

INTRODUÇÃO

- A medição de velocidades em escoamentos é importante tanto para o entendimento de processos físicos relacionados a dinâmica dos fluidos quanto para a determinação de quantidades necessárias em projetos e aplicações de engenharia.
- Com o atual avanço das técnicas computacionais de simulação, criou-se uma demanda adicional por experimentos de validação e verificação dessas simulações. De modo que as técnicas de medição em escoamentos continuam sendo muito importantes para o estudo de escoamentos

INTRODUÇÃO

- Dentre as diversas técnicas existentes para a medição da velocidade do fluido pode-se encontrar dois principais grupos:
 - **Medições localizadas (ou pontuais).** Nos métodos para medição pontual destacam-se o tubo de Pitot, a anemometria térmica e a anemometria por efeito Doppler.
 - **Medições de campo.** Os casos de medição de campo envolvem as técnicas de velocimetria por imagem de partícula (PIV- do inglês Particle Image Velocimetry), rastreamento de partículas (PTV- do inglês Particle Tracking Velocimetry), dentre outras.
- Nesta aula serão abordados em detalhe o tubo de Pitot e a anemometria térmica.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

- O equipamento foi criado por Henri Pitot em 1732, para a medição da vazão do rio Sena.
- De maneira intuitiva Henri Pitot mostrou que a altura de uma coluna de líquido conectada um tubo de Pitot era proporcional ao raiz quadrada da velocidade.
- Na época as equações de Bernoulli (~1740) e Navier-Stokes (~1830), ainda não haviam sido publicadas. Somente mais tarde as observações foram confirmadas pela teoria .

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ TUBO DE PITOT

- É a técnica mais comum para determinar a velocidade de um fluido. As principais razões para a sua ampla utilização se devem a simplicidade na operação do equipamento, na fabricação das sondas e no baixo custo do sistema.
- O tubo de Pitot pode ser utilizado em diversos fluidos e em diferentes faixas de velocidades que variam desde baixo regime subsônico até velocidades supersônicas. Com o uso de correções apropriadas pode-se obter medidas de velocidade com alta precisão.
- Contudo, a técnica também apresenta desvantagens dentre as quais pode-se citar a erro em baixas velocidades, a incapacidade de medição de escoamentos reversos e dificuldade de se obter resposta em alta frequência.

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ TUBO DE PITOT

Princípio de funcionamento

➤ Pitot se baseia na conversão da energia cinética do escoamento em energia potencial. Essa conversão é feita através das equações de conservação de quantidade de movimento, que podem ser resumidas a equação de Bernoulli para o caso de escoamentos estacionários e invíscidos:

$$\frac{dp}{\rho} + U dU = 0 \quad (1)$$

onde p é a pressão, ρ a densidade local do fluido e U a velocidade

➤ No caso de escoamentos incompressíveis a equação pode ser integrada facilmente, assumindo a forma:

$$p - p_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2)$$

onde p é a pressão de estagnação (ou total) e p_0 a pressão estática. A diferença entre a p e p_0 é conhecida como pressão dinâmica.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Princípio de funcionamento

➤ O termo do lado direito da equação (2) está relacionado a energia cinética do escoamento enquanto que os termos do lado esquerdo se referem a energia potencial. Essa formulação é válida para escoamentos onde os efeitos de compressibilidade do fluido são desprezíveis ($U < 0.2Ma$), onde Ma é o número de Mach que é dado pela equação abaixo

$$Ma = \frac{U}{c}; \quad (3)$$

➤ Vale lembrar que γ é a razão entre os calores específicos do fluido e c a velocidade do som ($c = \sqrt{\gamma p / \rho}$)

➤ TUBO DE PITOT

Princípio de funcionamento

➤ Quando os efeitos de compressibilidade do escoamento são importantes a relação entre a pressão e velocidade dada pela equação (2) não é mais válida. Nesses casos a densidade não pode ser considerada como constante na solução da equação (1).

➤ Em regimes subsônicos de gases ideais pode-se assumir o escoamento como isentrópico de modo que a solução da equação (1) fica:

$$\frac{U^2}{2} + \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{p}{p_0} \right) \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = 0 \quad (4)$$

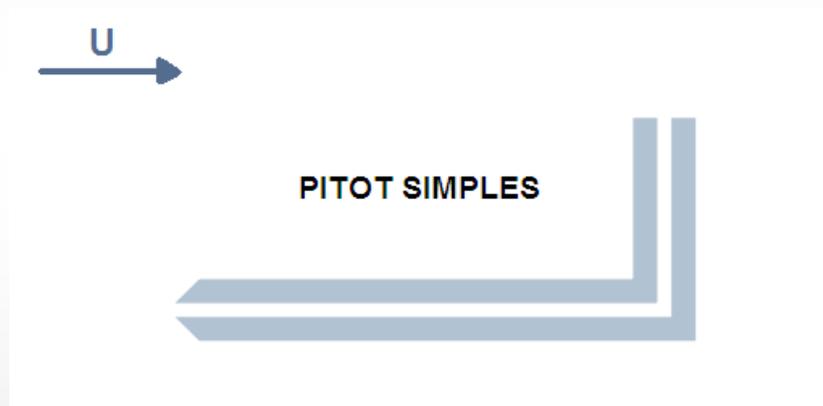
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Tipos de Pitot

➤ Existem diferentes modos de se medir as pressões total e estática, e conseqüentemente diferentes configurações de Pitot. As mais comuns são:



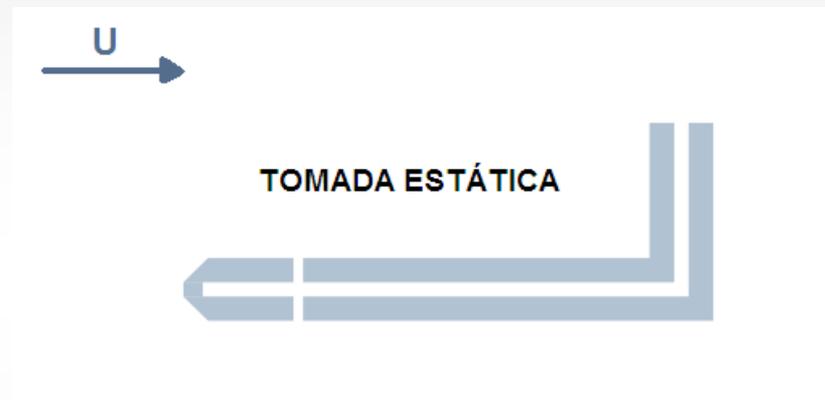
➤ O pitot simples serve para a medição da pressão de estagnação do escoamento. Esse tipo de pitot deve ser utilizado em conjunto com alguma tomada de pressão estática de referência, para que a pressão dinâmica possa ser determinada

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Tipos de Pitot



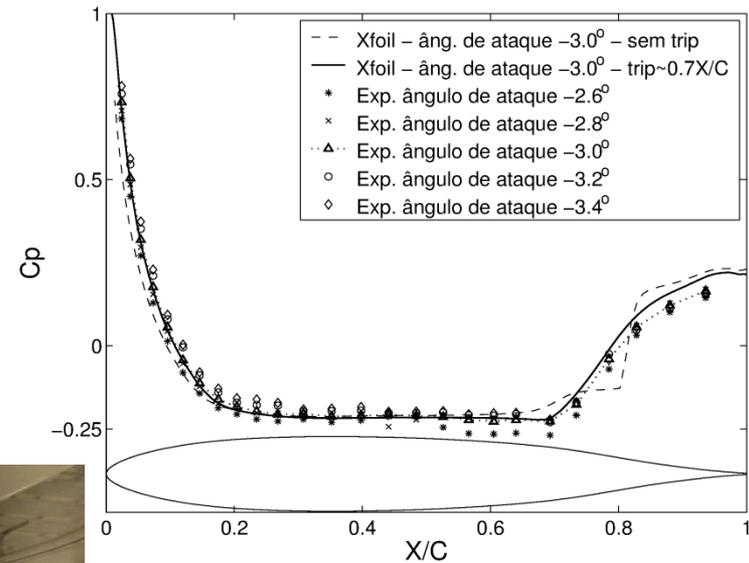
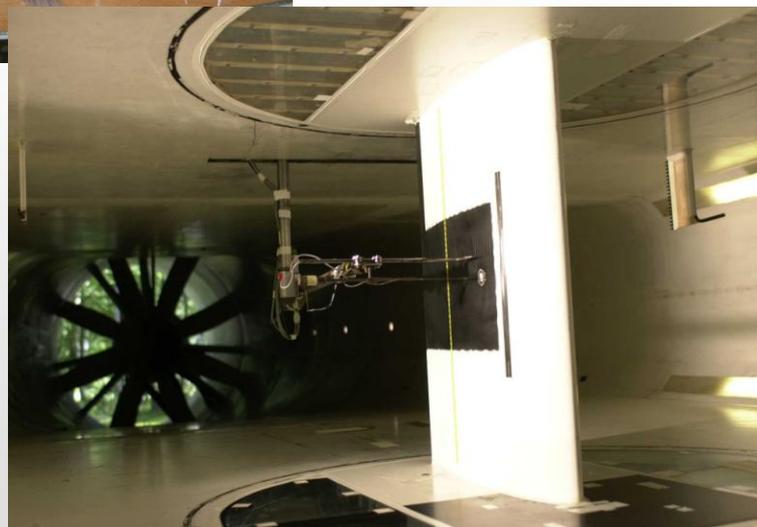
- As tomadas estáticas devem ser sempre perpendiculares a direção do escoamento de modo a evitar que componentes da pressão de estagnação influenciem na medição da pressão estática.
- No caso de escoamentos sobre superfícies, geralmente utilizam-se furos como tomadas de pressão estáticas. Nesses casos deve-se tomar cuidado para que a linha de eixo de cada furo fique sempre alinhada perpendicularmente com superfície.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Tomadas de pressão estática



