

MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO NO PROCEDIMENTO DE MEDIDAS COM UMA SONDA DE PRESSÃO DE CINCO FUROS

Ricardo W. M. Ferreira

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, CEP: 66075-900 Belém - PA
e-mail: caco_bass@yahoo.com.br

Yuu Itai

Grupo de Energia Biomassa e meio Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, CEP: 66075-900 Belém - PA
e-mail: yuu_itai@yahoo.com.br

Danielle R. da S. Guerra

Grupo de Energia Biomassa e meio Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, CEP: 66075-900 Belém - PA
e-mail: daguerra@ufpa.br

André L. A. Mesquita

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, CEP: 66075-900 Belém - PA
e-mail: andream@ufpa.br

Abstract. A sonda de pressão multifuros é um instrumento padrão para medidas de pressão estática, velocidade e direção do escoamento em escoamentos complexos. São encontradas no mercado entretando com alto custo quando comparadas com os tubos de Pitot. O objetivo deste trabalho é o de descrever o procedimento de calibração e medição usando uma sonda de pressão de cinco furos no mapeamento da pressão e velocidade em um escoamento em túnel de vento. Dois métodos diferentes foram usados para obter as características do escoamento em termos das pressões estática, pressão total e as componentes tridimensionais. Os dados foram obtidos a partir das medidas de pressão obtidas pelos cinco furos da sonda. Estes furos são constituídos de tubos de agulha hipodérmica de 0,9 mm de diâmetro externo e 0,5 mm de diâmetro interno. A calibração foi realizada na seção de teste de um túnel de vento em todas as combinações de ângulos de desvio e de direção na faixa de -35° to 35° .

Keywords: cinco furos, sonda de pressão, medição do escoamento.

1. Introdução

Os dados experimentais em muitos campos de escoamentos complexos são comumente obtidos através da utilização de sondas de pressão multifuros. Estes tipos de sonda têm sido usadas de várias formas para medir as componentes de velocidade e o campo de pressão local em escoamentos tridimensionais, como aqueles encontrados em máquinas rotativas, turbomáquinas ou em escoamentos em torno de corpos complexos. A aplicação destas sondas requer uma cuidadosa calibração com a obtenção de dados tridimensionais. A sonda pode operar de duas formas, no modo de anulamento ou no modo de não anulamento.

Lee e Ash (1956) propuseram um método de calibração e medida para sondas de cinco furos esférica, o método de calibração da sonda consistia no ajuste da sonda até o ponto do eixo, na direção do fluxo do escoamento ou o desvio da sonda até que o plano meridiano passasse através do centro do orifício contendo o ângulo do fluxo. Esta proposta de calibração se mostrou inovadora considerando que na época não existiam muitas propostas, porém este método é de difícil execução. Este método adquire medidas de pressão estática, magnitude e direção do vetor de velocidade.

Algumas técnicas de calibração de uma sonda de cinco furos podem ser encontradas na literatura. Uma delas é o método mais comum que foi proposto por Treaster e Yocum (1979). Na técnica proposta a sonda é calibrada no modo de não anulamento ou em uma posição fixa. A técnica é simples, entretanto pode haver singularidade quando empregada para grandes ângulos de desvio ou de direção. No estudo de Treaster e Yocum (1979), um sensor tipo prisma com um diâmetro de 3.18 mm e um sensor cônico com 3.81 mm de diâmetro foram usados em um escoamento com número de Reynolds baseado no diâmetro da ponta do sensor estando na faixa de 2000 a 7000.

Dominy e Hodson (1993) calibraram em um número de Reynolds diferente, sobre uma faixa encontrada em escoamento de turbomáquinas. Os autores usaram o modo de calibração e os coeficientes de calibração proposto por Treaster e Yocum (1979). O resultado do estudo confirmou a existência dos efeitos de dois números de Reynolds distintos, a compressibilidade mostrou ter pequena influência, contudo a turbulência pode afetar a confiabilidade da calibração da sonda.

Nowack (1970) construiu um aparato experimental especial constituído de três eixos perpendiculares e propôs uma calibração Cartesiana. Neste tipo de calibração a direção do vetor velocidade é determinada por dois ângulos

cartesianos, o ângulo de desvio no plano meridiano horizontal e o ângulo de direção no plano vertical; o método foi proposto para a calibração de um tubo de Pitot de cinco furos esférico.

Morrison et al. (1998), propuseram uma técnica de calibração mais sofisticada a qual ajuda a reduzir os efeitos de uma calibração com pontos de má qualidade e que não requer uma sonda perfeitamente simétrica. A técnica consiste em obter curvas tridimensionais de todo o conjunto de dados da calibração a qual fará a compensação de se ter usado uma sonda não simétrica, e também suavizará os efeitos de pontos de má qualidade. Os dados foram obtidos fazendo a calibração no modo de não anulamento, o refinamento foi empregado e expressões analíticas foram obtidas para as funções de calibração.

No estudo de Sitaran e Treaster (1995) a aplicação da técnica de calibração foi a mesma apresentada por Treaster e Yocum com modificações para empregar sondas de pressão de quatro furos. Neste trabalho os autores usaram a sonda para medir a camada limite turbulenta sobre uma placa plana. Os autores concluíram que os resultados próximo à parede não estavam de acordo com o previsto pela teoria.

