

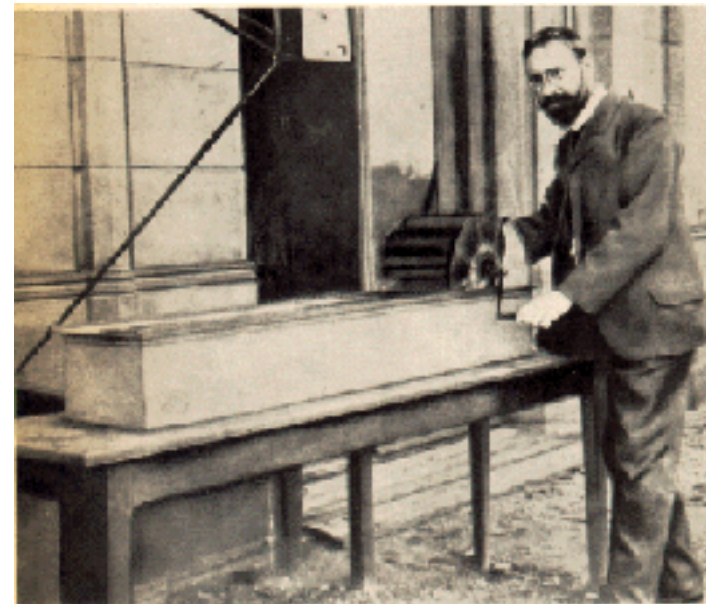


Técnicas Experimentais Aplicadas à Mecânica dos Fluidos

Juliana Braga Rodrigues Loureiro, DSc
Divisão de Metrologia da Dinâmica dos Fluidos
Diretoria de Metrologia Científica e Industrial
Instituto Nacional de Metrologia
Dimci/INMETRO

Introdução

- A Mecânica dos Fluidos no final do século XIX estava dividida em dois ramos distintos: a *Hidrodinâmica* x *Hidráulica*.
- Ludwig Prandtl, no início do séc. XX, notabilizou-se ao unificar estes dois ramos distintos.
- A quantificação de escoamentos é uma tarefa bastante complexa, especialmente para o caso de regime turbulento.
- O recente progresso de técnicas experimentais permitiu a investigação de fenômenos complexos como a turbulência em fluidos.



Prandtl e o aparato experimental onde a existência da camada limite foi primeiramente observada.

O método científico

- Observação e identificação do fenômeno físico de interesse.
- Simulação do problema físico em menor escala: **experimentação.**
- **Quantificação das grandezas de interesse:**
 - **Velocidade média**
 - **Tensões de Reynolds**
 - **Momentos de ordem superior**
 - **Temperatura**
 - **Pressão**
- Modelagem física e matemática
- Aplicações

Problemas de Engenharia

- **Medição de propriedades locais:**
 - Velocidade, pressão, temperatura, massa específica, viscosidade
- **Medição de propriedades integrais:**
 - Vazão mássica
 - Vazão volumétrica
 - Volume totalizado
- **Medição de propriedades globais:**
 - Visualização de campo completo

Experimentação em Turbulência

- Um instrumento que se proponha à investigação da turbulência deve satisfazer os seguintes requisitos:
 - O sensor deve ter **dimensões físicas diminutas**, de modo a não introduzir perturbações no escoamento que possam distorcer o campo de velocidades avaliado.
 - **Alta resolução espacial**: isso implica que o sensor deve possuir dimensões inferiores às menores escalas do escoamento.
 - A inércia do instrumento deve ser muito baixa, pois deve responder quase que instantaneamente às mais **rápidas flutuações de velocidade**.
 - **Estabilidade** e **robustez** são características essenciais a um bom anemômetro; os parâmetros de calibração e operação devem permanecer constantes durante toda medição.

Conteúdo da aula

- **Principais tipos de medidores de velocidade e vazão**
- **Técnicas sofisticadas de medição de velocidade:**
 - **Anemometria a fio-quente**
 - **Velocimetria a laser-Doppler**
 - **Velocimetria por imagem de partícula**
- **Técnicas complementares**
- **Análise crítica**

Principais técnicas de medição

- **Medidores locais de velocidade:**
 - Tubo de Pitot
 - Anemômetro térmico
 - Anemômetro a laser-Doppler
 - Velocimetria por imagem de partículas
- **Medidores baseados em outros princípios:**
 - Turbina
 - Emissão de vórtice
 - Ultrassônico
 - Rotâmetro
 - Coriolis
 - Elemento laminar
- **Medidores baseados no princípio de queda de pressão:**
 - Placa de orifício
 - Bocais
 - Venturi
 - Tubo capilar
- **Medidores de massa ou volume totalizado:**
 - Método gravimétrico
 - Tanques-padrão
 - Deslocamento de pistão
 - Medidores de esfera

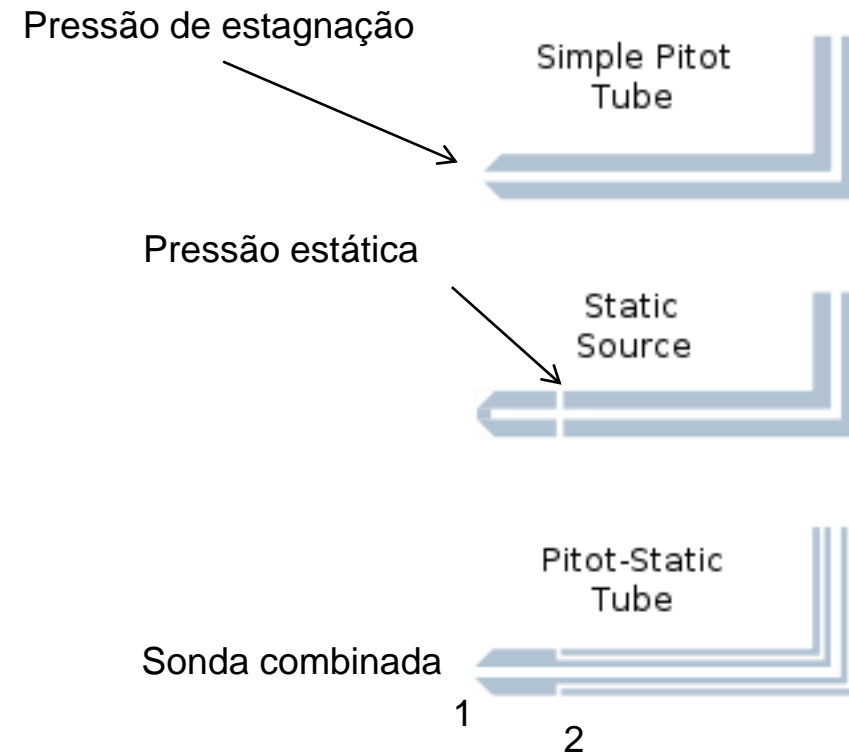
Tubo de Pitot

- **Tubo de Pitot:** instrumento mecânico simples que, a partir de uma **tomada de pressão**, pode ser utilizado para medir a **velocidade** de um dado **escoamento**.
- **Equação de Bernoulli:**

$$P_1 + \rho g z_1 + \underbrace{\frac{1}{2} \rho U_1^2}_0 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2$$

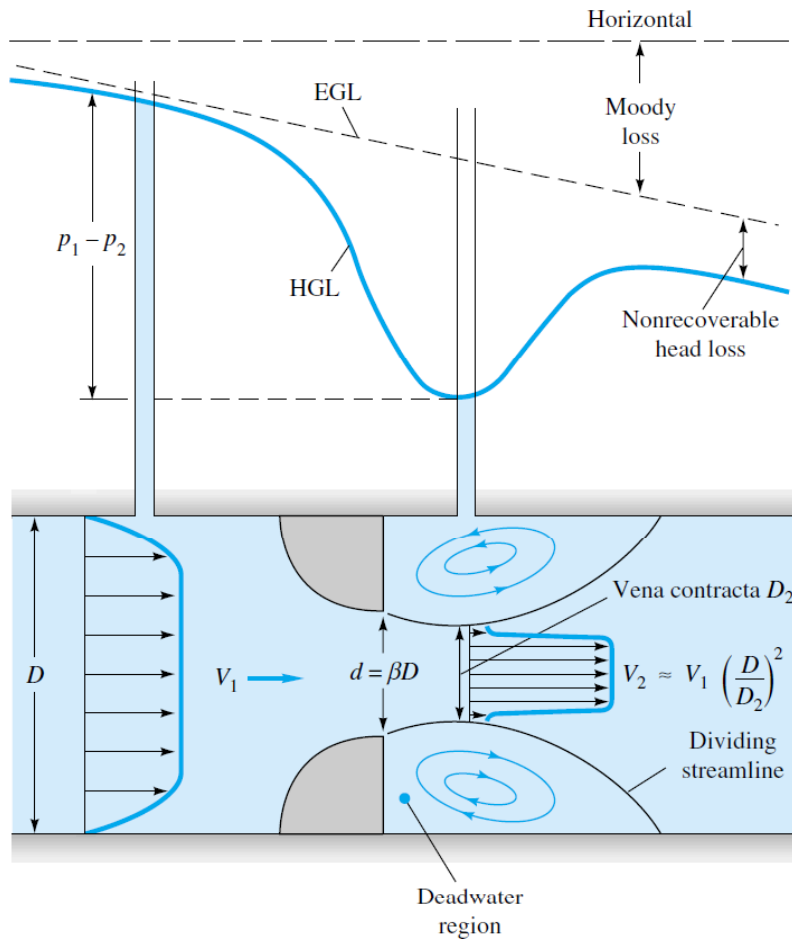
$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho U_2^2$$

$$U = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ar}}}$$



Medidores baseados na queda de pressão

- Princípio:



- Equações básicas:**

- Continuidade
- Bernoulli

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V_1 = \frac{\pi d^2}{4} V_2$$

