

Monografia de Graduação

Influência de parâmetros dimensionais e geométricos em placas de orifício na determinação da vazão

João Batista de La Salles Junior

Natal, fevereiro de 2010

Resumo

O trabalho tem como objetivo avaliar a influência de grandezas macrogeométricas, como a circularidade, microgeométricas como a rugosidade superficial, e dimensionais em placas de orifício na determinação da vazão. O controle dessas grandezas é extremamente importante e necessário quando temos em vista a realização de qualquer projeto. Estão especificadas nas diversas áreas dentro da engenharia, dentre elas à medição de vazão, uma das áreas de grande destaque na indústria. Todas as máquinas ou peças quando projetadas são representadas através de desenhos contendo suas dimensões nominais, com as respectivas tolerâncias dimensionais e/ou geométricas. Depois de fabricadas, o controle dimensional e geométrico comprovará se as peças ou máquinas foram confeccionadas de acordo com o projeto. Em uma placa de orifício que apresenta variações geométricas tais como ovalização do orifício e planeza das faces, valores maiores ou menores que seu diâmetro nominal poderão ser encontrados. Estas variações dimensionais e geométricas são determinadas através de medições mais sofisticadas, como a máquina de medir por coordenadas, e dependendo dos seus valores podem afetar o resultado da medição de vazão, particularmente para medições em grandes escalas podendo significar grandes desperdícios de líquidos ou gases. No trabalho serão apresentadas as incertezas na medição de vazão com placas de orifício, e será feita uma análise comparativa dos dados obtidos com os requisitos estabelecidos em regulamentos e normas técnicas.

Abstract

This work aims to evaluate the influences of macro-geometric (circularity), micro-geometric (surface roughness) and dimensional quantities on orifice plates to the flow determination. Dimensional and geometric quantities are extremely important and also necessary when we have in mind the accomplishment of any project being directly linked with several areas of the engineering. All designs of machines or pieces are represented through drawings containing their nominal dimensions with the respective dimensional and/or geometric tolerances. After it had been manufactured the dimensional and geometric control will prove if the pieces or machines were made in agreement with the project. Therefore, the orifice of an orifice plate can come oval for effect of deformation and the measure of its diameter can result in two: the maximum and minimum diameters. Then, taking big flows into consideration it can mean large wastes of liquid and gas. The work will also present the tolerances imposed to the dimensional and geometric parameters related to orifice plates according to the norms and technical regulations. The measurements are performed using a coordinate measuring machine (CMM) and a profilometer. Finally, we will express the uncertainty sources associated to flow meters, especially to the orifice plates.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1. Medição de vazão.....	9
2.1.1. Condição Padrão.....	10
2.1.2. Medidores por obstrução.....	10
2.1.2.1. Tipos de medidores.....	10
2.1.2.2. Placas de Orifício (<i>orifice plates</i>).....	11
2.1.3. Número de Reynolds.....	12
2.1.4. Equacionamento para escoamentos incompressíveis.....	13
2.1.5. Equação para fluidos reais.....	16
2.1.6. Coeficiente de descarga (<i>discharge coefficient</i>).....	17
2.1.7. Tomadas de impulso em placas de orifício.....	19
2.1.8. Inspeção de parâmetros construtivos em placas clássicas.....	22
2.1.9. Cuidados complementares.....	27
2.2. Tolerâncias.....	28
2.2.1. Tolerâncias geométricas.....	28
2.2.1.1. Diferença do plano (planeza).....	29
2.2.1.2. Diferença do círculo (circularidade).....	31
2.2.1.3. Diferença Angular.....	31
2.2.2. Tolerância de acabamento superficial.....	32
2.2.2.1. Rugosidade.....	32
2.2.3. Análise de dimensões.....	33
2.3. Automação do controle dimensional.....	34
2.3.1. Máquinas de medir por coordenadas.....	34
2.3.2. Configurações mecânicas.....	35
2.4. Incerteza de medição.....	36
2.4.1. Incerteza na medição de petróleo e gás.....	36
2.4.2. Incerteza na medição de vazão (placa de orifício).....	37
2.4.3. Incerteza sobre o coeficiente de descarga.....	38
3. METODOLOGIA.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5. CONCLUSÕES.....	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