Sitaran et al. (1981) reportaram as medidas do escoamento relativo que passa nas pás de um rotor de um escoamento axial e um escoamento induzido usando sondas convencionais como: a sonda de pressão de cinco furos e Pitot esférico. Os métodos de calibração e de interpolação usados foram os propostos por Treaster e Yocum (1979). Ligrani et al. (1989), descreveram uma miniatura da sonda de cinco furos a qual tem uma ponta de diâmetro de 1.22 mm. A sonda foi desenvolvida para medir as três componentes de velocidade usando o procedimento de não anulamento em posições individuais em um canal curvado onde as diferenças de pressão são baixas, o escoamento laminar e tridimensional.

Wu J. Kim e Virendra C. Patel (1994) desenvolveram um estudo utilizando a sonda de cinco furos para encontrar a velocidade média e componentes do tensor de Reynolds. Neste mesmo trabalho os autores desenvolveram estudos dos vórtices formados próximos às curvas da parede convexa do túnel utilizado em questão. Também foi medida a turbulência em quatro seções pré-definidas. Embora tal estudo tenha sido feito para elucidar as ocorrências na camada limite do túnel, é de serventia ao presente trabalho o uso da sonda.

B.J. Wendt e Reichert (1995) agruparam 10 sondas de cinco furos em uma única sonda e as utilizaram simultaneamente para realizar medições das três componentes de velocidade, pressão total e pressão estática. Neste trabalho todas as sondas foram calibradas, daí a importância da calibração, assunto recorrente neste trabalho. D.G. Gregory Smith e J.G.E. Cleak (1992) desenvolveram um estudo sobre o rotor de turbina em formato de cascata, para ter um melhor entendimento da estrutura turbulenta do fluxo, incluindo a contribuição dos stress de Reynolds. Para este trabalho, também se fez o uso da sonda de cinco furos.

Pisasale e Ahmed (2002) propuseram um novo método o qual é simples, de fácil implementação e que supera o problema de singularidade encontrado no método tradicional proposto por Treaster e Yocum. O método foi testado usando os dados de calibração de uma sonda de cinco furos que foram obtidos empregando um túnel de vento subsônico de seção de 18in x 18in, com uma velocidade de 15 m/s. O novo procedimento mostrou que a faixa de calibração pode ser estendida com sucesso até ângulos de $\pm 75^\circ$.

O objetivo do presente trabalho é aplicar e comparar os dois métodos de calibração encontrados na literatura, o tradicional de Treaster e Yocum, e o mais recente de Pisasale e Ahmed, uma vez que este último promete superar o problema da singularidade presente no método tradicional. Uma sonda de cinco furos será testada e calibrada com o objetivo futuro de obter o campo de velocidade na seção curva do túnel de vento.

2. Aparato Experimental e Procedimento de Calibração

Uma foto do aparato experimental é mostrada na Figura 1. O túnel de vento usado para a calibração da sonda de cinco furos está localizado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.



Figura 1 (a) O túnel de vento.



Figura 1 (b) Vista superior do túnel de vento.

O túnel de vento é de circuito aberto, de paredes curvas com seção quadrada de 0,30m x 0,15m, o ar é fornecido por um ventilador centrífugo o qual é controlado por um inversor de frequência. O túnel fornece um escoamento uniforme na entrada da seção de teste, e, para este trabalho, a velocidade foi fixada no valor de 10 m/s, a qual foi estabelecida com o auxílio de um tubo de Pitot inserido no escoamento.

A sonda de pressão usada no presente estudo é mostrada na Figura 2. A sonda é constituída por cinco tubos de aço de agulhas hipodérmicas com diâmetro interno de 0,5 mm, diâmetro externo de 0,9 mm e 70,0 mm de comprimento. Estes tubos foram inseridos num tubo de alumínio de 4,0 mm de diâmetro externo e 40,0 mm de comprimento. Os tubos hipodérmicos são conectados a tubos capilares de cobre e então são conectados a um manômetro através de tubos flexíveis para a medição da pressão. As pontas da sonda foram usinadas com um ângulo de 45° em relação à ponta do tubo central. Detalhes da construção podem ser encontrados em Gouveia et al. (1997).

Para a realização da calibração em vários ângulos de direção e desvio, foi necessário o uso de um mecanismo que permitisse o suporte, a fixação e variação da ponta da sonda em vários ângulos. O mecanismo usado, bem como a sonda de cinco furos foi construído pelos técnicos do laboratório. Uma foto do mecanismo que permite a movimentação da sonda é mostrada na Figura 3.

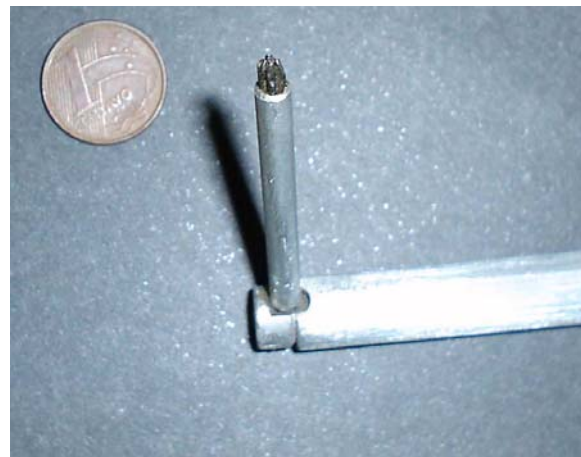


Figura 2. A sonda de cinco furos.



Figura 3. Mecanismo de variação angular da sonda.