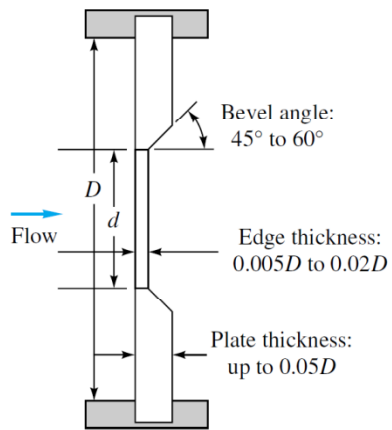
$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

$$V_2 = \left[\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)} \right]^{1/2}, \quad \beta = d / D$$

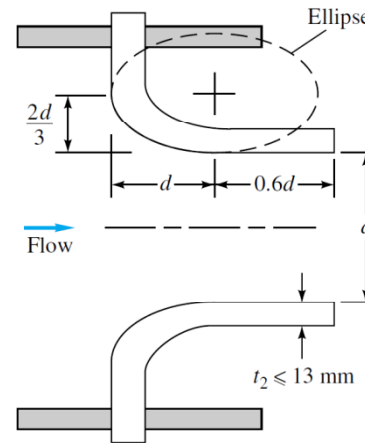
$$Q_m = C_d A_2 V_2$$

Medidores baseados em queda de pressão

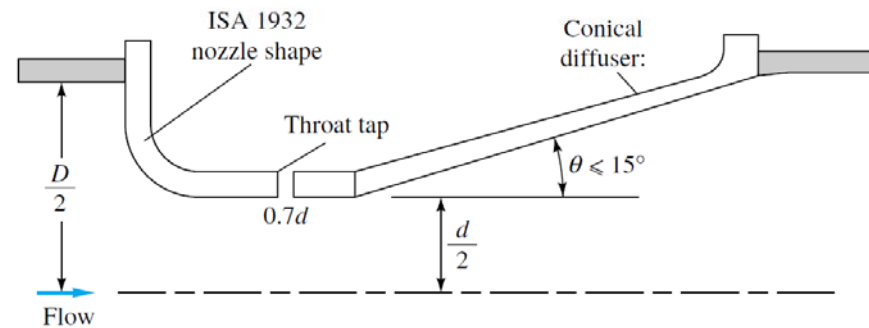
- **Placa de orifício:**
Alta perda de carga
Baixo custo



- **Bocal:**
Perda de carga intermediária
Custo mediano



- **Tubo de Venturi: baixa perda de carga, alto custo**

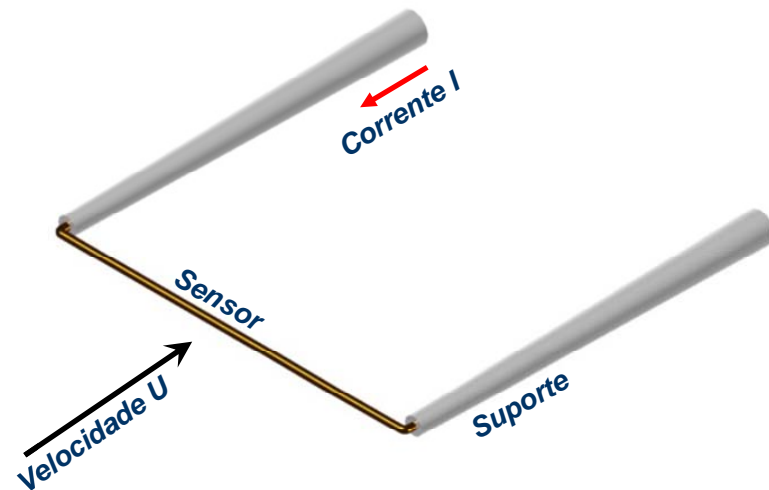


Anemometria Térmica

- **As pequenas dimensões do elemento sensível, combinadas a um circuito eletrônico de controle emprestam a esta técnica elevadas frequências de resposta.**
- **O princípio de funcionamento da AFQ remonta ao início do século XX. Apesar do surgimento recente de diferentes técnicas experimentais sofisticadas, esta continua a ser o estado da arte para a investigação da turbulência.**
- **Embora de concepção simples, e baixo custo de aquisição e manutenção, o anemômetro de fio-quente é um instrumento complexo.**
- **O filamento possui uma constante de tempo associada à sua inércia térmica, o circuito tem suas próprias constantes de tempo que interagem de modo não trivial com o filamento.**
- **A correta utilização da técnica consiste em garantir que o sinal de resposta do anemômetro seja gerado, adquirido e tratado corretamente para que as aproximações teóricas possam ser consideradas válidas.**

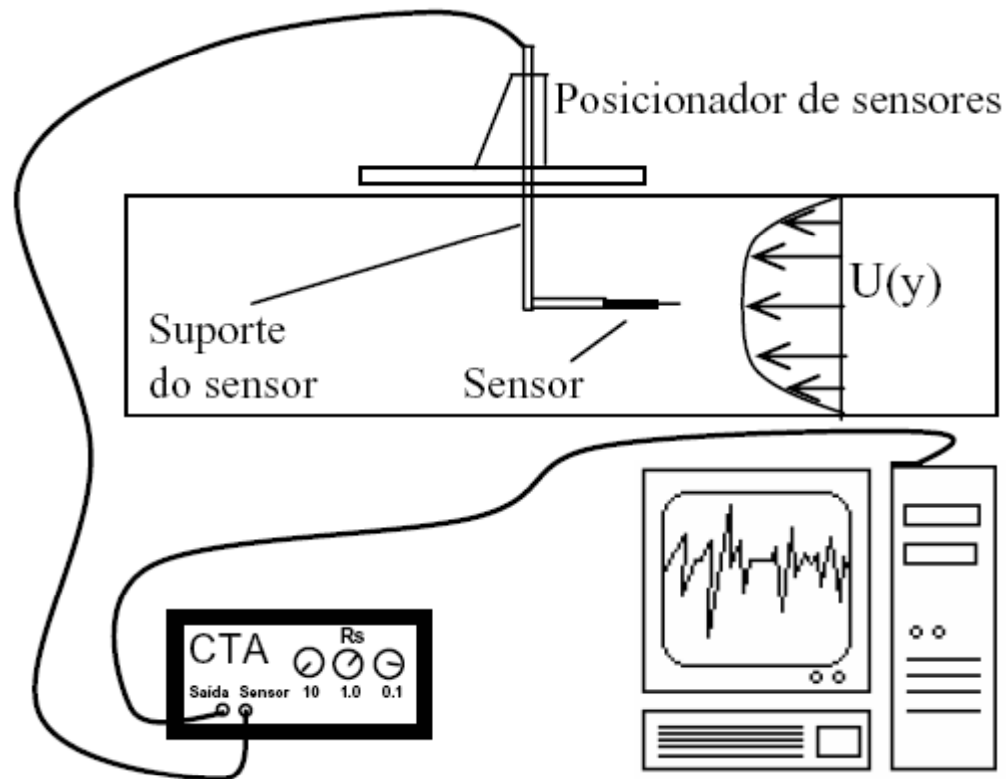
Modos de operação

- O princípio de funcionamento da AFQ é baseado na transferência de calor por convecção entre um fio aquecido e o fluido.
- Modos de operação:
Três são os principais tipos de transdutores térmicos utilizados para a caracterização da turbulência. Eles se distinguem especialmente pelo método de controle da corrente elétrica que passa pelo sensor.
- Ponte CTA: a temperatura do sensor é mantida constante através da variação da corrente elétrica, controlada pelo circuito de realimentação, em resposta a variações da velocidade do fluido.
- Ponte CCA: a temperatura do filamento varia com a velocidade do fluido, pois a corrente é mantida constante. Devido à inércia térmica do fio, o tempo de resposta é alto.
- Fio-quente pulsátil: sonda é composta por três fios, sendo um central, responsável pela emissão de um pulso de calor. Os fios dois laterais servem para identificação do tempo de percurso do pulso. É possível então discriminar direção e sentido do vetor velocidade.



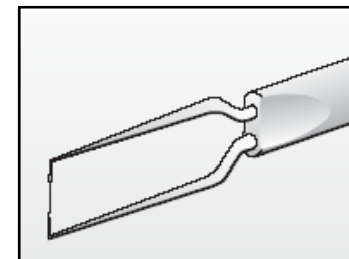
Sistema de medição

- O sistema é composto basicamente por um pequeno sensor, que realiza a avaliação pontual do escoamento, e por um circuito controlador.
- O sinal de saída da ponte controladora deve ser enviado ao computador, digitalizado e tratado para o cálculo das estatísticas do escoamento.



Tipos de sensores

- O elemento sensível é geral um fio de tungstênio de **5 microns** de diâmetro de 1.25 mm de comprimento. Podem ter as extremidades recobertas para evitar perda de calor para as agulhas.
- As pequenas dimensões tornam o **sensor frágil** e delicado, que exige cuidado na manipulação.
- Em geral, o número do fios do sensor corresponde às componentes do vetor velocidade capaz de serem avaliadas.
- Para aplicações em água, é recomendável utilizar sensores de filme quente, que são recobertos por uma camada de quartzo.