Medidas Pontuais de Velocidade

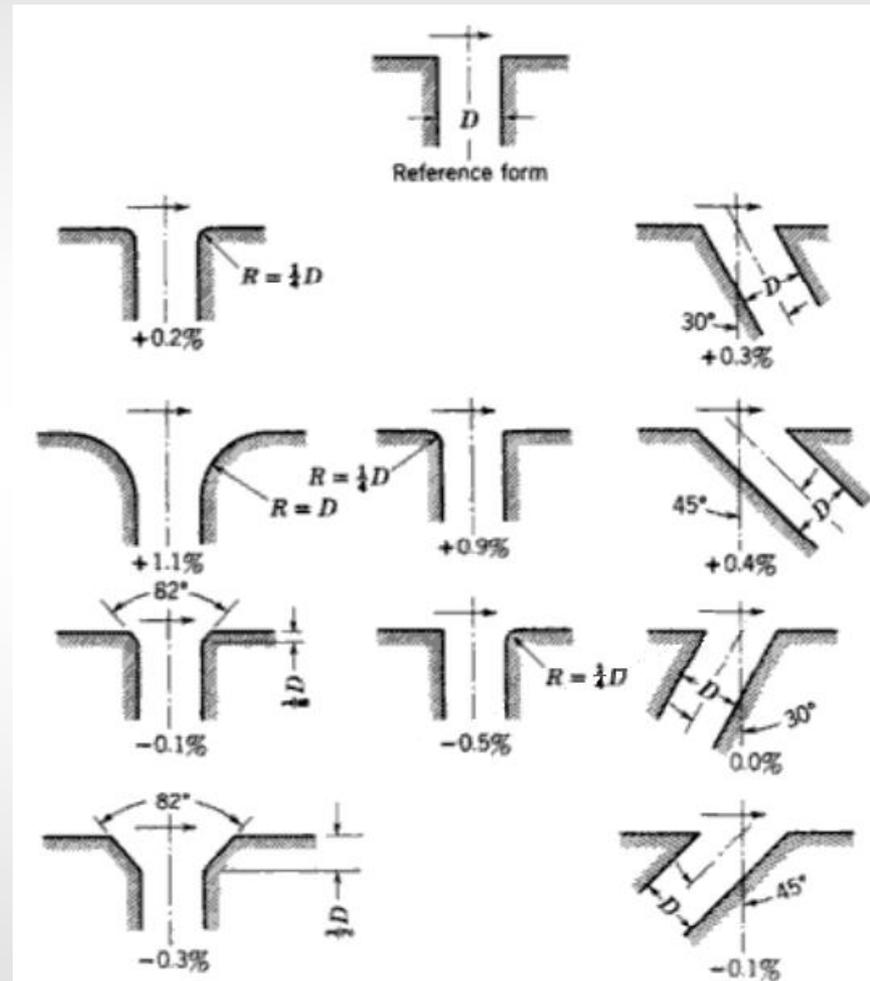
I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Tomadas de pressão estática

➤ A geometria das tomadas de pressão pode influenciar significativamente as medições de pressão estática em uma superfície.

➤ Por isso deve-se ter extremo cuidado na confecção de modelos.

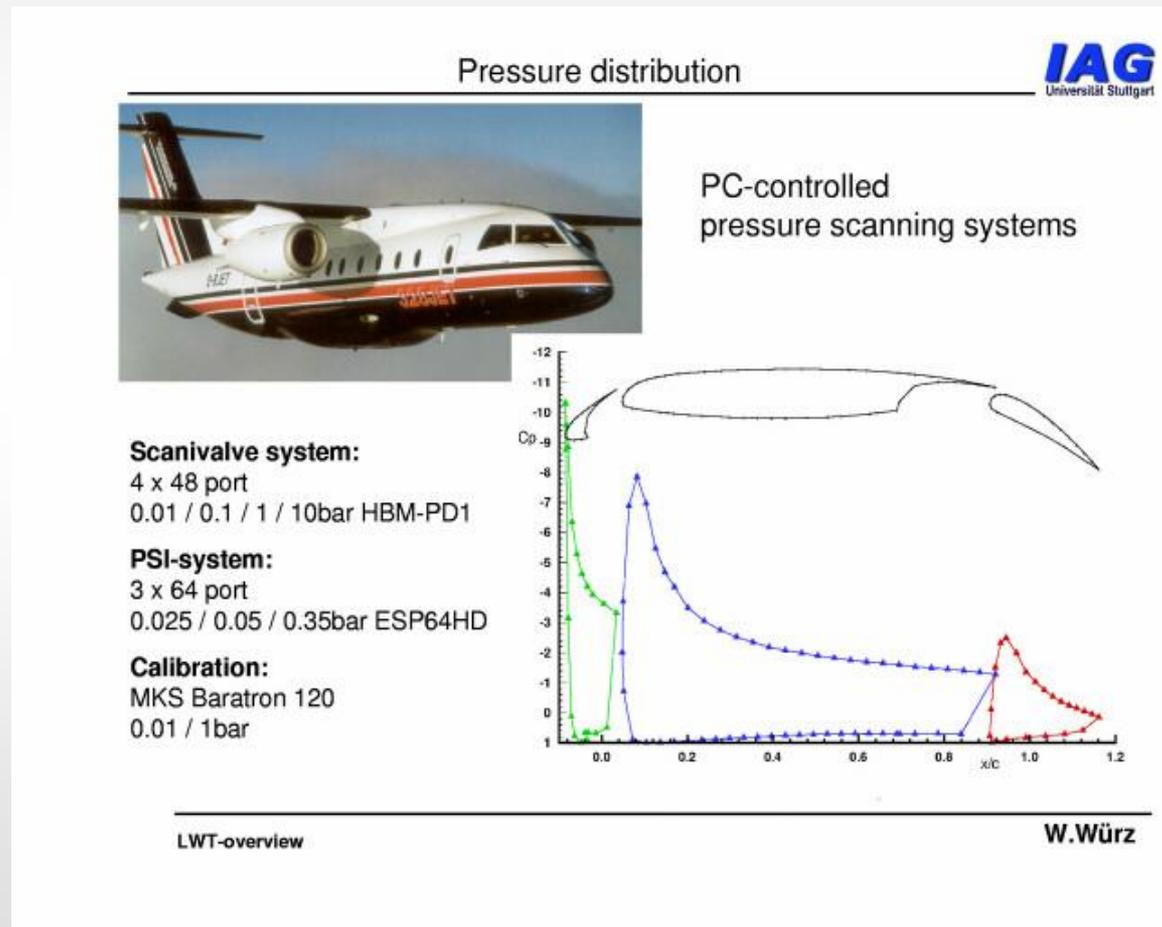


Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Tomadas de pressão estática

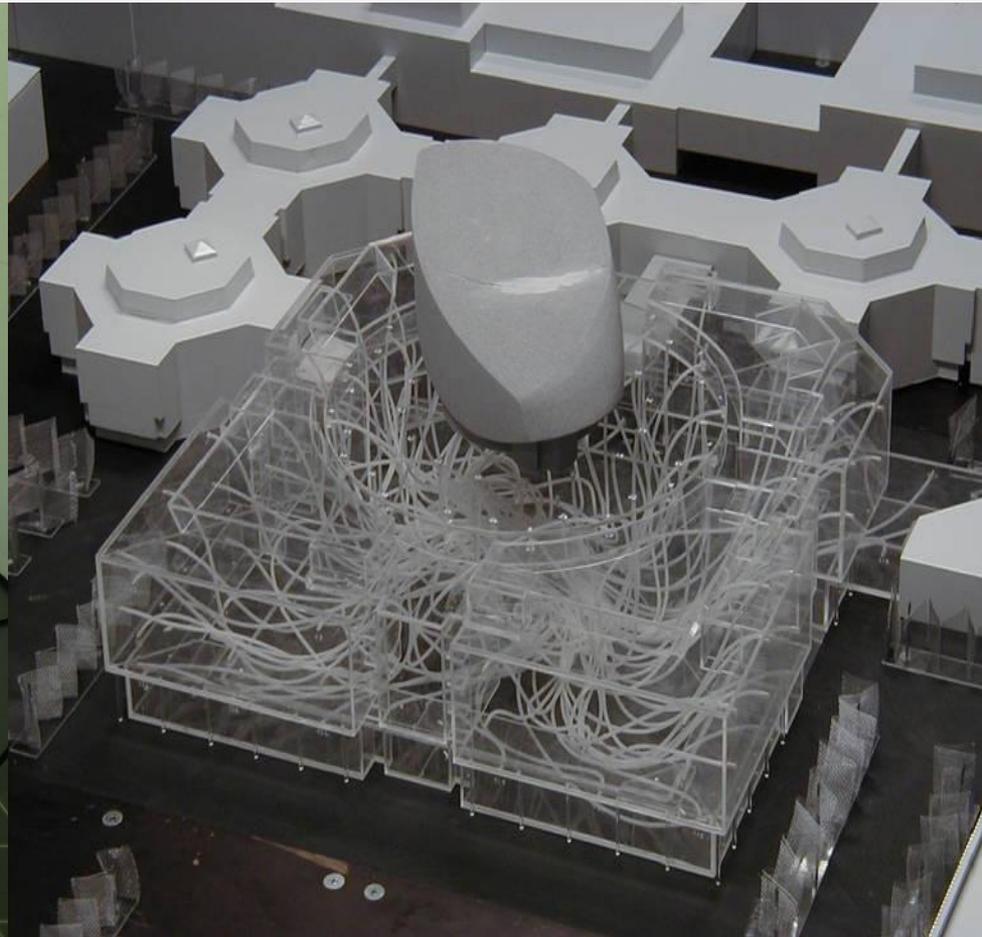
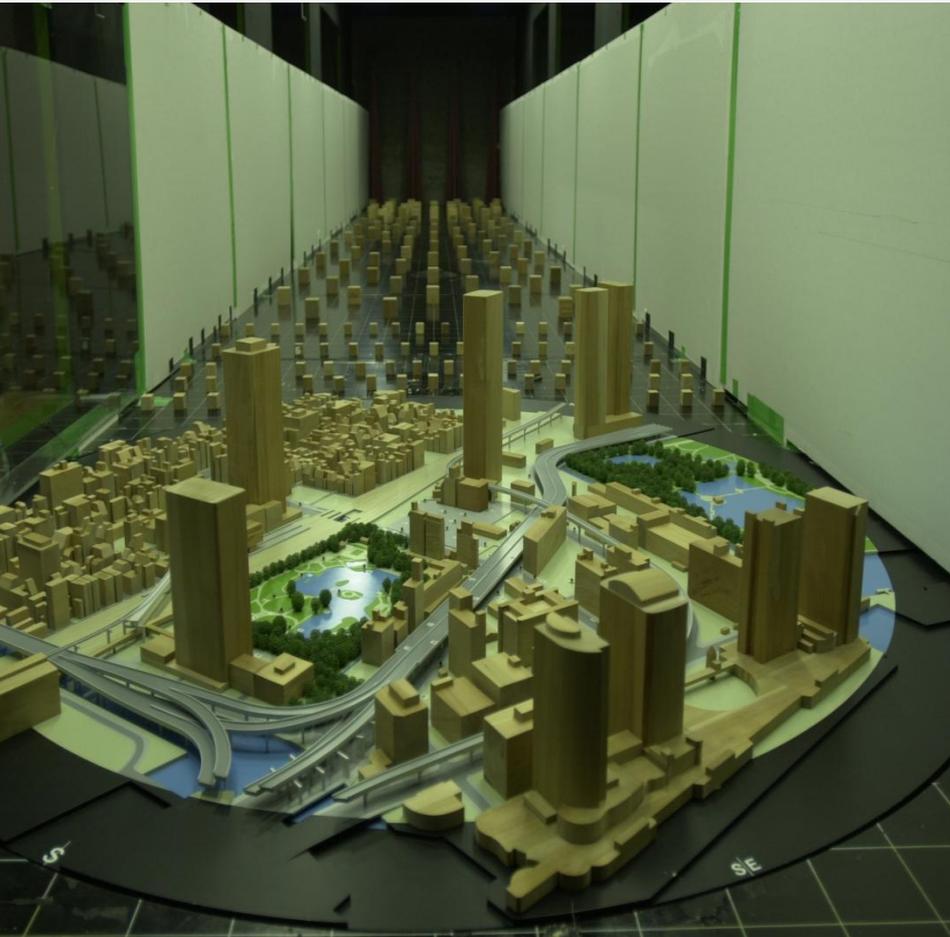


Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Tomadas de pressão estática

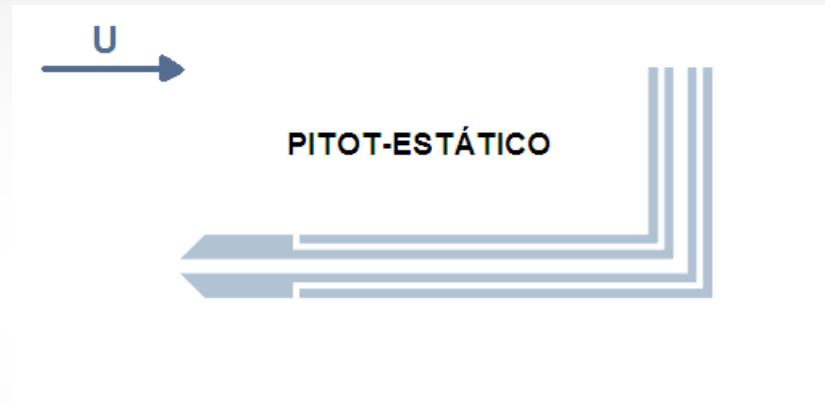


Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Tipos de Pitot



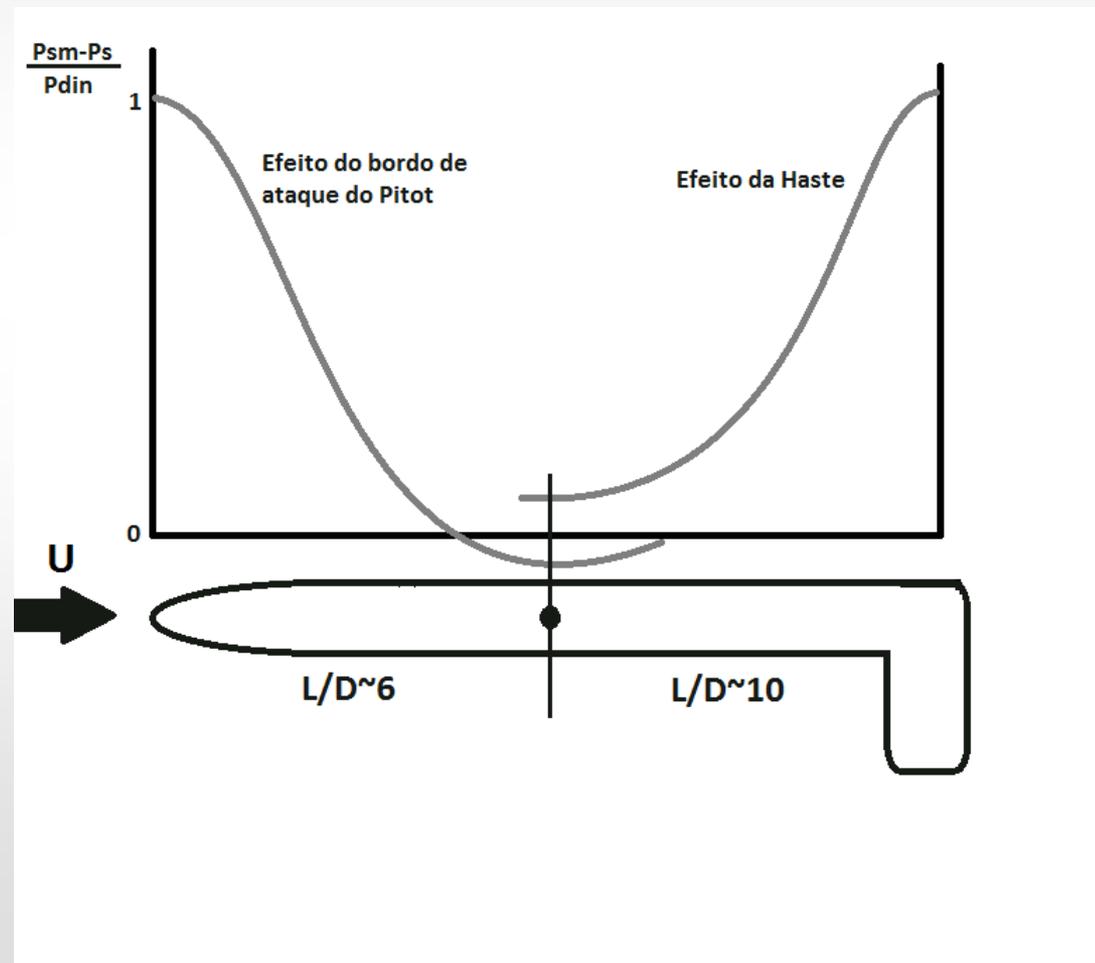
➤ Para a medição conjunta das pressões total e estática, utilizam-se tubos de Pitot-estáticos. Essa é uma configuração bastante usada, pois as pressões são medidas em um mesmo local. Deve-se atentar para o problema da utilização deste sensor em escoamentos próximos a superfícies e em esteiras, devido a influência desses fatores na medição da pressão estática

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Pitot-estático

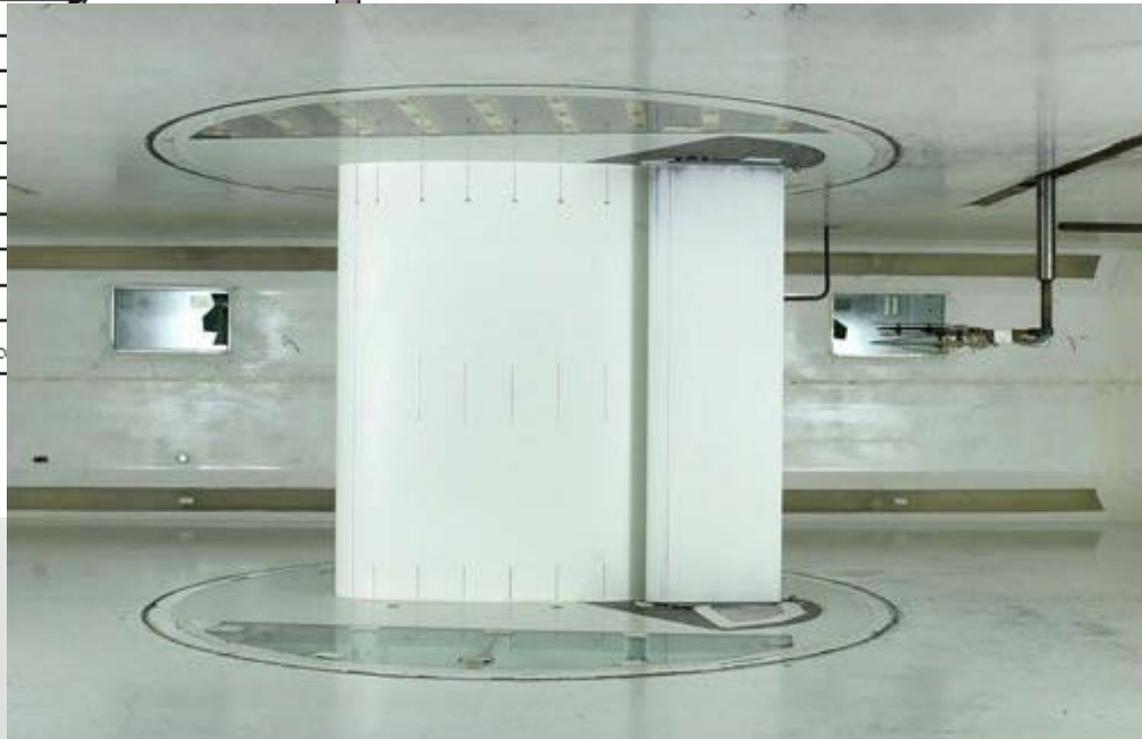
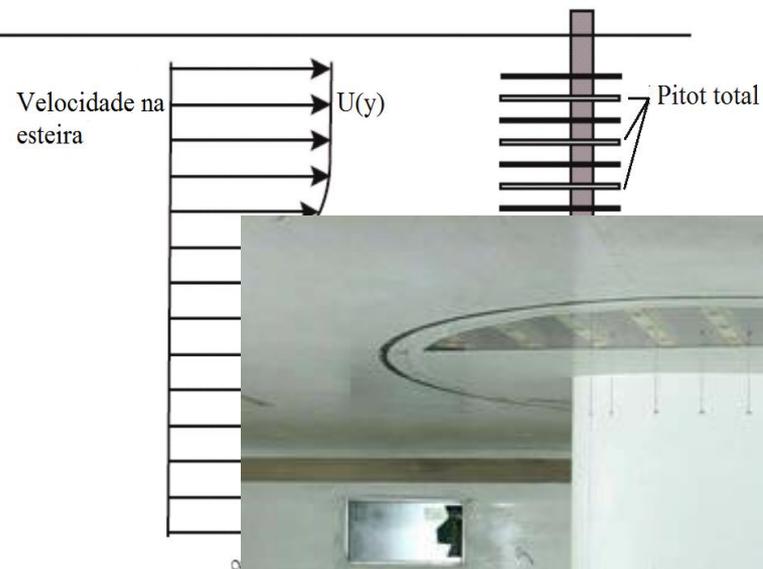
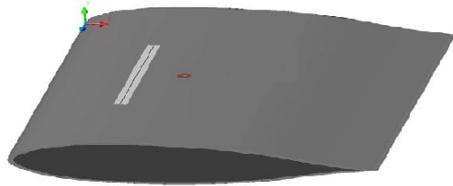


Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

Pitot-estático-aplicações



Medidas Pontuais de Velocidade

➤ TUBO DE PITOT

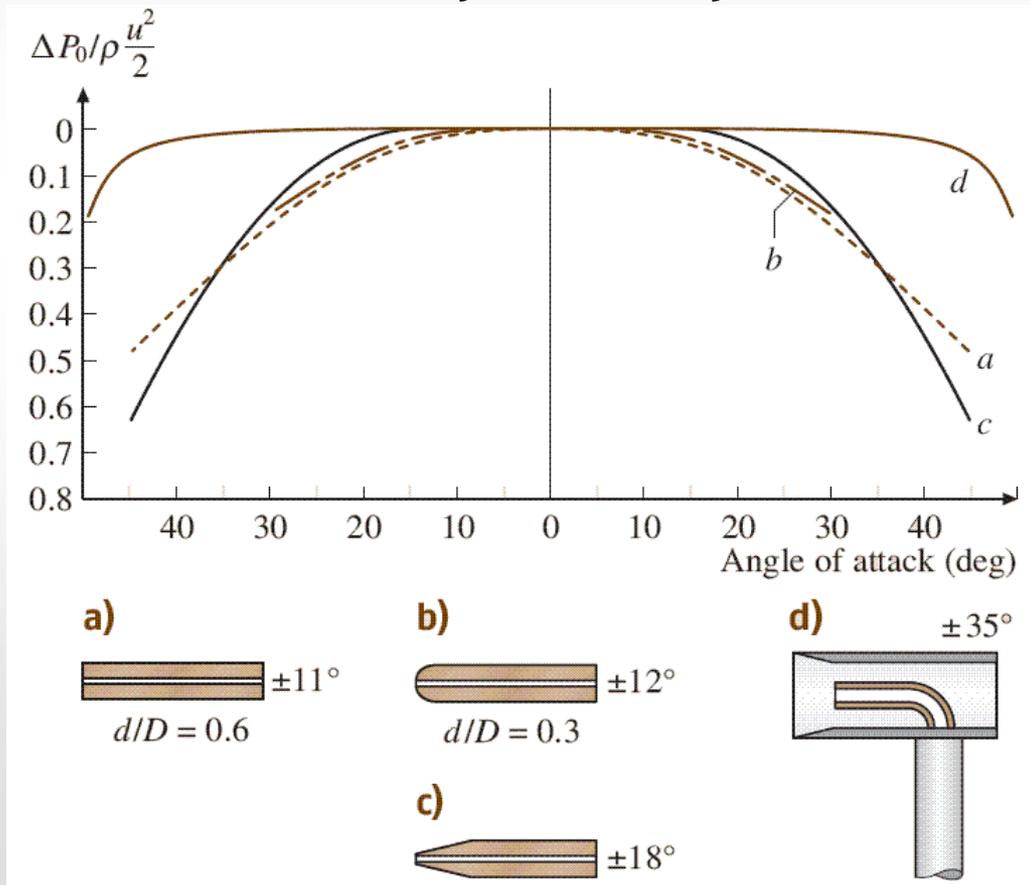
- A leitura da pressão dinâmica normalmente é feita diretamente utilizando-se manômetros de coluna, transdutores, microfones ou ainda qualquer outro equipamento que permita medir um diferencial de pressão.
- Vale lembrar que a precisão das medidas e o tempo de resposta na leitura dos dados é fortemente dependente do transdutor escolhido.
- As linhas de transmissão de pressão também podem influenciar nas medições, principalmente nos casos onde se deseja observar as flutuações de pressão.
- Existem métodos na literatura que foram desenvolvidos para estimar a função de transferência do conjunto linha de transmissão/transdutor, entretanto a descrição e detalhamento de tais métodos foge do objetivo da aula.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

➤ O fato do tubo de Pitot utilizar a pressão de estagnação para a medição da velocidade o torna sensível a efeitos de geometria, viscosidade e inclinação em relação ao escoamento.



- (a) ponta reta,
- (b) ponta redonda,
- (c) ponta cônica
- (d) tipo Kiel

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ TUBO DE PITOT

- As sondas de ponta reta são as mais utilizadas em escoamentos subsônicos devido a facilidade de construção.
- Sondagens de ponta redonda também são comuns pois oferecem uma pequena redução na sensibilidade ao ângulo de incidência uma menor perturbação do escoamento quando comparadas com as sondagens de ponta reta.
- Já as sondagens achatadas, sejam elas de ponta redonda ou reta, são usadas em medições próximas a parede.
- As sondagens do tipo Kiel são as mais indicadas nos casos de grandes variações do ângulo de incidência do escoamento.

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ TUBO DE PITOT

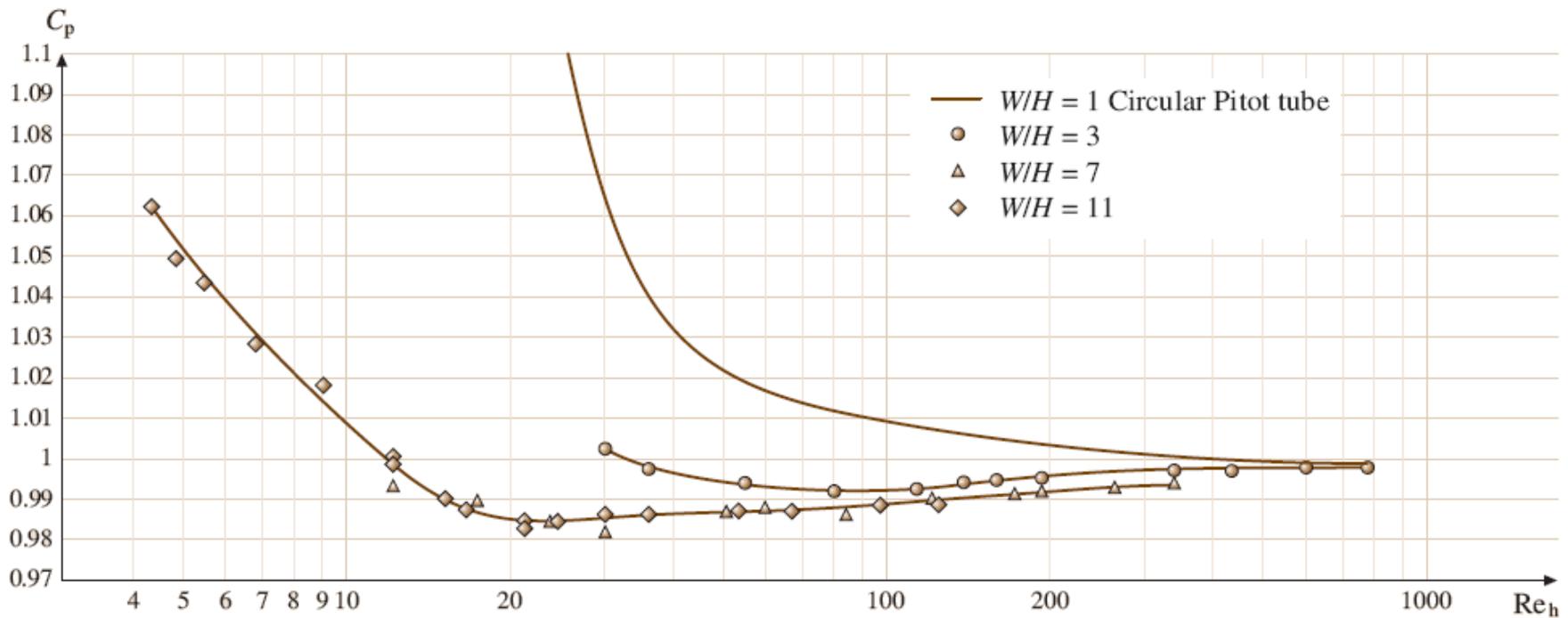
- Os efeitos de viscosos também podem induzir a erros nas medições, devido ao fato da pressão e da velocidade serem relacionadas por uma equação de Bernoulli, que é essencialmente invíscida.
- Para velocidades muito baixas e conseqüentemente em números de Reynolds da sonda ($Re_{sonda} = d_{sonda} \cdot U_{local} / \nu$) também baixos os efeitos viscosos se tornam importantes de modo que a estagnação ocorre a montante do sensor.
- As correções para esses efeitos normalmente são feitas através de calibração, uma vez que não há uma formulação simples da equação de Bernoulli que inclua os efeitos viscosos.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

➤ A figura abaixo mostra algumas curvas de correção do coeficiente de pressão de tubos de Pitot de acordo com o número de Reynolds.

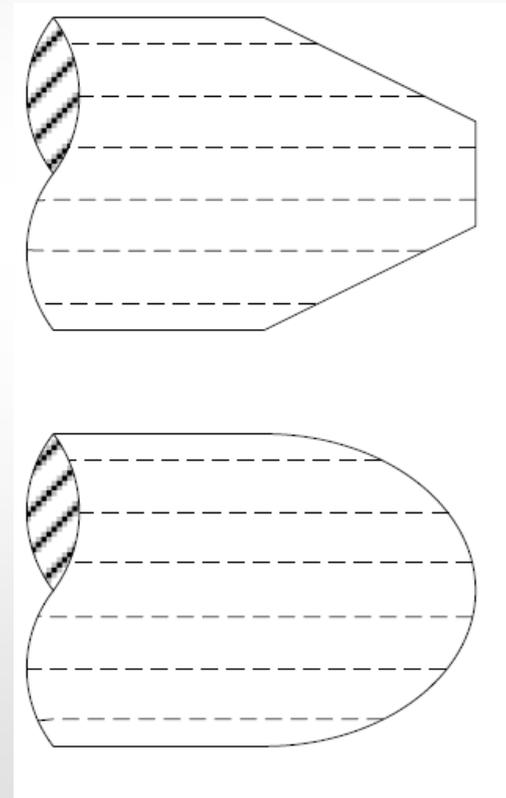
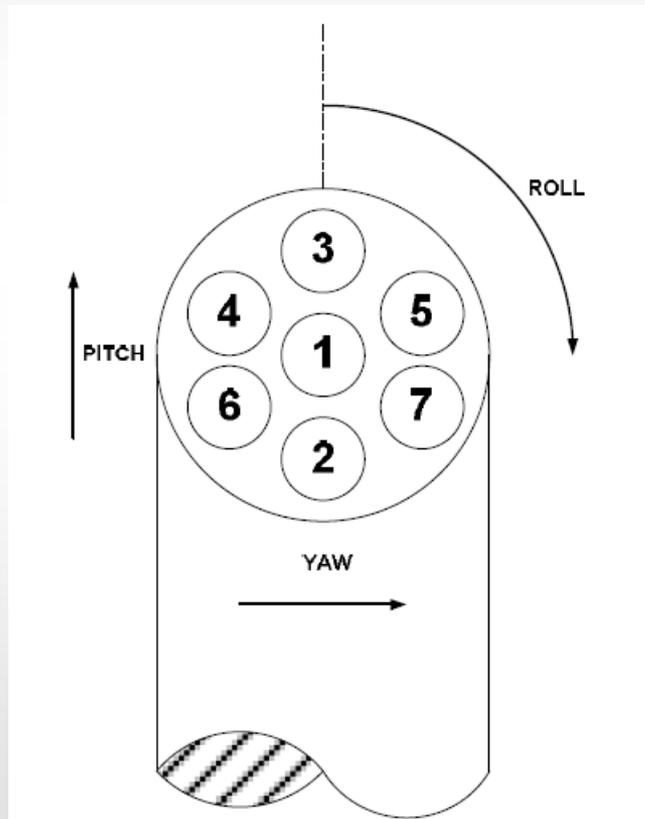


Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ TUBO DE PITOT

➤ A medição de velocidades em mais de uma direção com um tubo de Pitot pode ser realizada através de sondas multi-furo.



Medidas Pontuais de Velocidade

➤ TUBO DE PITOT

- Ao contrário do Pitot convencional as sondas multi-furo requerem uma calibração, que é feita utilizando escoamentos com ângulos conhecidos (normalmente rotaciona-se a sonda).
- Mesmo com a calibração, a maioria das sondas multi-furo não oferecem resultados precisos quando o ângulo de incidência do escoamento é maior do que 30° graus.
- O instrumento também apresenta alto erro na presença de elevada turbulência, caso esse que frequentemente ocorre em situações práticas.
- Por isso, o mais comum é a utilização de técnicas mais sofisticadas como anemometria a fio quente, laser doppler ou ainda PIV para a medição das componentes de velocidade do escoamento.