2.1 Procedimento de Calibração

A sonda utilizada neste trabalho foi uma sonda de pressão de cinco furos, este tipo de configuração favorece a obtenção de uma melhor sensibilidade da sonda em relação à obtenção dos dados. O princípio para a obtenção do campo de velocidade utilizando sondas anemométricas está baseado na decomposição do vetor velocidade, onde os ângulos τ e α são os ângulos que definem o vetor velocidade. Estes ângulos são definidos como o ângulo de direção, τ e o ângulo de desvio, α .

A calibração deste tipo de sonda pode ser realizada usando os modos de anulamento ou não anulamento das pressões. No modo de anulamento é realizado um balanceamento das pressões durante a utilização da sonda. O procedimento de calibração consiste na medição das pressões totais em todos os tubos que constituem a sonda. Como são cinco tubos é necessário obter a pressão em cada um deles: P1, P2, P3, P4 e P5. A sonda é fixada no mecanismo de variação angular e então posicionada no interior do túnel de vento. As saídas dos tubos são conectadas independentes uma das outras, através de tubos flexíveis até um manômetro.

O estabelecimento de um escoamento completamente desenvolvido na entrada da seção de testes foi necessário antes de dar início à calibração. O escoamento foi definido com uma velocidade de 10 m/s através da medida do perfil de velocidade numa seção localizada antes da seção em que a sonda foi posicionada, utilizando um tubo de Pitot.

A obtenção das medidas de pressão é realizada através da leitura direta do manômetro. A quantidade de dados obtidos da leitura é considerada grande uma vez que a variação dos ângulos é na faixa de -15° a 15° no plano de direção, e de -35° a $+35^\circ$ no plano de desvio. Para cada variação são obtidas cinco leituras de pressão.

A Figura 4 apresenta um desenho esquemático da variação dos ângulos e da ponta da sonda.

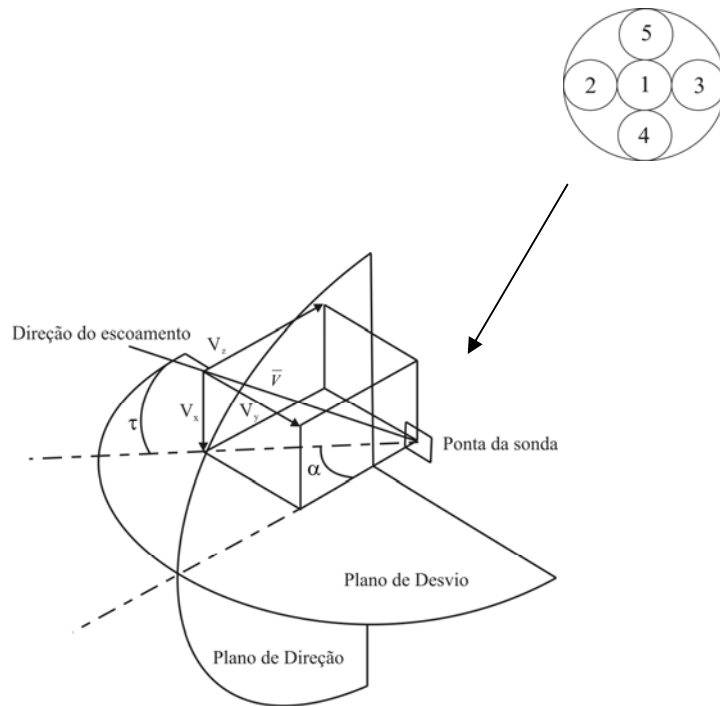


Figura 4. Esquema dos planos de desvio e direção, componentes de velocidade e vista da ponta da sonda numerada.

3. Métodos de Calibração

Alguns métodos de calibração são encontrados na literatura, contudo, neste trabalho foram investigados dois métodos de calibração para sondas de cinco furos, o método tradicional proposto por Treaster e Yocum (1979) e o método mais recente proposto por Pisasale e Ahmed (2002). O procedimento experimental e de cálculo empregado para cada método é descrito nos parágrafos que seguem.

Em ambas as calibrações a sonda foi empregada em modo não-nulo ou posição fixa, na operação no modo não-nulo, são obtidos dados que represente as diferenças de pressão tanto no plano de direção quanto no plano de desvio. Esta relação entre a pressão total local e a pressão estática, é geralmente expressa na forma de coeficientes de pressões adimensionais, estes coeficientes devem ser independentes da velocidade, e dependentes somente em função da angularidade do fluxo.

Seria bastante oportuno se a calibração da sonda de cinco furos pudesse ser feita somente por procedimentos analíticos, contudo, devido à inexatidão na fabricação e faixa de operação, são requeridas calibrações que atendam a exatidão em condições de laboratório, ou de campo.

Para sondas de geometrias como a utilizada neste trabalho, são necessárias calibrações devido à complexidade da geometria, pelas mudanças que ocorrem em seu contorno, separação de fluxo e efeitos viscosos em torno da mesma.

3.1 Calibração Utilizando o Método de Treaster e Yocum

O método mais usual de calibração proposto por Treaster e Yocum (1979), é bastante simples. A técnica consiste essencialmente de uma adaptação da calibração tradição de uma sonda de cinco furos, usando-a em um modo não-nulo. Onde P_1 é considerado a pressão total, e \bar{P} é considerada a pressão estática. Conseqüentemente a diferença entre as duas pressões $P_1 - \bar{P}$, é que representa a pressão dinâmica, no qual é usada nos coeficientes de calibração de pressão adimensionais.