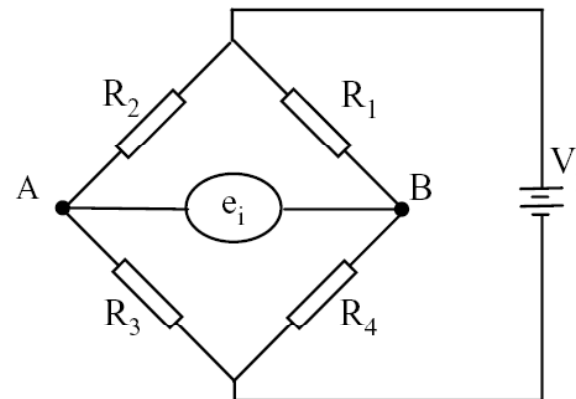
Ponte de Wheatstone

- A ponte de Wheatstone é peça fundamental na anemometria térmica, tanto para o modo CCA quanto para o CTA. É formada por quatro resistores, e pode ser alimentada por uma fonte de tensão ou de corrente.
- Dizemos que a ponte está balanceada quando a tensão e_i é nula, e a análise do circuito mostra que isso acontece quando:

$$R_2 R_4 = R_1 R_3 .$$

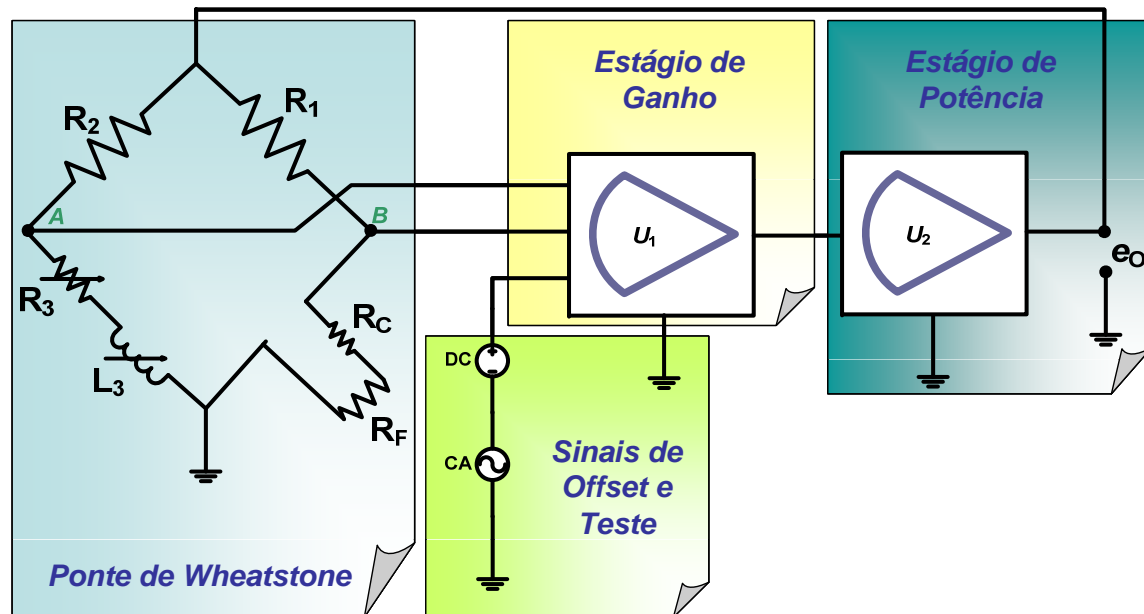
- Outro fator importante é a chamada razão da ponte, que determina a relação entre as correntes que atravessam os braços da ponte:

$$A = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} ,$$



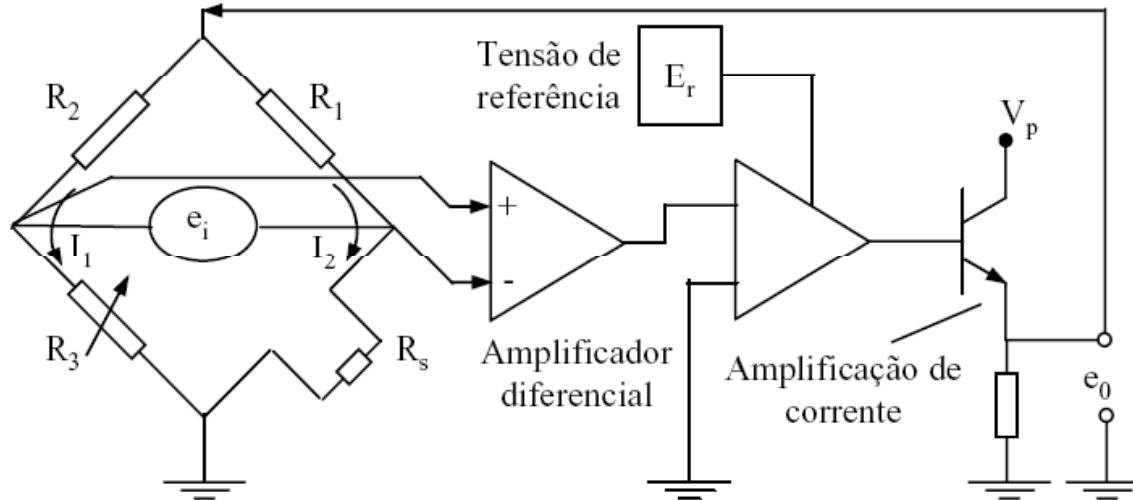
Ponte de temperatura constante (CTA)

- A partir da condição de equilíbrio ($e_i = 0$), qualquer variação da velocidade do escoamento irá influenciar a temperatura (e resistência) do sensor, dando origem a uma tensão e_i .
- A tensão e_i é enviada a um amplificador, e em seguida para uma fonte de corrente. Esta fonte gera um sinal proporcional a e_i , que será aplicado à entrada da ponte para reestabelecer o balanceamento.



- O circuito de controle permite superar a inércia térmica do fio, elevando a resposta em frequência do sistema até centenas de kHz.

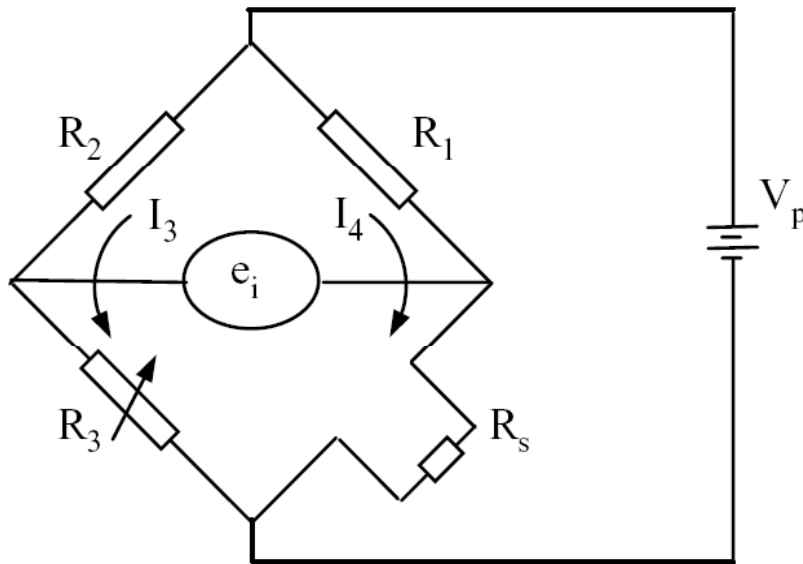
Ponte de temperatura constante



- **Essencialmente, quatro níveis compõem o sistema de compensação de temperatura:**
 - (i) a ponte de Wheatstone, onde o estímulo sobre o sensor (variação de velocidade) é transformado em um sinal elétrico,**
 - (ii) um estágio de ganho, onde a diferença de tensão entre os dois braços da ponte é amplificada,**
 - (iii) inserção de uma tensão de referência ou de um sinal de teste,**
 - (iv) e um estágio de potência, onde a corrente necessária para reequilibrar a ponte é gerada.**

Taxa de sobreaquecimento

- Antes de o sistema CTA ser colocado em operação, um resistor variável deve ser ajustado. O valor a ser escolhido deve ser maior que aquele necessário para balancear a ponte à temperatura ambiente.
- Logo, quando ligamos a ponte sem a presença de escoamento sobre o sensor, a corrente na entrada da PW se eleva, aumentando a temperatura (e resistência) do sensor, até que a ponte esteja balanceada.



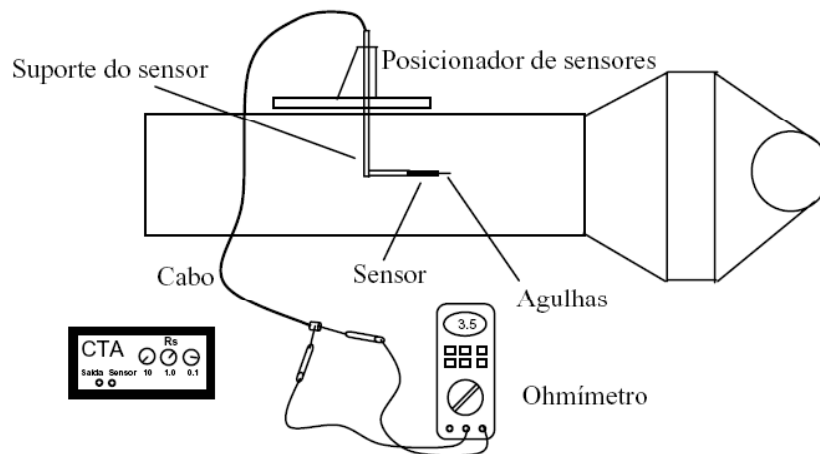
- Portanto, a temperatura de operação do sensor é determinada pelo resistor variável, bem como a condição de equilíbrio da PW.
- A taxa de sobreaquecimento tem, pois, a função de guiar o cálculo do valor de R_3 .