➤ **ANEMOMETRIA TÉRMICA**

- A anemometria a fio quente ainda é a principal ferramenta utilizada em investigações acerca da turbulência de escoamentos, apesar do princípio de funcionamento do sistema ter sido desenvolvido no início do século XX.
- Isso pode ser confirmado pela quantidade e qualidade dos resultados de investigações experimentais sobre escoamentos turbulentos disponíveis na literatura.
- A ampla utilização da técnica se deve a diversos fatores dentre os quais pode-se citar:
 - O custo de um sistema de anemometria a fio quente ser relativamente baixo em comparação com um sistema de anemometria a laser.

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

- A frequência de resposta de um anemômetro moderno pode chegar a 500kHz, para algumas configurações, mas normalmente gira em torno de 50-100kHz para as configurações típicas. Esses valores estão bem acima daqueles observados nos dos sistema de anemometria a laser, que atinge no máximo 20kHz.
- Medições de temperatura podem ser feitas simultaneamente a medição de velocidade utilizando sondas multi-sensores, que geralmente contém um sensor operando no modo frio.
- A operação de um sistema a fio quente é relativamente simples em comparação com o sistema a laser.
- A análise de sinal em anemometria a fio quente é menos complexa devido a continuidade do sinal analógico de saída enquanto que no sistema a laser a resposta depende da passagem de partículas entre os feixes.

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

- A principal desvantagem da anemometria a fio quente em relação ao método a laser se deve ao fato da técnica ser intrusiva, ou seja é necessário inserir uma sonda no escoamento o que pode causar perturbações indesejadas ao escoamento.
- Outra desvantagem em relação a anemometria a laser é que na anemometria térmica convencional não é possível extrair o sentido do escoamento

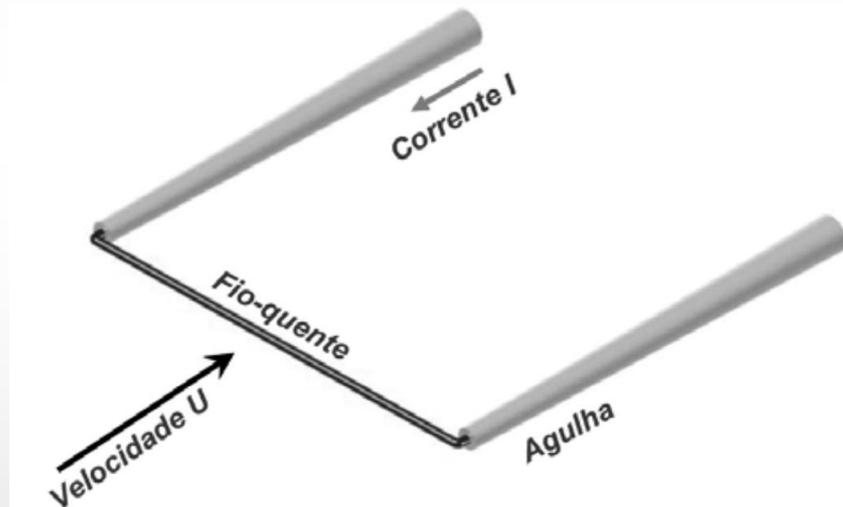
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

➤ O princípio de funcionamento é baseado na transferência de calor por convecção forçada entre um filamento aquecido e o fluido escoando ao seu redor.



➤ A variação da resistividade elétrica do fio com a temperatura é reconhecida por um circuito elétrico que transforma essa variação em um sinal elétrico

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

- O calor introduzido no sensor por efeito Joule é dado por: $I_w^2 R_w$ onde I_w é a corrente que passa pelo fio e R_w a sua resistência.
- A perda de calor por convecção forçada pode ser descrita de maneira simplificada por: $(T_w - T_a) \phi_{conv}(U)$, onde T_w e T_a se referem respectivamente a temperatura do fio e do ambiente, e $\phi_{conv}(U)$ é uma função que representa o efeito de convecção forçada que depende da velocidade do escoamento U .
- Deprezoando-se a perda de calor por condutividade nas extremidades do suporte do sensor e perdas por convecção natural, é possível fazer o balanço em regime permanente entre calor introduzido e dissipado no sensor:

$$R_w I_w^2 = (T_w - T_a) \phi_{conv}(U) \quad (5)$$

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

De acordo com Collis & Williams, J. Fluid Mech. 1959, os efeitos de convecção forçada prevalecem sobre os efeitos de convecção natural se a seguinte relação for satisfeita:

$$Re > Gr^{1/3}$$

onde Gr é o número de Grashoff ($Gr = g\beta(T_w - T_a)d^3 / \nu^2$), g a gravidade, d o diâmetro do fio, β o coeficiente de expansão térmica a pressão constante e ν a viscosidade

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

- Com a equação 5 é possível estimar a velocidade do escoamento U a partir das quantidades R_w e I_w caso elas possam ser relacionadas com T_w e a função $\phi_{conv}(U)$ seja conhecida.
- Para a maioria dos sensores existe uma relação entre a resistência do material e a temperatura que é dada por:

$$\begin{aligned} R_w &= R_0 + R_0 \alpha_0 (T_w - T_0); \\ R_a &= R_0 + R_0 \alpha_0 (T_a - T_0); \end{aligned} \quad (6)$$

Essa relação é linear e pode ser descrita assumindo-se uma temperatura de referência (T_0) e avaliando-se a resistência do material (R_0) e seu coeficiente de variação de resistividade (α_0) em torno dessa temperatura

- A partir das equações é possível estimar a temperatura do fio para uma dada resistência e vice versa, permitindo a utilização na medição de temperaturas, caso seja U conhecido.

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

- A relação entre resistência/temperatura é importante pois dela dependem vários termos da equação de balanço de calor inclusive a potência que deve ser fornecida ao sensor.
- Antes de operar um anemômetro de fio quente é necessário que se defina a resistência ou temperatura de trabalho do sensor.
- A relação entre as resistências do sensor na temperatura de trabalho (R_w) e na temperatura de ambiente (R_a) definem a razão de sobre aquecimento do sensor (OR do termo em inglês *Overheat Ratio*).

$$OR = \frac{R_w}{R_a} = 1 + \frac{R_0}{R_a} \alpha_0 (T_w - T_a) \quad (7)$$

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

- Na prática utiliza-se valores de OR da ordem de 1.6 a 1.8 para sondas de tungstênio ou 1.3 a 1.5 para sondas de filme quente imersas em ar.
- Sondas de diferentes materiais e/ou imersas em outros fluidos a razão de sobre aquecimento deve ser diferente.
- No ajuste da resistência e temperatura do fio deve-se escolher temperaturas elevadas o suficiente que permitam uma boa resposta do sensor a flutuações de velocidade do escoamento mas que não causem oxidação do fio, nem excessiva convecção natural e nem vaporização do fluido.
- A regra básica para auxiliar nessa operação é respeitar a relação de Collis & Williams dada na equação 6.

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

➤ A relação entre a transferência de calor do sensor e a potência ou voltagem no fio pode ser obtida através de diversas formulações propostas na literatura. Uma das mais conhecidas e utilizadas é aquela proposta por King no início do século XX e que pode ser escrita como:

$$Nu = A + B Re^{0.5} \quad (8)$$

onde Nu é o número de Nusselt ($Nu = R_w I_w^2 / [\pi d k (T_w - T_a)]$), com l sendo o comprimento do fio, k a condutividade térmica do material, e Re o número de Reynolds baseado no diâmetro do sensor.

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Princípio de funcionamento

➤ Levando em consideração as perdas de calor por condução para os suportes do fio lei de King pode ser reescrita na forma:

$$E^2 = A + BU^n \quad (9)$$

➤ E é a tensão de saída do anemômetro, A , B e n coeficientes obtidos através de calibração. De acordo com Perry (1982), Bruun (1995), Tropea et al (2007) e muitos outros, o coeficiente n normalmente assume valores em torno de 0.5.

➤ Pode-se encontrar trabalhos onde ajustes polinomiais foram utilizados para a calibração dos sistemas de anemometria. Deve-se tomar evitar a extrapolação de velocidades medidas fora da faixa utilizada na calibração.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Modos de operação

- Existem atualmente, três modos de operação dos sistemas de anemometria térmica, sendo eles:
 - Corrente constante (CCA, do inglês constant current anemometer). Nessa configuração a corrente sobre o sensor (I_w) é mantida constante. Assim, mudanças na velocidade causam alteração da resistência R_w do sensor e o sinal de saída do equipamento é uma medida direta dessa variação de resistência. Os primeiros equipamentos de anemometria térmica foram desenvolvidos com essa configuração.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Modos de operação

- Existem atualmente, três modos de operação dos sistemas de anemometria térmica, sendo eles:
 - Temperatura constante (CTA, do inglês constante temperature anemometer). No anemometro de temperatura constante a resistência R_w é mantida constante. Para isso se utiliza um circuito de realimentação que detecta as variações de resistência e efetua um ajuste da corrente I_w de modo a manter a temperatura e consequentemente a resistencia do sensor constantes. Nesse caso o sinal de saída é uma medida relacionada a mudança de corrente imposta pelo circuito de realimentação.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Modos de operação

- Existem atualmente, três modos de operação dos sistemas de anemometria térmica, sendo eles:
 - Voltagem constante (CVA, do inglês constant voltage anemometer). A voltagem dada por R_{wlw} é mantida constante por um circuito de realimentação. Nessa configuração e o sinal de saída do equipamento é na verdade uma medida direta da variação da corrente I_w .

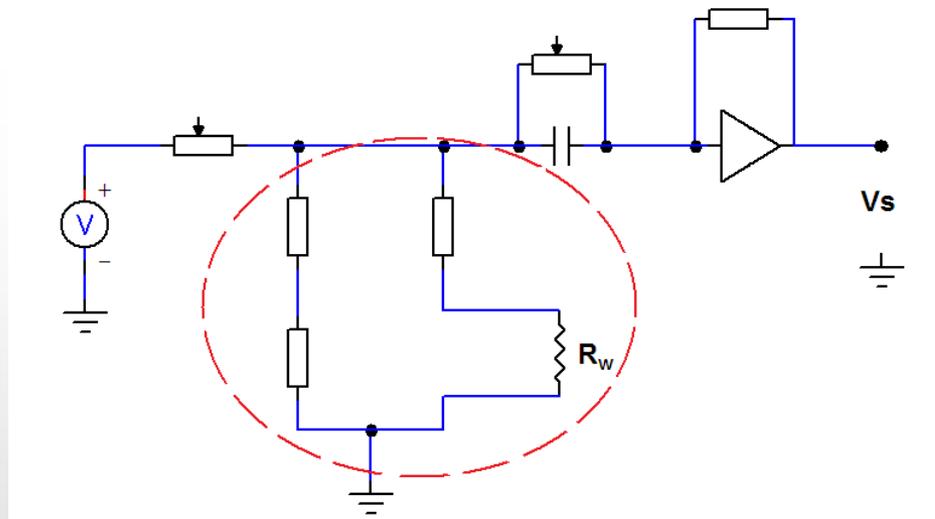
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Modos de operação

➤ No anemômetro de corrente constante a atenuação devido a inércia do sensor é compensada por um filtro de ganho crescente com a frequência. A compensação da atenuação não atua no sensor diretamente.