Grandezas dimensionais e geométricas são extremamente importantes e necessárias quando desenvolvemos um projeto. Estas grandezas estão ligadas diretamente com diversas áreas dentro da engenharia, em particular para dispositivo medidor de vazão, uma das áreas de grande destaque na indústria do petróleo, com várias aplicações, dentre elas, as medições de gases industriais e combustíveis.

Todas as máquinas ou peças quando projetadas são representadas através de desenhos contendo suas dimensões nominais, com as respectivas tolerâncias dimensionais e geométricas. Depois de fabricadas, o controle dimensional e geométrico comprovará se as peças ou máquinas foram confeccionadas de acordo com o projeto. Na medição de vazão, as placas de orifício são dispositivos de baixo custo de instalação e manutenção, sendo, portanto, as mais utilizadas na maioria das aplicações industriais. Em uma placa com um diâmetro nominal de 25 mm em seu orifício, na prática podem ser encontrados valores maiores ou menores que 25 mm, evidentemente dentro da tolerância especificada, além de variações geométricas como ovalização do orifício, e variação de planeza das faces. Estas variações dimensionais e geométricas devem ser determinadas através de medições mais sofisticadas, com máquina de medir por coordenadas ou medidores de forma, e dependendo dos seus valores podem afetar o resultado da medição de vazão, particularmente para medições em grandes escalas podendo significar grandes desperdícios de líquidos ou gases.

Como sabemos, o escoamento da produção de petróleo e gás natural ocorre por caminhões, trens, navios e dutos que interligam poços a refinarias e terminais. A rede dutoviária, no entanto, é bastante utilizada e adequada para o transporte de grandes volumes de petróleo, derivados e gás natural, por isso a calibração dos medidores de vazão é fundamental para a medição exata dos volumes para garantir não só a cobrança correta da carga encomendada, como também a comprovação de que ela efetivamente chegou ao seu destino. Para se ter uma idéia da importância comercial da medição de vazão, tomemos o exemplo do gasoduto Bolívia-Brasil que transporta gás natural da Bolívia até São Paulo. Este gasoduto foi projetado para transportar até 30 milhões de metros cúbicos por dia de gás natural. Estimando-se um custo de venda de US\$ 0,50 por metro cúbico, vê-se que um erro sistemático de apenas 1% em um medidor de vazão está associado a uma quantia de cerca de US\$ 150.000 por dia (FERNANDO, Luis A. Azevedo, PUC-RJ). Há um esforço, atualmente, de vários laboratórios internacionais (rede internacional de laboratórios de medidas e certificação) para aprimorar os medidores de vazão e reduzir as incertezas de medição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Medição de vazão

O medidor de vazão é um instrumento capaz de medir a massa (medidor de vazão mássica) ou o volume de um fluido (medidor de vazão volumétrica) que escoar em uma tubulação ou um canal em um determinado intervalo de tempo. A vazão poderá ser volumétrica (volume na unidade de tempo, usualmente representada por Q) ou mássica (massa na unidade de tempo, muitas vezes representada por m ou M). Como trataremos no projeto da vazão volumétrica, conversões de várias unidades que poderemos estar utilizando, entre diferentes sistemas de unidades, são apresentadas na Tabela 1.

