

## ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE UM PULSO DE PRESSÃO E SUA INFLUÊNCIA NO ERRO DE MEDIÇÃO DA VAZÃO MÉDIA DE UM ESCOAMENTO EM REGIME LAMINAR EM PLACA DE ORIFÍCIO

**Cláudio Gomes da Costa**

Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Universitário  
Belo Horizonte – M.G.  
[claudiogcosta@hotmail.com](mailto:claudiogcosta@hotmail.com)

**Ramón Molina Valle**

Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica  
[ramon@vesper.demec.ufmg.br](mailto:ramon@vesper.demec.ufmg.br)  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Universitário  
Belo Horizonte – M.G.

**Resumo:** *Para o estudo experimental do escoamento transiente laminar, a propagação de uma flutuação de vazão conhecida é relacionada a uma flutuação de pressão, permitindo a calibração dinâmica do sistema de medição do tipo placa de orifício. Uma flutuação de vazão em torno de um escoamento médio laminar, também conhecido, é produzida pelo movimento harmônico de um êmbolo. A variação de pressão através do orifício é determinada experimentalmente através de transdutores de pressão acoplados a um sistema de aquisição dinâmica de dados. A determinação da vazão em regime permanente e transiente, a partir dos gradientes instantâneos de pressão na placa de orifício, permite que os erros de medição do escoamento médio sejam estimados em função da frequência do pulso gerado. Desta forma, os erros de medição do escoamento médio em função da frequência de pulsação da onda de vazão gerada podem ser determinados. Erros de medição de vazões médias são determinados para frequências de 3 a 28Hz. Os resultados mostram um aumento substancial do erro para frequências de pulsação maiores e uma queda deste erro para vazões médias menores, quando transdutores de pressão com características dinâmicas são utilizados nas placas de orifício.*

**Palavras-chave:** Placa de Orifício, Escoamento Pulsante, Erro de Medição.

### 1 – Introdução

Os medidores de vazão do tipo placa de orifício são largamente utilizados na indústria. A grande aceitação deste tipo de medidor se deve à sua facilidade de instalação e manutenção, boa confiabilidade e custo relativamente baixo, compensando assim suas limitações, como a baixa rangeabilidade e a grande dependência das condições operacionais. As geometrias, localização das tomadas de pressão e outras exigências de instalação são bem especificadas em normas técnicas internacionais para escoamento em regime permanente, com  $Re > 3150$  e tubulações com diâmetros internos acima de 50mm. Devido à sua grande utilização, a preocupação na redução da incerteza nas medidas é muito grande. No entanto, todas as melhorias conseguidas até hoje para regime permanente foram baseadas em novas fórmulas empíricas para o cálculo com menor incerteza dos coeficientes de vazão para a faixa de Reynolds prevista pelas normas. Nos escoamentos em regime permanente e turbulento, o coeficiente de vazão é bem definido com base na equação de Bernoulli Corrigida e a determinação experimental dos coeficientes de vazão é realizada conforme as normas.

Para situações que não se enquadram àquelas previstas nas normas, tal como escoamentos em regime laminar, para pequenos diâmetros e escoamentos pulsantes, são encontrados poucos trabalhos na literatura. No escoamento pulsante, o comportamento dinâmico do escoamento depende das variações ligadas à inércia do fluido e dos efeitos da pulsação sobre a formação de vórtices que alteram o gradiente

de pressões e o perfil de velocidades. Além disso, a interação entre esses fatores não permite analisar separadamente o grau de influência de cada um. Segundo as normas clássicas, como a ISO 5167 ou a BS 1042, medições de escoamentos que não variam discretamente no tempo não podem ser obtidas com um grau aceitável de incerteza, visto que na maioria dos casos não se dispõe de dados confiáveis para tal.

## 2 – Objetivos

O objetivo do presente trabalho é analisar a propagação de uma onda de vazão e determinar a influência desta onda sobre a medição de vazão de um escoamento médio através de uma placa de orifício. O escoamento em questão se dá a baixos números de Reynolds em uma tubulação de pequeno diâmetro ( $D < 50\text{mm}$ ). Utiliza-se um gerador de pulsos para criar uma onda senoidal de vazão em torno de um escoamento médio. São utilizadas duas placas de orifício, uma convencional de canto vivo e uma de entrada cônica. Em ambos os casos são utilizados transdutores de pressão com características dinâmicas, os quais permitem acompanhar as flutuações de pressão no tempo.