➤ A frequência de resposta de equipamentos CCA não é muito elevada, sendo tipicamente na faixa de 1kHz

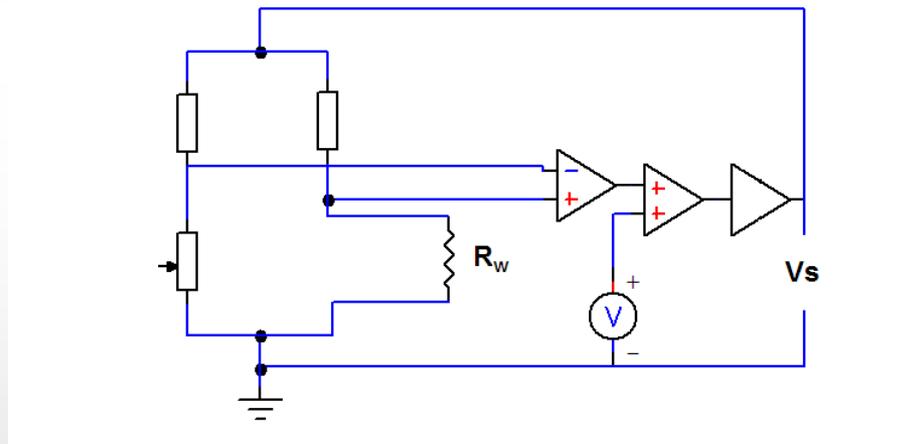
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Modos de operação

➤ No anemômetro a temperatura constante a diferença de tensão entre os dois lados da ponte fornece a entrada para amplificadores que no estágio final recebem potência para realimentar a ponte.



- O valor da resistência de trabalho do sensor é ajustado pelo resistor variável diretamente oposto na ponte ao sensor
- A frequência de resposta tipicamente fica em torno de 50 a 100kHz.

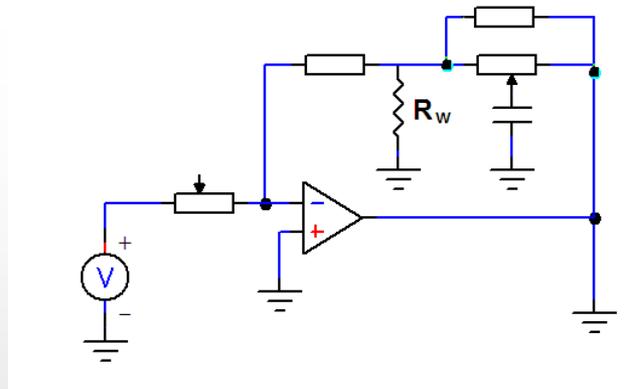
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Modos de operação

➤ O anemômetro a voltagem constante foi desenvolvido em meados dos anos 90. Nesse circuito a voltagem sobre o sensor é independente da sua resistência, mas a mudança na resistência R_w gera uma alteração na corrente que flui sobre a realimentação do amplificador.



➤ Com essa configuração e utilizando-se circuitos adicionais para a compensação da inércia do sensor é possível atingir frequências da ordem de 500kHz.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Tipos de Sensor

- Os elementos sensíveis usados na construção de sondas de anemometria podem ser tanto fios como filmes, dependendo da aplicação.
- Tipicamente, os fios possuem diâmetros da ordem de 0.5 a 5 μ m enquanto que filmes normalmente possuem espessura de 0.1 μ m e ficam depositados sobre cilindros de quartzo de 25 a 50 μ m de diâmetro.
- Os materiais utilizados na construção das sondas são principalmente tungstênio, platina e ligas de platina.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Tipos de Sensor

- As sondas que utilizam fios como elemento sensível apresentam maior razão entre sinal e ruído e uma melhor resposta em frequência do que filmes.
- No entanto sensores de fio são mais frágeis e sujeitos a contaminação. Além disso, elevadas tensões de cisalhamento do escoamento podem romper o sensor.
- É mais comum a utilização de fios para investigações em escoamentos de gases, sem a presença de particulado e em regimes subsônicos.
- Os filmes são usados em investigações que envolvem escoamentos de líquidos, ou escoamentos supersônicos ou ainda escoamentos onde existe uma pequena concentração de particulado.

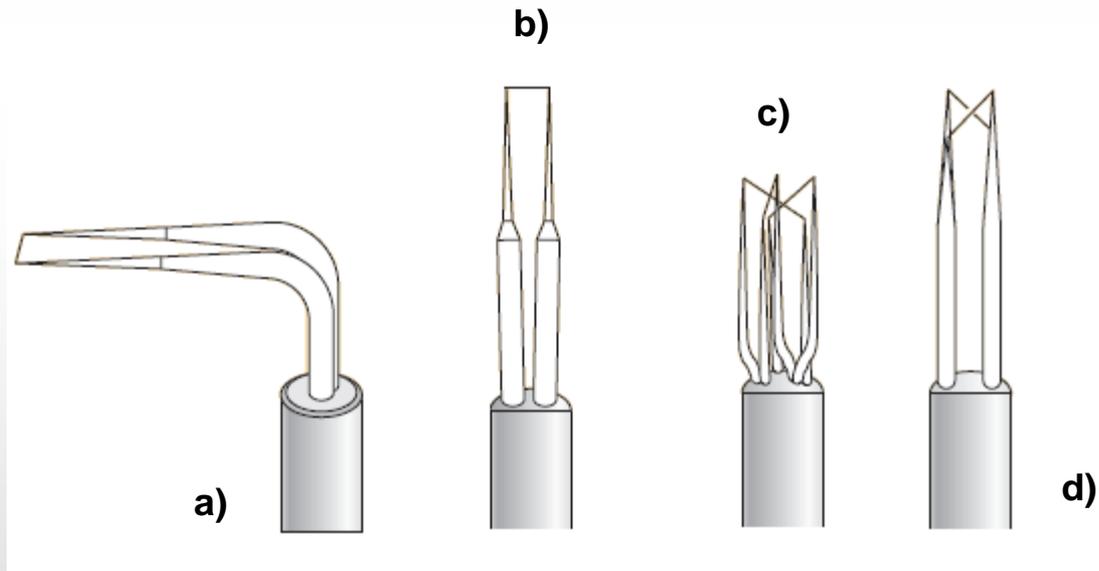
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Tipos de Sensor

➤ Existem diversas configurações de sondas e algumas possuem múltiplos elementos para a medição de mais de uma componente de velocidade.



a) sonda de camada limite, b) sonda reta, c) sonda 3D, d) sonda 2D tipo X

➤ **ANEMOMETRIA TÉRMICA**

Resposta dinâmica

- Vários parâmetros podem influenciar a frequência de resposta dos sistemas de anemometria, dentre os quais destacam-se o tipo de sonda, o ganho e a razão de sobreaquecimento.
- Logo, não existe um valor fixo pré determinado para o tempo de resposta do equipamento que pode variar de acordo com o arranjo escolhido.
- O procedimento padrão para se avaliar o comportamento dinâmico consiste em introduzir de um sinal do tipo degrau e avaliar a resposta do sistema. Este tipo de teste é conhecido como teste da onda quadrada.

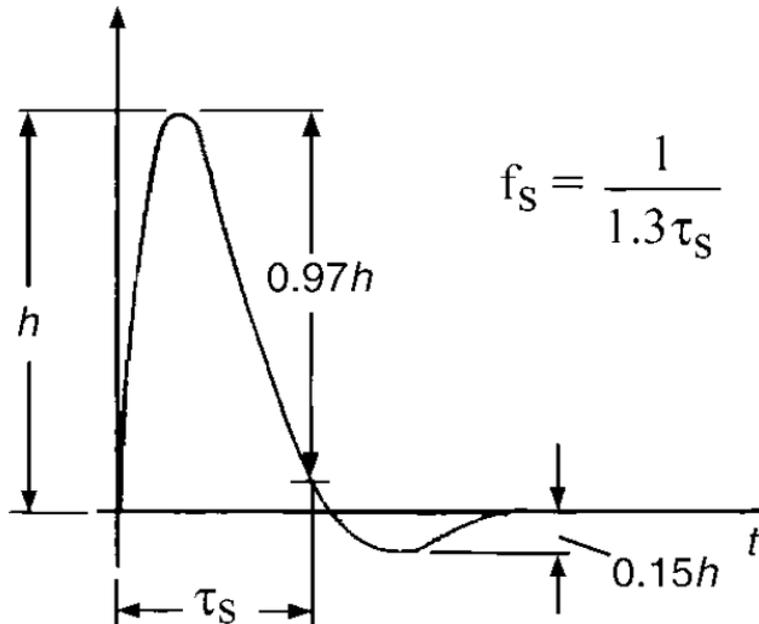
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

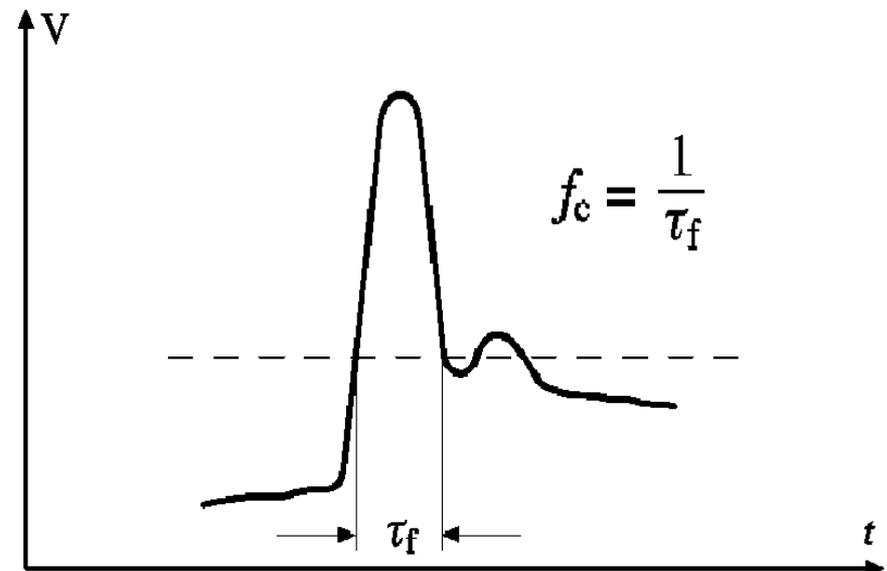
➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Resposta dinâmica

➤ Ex: Anemômetro operando no modo de temperatura constante (CTA)