Taxa de sobreaquecimento

- A TS é definida como a razão entre a resistência do fio aquecido R_F e a resistência do fio à temperatura ambiente, R_0 :

$$a = \frac{R_F}{R_0} = 1 + \alpha_0(T_F - T_0).$$

- Procedimento de determinação da taxa de sobreaquecimento:



$$R_0 = R_{tot} - R_{cc}$$

$$R_F = aR_0$$

$$R_s = R_F + R_{cc}$$

$$R_3 = AR_s$$

Taxa de sobreaquecimento

- Como exemplos quantitativos, alguns valores típicos são mostrados abaixo. Para este caso, $TS = 1.8$, e a temperatura de operação do fio será em torno de $230\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Resistências do cabo, suporte e agulhas: $R_{cc} = 1.6\Omega$

Resistência total a temperatura ambiente: $R_{tot} = 5.1\Omega$

Resistência do elemento sensível: $R_0 = 3.5\Omega$

Resistência do fio em operação: $R_F = 6.3\Omega$

Resistência total em operação: $R_s = 7.9\Omega$

- Para este exemplo, se a resistência do caminho fosse desprezada, teríamos:

$$R_s = 1.8(5.1) = 9.2\Omega$$

e a taxa de sobreaquecimento real seria:

$$a = (9.2-1.6)/(5.1-1.6) = 2.2$$

o que resulta em uma temperatura de operação em torno de $340\text{ }^{\circ}\text{C}$, muito próximo do ponto de oxidação do tungstênio, o que tende a diminuir a vida útil do sensor.

Transferência de calor entre o fio-quente e o fluido

- A relação entre a velocidade do fluido e a tensão de saída da ponte é deduzida com base nas equações de transferência de calor. Os termos envolvidos são:

$$d\dot{Q}_g = \frac{I^2 \chi_F}{A_F} dx,$$

potência gerada pela corrente elétrica;

$$d\dot{Q}_{cf} = h\pi d(T_F - T_a) dx,$$

perda de calor para o fluido por convecção forçada;

$$d\dot{Q}_{cd} = -k_F A_F \frac{d^2 T_F}{dx^2} dx,$$

perda de calor por condução;

$$d\dot{Q}_r = \pi \sigma \epsilon d(T_F^4 - T_a^4) dx,$$

perda de calor por radiação;

$$d\dot{Q}_{ac} = \rho_F c_F A_F \frac{\partial T_F}{\partial t} dx,$$

acúmulo de calor no fio.

- Admitindo que as perdas por radiação e condução são desprezíveis, e supondo que em regime permanente $\partial T_F / \partial t = 0$, a equação de balanço da taxa de transferência de calor pode ser escrita como:

$$\frac{I^2 \chi_F}{A_F} = h\pi d(T_F - T_a).$$

Relação entre resistência e temperatura

- A resistividade de um material é definida como a resistência por unidade de comprimento, por unidade de área transversal:

$$\chi_F = R_F A_F / l$$

- A dependência térmica da resistividade foi objeto de diferentes trabalhos (Hinze (1959), Bruun (1975)), e pode ser escrita como:

$$\chi_F = \chi_0 [1 + \alpha_0 (T_F - T_0)] ,$$

onde o índice denota a grandeza avaliada à temperatura ambiente. Integrando a primeira equação ao longo do comprimento do fio, obtemos:

$$R_F = R_0 [1 + \alpha_0 (T_F - T_0)] .$$

- Logo, o balanço de transferência de calor pode ser reescrito como:

$$I^2 R_F = h l \pi d (T_F - T_a) .$$

Leis de Calibração

- Então, é preciso determinar a relação entre a potência dissipada no fio e a velocidade do escoamento. Uma variedade de leis foram propostas e em geral são expressas em função de números adimensionais, como:

$$Nu = A + B Re^{1/2} ,$$

onde o número de Nusselt é definido como: ($= hd/k_F$)

- Uma relação clássica, válida para uma ampla faixa de velocidades, e aplicada tanto para o modo CTA quanto para o CCA, é a Lei de King (1914) :

$$E^2 = A + BU^n ,$$

onde E é a tensão de saída do anemômetro, U é a velocidade do fluido e as constantes A , B e n devem ser determinadas através de um procedimento de calibração. King recomendou o uso de $n = 0.45$

- Siddal e Davies (1972) adicionaram uma constante à lei de King, para ampliar a faixa de calibração até 160 m/s.

$$E^2 = A + BU^{0.5} + CU .$$

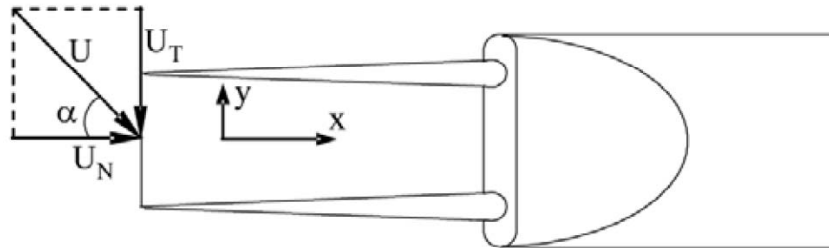
- Uma revisão detalhada das diferentes curvas de calibração propostas foi feita por Bruun (1995), e os resultados indicam que a lei de King é a que fornece melhor precisão.

Medição de velocidade

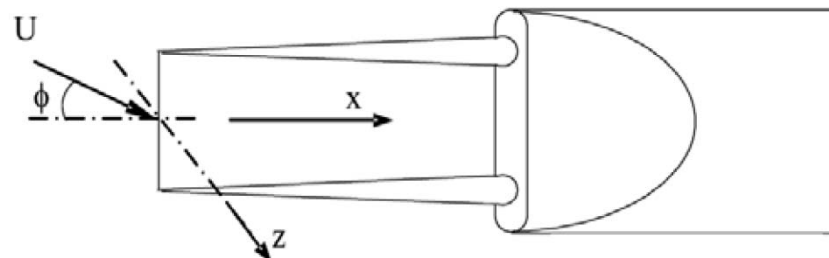
- **Uma grande vantagem da anemometria de fio-quente é permitir a discriminação das componentes de velocidade. A resolução do vetor é alcançada através de dois passos principais:**
 - **decomposição do vetor velocidade em uma componente normal, uma componente tangencial e uma componente transversal (binormal) ao sensor de fio-quente,**
 - **análise da sensibilidade do fio-quente a cada uma dessas componentes.**

Sensibilidade direcional

- É intuitivo decompor o vetor incidente em uma componente normal ao fio-quente e uma componente tangencial, ou paralela ao fio. Apesar de ambas incidirem simultaneamente sobre o sensor, a principal responsável pelo resfriamento do fio é a componente normal.
- Sob estas condições, o ângulo formado entre o vetor velocidade e a normal ao sensor no plano da agulhas é chamado de ângulo de guinada.



- O sensor de fio-quente também é sensível a variações de velocidade na direção normal ao plano das agulhas. Isso pode ser considerado através do chamado ângulo de ataque.



Sensibilidade direcional

- A sensibilidade do sensor de fio-quente aos ângulos de guinada e de ataque são dados respectivamente por

$$e_\alpha = \frac{\partial E}{\partial \alpha}, \quad e_\phi = \frac{\partial E}{\partial \phi},$$

onde E denota a tensão de saída do anemômetro.

- Logo, a velocidade efetiva vista pelo sensor terá contribuições das três componentes de velocidade, e isso pode ser escrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_e^2 &= (U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2), \\ &= U^2 (\cos^2 \alpha \cos^2 \phi + k^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \phi + h^2 \sin^2 \phi), \end{aligned}$$

- Os parâmetros k e h são conhecidos como coeficientes de guinada e coeficiente de ataque, e representam a sensibilidade do sensor com respeito a esses ângulos.
- Revisitando a Lei de King, temos:

$$E^2 = A + B(U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2)^{n/2}.$$

Medição de duas componentes de velocidade

- Para escoamentos bidimensionais, podemos considerar o ângulo de guinada nulo, e a velocidade efetiva se torna:

$$\begin{aligned} V_e^2 &= (U_N^2 + k^2 U_T^2), \\ &= U^2 (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha). \end{aligned}$$

- Medições de duas componentes de velocidade são normalmente realizadas com o uso de um sensor em configuração cruzada (X-wire).
- O procedimento padrão de calibração é considerar que a componente perpendicular ao plano dos fios em X, quando comparada com as componentes verticais e longitudinais, é pequena :

$$\begin{aligned} E_1 &= F_1(U, V) = F_3(\tilde{V}, \theta, \alpha), \\ E_2 &= F_2(U, V) = F_4(\tilde{V}, -\theta, \alpha). \end{aligned}$$

onde θ denota o ângulo do escoamento e α o ângulo de guinada.

Medição de duas componentes de velocidade

- **Um método simplificado de calibração e análise do sinal pode ser proposto com a introdução do conceito de velocidade efetiva:**

$$\begin{aligned} V_e &= \tilde{V} f(\alpha) = \tilde{V} (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}, \\ &= (U_N^2 + k^2 U_T^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

$$k(\alpha) = \frac{1}{\sin \alpha} \left[\left(\frac{E^2(\alpha) - A}{E^2(0) - A} \right)^{1/2} - \cos^2 \alpha \right]^{1/2}.$$

- **Logo, a equação para o sinal de saída dos dois fios pode ser escrita como:**

$$\begin{aligned} E_1 &= F_1(U, V) = F_3(\tilde{V}, \theta, \alpha), \\ E_2 &= F_2(U, V) = F_4(\tilde{V}, -\theta, \alpha). \end{aligned}$$

- **Então, a relação completa de calibração para a faixa de velocidade e ângulo do escoamento para um sensor de dois canais em X pode ser expressa como:**

$$E^2 = A(\theta) + B(\theta) V_e^{n(\theta)}.$$

Medição de duas componentes de velocidade

- No chamado método de calibração de velocidade efetiva, cada fio do sensor em X é considerado separadamente, de modo que o procedimento de calibração clássica do fio simples de um canal pode ser utilizado. Isso resulta em uma expressão simples para a velocidade efetiva, que pode ser escrita como:

$$V_e = f(\alpha) [U - g(\alpha)v],$$

onde

$$f(\alpha) = (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha)^{1/2},$$

$$g(\alpha) = \frac{(1 - k^2) \cos^2 \alpha}{(\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha)} \tan \alpha.$$

