultados

Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP)

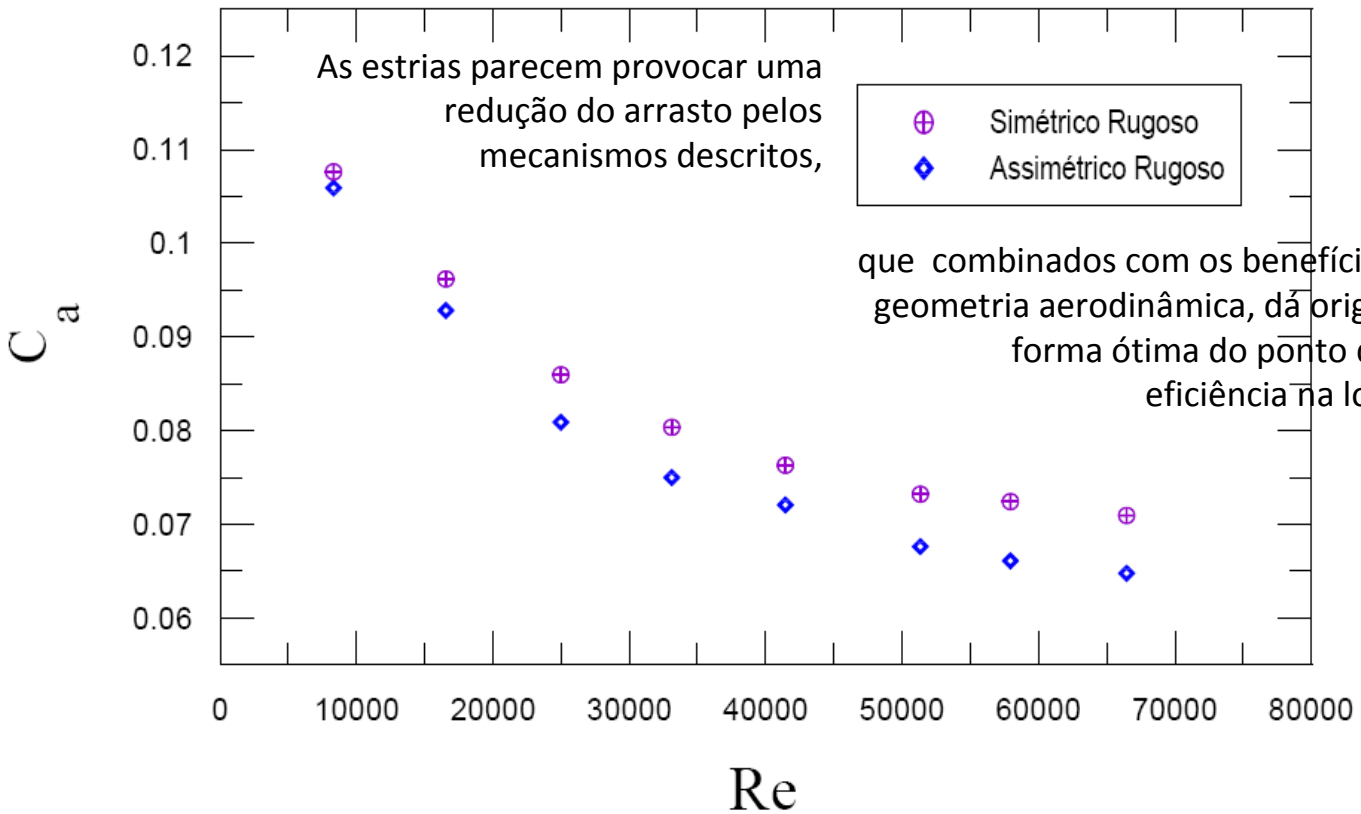
Assimétrica Lisa

Linhas de corrente

Resultados

Coeficiente de Arrasto

A superfície assimétrica rugosa apresenta C_a menor para todos os R_e ensaiados, isso é inesperado para os R_e menores