Caso com uma sonda de fio quente



Caso com uma sonda de filme quente

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Procedimento de calibração

- A calibração do sistema de anemometria é feita utilizando-se um medidor de velocidade de referência, de modo que os valores de tensão fornecidos pelo sistema possam ser ajustados por meio da lei de King ($E^2 = A + BU^n$).
- O medidor de velocidade mais utilizado como referência é o tubo de Pitot.
- A lei de King mostra que a relação entre tensão e velocidade é não linear. Sendo assim, é importante que durante a calibração as velocidades sejam compatíveis com essa relação afim de se evitar um baixo número de amostras em regiões de alta variação da resposta do anemômetro

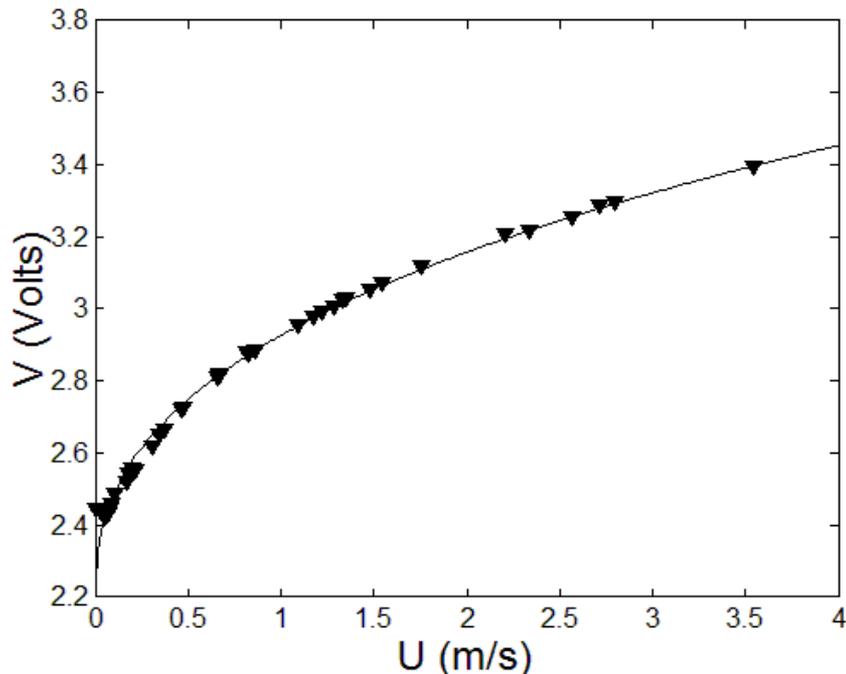
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

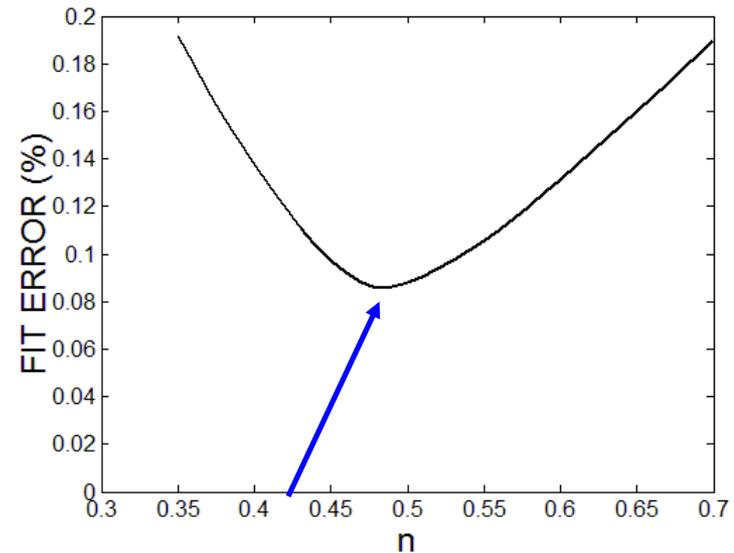
➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Procedimento de calibração

➤ um exemplo de curva de calibração obtida para um anemômetro no modo CTA



$$\text{erro}\% = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{amostras}}} \sum_1^{N_{\text{amostras}}} \left(1 - \frac{U_{\text{Ref}}}{U_{\text{HW}}}\right)^2}$$



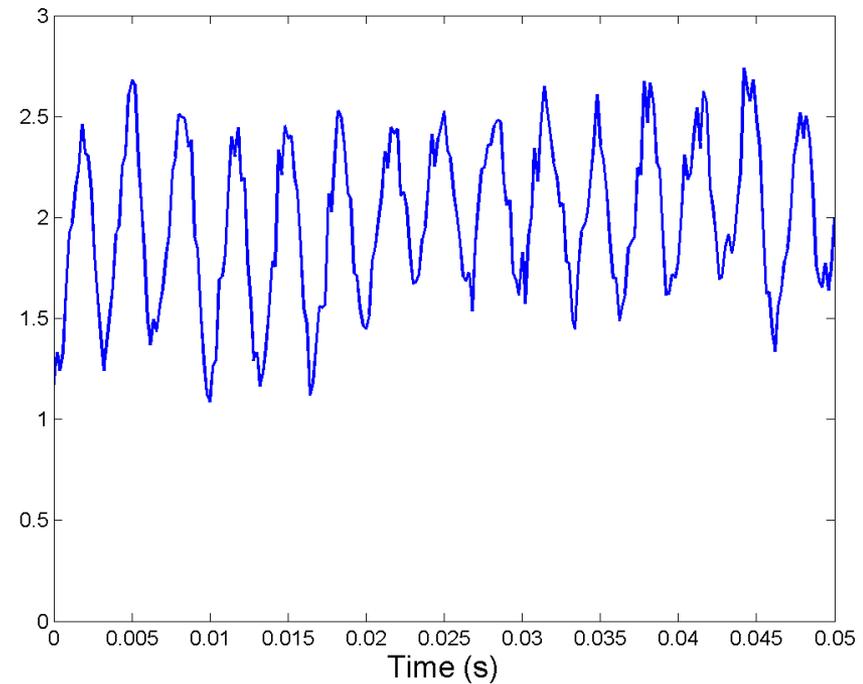
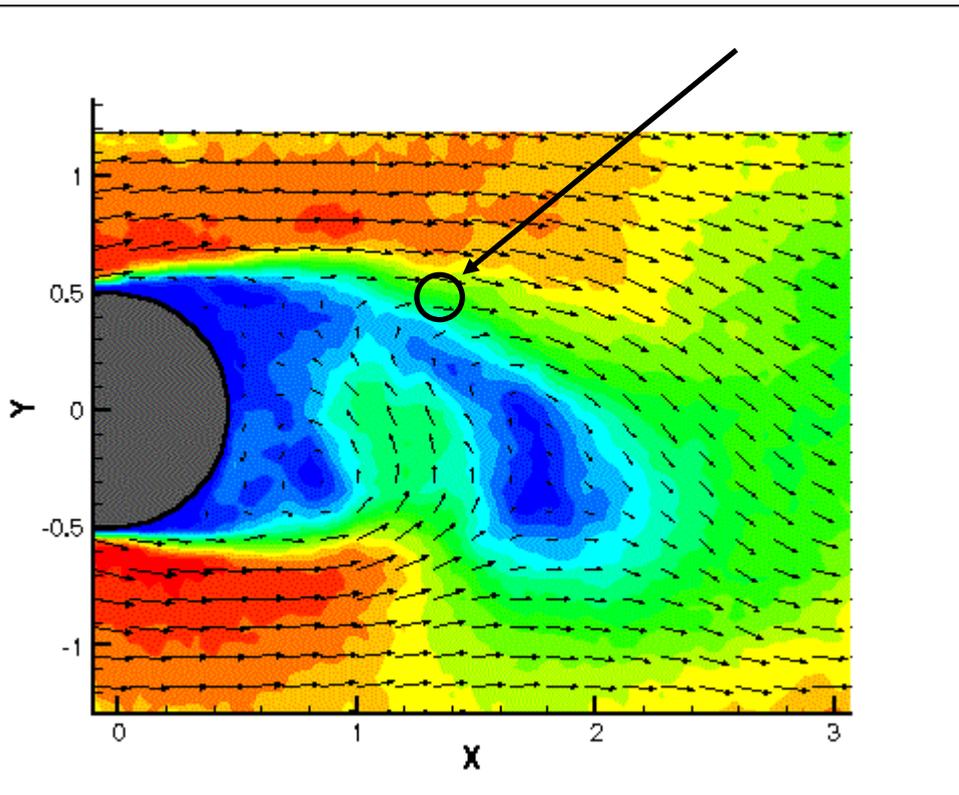
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Sinal de saída

Exemplo: Escoamento na esteira de um cilindro



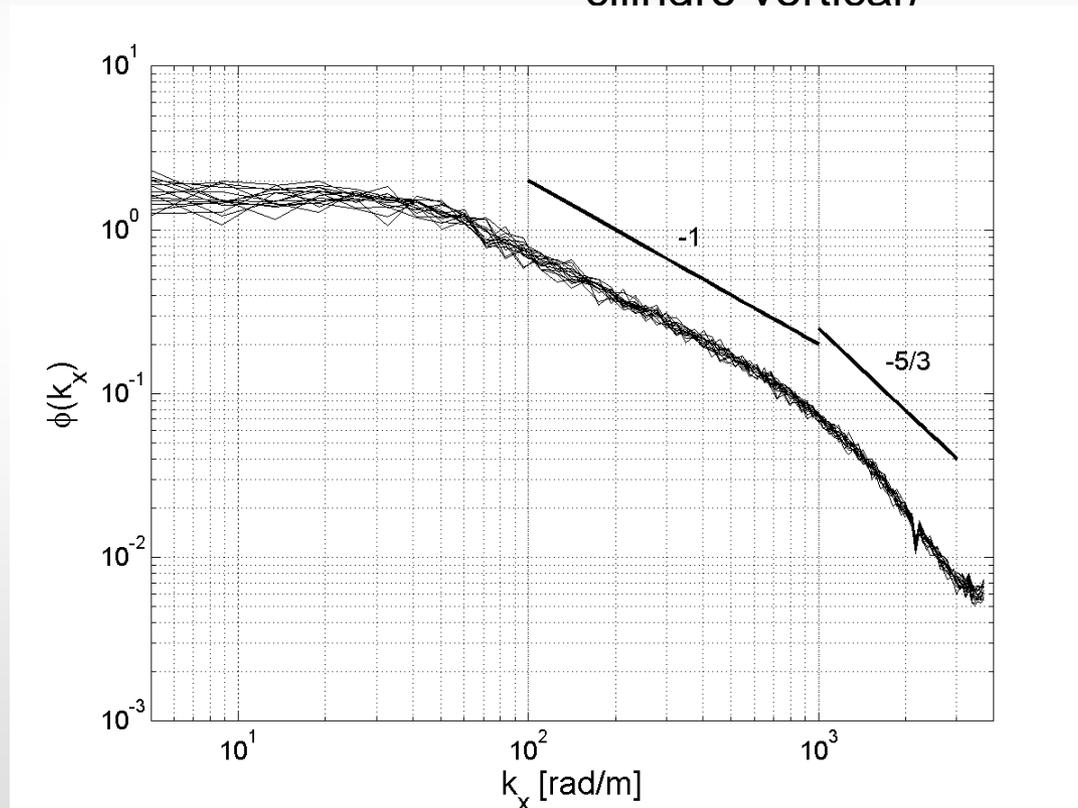
Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Sinal de saída

Exemplo: Espectro de turbulência (camada limite, na esteira de um cilindro vertical)



Medidas Pontuais de Velocidade

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Medição de mais uma componente de velocidade

- Nos casos de sondas inclinadas ou de múltiplos sensores deve-se considerar o efeito de sensibilidade direcional da sonda.
- Como o anemometro trabalha com a convecção forçada no sensor, a transferência de calor do fio para o escoamento é maior quando a velocidade é perpendicular ao sensor. Assim, a sensibilidade à componente perpendicular ao fluxo também é maior.
- Logo, para estabelecer a influência do vetor de velocidades sobre a resposta do sensor é necessário estabelecer uma velocidade efetiva de resfriamento.