- Os valores de U e V podem ser obtidos por um procedimento de soma e diferença, que fornece:

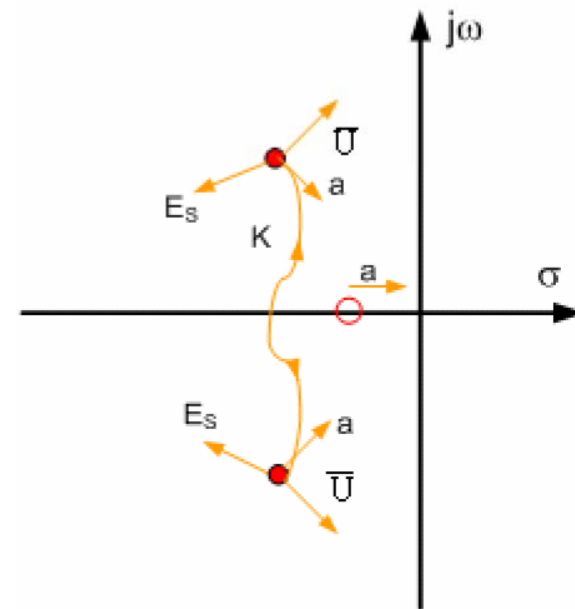
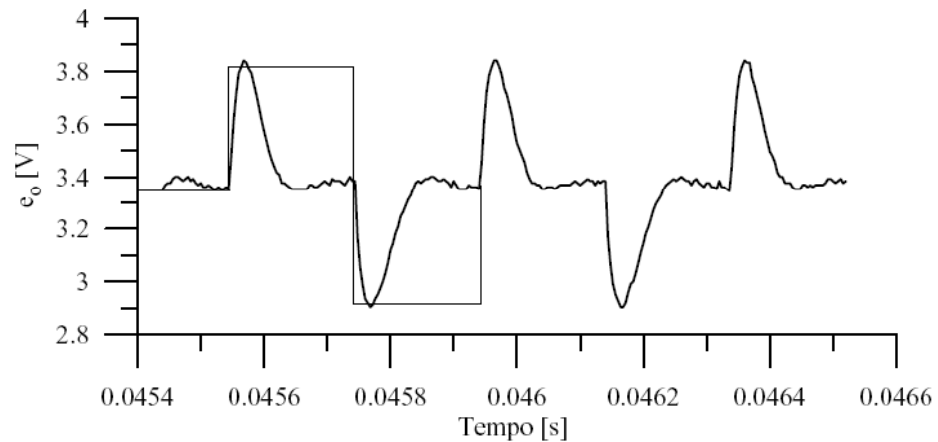
$$U = \frac{[V_{e1}/f_1(\alpha_1)]g_2(\alpha_2) + [V_{e2}/f_2(\alpha_2)]g_1(\alpha_1)}{g_1(\alpha_1) + g_2(\alpha_2)},$$

$$V = \frac{[V_{e2}/f_2(\alpha_2)] + [V_{e1}/f_1(\alpha_1)]}{g_1(\alpha_1) + g_2(\alpha_2)}.$$

- Para escoamentos com variações de temperatura, os parâmetros A e B devem ser considerados dependentes não só de θ mas também de T .

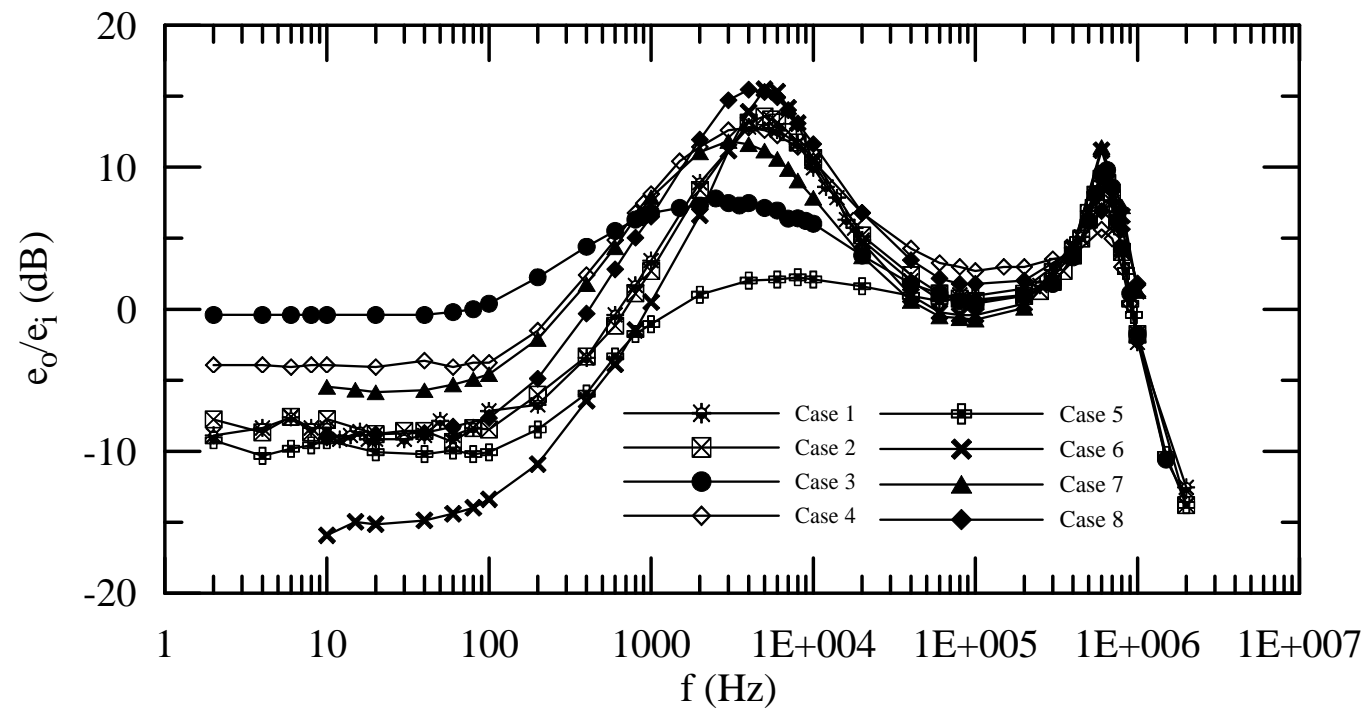
Avaliação da resposta dinâmica do sistema

- Não existem meios de submeter o sensor a um escoamento cuja velocidade média e flutuações turbulentas sejam conhecidas em absoluto.
- Por este motivo, é usual submeter o sistema sensor e ponte CTA a uma perturbação elétrica bem conhecida, e avaliar a sua resposta.



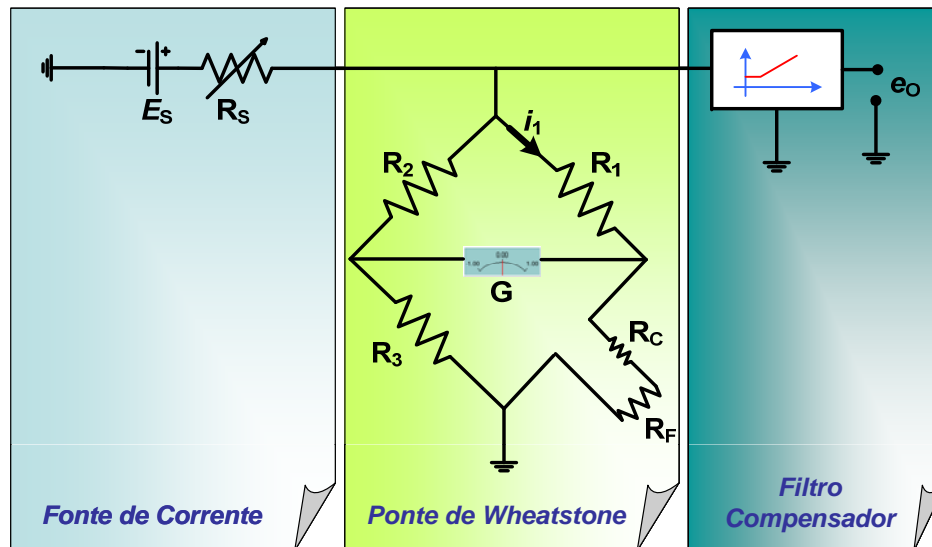
Avaliação da resposta dinâmica do sistema

- **Análise da resposta em frequência:**



Ponte de corrente constante

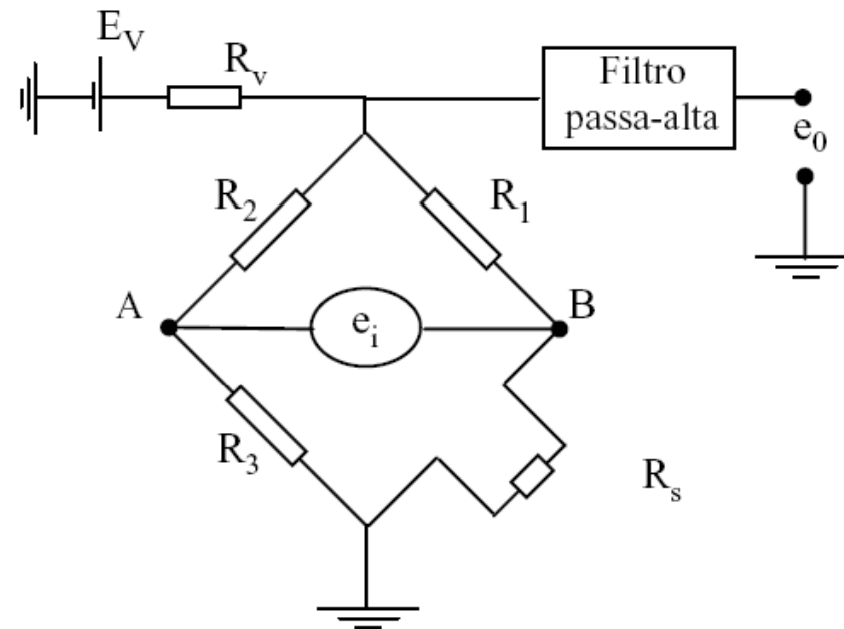
- A inércia térmica do fio-quente tende a se opor à variação de temperatura, e assim a resposta temporal do sensor em modo CCA pode ser grande em comparação com as escalas de tempo das flutuações turbulentas.