<i>Vazão Volumétrica</i>		
Para Converter De:	Para	Multiplique por:
m^3/s	ft^3/min	$2.1189 \cdot 10^3$
m^3/s	gal/min	$1.5850 \cdot 10^4$
m^3/s	l/min	16.6667
m^3/h	ft^3/min	$5.8858 \cdot 10^{-1}$
m^3/h	gal/min	$4.4028 \cdot 10^0$

Tabela 1 – Conversão de unidades

A medição de vazão por elementos primários deprimogênicos, em particular por placas de orifício, apesar de ser a mais antiga, ainda é a mais utilizada em todo o mundo, por dar origem a medidores extremamente versáteis, empregáveis na maioria das aplicações industriais. O elemento primário, diretamente em contato com o fluido, é o primeiro elo de uma malha de medição. A malha completa é geralmente complementada por um transmissor de pressão diferencial e um instrumento receptor.

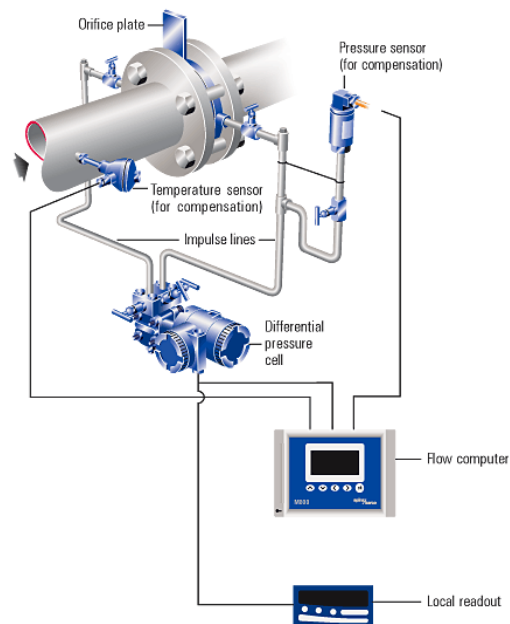


Fig. 1 - Esquema de malha de medição por placa de orifício.

2.1.1. Condição Padrão

Em medição de gases ou vapores (isto é, fluidos altamente compressíveis), é comum que a vazão volumétrica seja referenciada a uma condição específica de pressão e temperatura. Esta condição é denominada de condição normal, condição *standard* ou condição padrão, dependendo dos valores especificados de pressão e temperatura. O valor de pressão mais utilizado como referência é: 1,01325 bar, isto é, 1 atm, ou 760 mmHg ou ainda 29,92 inHg. Os valores de temperaturas mais utilizados como referências são: 0°C, 15°C ou 60°F (15,55°C). A condição de referência que é usualmente designada de *CNTP* (isto é, *Condição Normal de Temperatura e Pressão*) tem os valores respectivos de pressão e temperatura dados por: (1 bar ; 0 °C). A condição de referência que é usualmente designada de Condição Padrão tem os valores (1 bar ; 60 °F). Denomina-se de vazão ‘in situ’ aquela correspondente à pressão e temperatura do fluido no local da medição.

2.1.2. Medidores por obstrução

2.1.2.1. Tipos de medidores

Trata-se de um dos sensores ou dispositivos mais usuais de medida de vazão, e os diversos modelos e tipos constituem cerca de 50% dos equipamentos existentes. Seu princípio de medição é baseado na variação da pressão provocada por algum tipo de obstrução, que é então relacionada à vazão. Os medidores mais comuns são do tipo *placa de orifício*, bocal e ainda Venturi.

2.1.2.2. Placas de Orifício (*Orifice Plates*)

As placas de orifício são um tipo de medidor de vazão por obstrução amplamente usadas na indústria do petróleo, onde sua configuração mais comum é construída com um orifício concêntrico montado entre flanges, que interrompe uma canalização ou canal fechado. Também são encontradas placas com orifícios excêntricos e segmentais, escolhidos em função do tipo de impurezas encontradas no fluido.



Fig. 2 – Placas de orifício (com orifício concêntrico)

A montagem da placa de orifício requer um comprimento de tubo reto a montante do dispositivo de cerca de 10 a 30 vezes do diâmetro para garantir o desenvolvimento completo da camada limite cinética. Já a colocação das tomadas de pressão diferencial não segue uma única padronização, e são escolhidas conforme a necessidade da instalação.