Basicamente são analisados os parâmetros relativos à propagação do pulso de vazão, desde o gerador de pulsos até a placa de orifício e posteriormente determinados os erros de medição da vazão média devidos à presença da pulsação na placa.

## 3 – Metodologia

A Figura 1 mostra o esquema geral do banco de fluxo construído. Um motor elétrico aciona um pistão que por sua vez gera um movimento harmônico que cria flutuações de vazão em várias frequências. Este pistão, acionado por um mecanismo do tipo garfo escocês (*Scotch Yoke*), é capaz de gerar ondas senoidais de vazão em torno do escoamento médio,  $Q_o$ . Esse escoamento médio,  $Q_o$ , é fornecido pela bomba de palhetas (2) e é medido por uma cuba graduada ou pelo sistema de medição de vazão (7). O pulso de vazão,  $Q_p(t)$ , é produzido pelo gerador de pulsos (10). A vazão total transiente, constituída pela flutuação e pela vazão média, é medida pelo sistema de medição (12). Um amortecedor do tipo Ressonador em série (8) impede a propagação da flutuação de pressão em direção à placa de orifício superior (7). A vazão transiente total que passa pela placa de orifício (12) é dada pela soma da flutuação gerada pelo gerador de pulsos de vazão (10),  $Q_p(t)$ , e a vazão média,  $Q_o$ , fornecida pela bomba (2). Desta forma, tem-se:

$$Q_t(t) = Q_p(t) + Q_o \quad (1)$$

O pulso de vazão gerado no cilindro do gerador de pulsos,  $Q_p(t)$ , é dado por

$$Q_p(t) = A_c r w \text{sen}(wt) \quad (2)$$

onde  $A_c$  = área do cilindro;  
 $r$  = raio da manivela do êmbolo;  
 $w$  = frequência angular;  
 $t$  = tempo;  
 $wt$  = ângulo da manivela.

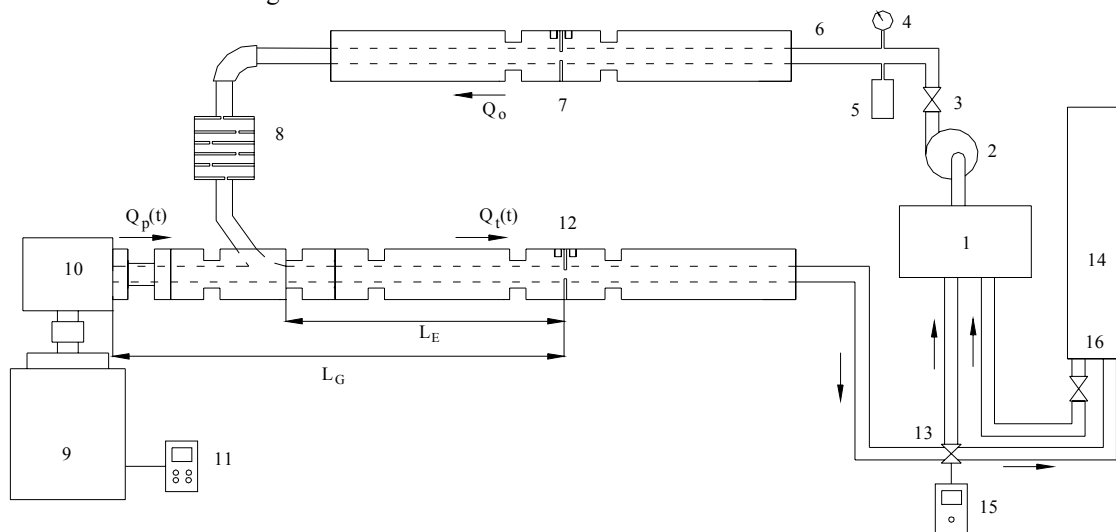


Figura 1. Esquema geral do sistema de medição dinâmico construído.