Os quatro coeficientes de calibração utilizados por Treaster e Yocum são definidos pelas expressões:

$$Cp_{desvio} = (p_2 - p_3) / (p_1 - \bar{p}) \quad (1)$$

$$Cp_{direção} = (p_4 - p_5) / (p_1 - \bar{p}) \quad (2)$$

$$Cp_{total} = (p_1 - p_{total}) / (p_1 - \bar{p}) \quad (3)$$

$$Cp_{estatica} = (\bar{p} - p_{estatica}) / (p_1 - \bar{p}) \quad (4)$$

$$\bar{p} = (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) / 4 \quad (5)$$

O procedimento de calibração foi conduzido mantendo-se uma velocidade constante de 10 m/s na seção de teste. Foi construída uma tomada de pressão na seção de teste para se obter a pressão estática na parede do túnel de vento. A sonda de cinco furos foi posicionada no centro da seção, onde a velocidade tinha o valor máximo no escoamento, e através do dispositivo de mudança de ângulo de desvio (α) e ângulo de direção (τ), se deu início ao procedimento de calibração.

A sonda foi fixada em um ângulo de desvio (α) pré-determinado e a seguir foi movimentada no sentido do ângulo de direção de acordo com seus incrementos, variando então o ângulo de desvio de -35 até +35, e o ângulo de direção de -15 até +15.

3.2 Calibração Utilizando o Método de Pisasale e Ahmed

O método proposto por Pisasale e Ahmed consiste basicamente em ampliar a faixa de calibração de uma sonda de cinco furos para fluxos tridimensionais. O proposto pelos autores é devido ao fato de que os métodos empregados não são adequados para uma faixa de ângulos de calibração maiores. Nestas condições, de ângulos maiores, foi observado na literatura que freqüentemente ocorria singularidade, e daí, a necessidade de se utilizar um método que satisfizesse a calibração da sonda para uma faixa maior de ângulos de desvio e direção.

A primeira proposta de Pisasale e Ahmed foi a de substituir o denominador, $(P_1 - \bar{P})$ por uma constante, entretanto ao resolver o problema de singularidade, os autores encontraram outro problema, o de vários valores de ângulos para um mesmo Cp_{desvio} .

Outra forma que os autores tentaram empregar foi a de substituir o denominador, $(P_1 - \bar{P})$ por $(P_1 - P_s)$ ou $(\bar{P} - P_s)$, a fim de evitar multi valores, entretanto, não conseguiram evitar as singularidades. Isto devido ao fato de que o denominador $P_1 - P_s$ (ou $\bar{P} - P_s$) continuava a mudar de sinal e igualar a zero, ocasionando assim a singularidade.

Pisasale e Ahmed enfim encontraram outra forma para resolver os problemas encontrados em seu método de calibração. A solução foi a substituição do denominador $(p_1 - \bar{p})$ por $p_1 - p_s + A_q$, evitando assim as singularidades e os multi valores.

O procedimento experimental foi conduzido de maneira semelhante ao método de Treaster e Yocum, tomando todos os cuidados na realização das medidas a fim de evitar singularidades e estender a faixa de calibração para ângulos de desvio e direção maiores.

O método desenvolvido por Pisasale e Ahmed utiliza um novo caminho para encontrar os coeficientes de calibração adimensionais, onde utiliza os seguintes parâmetros:

$$N_y = \frac{p_1 - \bar{p}}{DEN} \quad (6)$$

Onde, $DEN = p_1 - p_s + A_q$

$$N_x = \frac{p_1 - \bar{p}}{\sqrt{(p_2 - p_3)^2 + (p_4 - p_5)^2}} \quad (7)$$

$$N_y^* = \frac{DEN}{\sqrt{(p_2 - p_3)^2 + (p_4 - p_5)^2}} \quad (8)$$

Apartir destes parâmetros podemos encontrar os coeficientes de calibração desta maneira:

$$Cp_{desvio} = \frac{P_2 - P_3}{DEN} \tag{9}$$

$$Cp_{direção} = \frac{P_4 - P_5}{DEN} \tag{10}$$

$$Cp_{estática} = \frac{\bar{P} - P_5}{DEN} \tag{11}$$

$$Cp_{total} = \frac{P_1 - P_t}{DEN} \tag{12}$$

4. Resultados

Neste trabalho as medidas de pressão foram realizadas e os coeficientes de pressão foram calculados utilizando as duas metodologias apresentadas anteriormente. Os coeficientes são apresentados na forma de gráficos nas Figuras 6 e 7.

Os resultados experimentais foram obtidos estabelecendo a velocidade inicial de 10 m/s na entrada da seção reta. As medidas foram obtidas em cinco estações, as quais foram definidas como os planos 1, 2, 3, 4 e 5, para auxiliar na metodologia experimental e análise do comportamento da pressão ao longo da curva. A Figura 5 apresenta as localizações de cada plano.

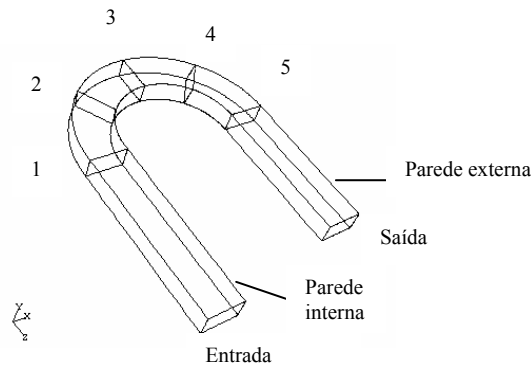


Figura 5 – Esquema dos cinco planos criados no túnel de vento de seção curvada.