As placas de orifício são dispositivos de baixo custo de instalação e manutenção. Sua grande desvantagem reside na perda de carga que impõe ao escoamento, em função da expansão a jusante da placa.

Nas figuras abaixo estão alguns dos pontos mais importantes a serem medidos nas placas de orifício, na calibração deste tipo de instrumento.

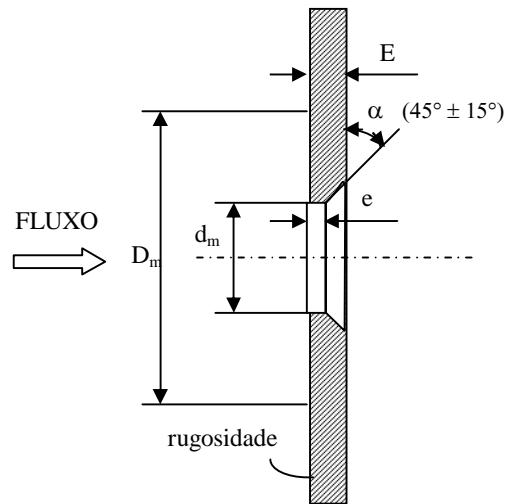


Fig. 3 - Simbologia em placas de orifício

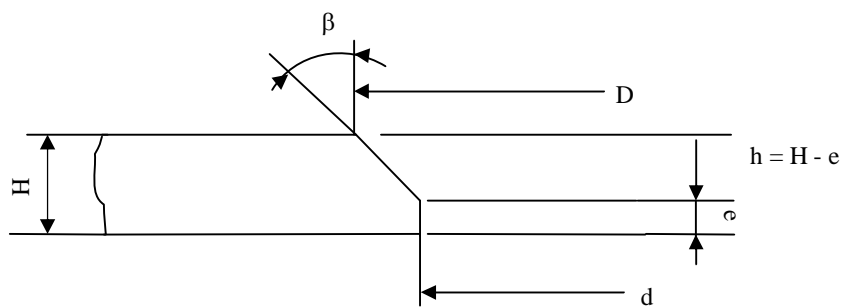


Fig. 4 - Parâmetros medidos em placas de orifício

2.1.3. Número de Reynolds

Osborne Reynolds (1842-1912) desenvolve um “identificador de regime” de escoamento baseado em parâmetros cujas unidades, uma vez efetuada a operação, resultam em valor adimensional:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Onde:

V a velocidade (m/s);

D o diâmetro (m);

ν a viscosidade (m^2/s).

Quando queremos que o número de Reynolds se refira a uma seção onde o diâmetro é D , costuma-se escrever R_D . Excepcionalmente, nas referências sobre a medição de vazão, o número de Reynolds se refere ao diâmetro d e, nesse caso, escreve-se R_d .

O número de Reynolds é válido para líquidos, gases e vapores e permite definir três regimes de escoamento:

- Abaixo de $R_D = 2000$, regime laminar;
- Entre $R_D = 2000$ e 4000 , regime transitório;
- e acima de $R_D = 4000$, regime turbulento.

O número de Reynolds pode também ser calculado pela fórmula:

$$R_D = \frac{4Q_m}{\pi D \mu_p} = \frac{1,273Q_m}{D \mu_p}$$

sendo: Q_m a vazão mássica (kg/s);

D o diâmetro da tubulação (m);

μ_p a viscosidade do fluido (Pa.s).

2.1.4. Equacionamento para escoamentos incompressíveis

A teoria da medição de vazão por pressão diferencial é fundamentada em leis físicas conhecidas. As equações teóricas devem ser complementadas por coeficientes práticos, para que a vazão possa ser medida com precisão. A teoria considera a equação da continuidade e a equação de Bernoulli.