- A sensibilidade do sistema a variações de velocidade aumenta com a elevação da temperatura do sensor.
- Contrariamente, quando o interesse reside em medir o campo de temperatura do escoamento, o fio é operado a temperatura ambiente, e por isso é chamado de fio-frio.

Ponte de corrente constante

- O resistor R_3 deve ser ajustado para determinar a temperatura de trabalho do fio. A corrente sobre o sensor é determinado através do ajuste do resistor variável R_v .
- A PW é balanceada pelos ajustes de R_3 e R_v , e a resistência do sensor é então calculada pela equação de equilíbrio. No modo CCA, a ponte deve ser reequilibrada a cada variação de velocidade, o que torna o procedimento de medição muito trabalhoso.



Medição de velocidade e temperatura

- Os diferentes métodos existentes na literatura para caracterizar a dependência do sinal da ponte CTA com respeito à velocidade e à temperatura, de acordo com Freymuth (1970), podem ser classificados em três categorias principais:
- **Método da correção linear:** Considera que a transferência de calor entre o fio-quente e o fluido é uma função da velocidade do escoamento, e proporcional à diferença de temperatura ($T_F - T_a$). A voltagem de saída da ponte CTA pode então ser escrita como:

$$E^2 = f(U) (T_F - T_a).$$

- **Método dos números adimensionais:** a transferência de calor por convecção entre o fio e o escoamento é escrita de uma forma adimensional envolvendo o número de Nusselt, o número de Reynolds e o número de Prandtl.
- **Método direto:** é feita uma calibração direta para contabilizar a variação da voltagem de saída do anemômetro, com a velocidade e temperatura ambiente para uma dada resistência de trabalho do fio-quente .

Calibração de temperatura para o fio-frio

- Nesta configuração, medidas de temperatura são realizadas através um sensor de fio-quente ligado a uma ponte de CCA. Uma taxa de sobreaquecimento muito pequena é utilizada de modo a minimizar o efeito Joule e permitir que a temperatura do fio acompanhe a temperatura ambiente. Idealmente, o sensor funciona como um termômetro resistivo.
- Para aplicações práticas, Bruun(1995) recomenda que seja adotada como curva de calibração uma relação linear entre a resistência do fio-frio e a temperatura ambiente:

$$R_a = A + BT_a.$$

Tabela 1.3: Faixa de calibração típica para anemometria a fio-frio.

Autor	Faixa de velocidade (m/s)	Faixa de temperatura ($^{\circ}C$)
Pessoni e Chao(1974)	0-6	22-60
Koppius e Trines(1976)	0.5-5	10-80
Fiedler(1978)	2-20	21-50
Dekeyeser e Launder(1983)	7.6-15.4	25-5
Lemieux e Oosthuizer(1984)	0.5-4	25-55
Bremhorst(1985)	1.5-35	20-80
COPPE/UFRJ	0.5-3.0	20-35

Calibração direta de velocidade e de temperatura para o sensor de fio-quente

- A forma mais precisa de se estabelecer a sensibilidade à velocidade e à temperatura de um anemômetro CTA, operando com uma resistência fixa consiste em medir a tensão de saída da ponte como função da velocidade e da temperatura do fluido.
- Esse tipo de calibração normalmente é feito para diferentes temperaturas do fluido. A dependência funcional dos dados de calibração pode ser escrita como:

$$E = F(U, T_F - T_a)_{T_F = \text{const.}}$$

- Um procedimento semelhante foi utilizado por Koppius and Trines (1976) para dados de calibração de velocidade utilizando a seguinte relação para a voltagem do fio:

$$\frac{E_F}{R_F(R_F - R_a)} = A + BU^n.$$

- Uma abordagem similar foi utilizada por Lemieux e Oosthuizen (1984). Para a medição simultânea de velocidade e temperatura, os autores sugeriram uma relação de calibração para o fio-quente da forma:

$$E^2 = A^* + B^*U^n, \quad \begin{aligned} A^* &= A_1 + A_2 T_a, \\ B^* &= B_1 + B_2 T_a. \end{aligned}$$

Métodos de compensação analítica

- **Compensação por diferença de temperatura:**
- **A técnica de compensação analítica mais simples assume que a eq. anterior fornece uma representação precisa da dependência do sinal do fio- quente à velocidade e à temperatura. Expressando-a em termos da voltagem de saída do anemômetro, temos:**

$$E^* = E^2 \frac{R_F}{(R_{cc} - R_F)^2 (T_F - T_a)} = A + BU^n,$$

- **Para um anemômetro a temperatura constante, a razão envolvendo resistências na eq. anterior será constante, e por isso pode eventualmente ser incluída nas constantes de calibração. Segue-se que a velocidade do escoamento pode ser escrita como:**

$$E^2 = (A + BU^n)(T_F - T_a),$$

Métodos de compensação analítica

- **Compensação por duas pontes de temperatura constante:**
- **Um segundo método de compensação analítica foi proposto por Corrsin (1949). Esta técnica utiliza dois anemômetros de temperatura constante, com dois sensores de fio-quente situados com uma distância mínima entre eles, para que estejam expostos ao mesmo campo de velocidades e de temperatura.**
- **Por meio da operação de dois sensores que utilizam taxas de sobreaquecimento diferentes podemos estabelecer um sistema de duas equações algébricas com duas incógnitas, pode ser escrito como:**

$$\frac{E_{F_1}^2}{R_{F_1}} = (A + BU^n)(T_{F_1} - T_a),$$
$$\frac{E_{F_2}^2}{R_{F_2}} = (A + BU^n)(T_{F_2} - T_a).$$

- **Subtraindo a primeira da segunda, temos:**

$$\frac{E_{F_1}^2}{R_{F_1}} - \frac{E_{F_2}^2}{R_{F_2}} = (A + BU^n)(T_{F_1} - T_{F_2}),$$

uma equação cuja única variável desconhecida é U .

Métodos de compensação analítica

- **Compensação via duas pontes de temperatura constante:**
- **Essas equações formam um sistema de duas equações não lineares, de incógnitas U e T_a , e podem ser reescritas como:**

onde

$$E_{F_1}^2 = a_1 + a_2 T_a + (a_3 + a_4 + T_a) U^n,$$

$$E_{F_2}^2 = b_1 + b_2 T_a + (b_3 + b_4 + T_a) U^n,$$

$$a_1 = R_{F_1} A_1 T_{F_1}, \quad b_1 = R_{F_2} A_2 T_{F_2},$$

$$a_2 = -R_{F_1} A_1, \quad b_2 = -R_{F_2} A_2,$$

$$a_3 = R_{F_1} B_1 T_{F_1}, \quad b_3 = R_{F_2} B_2 T_{F_2},$$

$$a_4 = -R_{F_1} B_1, \quad b_4 = -R_{F_2} B_2$$

Métodos de compensação analítica

- **Compensação via duas pontes de temperatura constante:**

E eliminando U_n , temos uma equação de segunda ordem para T_a :

$$c_3 T_a^2 + c_2 T_a + c_1 = 0,$$

onde

$$c_1 = (E_{F_2}^2 - b_1)a_3 - (E_{F_1}^2 - a_1)b_3,$$

$$c_2 = (E_{F_2}^2 - b_1)a_4 - (E_{F_1}^2 - a_1)b_4 - b_2 a_3,$$

$$c_3 = a_2 b_4 - b_2 a_4.$$

Para fins operacionais, as voltagens dos fios E_{F_1} e E_{F_2} podem ser substituídas pela tensão de saída do anemômetro através da equação

$$E = \frac{R_{cc} + R_F}{R_F} E_F .$$

Ao resolver esta primeira eq. para os valores medidos de voltagem, podemos determinar a temperatura ambiente do escoamento. Então, as eqs anteriores podem ser utilizadas para encontrar a velocidade do fluido.