Os resultados da calibração utilizando os dois métodos foram calculados conforme o proposto por Treaster e Yocum, e, o proposto por Pisasale e Ahmed sendo estes mostrados nas Figuras 6 e 7.

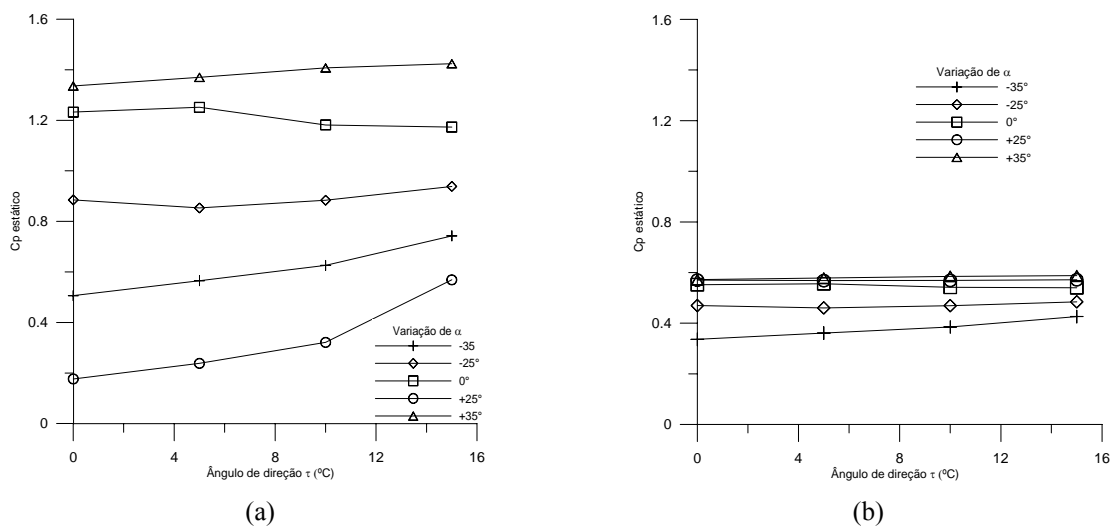


Figura 6. Coeficientes de pressão estática versus ângulo de direção usando: (a) método de Treaster e Yocum, (b) método de Pisasale e Ahmed.

Comparando os gráficos da Figura 6, é observado que os coeficientes de pressão estática (Cp estático) versus o ângulo de direção, possuem valores bem diferentes dentro de uma mesma escala e para os mesmos ângulos de desvio.

Na análise é notado que, para o mesmo ângulo de direção, o C_p estático calculado pelo procedimento proposto por Pisasale e Ahmed, apresenta valores menores quando comparados aos calculados pelo procedimento de Treaster e Yocum.

Na Figura 7, é comparado o C_p total versus o ângulo de direção. É possível observar que os coeficientes calculados pelo método de Treaster e Yocum, apresentam perturbações nos valores dos coeficientes de C_p total para ângulos de $+25^\circ$ e $+35^\circ$. A mesma observação não é notada nos coeficientes calculados pelo método de Pisasale e Ahmed.

A Figura 7(b) ainda mostra que os coeficientes pelo método se mantêm estáveis, mantendo os valores numa escala menor do que o método de Treaster e Yocum.

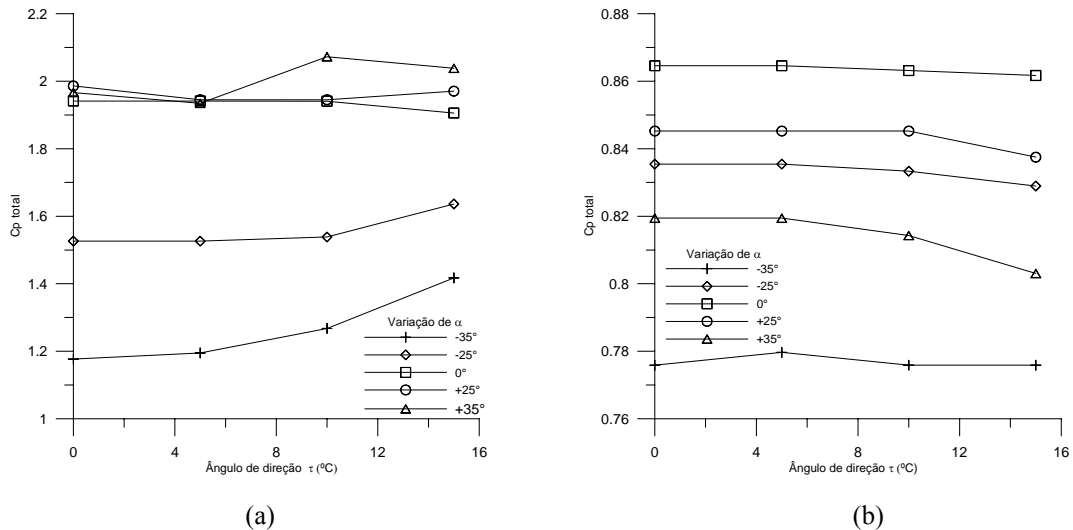


Figura 7. Coeficientes de pressão estática versus ângulo de direção usando: (a) método de Treaster, (b) método de Pisasale.

Neste trabalho é também apresentado o comportamento da pressão média, obtida com a sonda de cinco furos. As medidas foram obtidas em várias seções da curva acoplada no túnel de vento. Uma malha esquemática foi elaborada em cada plano para obter as medidas de pressão. Os números existentes na malha correspondentes à ordem da aquisição são representados na Figura 8.