A equação da continuidade aplica-se diretamente a líquidos incompressíveis que fluem em tubulação completamente preenchida, cuja seção varia de A_1 para A_2 . Num determinado instante, ao longo da tubulação, a vazão volumétrica Q é igual ao produto da velocidade V pela seção A :

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = Q$$

A equação de Bernoulli foi desenvolvida visando estabelecer a relação entre a velocidade e pressão num filete líquido aonde o diâmetro (muito pequeno, por hipótese) varia num certo trecho, passando da seção 1 à seção 2 como na situação apresentada, mostrada nas figuras que seguem:

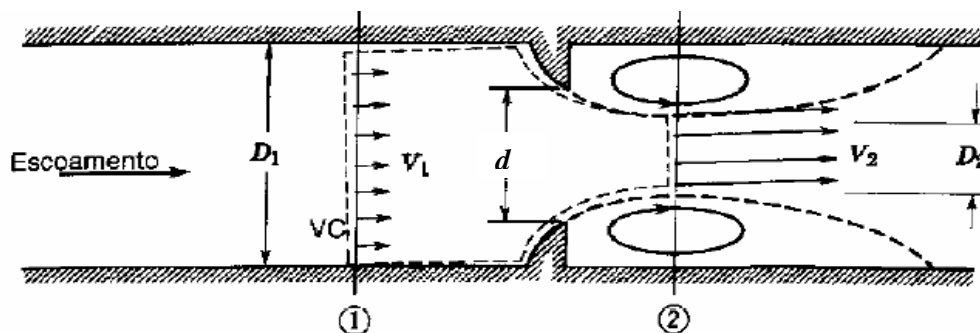


Fig. 5 – Escoamento num medidor por obstrução genérico (Fonte: FOX e MCDONALD, 1995)

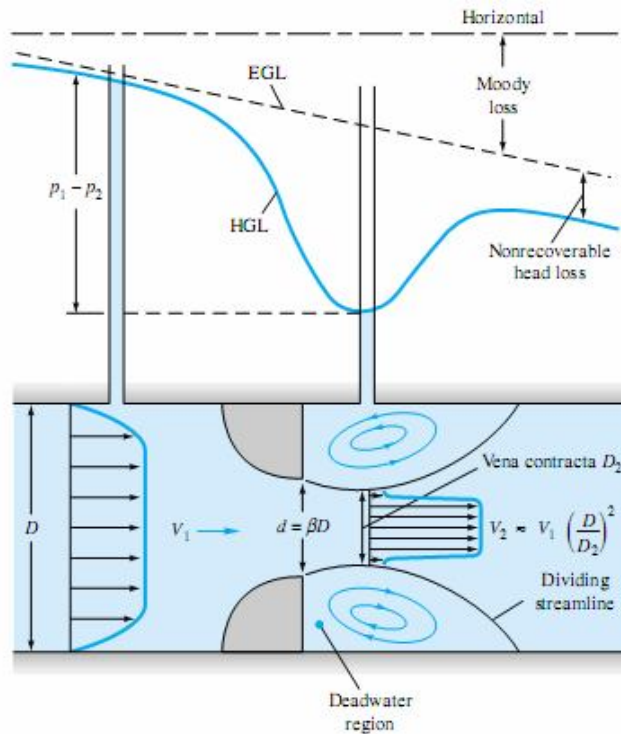


Fig. 6 - Escoamento num medidor genérico por obstrução

(Fonte: FRANK, M. White. Fluid Mechanics, 1998)

A equação da energia sem perdas, ou equação de Bernoulli, aplicada ao fluido escoando ao longo de uma linha de corrente, é dada por:

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z = const$$

Como não há diferença de altura nesse tipo de medidor pode-se simplificar a equação anterior, eliminando-se o termo potencial. Assumindo-se que a massa específica é constante (escoamento incompressível) e tomando-se dois pontos de observação 1 e 2 ao longo da linha de corrente, obtém-se:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2$$

A validade do equacionamento dado pelas equações anteriores é restrita a condições de escoamento permanente, incompressível, ao longo de uma mesma linha de corrente, sem atrito, sem diferença de cota z , e com velocidade uniforme ao longo dos pontos ou seções de observação 1 e 2. São considerações que serão adotadas em todo o projeto.