O sistema de medição de vazão transiente (12) é instalado a uma distância  $L_G$  do gerador de pulsos de vazão e a uma distância  $L_E$  de tubo reto, a partir do tubo inclinado. Esta distância influencia a onda de vazão produzida pelo gerador de pulsos, a qual chega amortecida e defasada na placa de orifício, depois de percorrer a distância  $L_G$ . Vários são os fatores que interferem na propagação da onda de vazão gerada enquanto esta percorre a distância  $L_G$ . Fatores tais como o efeito da compressibilidade do sistema, as forças de atrito viscoso, a mudança de direção do escoamento médio  $Q_0$ , a frequência imposta ao sistema pelo pistão do gerador de pulsos e a geometria do orifício, entre outras, contribuem para o amortecimento e atraso na propagação desta onda. Deste modo, a vazão que deverá ser medida pelo sistema de medição de vazão dinâmica (12) é dada por

$$Q_i(t) = Q(t) + Q_0 \quad (3)$$

onde  $Q_i(t)$  = vazão total transiente que efetivamente passa pela placa de orifício;

$Q(t)$  = flutuação de vazão amortecida e defasada na placa de orifício, dada por:

A flutuação de vazão amortecida é dada por

$$Q(t) = Ra Q_p(t-\tau) = Ra A c r w \text{ sen } [w(t - \tau)] \quad (4)$$

onde  $\tau$  = tempo que o pulso de vazão leva para percorrer a distância  $L_G$ , ou seja, o atraso da onda de vazão;

$Ra$  = razão de amplitudes, que relaciona a vazão que chega à placa com a vazão que sai do gerador de pulsos.

A equação 4, através dos parâmetros  $Ra$  e  $\tau$ , envolve os efeitos dissipativos da flutuação de vazão desde o gerador de pulsos até a placa de orifício. Desta forma, a vazão que atravessa a placa pode ser obtida medindo-se a vazão  $Q_0$  e os parâmetros dissipativos da onda,  $Ra$  e  $\tau$ .

Para obter os parâmetros  $Ra$  e  $\tau$ , torna-se necessário medir por outro meio a vazão total instantânea  $Q_i(t)$  que passa pela placa. A medição desta vazão é realizada experimentalmente através do sistema de medição dinâmica (12), medindo-se o experimentalmente o diferencial instantâneo de pressão na placa,  $\Delta P(t)$ . Desta forma, a vazão é obtida experimentalmente por meio da relação

$$Q_T(t) = k [\Delta P(t)]^a \quad (5)$$

onde  $k$  e  $a$  são constantes obtidas através da calibração em regime permanente da placa de orifício. Isto somente é possível pelo fato dos transdutores utilizados serem capazes de captar as variações de pressão no tempo, isto é, o limite de aplicação desta equação para regime transiente dependerá das características dinâmicas dos transdutores. Para garantir que esta equação seja válida para toda a faixa de valores utilizados neste trabalho, é necessário trabalhar dentro da faixa prevista em normas, que equivale a 10% da frequência de resposta do transdutor.

Desta forma, a determinação experimental dos parâmetros  $Ra$  e  $\tau$  é obtida graficamente, através da comparação da curva teórica obtida utilizando-se a equação 1 com a curva baseada em dados experimentais e expressa pela equação 5, obtida diretamente pelo sistema de aquisição de dados.

Um sensor de posição indica a posição do valor máximo do pulso, equivalente à metade do curso do pistão. Comparando-se o instante de tempo em que ocorre o valor máximo do pulso dentro do cilindro com o instante de tempo em que ocorre o valor máximo do pulso na placa de orifício, obtém-se o valor do atraso da onda de vazão ( $\tau$ ). O valor  $Ra$  é obtido através da relação entre o valor máximo do pulso que atravessa a placa e o valor máximo do pulso dentro do cilindro.

A Figura 2 apresenta as curvas geradas pelas equações 1 (pulso de vazão gerado no cilindro) e 5 (pulso de vazão na placa) para uma determinada frequência e para um valor específico de  $Q_0$ . Os valores de  $Ra$  e  $\tau$  representam a razão de amplitude e a fase entre as curvas, respectivamente.