Dentro do esquema desta malha, foram obtidas 75 medidas em cada seção sendo que foram 5 seções, totalizando 375 leituras de pressão ao longo da curva. Em cada ponto da malha, a sonda foi utilizada em uma dada posição fixa, com os ângulos de desvio e direção iguais a 0° . Em cada ponto foram obtidos cinco leituras de pressão, pois cada leitura é referente a um furo existente na sonda. Após a aquisição de dados ter sido efetuada, os cálculos para obter os valores de pressão média foram realizados. Os valores de pressão média foram obtidos através da equação apresentada abaixo.

$$\bar{p} = (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) / 4 \tag{13}$$

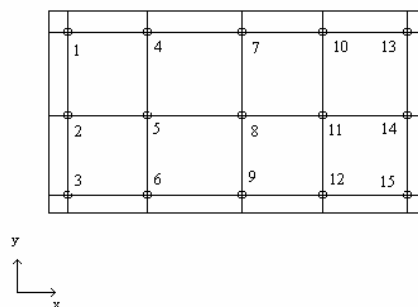


Figura 8. Esquema de malha criada para estabelecer os pontos de medidas em cada plano.

As pressões médias de cada ponto numerado foram calculadas a partir das cinco leituras em cada ponto, o resultado foi colocado na forma gráfica em linhas de contorno para cada uma das seções ou planos, e são apresentados nas Figuras de 9 a 13.

Analisando os gráficos de pressão abaixo, podemos notar que: na seção 1 na parede externa da curva ocorre o maior gradiente de pressão, variando de 52 Pa a 28 Pa, máximo e mínimo respectivamente. De acordo com os princípios da mecânica dos fluidos, podemos afirmar que onde a pressão é mínima a velocidade é máxima, e, onde a pressão é máxima a velocidade é mínima. Deste modo, pelo campo de pressão média pode ser estimado o comportamento da velocidade na curva do tunel de vento.

Nas Figuras de 1 a 12 é possível observar sempre um decrescimento da pressão na parede interna da curva, o que sugere um aumento da velocidade. Este comportamento muda na seção 5, onde a pressão volta a aumentar sugerindo uma diminuição da velocidade. É Observado que o comportamento da distribuição de pressão ao longo das paredes do canal é fortemente influenciado pela curvatura das paredes.

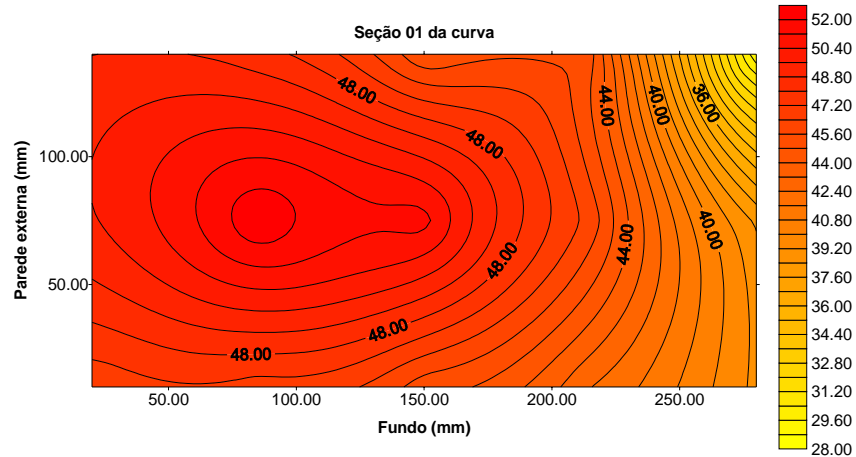


Figura 9. Campo de pressão média no plano 1.

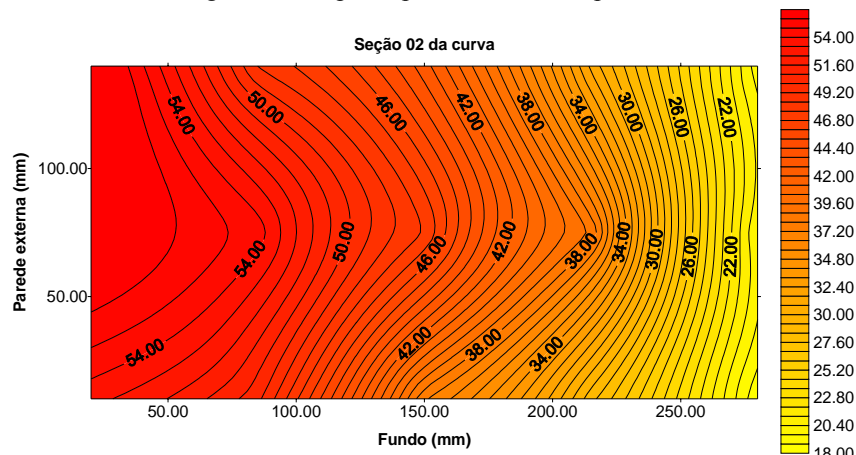


Figura 10. Campo de pressão média no plano 2.