Aparato experimental

- **Túnel de vento estratificado:**



Características principais:

- **Circuito aberto**
- **Seção transversal 0.67 x 0.67 m**
- **Comprimento: 10 m**
- **Seção de estratificação com 10 elementos resistivos**
- **Seção de aquecimento com 6 m de comprimento**
- **Potência total: 10 kW**
- **Sistema 2D de posicionamento de sensores controlado por computador**
- **Equipamentos de suporte: multímetros, osciloscópios, manômetros, entre outros.**

Aparato experimental

Características principais:

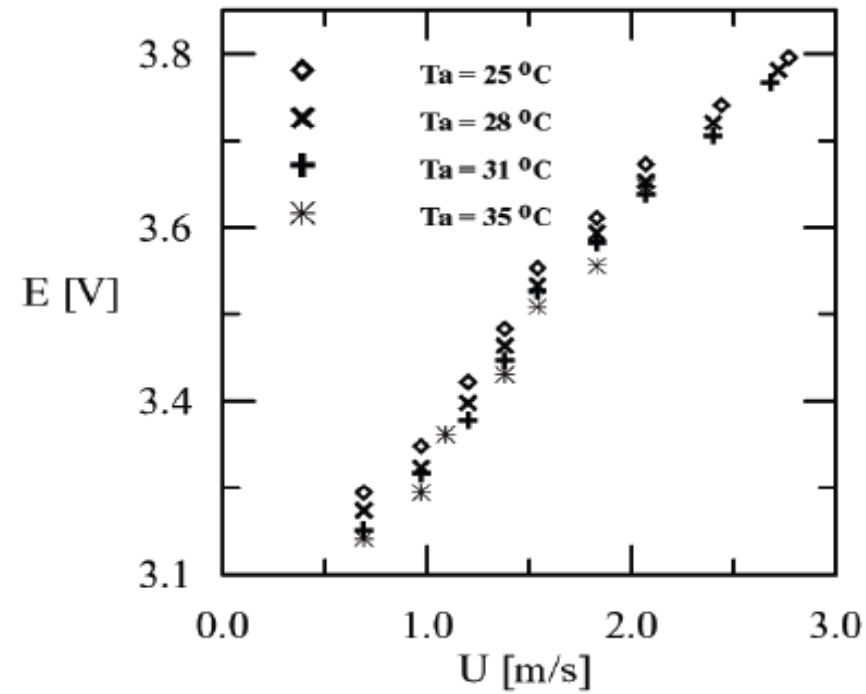
- **Circuito aberto**
- **Seção transversal 0.30 x 0.30 m**
- **Comprimento: 4 m**
- **Seção de estratificação com séries elementos resistivos**
- **Potência total: 5 kW**
- **Sistema 2D de posicionamento de sensores controlado por computador**
- **Equipamentos de suporte: multímetros, osciloscópios, manômetros, entre outros**

- **Túnel de vento aerodinâmico:**



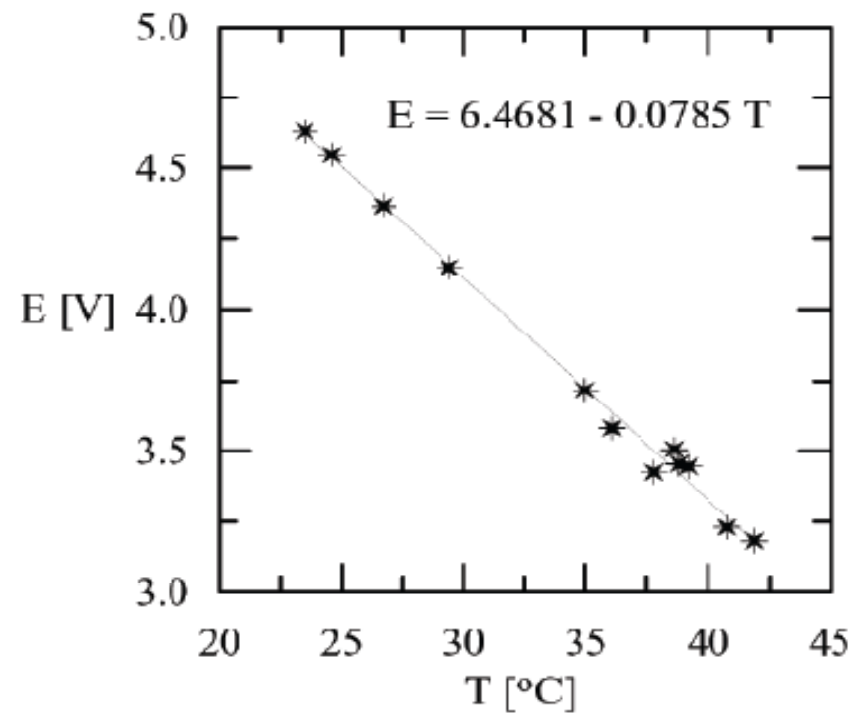
Comparação entre os métodos

- Dependência da voltagem do fio-quente em relação à velocidade e temperatura.



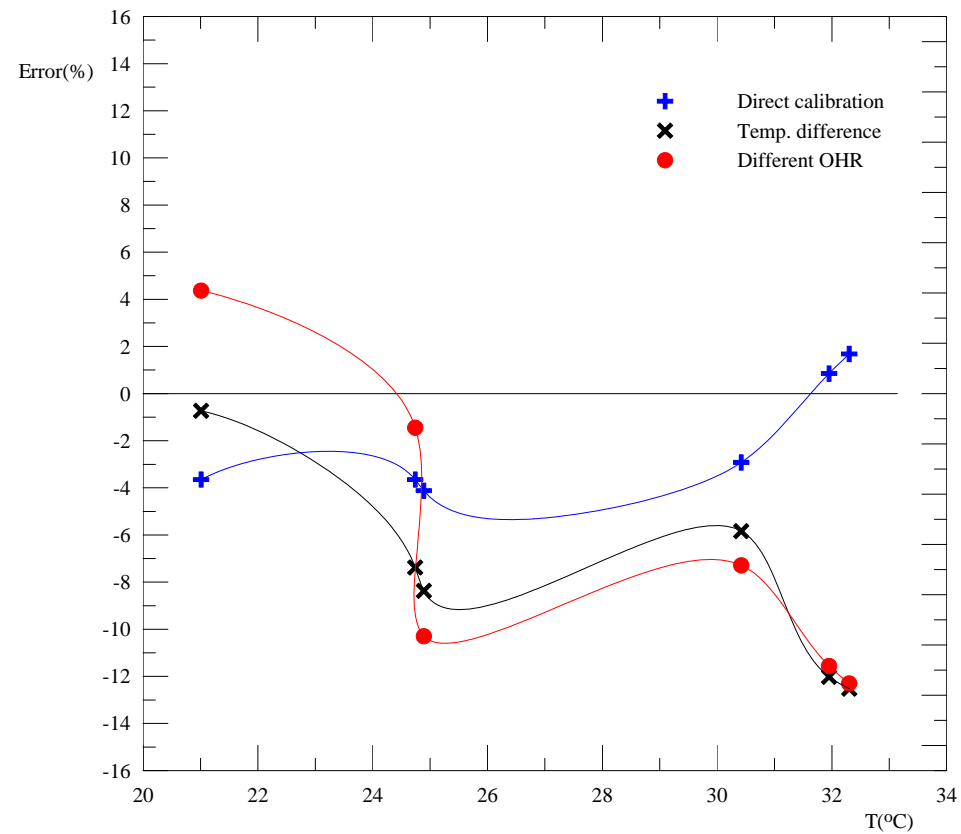
Comparação entre os métodos

- **Curva de calibração do fio-frio, mostrando a variação linear com a temperatura:**



Comparação entre os métodos

- **Dependência da voltagem do fio-quente em relação à velocidade e temperatura.**



Aquisição e tratamento do sinal

- Os parâmetros que definem a aquisição de dados de placa A/D são a taxa de amostragem, o número de amostras e tempo total de amostragem:

$$\Delta t_a = \frac{N_a}{f_a} .$$

- O conversor A/D discretiza o sinal analógico em pequenos intervalos , cujo número é definido pelo número de bits da placa de aquisição.
- Diferentes configurações podem ser estabelecidas em uma mesma A/D através da variação de parâmetros como (i) faixa de voltagens, (ii) polaridade (unipolar ou bipolar), (iii) uso de canais em modo diferencial ou de referência. Na prática, a definição desses parâmetros em conjunto com o número de bits da A/D determinam a resolução da placa de aquisição.
- Consideremos uma placa de 16 bits operando em modo bipolar (leitura de sinais positivos e negativos), com uma faixa de voltagens de ± 5 V. O número de intervalos de saída é 65536, e a resolução de voltagem é 0.15 mV. Esta mesma placa ajustada em modo unipolar na faixa de 0-5 V, a discriminação resultante será 76 microV.

Aquisição e tratamento do sinal

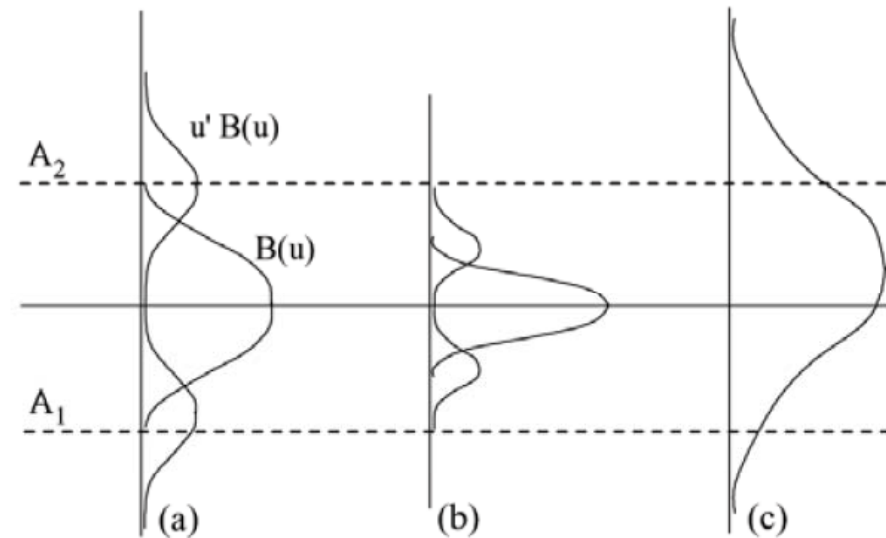
- É importante que o sinal de entrada esteja ajustado para que tanto o nível médio quanto as suas flutuações sejam resolvidos adequadamente pela placa de aquisição.