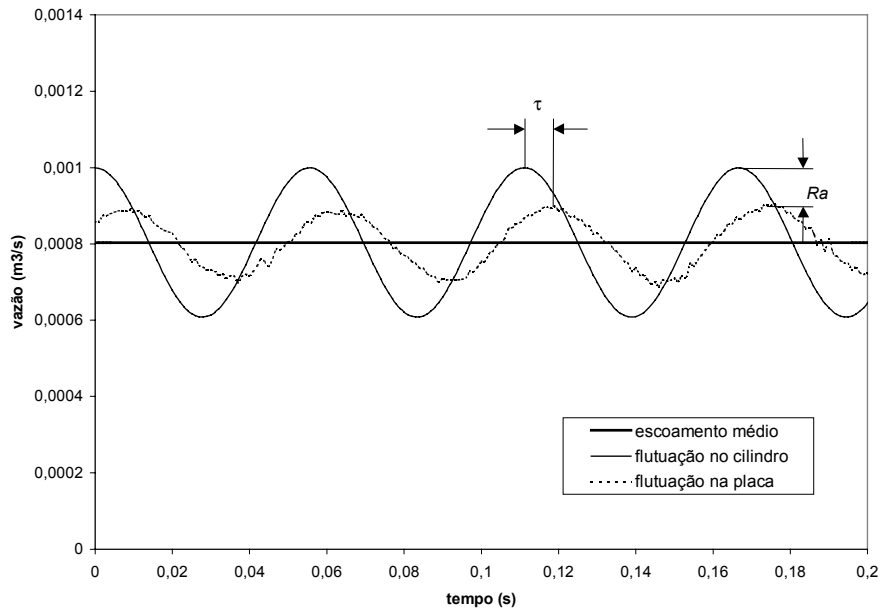


Figura 2. Flutuação de vazão no cilindro e na placa de orifício.

O comportamento dinâmico do escoamento e, portanto, as características dinâmicas da propagação da onda podem ser estudadas através dos parâmetros  $Ra$  e  $\tau$ , os quais dependem basicamente da frequência aplicada ao sistema, considerando-se os demais parâmetros constantes.

Para escoamentos em tubulações de pequeno diâmetro, as normas recomendam a utilização de tomadas de canto (“corner taps”) e um excelente acabamento da superfície interna da tubulação. Por este motivo, além da utilização de tomadas de canto, optou-se pela utilização de acrílico como material empregado na construção da tubulação, já que este material permite obter com muita facilidade um alto padrão de acabamento superficial.

O fluido utilizado no banco de fluxo foi o óleo hidráulico Mobil DTE 24. No presente trabalho, os testes foram efetuados para temperaturas do fluido de trabalho entre 45 e 47°C.

#### 4 – Resultados

Os resultados obtidos são apresentados para os diversos parâmetros envolvidos e comparados para as duas placas em estudo. As curvas de calibração relativas aos coeficientes de vazão em regime permanente para as duas placas utilizadas são mostradas na Figura 3.

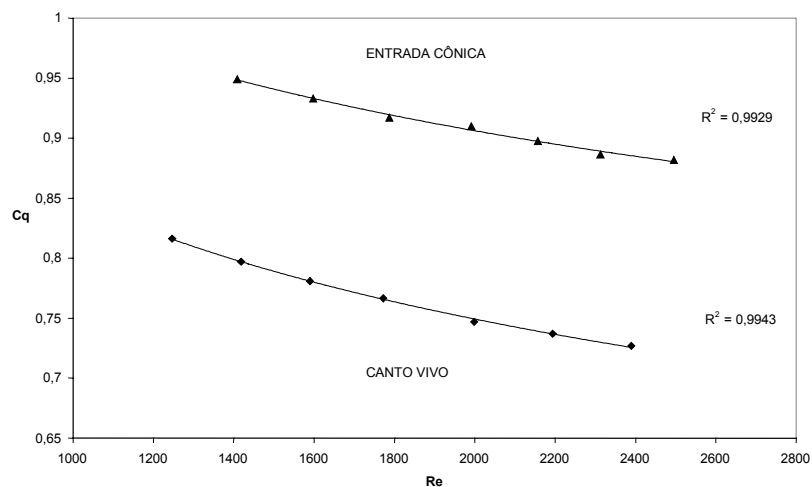


Figura 3. Coeficiente de vazão em regime permanente para as placas de canto vivo e entrada cônica

O amortecimento da onda de vazão, representado por  $Ra$ , é mostrado nas Figuras 4 e 5, para 3 valores distintos de  $Q_0$ . Nota-se que o amortecimento da onda de vazão praticamente não depende da

vazão da bomba  $Q_o$ , sendo apenas função da frequência de pulsação aplicada ao sistema. As curvas mostram, também, que o comportamento do amortecimento do pulso não é muito diferente para as duas placas. Para a faixa de frequências analisadas e para o fluido utilizado, a razão de amplitudes variou entre 0,4 a 0,88.