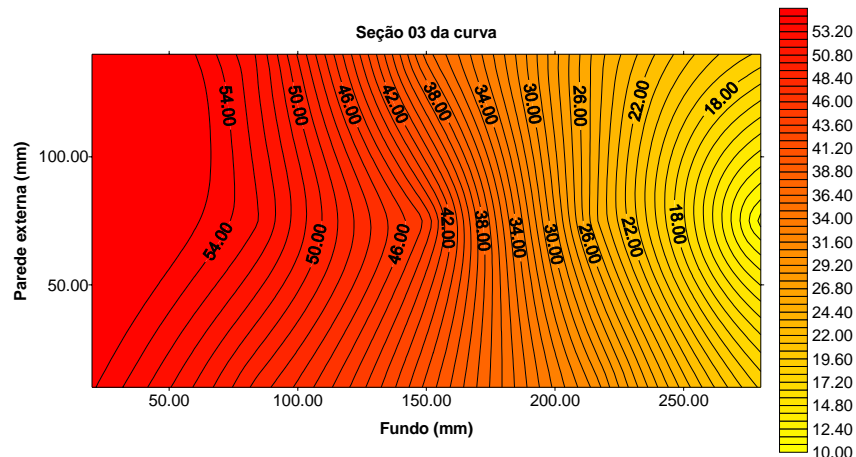


Figura 11. Campo de pressão média no plano 3.

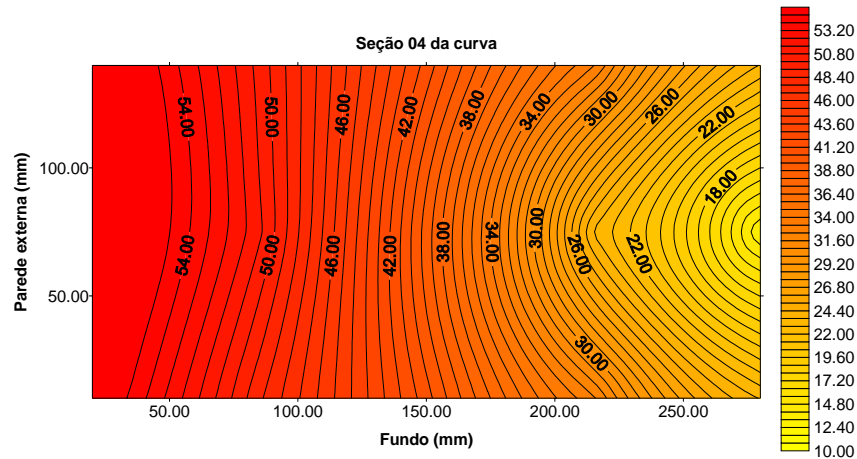


Figura 12. Campo de pressão média no plano 4.

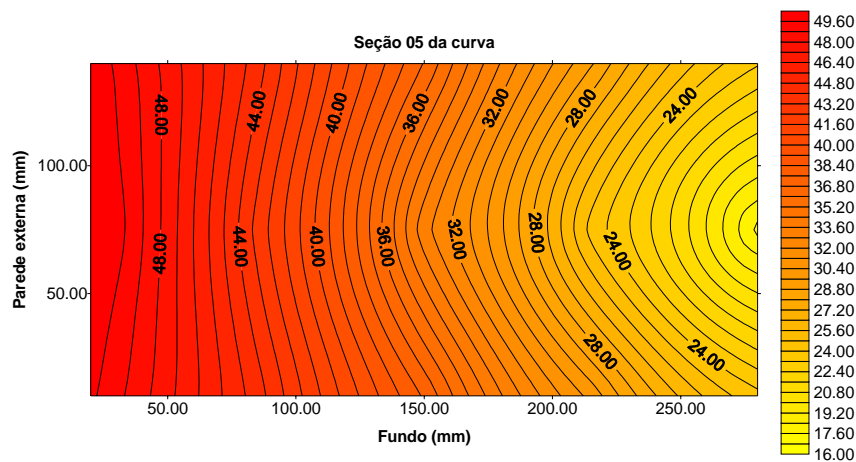


Figura 13. Campo de pressão média no plano 5.

O erro estimado nos experimentos é da ordem de $\pm 2\%$, o tipo de manômetro utilizado, Micromanometer MDC FC001, da Furness Controls Ltd, fornece uma precisão de $\pm 1 \text{ mmHg}$, na escala de 10%. Outra fonte de erro é devido ao fato de termos uma grande quantidade de dados, impossibilitando a realização do experimento em um único dia, por isso deve se ter um grande cuidado no momento da calibração a fim de se reduzir o erro no processo.

4. Conclusão

No presente trabalho, observamos que para a sonda de cinco furos utilizada no túnel de vento do Laboratório de Mecânica de Fluidos da UFPa, os dois métodos de calibração analisados, tanto o de Treaster e Yocum quanto o de Pisasale e Ahmed se mostram funcionais para a sonda em questão. Entretanto, mesmo para baixas faixas de angulação verificou-se que o método proposto por Pisasale e Ahmed é o mais eficaz comparado com o método proposto por Treaster e Yocum. Esta observação esta baseada no fato de que a formulação matemática proposta por estes dois ultimos autores, quando utilizada para ângulos maiores do que os apresentados neste trabalho, propicia que os valores dos denominadores das equações de $Cp_{direção}$ e Cp_{desvio} tendam a zero, produzindo assim o efeito das singularidade.

O comportamento das equações propostas por Treaster e Yocum, sugere que o método seja válido somente para baixos ângulos de calibração. Portanto, para este trabalho concluímos que o método de calibração de Treaster e Yocum apresenta um bom desempenho bem como o de Pisasale e Ahmed, sendo que este ultimo método proporciona uma faixa de calibração mais abrangente.