Respeitadas essas condições, a equação da continuidade é dada por:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad \text{ou} \quad \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 = \beta^2 \quad \text{com} \quad \beta = \frac{D_2}{D_1}$$

sendo D_1 o diâmetro da canalização e D_2 o diâmetro da veia contraída, resultante da obstrução. A equação da energia é dada por:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right]$$

que combinadas resultam numa expressão para a velocidade na descarga da obstrução em função da diferença de pressão que segue:

$$\frac{Q}{A_2} = V_2 \approx \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4} \right)} \right]^{1/2}$$

Essa expressão é imprecisa, pois não leva em conta o atrito do escoamento, e também porque a determinação de D_2 não é prática. Para contornar a situação, emprega-se o diâmetro da obstrução d , ficando:

$$\beta = \frac{d}{D_1}$$

e introduzindo-se o coeficiente adimensional de descarga C , para efetuar a correção dos problemas de atrito, tal que:

$$Q = A_r V_t = CA_r \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^4)} \right]^{1/2}$$

Onde:

$$C = \frac{Q_{real}}{Q_{teórica}} = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}}$$

A partir dessas equações, define-se o coeficiente de vazão K , dado pelo produto do coeficiente de descarga C e pelo fator de velocidade de aproximação E , tal que:

$$K = CE \quad \text{onde} \quad E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Assim, é possível reescrever a equação da vazão como:

$$Q = KA_t \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

$$Q = CE\beta^2 A_t \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Substituindo A_t por $\pi D^2/4$ e considerando que $\pi/4\sqrt{2} = 1,1107$, temos:

$$Q = 1,1107 \cdot CE\beta^2 \cdot D^2 \cdot \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (\text{Eq.1})$$

com Q em m^3/s ; p_1 e p_2 em Pa ; D em m ; ρ em kg/m^3 .

O produto $CE\beta^2$ pode ser tratado em conjunto, sendo C uma característica de cada elemento primário e o produto $E\beta^2$ representativo das dimensões geométricas.

2.1.5. Equação para fluidos reais

A equação de Bernoulli foi desenvolvida para fluidos incompressíveis. Em decorrência disso, nela consta uma única massa específica de operação, sem os índices $_1$ e $_2$. Com fluidos compressíveis, a massa específica, quando na mudança de pressão, se altera quando o fluido passa pelo elemento primário. É necessário, portanto, introduzir um fator que corrija tal efeito: a equação generalizada para fluidos compressíveis inclui o parâmetro ε :

$$Q = 1,1107 \cdot CE\beta^2 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

O fator ε , chamado de “fator de expansão isentrópica”, é aplicado para gases e vapores e representado por uma equação empírica, válida para placas de orifício com tomadas “*flange taps*”, “*corner taps*” e “*radius taps*”. Para tomadas $2\frac{1}{2}D$ e $8D$, outros parâmetros são levados em questão (Delmée, 2003).

Caso a pressão do gás seja a da tomada a montante, usa-se a equação:

$$\varepsilon_1 = 1 - \left[(0,41 + 0,35\beta^4) \cdot (\Delta p / P) / k \right]$$

com Δp e P (abs.) nas mesmas unidades e sendo k o coeficiente isentrópico.

Caso a pressão do gás seja a da tomada a jusante, a densidade do gás deve ser calculada considerando-se a pressão P_2 e a equação será:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \left[(1 + \Delta p / P_2) \right]^{0,5}$$

Entretanto, na norma ISO 5167*98, a equação apresentada para o cálculo de ε foi alterada em relação à anterior, de 1991 (Delmée, 2003), para:

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \cdot [1 - (P_2 / P_1)^{1/k}]$$