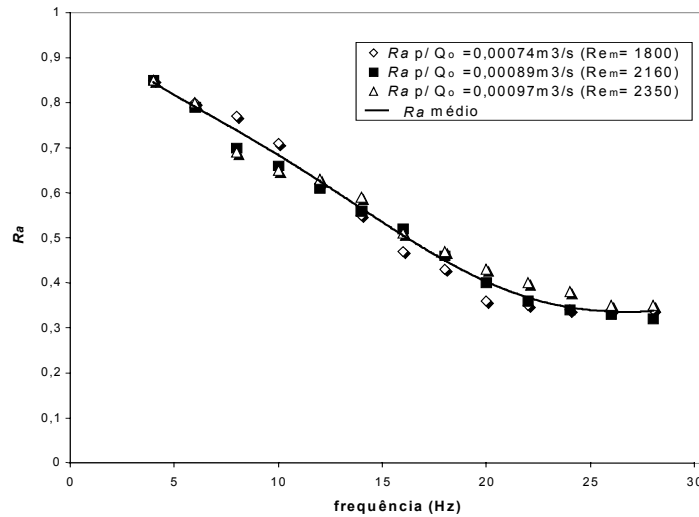


Figura 4. Razão de amplitudes ( $Ra$ ) para a placa de canto vivo.

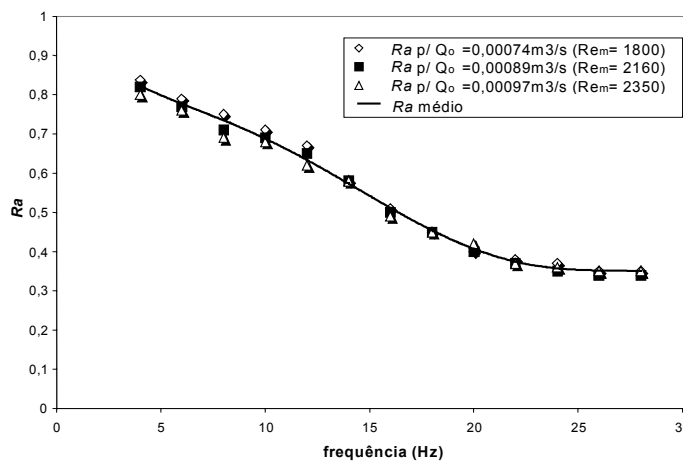


Figura 5. Razão de amplitudes ( $Ra$ ) para a placa de entrada cônica.

As Figuras 6 e 7 mostram os gráficos obtidos para a variação da fase com a frequência de pulsação, para diferentes valores da pressão média à montante da placa de orifício. Por comodidade, a fase presente nos gráficos é expressa em radianos e representa a defasagem entre a curva de vazão gerada no cilindro do gerador e a vazão que passa pela placa de orifício. As Figuras 6 e 7 mostram que a fase depende da pressão média do sistema. Esta pressão média do sistema é função da vazão média  $Q_o$  entregue pela bomba e representa a rigidez do sistema. Nota-se que a fase é ligeiramente maior para pressões médias (vazões médias  $Q_o$ ) menores, indicando que o atraso da onda depende da maior ou menor rigidez do sistema.

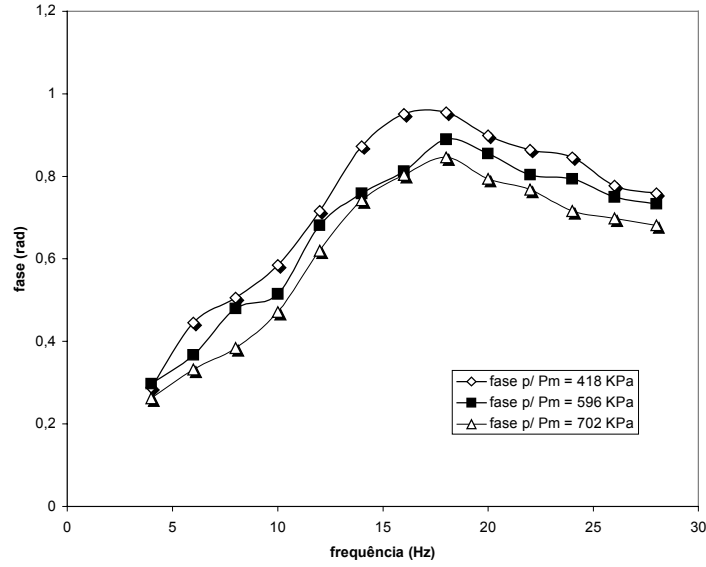


Figura 6. Fase para a placa de canto vivo.