- Seja $B(u)$ a função densidade probabilidade do sinal $u(t)$, que representa a velocidade instantânea. Então, o momento de ordem n de u , pode ser escrito como:

$$\overline{u^n} = \int_{-\infty}^{\infty} u^n B(u) du .$$

- Mas o momento efetivamente medido é:

$$\overline{u_m^n} = \int_{A_1}^{A_2} u^n B(u) du ,$$



Aquisição e tratamento do sinal

- O procedimento de condicionamento do sinal pode ser descrito pelos seguintes passos: (i) primeiramente, subtraímos um nível médio constante, também chamado de *offset*, do sinal de saída do fio-quente ; (ii) o sinal resultante é então amplificado com um ganho G conhecido. O sinal condicionado será então:

$$E_c(t) = G(E(t) - \overline{E}),$$

- Outros elementos importantes no condicionamento do sinal são os filtros. A remoção da parte DC do sinal é normalmente efetuada através de um filtro passa-alta. Essencial para a remoção de ruído, o filtro passa-baixa é também crucial para evitar problemas com o espectro.
- A inversão da eq. acima deve ser realizada digitalmente após o processo de aquisição. Muitas vezes, não é possível ajustar o sinal para a medição de todas as grandezas de interesse. Por esse motivo, é usual subdividir o sinal de entrada em diferentes canais, cada um com o condicionamento adequado para a medição da grandeza desejada.

Cálculo das estatísticas do escoamento

- **Análise no domínio da amplitude:**

Este tipo de análise oferece informações sobre a distribuição de amplitude do sinal, e pode ser baseada em uma ou mais séries temporais. O valor de velocidade média e momentos de ordem superior, considerando uma série proveniente de um fio de um canal, podem ser calculados como:

Velocidade média	$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_1^N U_i,$	$\overline{u'v'} = \frac{1}{N} \sum_1^N (U_i - \bar{U})(V_i - \bar{V}),$
Flutuação	$\overline{u'^2} = \frac{1}{N-1} \sum_1^N (U_i - \bar{U})^2,$	$\overline{u'w'} = \frac{1}{N} \sum_1^N (U_i - \bar{U})(W_i - \bar{W}),$
Assimetria	$S = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_1^N (U_i - \bar{U})^3,$	$\overline{v'w'} = \frac{1}{N} \sum_1^N (V_i - \bar{V})(W_i - \bar{W}).$
Achatamento	$K = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_1^N (U_i - \bar{U})^4,$	

Cálculo das estatísticas do escoamento

- **Análise no domínio o tempo:**
- **A estatística no domínio do tempo mais difundida é a função de auto-correlação, a partir da qual pode ser estimada a escala de tempo integral.**
- **Esta escala é muito importante porque define o intervalo de tempo para que duas amostras consecutivas do escoamento estejam não correlacionadas. (Hinze (1959), Pope (2003)).**
- **Considerando uma série temporal $x(t)$, a auto-correlação entre os valores de $x(t)$ no tempo t e $t+\tau$ podem ser expressos como:**

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t)x(t + \tau) dt.$$

- **Logo, podemos definir a função coeficiente de auto-correlação como:**

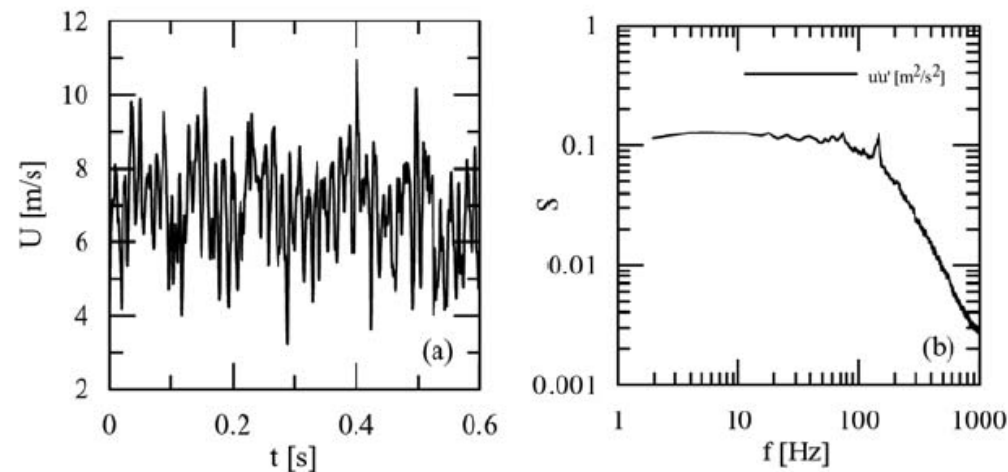
$$\rho_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{\sigma^2}.$$

onde $R_x(0) = \sigma^2$ escala de tempo integral pode ser dada por:

$$T_I = \int_0^{\infty} \rho_x(\tau) d\tau$$

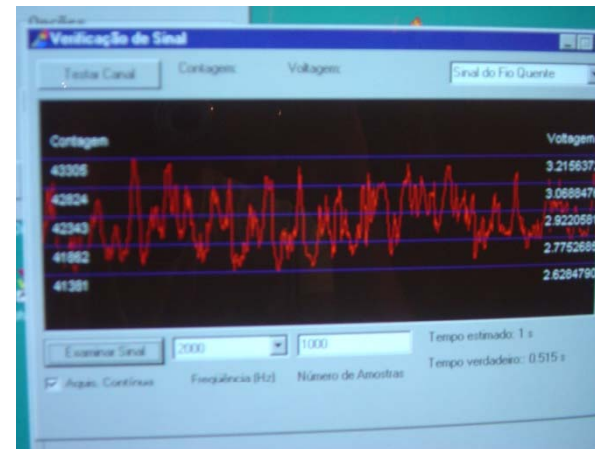
Cálculo das estatísticas do escoamento

- A análise do sinal no domínio da frequência nos fornece informações sobre como a energia do sinal está distribuída ao longo da faixa de frequências avaliada.
- A resolução do espectro depende basicamente do número de amostras utilizado, e da frequência de amostragem. É usual ainda subdividir a série temporal em um número de blocos, realizar a FFT em cada bloco, e tomar a média do resultado.
- Um problema típico que pode ocorrer no cálculo do espectro é o chamado "aliasing", ou rebatimento das maiores frequências sobre as menores frequências.



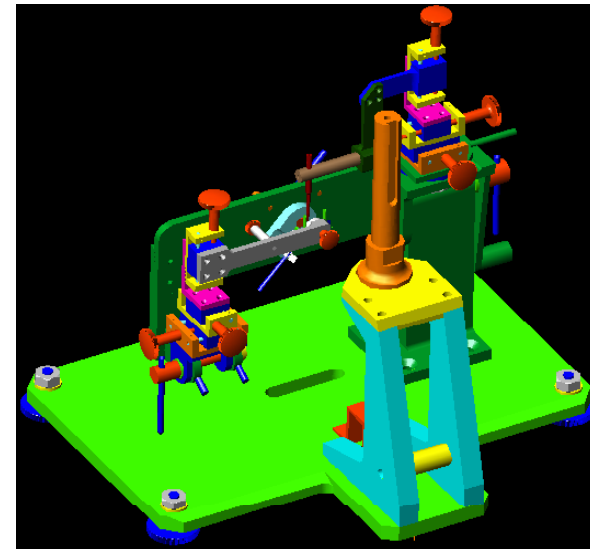
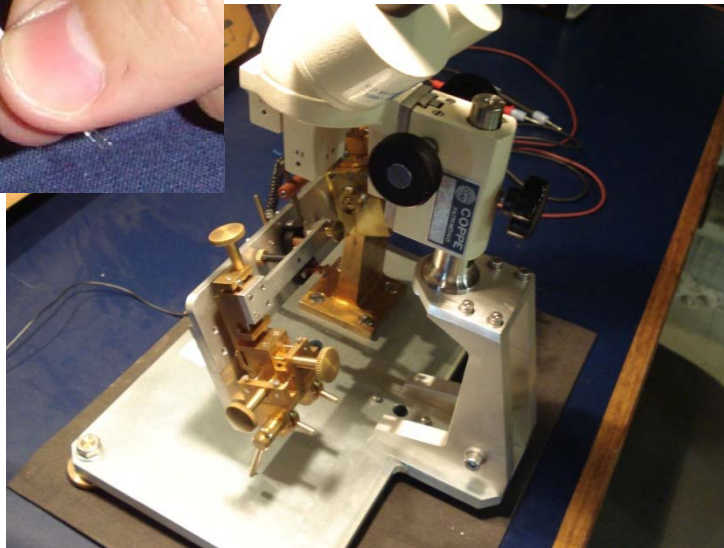
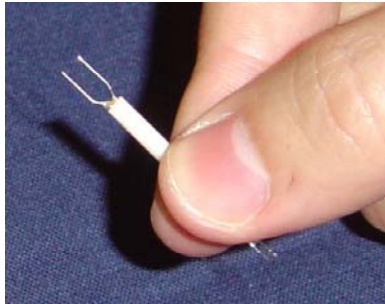
Aplicações

- **Escoamento ao redor de um cilindro circular:**



Reparo e construção de sensores

- Um tópico importante para a manutenção e a fluência de campanhas experimentais sistemáticas é a garantir de que os sensores de fio-quente estarão sempre em condição de operação.
- Considerando o caráter naturalmente frágil destas sondas, é importante dominar a capacidade de reparo, e em especial, de fabricação de sensores para anemometria térmica.



Conclusão

- **O principal propósito desta apresentação residiu em oferecer uma visão geral sobre as principais técnicas que constituem o atual estado da arte na experimentação em Mecânica dos Fluidos.**
- **O conjunto de avaliações apresentado permite-nos compreender em maior profundidade o funcionamento dos instrumentos estudados, garantindo assim maior confiança no método experimental e maior certeza da qualidade dos resultados experimentais.**
- **Apresentamos ainda alguns resultados experimentais com o propósito de ilustrar as potencialidades das técnicas avaliadas.**
- **Como conclusão, podemos destacar que todas as técnicas experimentais são necessariamente complementares. Uma investigação completa e refinada do escoamento demanda o uso de diferentes instrumentos, apropriados para o tipo de problema que se deseja estudar.**
- **O rigor e a atenção aos menores detalhes na execução dos aparatos experimentais e na condução das medidas são elementos fundamentais, sem os quais nenhuma técnica experimental pode ser utilizada com confiança.**

Agradecimentos