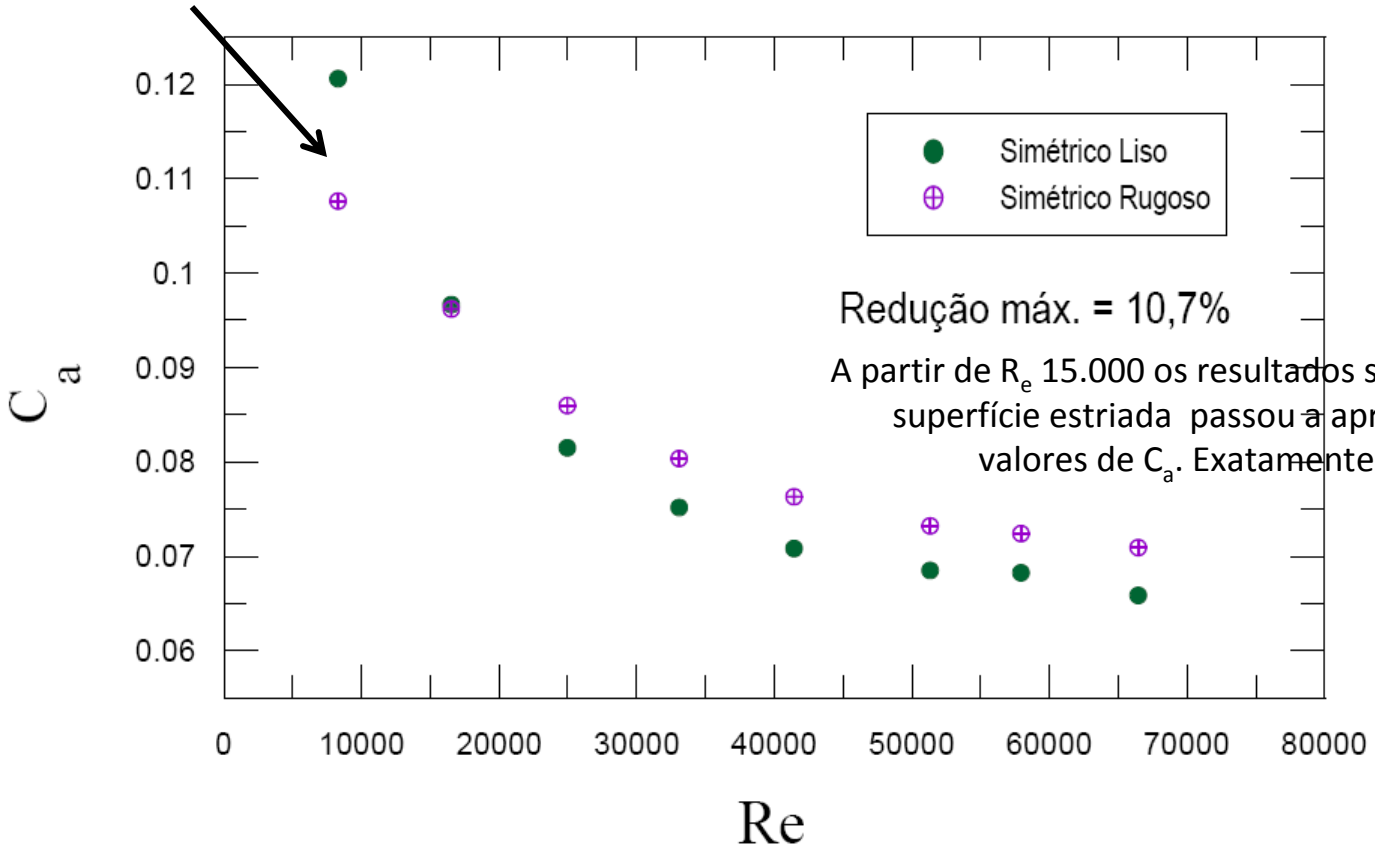
As estrias parecem provocar uma redução do arrasto pelos mecanismos descritos,

que combinados com os benefícios de uma geometria aerodinâmica, dá origem a uma forma ótima do ponto de vista da eficiência na locomoção.