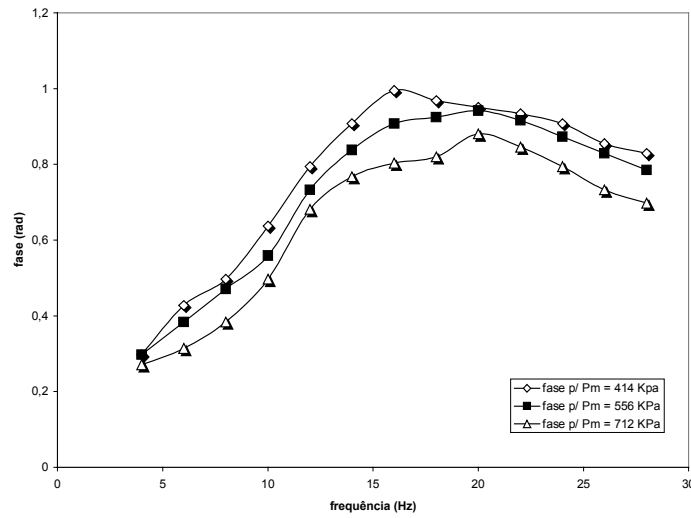


Figura 7. Fase para a placa de entrada cônica.

As curvas de erro foram obtidas com base na análise de 50 vazões diferentes, utilizando 13 frequências de pulsação, de 4 até 28Hz, com incrementos de frequência de 2 em 2Hz. As Figuras 8 e 9 mostram os erros devido à presença de pulsação no escoamento médio para 5 diferentes vazões. O erro foi calculado através da equação 6 [ISO TR 3313].

$$E_p = \left( \frac{\overline{\Delta p_p}}{\overline{\Delta p_{ss}}} \right)^{1/2} - 1 \quad (6)$$

onde  $\overline{\Delta p_p}$  = pressão diferencial média medida durante a pulsação;

$\overline{\Delta p_{ss}}$  = pressão diferencial média medida sob condições estáticas para as mesmas condições.

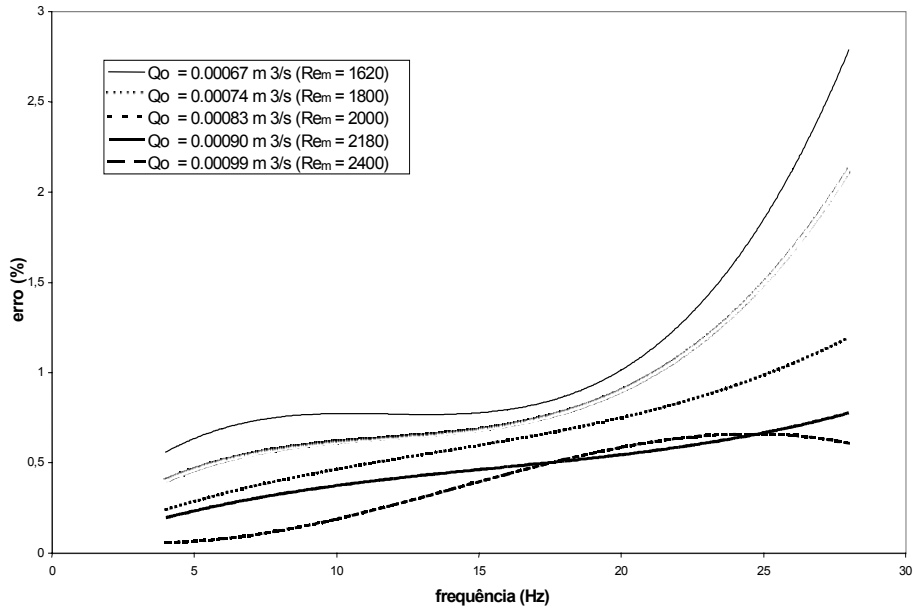


Figura 8. Curvas de tendência para os erros devido à pulsação obtidos para 5 valores de  $Q_o$  – placa de canto vivo.