2.1.6. Coeficiente de descarga (*Discharge Coefficient*)

A equação de Bernoulli não pode ser aplicada diretamente para escoamentos reais, já que estes são muito diferentes do filete líquido adotado como critério inicial (Delmée, 2003). Num escoamento real, com número de Reynolds superior a 4000, ou seja, escoamento turbulento, a velocidade não é igual à velocidade média e todos os pontos, e as linhas fluidas não acompanham o formato geométrico da tubulação, especialmente no caso de placas de orifício, como mostram as figuras abaixo:

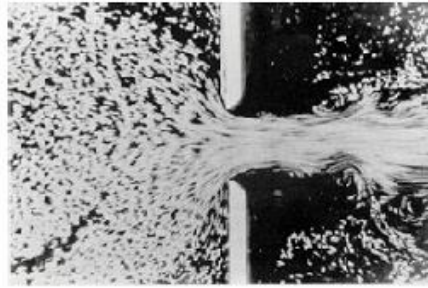
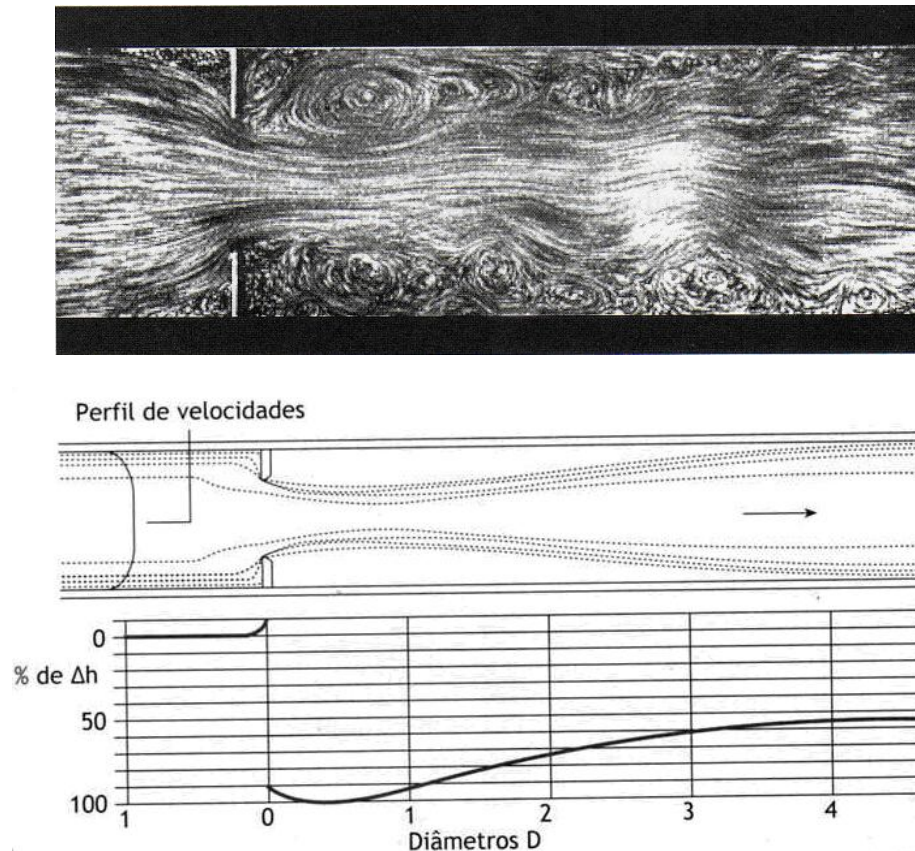


Fig. 7 - Escoamento real por placa de orifício. (Fonte: FRANÇA, Fernando A., 2007)



Figs. 8 e 9 - Escoamento real e escoamento idealizado, com variações de pressão ao longo da linha. (Fonte: Delmée, 2003)

Com o propósito de permitir o uso prático da equação de Bernoulli, foi necessário introduzir o coeficiente de descarga C , que como citado anteriormente dá-se por:

$$C = \frac{\text{vazão real}}{\text{vazão teórica}}$$

Para estabelecer o coeficiente C , a vazão teórica é calculada a partir de medidas precisas das dimensões do elemento, da massa específica do fluido e da pressão diferencial. A vazão real é medida pelo tempo necessário para se preencher um determinado volume ou para completar um peso definido de líquido. Esses levantamentos são realizados em centros de pesquisas e universidades de diversos países, e os valores de C são “consolidados” em comitês internacionais de normalização (Delmée, 2003).