Resultados

Coeficiente de Arrasto

Para baixos R_e, a superfície estriada apresentou o melhor desempenho aerodinâmico, com uma redução de arrasto de 10,7%

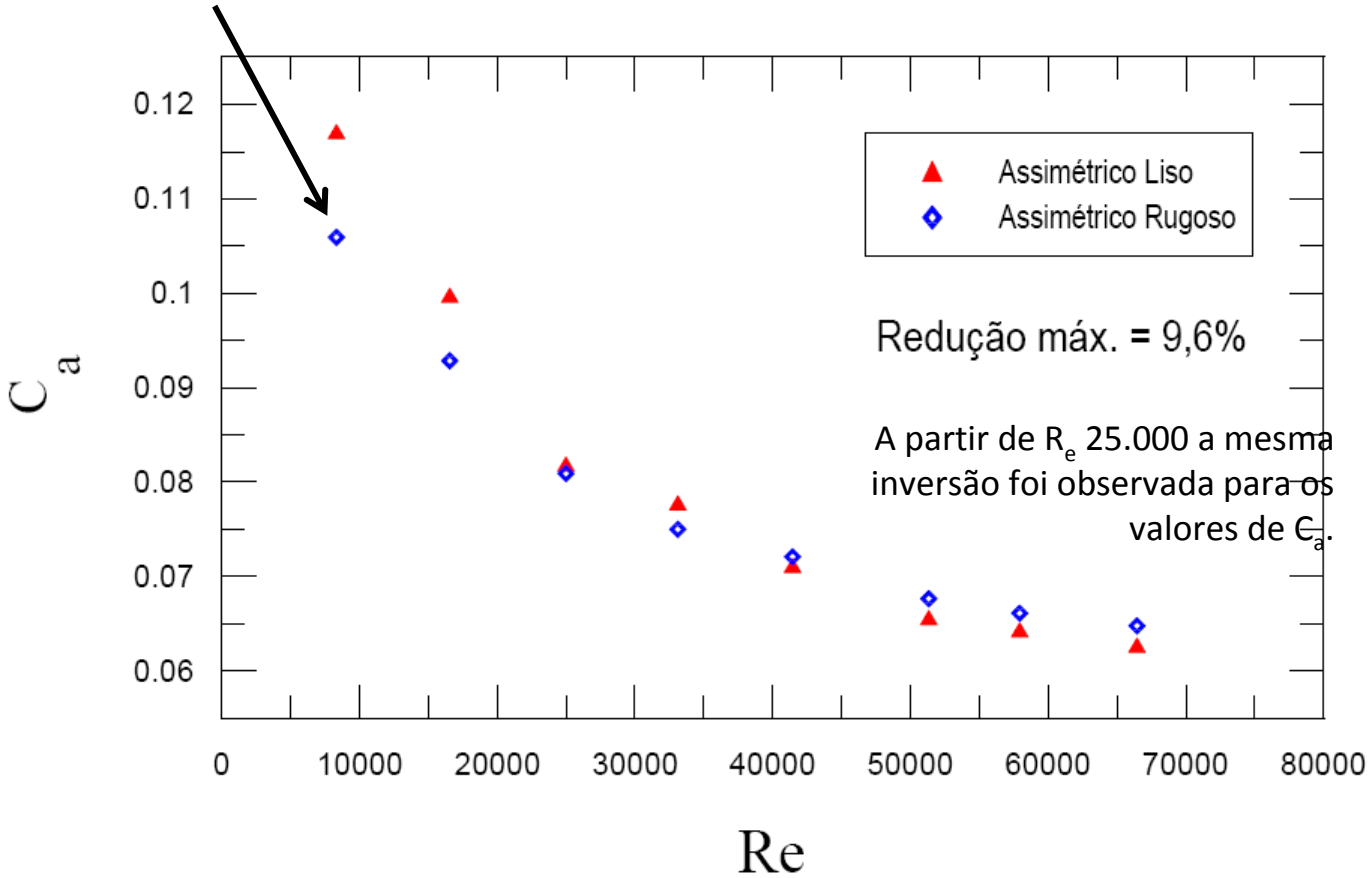


A partir de R_e 15.000 os resultados se inverteram e a superfície estriada passou a apresentar maiores valores de C_a. Exatamente como esperado.