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

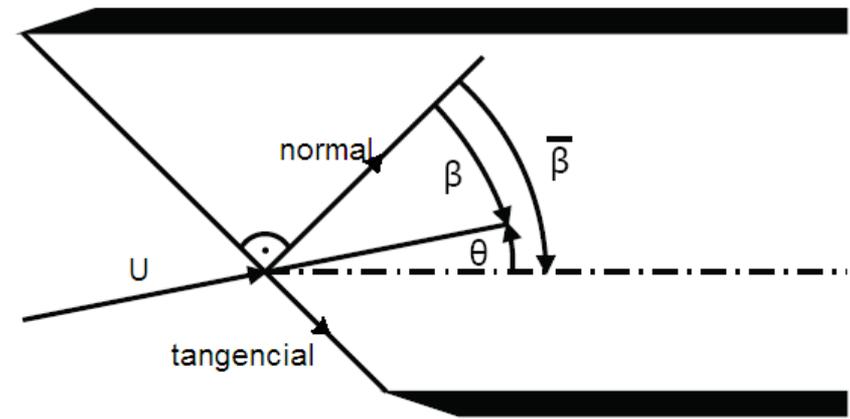
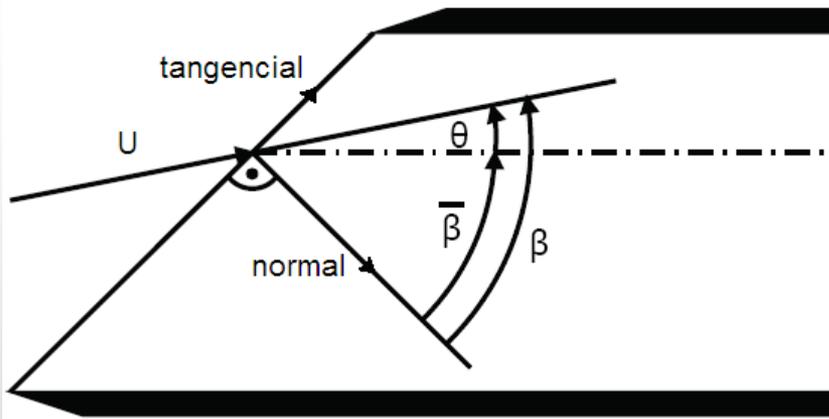
➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Medição de mais uma componente de velocidade (ex 2-D)

➤ De acordo com Al-Kayiem e Bruun (1991) a velocidade efetiva para uma sonda bidimensional é dada por:

$$U_{eff} = \tilde{U} \left(\cos^2 \beta + k^2 \sin^2 \beta \right)^{1/2} = \left(U_{Normal}^2 + k^2 U_{Tangencial}^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

O parâmetro k é um coeficiente de sensibilidade do fio à componente tangencial



Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

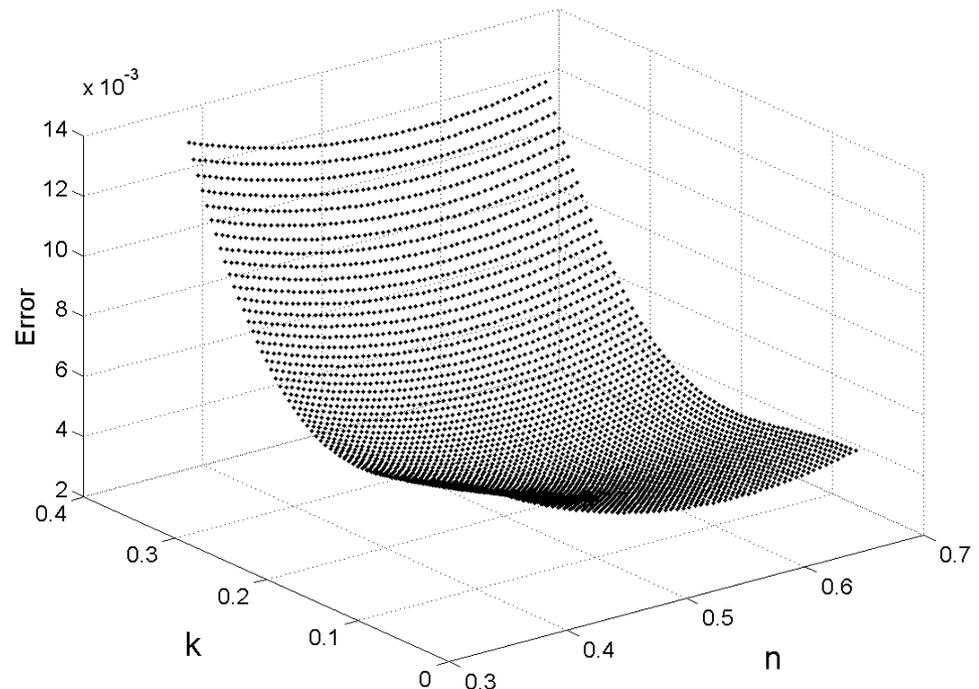
➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Medição de mais uma componente de velocidade (ex 2-D)

➤ A partir da velocidade efetiva é possível então utilizar a lei de King na calibração de cada sensor, para isso é necessário somente substituir a velocidade U da equação (9) pela velocidade efetiva U_{eff} .

➤ Na calibração de sondas multidirecionais deve-se efetuar a varredura de diferentes velocidades em diferentes ângulos de modo a se determinar o coeficiente k , além dos coeficientes A , B e n .

➤ Os valores de n e k são obtidos através da avaliação do mínimo erro dos ajustes.



Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Medição de mais uma componente de velocidade (ex 2-D)

➤ A conversão dos valores de tensão de cada sensor para velocidade nas coordenadas do suporte da sonda é feita utilizando-se as relações propostas por *Bruun et al (Journal of Physics E. , v21, 1991)* .

$$U_{eff1} = \left(\frac{E_{Sensor1}^2 - A_1}{B_1} \right)^{1/n_1} / f(\bar{\beta}_1) \quad U_{eff2} = \left(\frac{E_{Sensor2}^2 - A_2}{B_2} \right)^{1/n_2} / f(\bar{\beta}_2) \quad (11)$$

onde $f(\bar{\beta}) = (\cos^2 \bar{\beta} + k^2 \sin^2 \bar{\beta})^{1/2}$ e $\bar{\beta}$ o ângulo de inclinação nominal do sensor.

Medidas Pontuais de Velocidade

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Medição de mais uma componente de velocidade (ex 2-D)

➤ Para converter os valores de velocidade efetiva nas componentes de velocidade é necessário utilizar as equações abaixo

$$U = \frac{U_{eff1} \cdot g_2(\bar{\beta}_2) + U_{eff2} \cdot g_1(\bar{\beta}_1)}{g(\bar{\beta}_1) + g(\bar{\beta}_2)} \quad V = \frac{U_{eff2} - U_{eff1}}{g(\bar{\beta}_1) + g(\bar{\beta}_2)} \quad (12)$$

onde $g(\bar{\beta}) = \frac{(1 - k^2) \cos^2 \bar{\beta}}{k^2 + (1 - k^2) \cos^2 \bar{\beta}} \tan \bar{\beta}$

Finalmente, o ângulo de inclinação do escoamento pode ser obtido por:

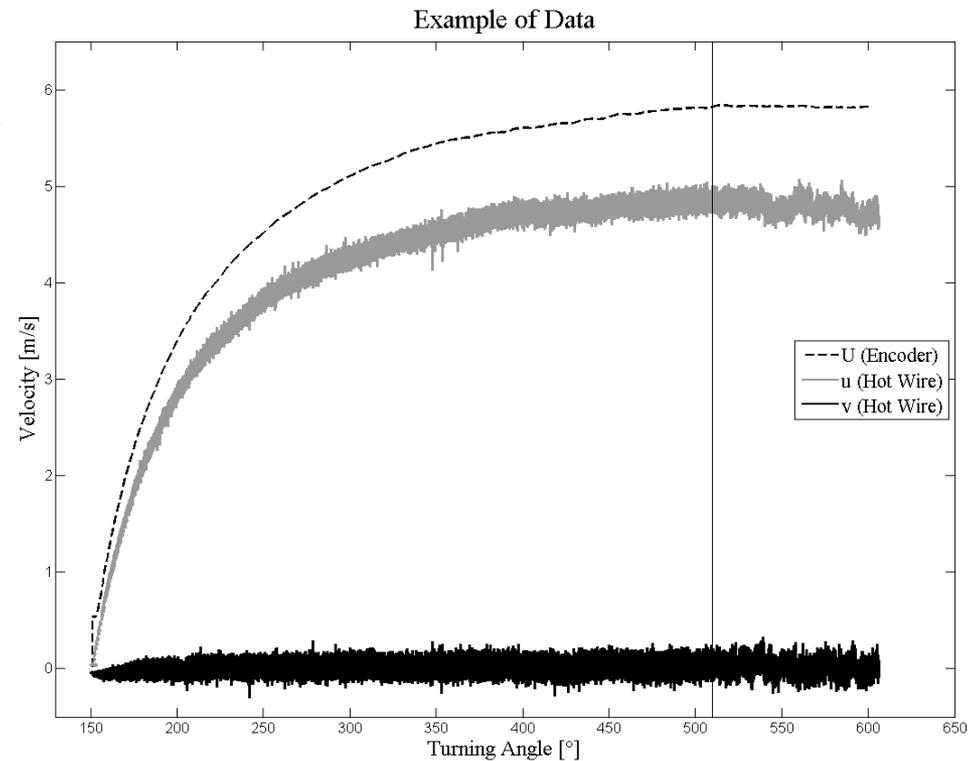
$$\theta = \tan^{-1}(V / U) \quad (13)$$

Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA

Medição de mais uma componente de velocidade (ex 2-D)



Medidas Pontuais de Velocidade

I.B De Paula

➤ ANEMOMETRIA TÉRMICA



...continua no próximo capítulo (aula de Lab)