Foi também realizado um procedimento onde se obteve o campo de pressão ao longo do canal curvado utilizando a sonda de cinco furos. Os resultados obtidos foram coerentes com o já visto na literatura em relação aos principios da mecânica dos fluidos. Futuramente estes resultados serão de grande importância já que as medidas de velocidade são oriundas das de pressão, juntamente com os coeficientes adimensionais calculados no momento da calibração. Os resultados e análise apresentados neste estudo são preliminares precisando os mesmos serem continuados.

5. Nomenclatura

A	Constante escalar
α	Ângulo de desvio
τ	Ângulo de direção
Cp_{desvio}	Coefficiente de pressão de desvio
$Cp_{direção}$	Coefficiente de pressão de direção
Cp_{total}	Coefficiente de pressão total
$Cp_{estático}$	Coefficiente de pressão estática
DEN	Denominador utilizado para adimensionalizar a equação (6).
N_y	Parametro para o eixo vertical
N_x	Parametro para o eixo horizontal
N_y^*	Parametro alternativo para o eixo vertical
\bar{p}	Pressão média.
q	Pressão dinâmica no fluxo livre.
p_{total}	Pressão total
P_s	Pressão estática
P_1, P_2, \dots, P_5	Pressão medida em cada furo da sonda.

6. Agradecimentos

R.W.M.F. agradece a SECTAM/ FUNTEC pelo auxílio através de uma bolsa de Iniciação Tecnológica.

7. Referências

- Dominy, R.G. and Hodson, H.P., 1993, "An Investigation of Factors Influencing the Calibration of Five-hole Probes for Three-Dimensional Flow Measurements", *Journal of Turbomachinery*, Vol.115, pp. 513-519.
- Gregory Smith, D.G. , e Cleak, J.G.E., "Secondary Flow Measurements in a Turbine Cascade With High Inlet Turbulence", *ASME Transactions, Journal of Turbomachinery*, vol 114, 173-183, January 1992.
- Gouveia, M.S.A., Chaves, J.A.C. and Amarante Mesquita, A.L., 1997, "A Low-Cost Probe to Measure Three Mean Velocity Components", *Proceedings of the 14th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Bauru-SP.
- Judd, A.M., 1975, "Calibration of a Five Tube Probe for Measuring Wind Speed and Direction", *Journal Physics E: Scientific Instruments*, Vol.08, pp. 115-116.
- Kim, Wu J. , e Patel, Virendra C. , "Origin and Decay of Longitudinal Vórtices in Developing Flow in a Curved Rectangular Duct", *ASME Transactions, Journal of Fluids Engineering* vol 116, 45-52, March 1994.
- Lee, J.C. , e Ash, J.E. , "Three-Dimensional Spherical Pitot Probe" *ASME Transactions*, 603-608, April 1956.
- Ligrani, P.M., Singer, B.A. and Baun, L.R., 1989, "Miniature Five-Hole Pressure Probe for Measurement of Three Mean Velocity Components in Low-Speed Flows", *Journal Physics E: Scientific Instruments*, Vol.22, pp.868-876.
- Morrison, G.L., Schobeiri, M.T. and Pappu, K.R., 1998, "Five-Hole Pressure Probe Analysis Technique", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.09, pp. 153-158.
- Nowack, C.F.R., 1970, "Improved Calibration Method for a Five-Hole Spherical Pitot Probe", *Journal Physics E: Scientific Instruments*, Vol.03, pp.21-26.
- Pisale, A.J. and Ahmed, N.A., 2002, "A Novel Method for Extending the Calibration Range of Five-hole Probe for Highly Three-dimensional Flows", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.13, pp. 23-30.
- Sitaram, N.; Lakshminarayana, B. and Ravindranath, A., 1981, "Conventional Probes for the Relative Flow Measurement in a Turbomachinery Rotor Blade Passage", *Transactions of the ASME*, Vol.103, pp. 406-414.
- Sitaram, N. and Treaster, A.L., 1985, "A Simplified Method of Using Four-Hole Probes to Measure Three-Dimensional Flow Fields", *Journal of Fluids Engineering*, Vol.107, pp. 31-35.

- Treaster, A.L. and Yocum, A.M., 1979, "The Calibration and Application of Five-hole Probes", ISA Transactions, Vol.18, pp. 23-34.
- Wendt, B.J., e Reichert B.A., "An Inexpensive and Effective Five-hole Probe Rake", Experiments in Fluids 19 (1995) 295-296.
- Wright, M.A., 1970, "The Evaluation of a Simplified form of Presentation for Five-hole Spherical and Hemispherical Pitometer Calibration Data", J. of Physics E: Scientific Instruments, Vol.3, pp. 356-362.

CALIBRATION METHODS IN THE MEASUREMENT PROCEDURE OF A FIVE-HOLE PRESSURE PROBE

Ricardo Wallace Machado Ferreira
Universidade Federal do Pará
Caco_bass@yahoo.com.br

Yuu Itai
Universidade Federal do Pará
Yuu_itai@yahoo.com.br

Abstract

***Abstract.** The multihole pressure probe is a standard instrument for measuring the total static pressure, velocity and flow direction of complicated field. They are commercially available but very high cost when compared to a single Pitot probe. This paper reports the calibration and measurement procedures implemented to work with a five-hole pressure probe in the mapping pressure and velocity wind tunnel flows. Two different methods were used to obtain flow characteristics in terms of static and total pressure and three-dimensional components. The data are obtained from the pressure information given by five steel hypodermic tubes. These tubes have a 0.9 mm outer diameter and 0.5 mm inner diameter. The calibration was carried out in a wind tunnel test facility at all combinations of pitch and yaw angles from -30° to 30°.*

Keywords: five-hole, pressure probe, flow measurement.