Resultados

Coeficiente de Arrasto

Para baixos R_e, a superfície estriada apresentou uma redução de arrasto de 9,6%



A partir de R_e 25.000 a mesma inversão foi observada para os valores de C_a.

Aplicação

- NASA riblets for *Stars & Stripes* (outubro 1993)

- Em 4 de fevereiro de 1987, em Fremantle na Austrália, o barco americano *Stars & Stripes* **venceu de 4 a 0 na melhor de 7 regatas** sobre o australiano *Kookaburra III*;

- A **tecnologia da NASA** colaborou com a vitória. Depois da competição, o segredo do projeto do casco foi desvendado: o **casco foi recoberto com uma película estriada** que ajudou na redução de arrasto;

- As primeiras estrias foram construídas em uma folha de alumínio e **testadas em um túnel de vento;**

O casco acima foi revestido com uma película estriada que ajudou a embarcação a deslizar pelos mares mais suavemente.

Vencedor da Copa América de 1987 (USA)

Aplicação

- Depois dos testes os engenheiros moldaram as estrias em um filme plástico adesivo;
- A NASA aceitou a parceria da 3M para produzir os adesivos estriados, que apresentaram uma redução de arrasto de 8% em testes em aviões, e resultados similares nos testes em túnel de vento com as estrias de alumínio;
- A meta do centro de pesquisa da NASA é dobrar a capacidade de redução de arrasto das estrias para 15~16%, o que significa aproximadamente 5% de redução nos custos com óleo combustível.
- As estrias podem ser usadas em linhas de transmissão de óleo, gás e água

Vencedor da Copa América de 1987 (USA)

Aplicação

- BMW Oracle's skin-friction reduction riblet film

  (15 de março de 2010)

- Uma reportagem com a **equipe da 3M** a respeito da **utilização de estrias longitudinais no casco do veleiro BMW** foi divulgada, mas sem muitos detalhes, pois são informações confidenciais:

P: De que material foi feito o filme estriado ?

R: Material plástico microreplicado com estrutura estriada.

P: Como é aplicado no casco ?

R: O filme é adesivo, colado no casco.

BMW Oracle

Vencedor da Copa América de 2010 (USA)

Aplicação

P: Qual o peso total do filme ?

R: Informação confidencial.

P: Qual o espaçamento e altura das estrias?

R: Informação confidencial.

P: Qual foi a redução de arrasto alcançada ?

R: Informação confidencial.

P: O quão diferente é a versão 2010 da versão 1987 ?

R: O novo filme estriado é diferente no material usado no veleiro Stars & Stripes em 1987 e foi projetado em cooperação com o time BMW Oracle para as altas velocidades do novo veleiro.

Esta entrevista mostra que o tema é absolutamente atual e demonstra a importância da continuidade nesta área de pesquisa.

Fonte: site Valencia Sailing

BMW Oracle

Vencedor da Copa América de 2010 (USA)

Conclusão

- Cada vez mais superfícies rugosas são usadas para reduzir o arrasto, mas ainda tem muito campo de pesquisa pela frente.

- Superfícies convexas podem se beneficiar de estrias longitudinais para uma redução de seus coeficientes de arrasto;

- Uma redução de até 10,7% foi observada para R_e na faixa de 8.000.

Obrigada pela atenção

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS

INEE INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DA TURBULÊNCIA

COPPE UFRJ