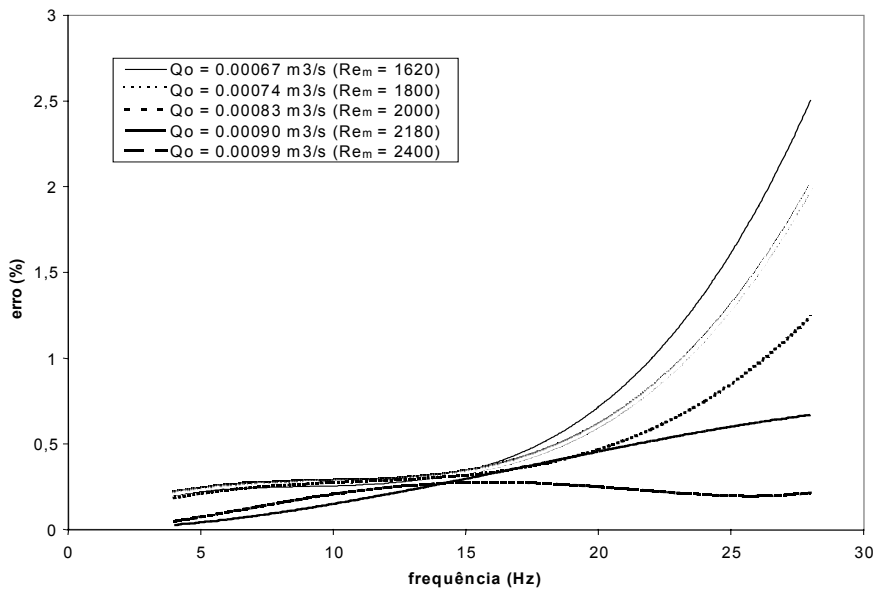


Figura 9. Curvas de tendência para os erros devido à pulsação obtidos para 5 valores de  $Q_o$  – placa de entrada cônica.

## 5 – Discussão dos resultados

Comparando-se as curvas mostradas na Figura 3, percebe-se, pela inclinação das curvas, que a placa com entrada cônica fornece coeficientes de vazão ligeiramente mais estáveis, para a faixa de vazões utilizada. Coincidência ou não, esta é a placa recomendada pelas normas para escoamentos em tubulações de pequenos diâmetros e com menores números de Reynolds [BS 1042].

Em todos os testes realizados, constatou-se que o parâmetro  $Ra$  decresce com o aumento da frequência, não variando significativamente com a vazão  $Q_o$ , para nenhuma das placas estudadas.

O comportamento da fase está intimamente ligado ao nível de pressão presente no escoamento. A fase cresce gradativamente até um valor máximo, a partir do qual começa a decrescer, sendo que o valor máximo atingido depende do nível médio de pressão do sistema. Isso pode ser atribuído ao fato de que

quanto maior é a pressão, menor é a quantidade de ar diluído no óleo, tornando-o mais incompressível (mais rígido). Pelos resultados obtidos, pode-se perceber que este parâmetro também não variou significativamente com o tipo de placa utilizada.

Para vazões médias abaixo de  $Q_0 = 0,00095 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Re_m = 2300$ ), todas as curvas obtidas mostram que os erros tendem a aumentar com o aumento da frequência da pulsação e a diminuir com o aumento da vazão média, dentro da faixa de vazões analisada. Acima deste valor, os erros obtidos são inferiores a 0,5% para qualquer frequência de pulsação imposta ao sistema. Percebe-se também que há pouca influência da vazão sobre os erros obtidos para a frequência de 4Hz.

As Figuras 8 e 9 mostram que a medição da vazão média em escoamentos sujeitos à pulsação depende do nível de pressão do sistema, obtendo-se erros menores para vazões médias maiores ( $Q_0$ ), onde o nível de pressão do sistema é maior. Comparando-se as Figuras 8 e 9, percebe-se que os erros encontrados para a placa de entrada cônica são menores que aqueles encontrados para a placa de canto vivo para frequências menores que 20Hz. Em todos os casos, a rigidez do sistema constitui um parâmetro importante no comportamento dinâmico do sistema. Pode-se concluir que a utilização de transdutores com características dinâmicas para medir vazões em regime permanente, quando flutuações de vazão estão presentes no escoamento, podem acarretar erros maiores que os obtidos por transdutores que não captam estas flutuações, ou seja transdutores que não apresentam características dinâmicas, atuando estes últimos como filtro das flutuações existentes.

## 5 – Conclusão

Foi utilizada uma metodologia experimental para a determinação dos parâmetros envolvidos na propagação de pulsos de vazão em tubulações de diâmetros inferiores a 40 mm e escoamentos laminares. Foram comparadas duas placas de orifício e a influência de suas geometrias sobre a propagação de pulsos de vazão, bem como na medição de vazão em escoamentos sujeitos a pulsação. A utilização de transdutores com características dinâmicas para medir vazões em regime permanente acarretam erros significativos quando flutuações de vazão estão presentes no escoamento. Para a faixa de vazões utilizadas, a medição de vazão média na placa de entrada cônica sofreu menor influência da pulsação presente no escoamento do que na placa convencional de canto vivo. O estudo realizado acerca do comportamento dos parâmetros relativos à propagação de pulsos de vazão é, com certeza, de grande valia no desenvolvimento de modelos numéricos de simulação de escoamentos pulsantes em placas de orifício. Ao mesmo tempo, em instalações onde transdutores de pressão com características dinâmicas são utilizados para medir vazões em regime permanente, estes valores somente podem ser obtidos pelo cálculo de valores médios de vazão, os quais são afetados pelas flutuações de vazão presentes e que são captadas pelos transdutores. Desta forma, a utilização de transdutores com características dinâmicas permite a obtenção de maiores informações do escoamento, sendo muito útil quando o objetivo é captar os transientes do escoamento. No entanto, quando a grandeza de interesse é a vazão em regime permanente, cuidados devem ser tomados nos cálculos das médias para que estes valores não sejam afetados pelas flutuações do escoamento.

## 6 –Referências bibliográficas

BS 1042 – Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits (Section 1.2) – British Standard Institution, 1989.

Figliola R. S. and Beasley D. E.- Theory and design for mechanical measurements, John Wiley & Sons, 1991.

Guia para a Expressão da Incerteza de Medição – Segunda Edição – Associação Brasileira de Normas Técnicas / Sociedade Brasileira de Metrologia, 1998.

ISO 5167-1 – 1991 – Measurements of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices – part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-section Conduits Running Full – International Organization for Standardization, 1991.

ISO/TR 3313 - Measurements of Pulsating Flow in a Pipe by Means Orifice Plates, Nozzles or Venturi Tubes Inserted, in Particular in the case of sinusoidal or Square Wave Intermittent Periodic Type Fluctuations – International Organization for Standardization, 1994.

Valle, R. M. – Escoamento Laminar em Placas de Orifício – Análise Teórica e Experimental em Regime Permanente e Transiente, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem à FAPEMIG pela ajuda financeira para a construção do Banco de Fluxo e à CAPES concessão da bolsa de mestrado para o aluno.



## **STUDY OF THE PRESSURE PULSE PROPAGATION AND ITS INFLUENCE IN THE MEASUREMENT ERROR OF THE AVERAGE FLOW RATE UNDER LAMINAR FLOW REGIME PASSING THROUGH AN ORIFICE PLATE**

**Cláudio Gomes da Costa**

Universidade federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Antônio Carlos,6627 – Campus Universitário  
Belo Horizonte – M.G.  
[claudiogcosta@hotmail.com](mailto:claudiogcosta@hotmail.com)

**Ramón Molina Valle**

Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Antônio Carlos,6627 – Campus Universitário  
Belo Horizonte – M.G.  
[ramon@vesper.demec.ufmg.br](mailto:ramon@vesper.demec.ufmg.br)

**Abstract:** *In this work a flow bench for an experimental study of transient flow in an orifice plate flow meter was build. For the experimental study of the dynamic flow, the propagation of a well-known fluctuation flow was related to a pressure fluctuation, allowing the dynamic calibration of the measurement system. Fluctuation flows was generated during a middle flow also well-known, by harmonic movement of a piston. The pressure variation through the orifice was experimentally determined by pressure transducers connected to a dynamic data acquisition system. Transient flow was determined by the instantaneous pressure gradients in the orifice plate and by the width and phase's fluctuation flow through the orifice plate. Thus, the middle flow measurement errors due the frequency of pulsation allowed to determine the pulsating flow influence on the flow measurement in orifice plates. The experimental flow bench and the data system acquisition allowed to validate numerical methods related with the study of pulsating flows.*

**Keywords:** Pulsating Flow, Orifice Plate, Pulsating Measurement Error