Os coeficientes de descarga dos elementos deprimogênicos são função do tipo de elemento primário, da posição das tomadas de pressão, do diâmetro da linha (D), do valor de β e do número de Reynolds (R_D).

De acordo com (Delmée, 2003), vários pesquisadores dedicaram-se a estudar a forma de representar essas curvas sob forma de equações chamadas de “empíricas” por representar resultados experimentais. Essa tarefa foi resolvida de forma diferente, ao longo do tempo, evoluindo junto com o progresso dos recursos do cálculo numérico e da disponibilidade da informática:

- Buckingham desenvolveu equações específicas para placas de orifício, uma para cada tipo de tomada.
- Jean Stolz apresentou uma única equação para placas de orifício com tomadas *corner taps*, *flange taps* e *radius taps*, um progresso muito grande em relação às anteriores, porém limitou sua aplicação a números de Reynolds relativamente elevados (R_D limite inferior = $1260\beta^2 D$).
- Reader-Harris e Gallagher aproveitaram a estrutura de Stolz e estenderam a aplicabilidade a números de Reynolds mais baixos, ao limite inferior do escoamento turbulento: 4000 ou $170\beta^2 D$, o maior.

A norma AGA3/ANSI/API 2530 (1991) adotou a equação empírica de Reader-Harris/Gallagher (RG), para representar o coeficiente de descarga C . Para os orifícios com tomadas de $2\frac{1}{2}D$ e $8D$ (*pipe taps*), a equação de Buckingham ainda é empregada pela AGA3 e seguida em toda a literatura sobre o assunto. A nova norma ISO 5167 adotou a equação de RG atualizada e estendida às tomadas *corner taps*, *flange taps* e *radius taps*, com parâmetros ligeiramente diferentes em relação a parâmetros como β , incertezas e dados laboratoriais considerados para cálculos estatísticos que geraram os parâmetros (Delmée, 2003).

As equações da nova norma ISO 5167 e AGA3 são mostradas no quadro comparativo abaixo:

AGA	eq. [3.10a]	ISO 5167*	eq. [3.10b]
$0,5961 + 0,0291\beta^2 - 0,229\beta^8$ $+ 0,000511 \cdot (10^6 \beta/R_D)^{0,7}$ $+ (0,21 + 0,0049A)\beta^4 (10^6/R_D)^{3,5}$ $+ (0,0433 + 0,0712 e^{-8,5 L_1} - 0,1145 e^{-6L_1}) \cdot$ $\cdot (1 - 0,23A) \cdot \beta^4 / (1 - \beta^4)$ $- 0,0116 [M'_2 - 0,52 M'_2{}^{1,3}] \beta^{1,1} \cdot (1 - 0,14A)$		$0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8$ $+ 0,000521 \cdot (10^6 \beta/R_D)^{0,7}$ $+ (0,188 + 0,0063A)\beta^{3,5} (10^6/R_D)^{0,3}$ $+ (0,043 + 0,08 e^{-10L_1} - 0,123 e^{-7L_1}) \cdot$ $\cdot (1 - 11A) \cdot \beta^4 / (1 - \beta^4)$ $- 0,031 [M'_2 - 0,8 M'_2{}^{1,1}] \beta^{1,3}$	
Se $D < 71,12$ mm, acrescentar o termo seguinte, com D em mm			
+ 0,003 (1 - β) [2,8 - (D/25,4)]		+ 0,011 (0,75 - β) [2,8 - (D/25,4)]	

* Edição ISO 5167 submetida à aprovação internacional em 1998, chamada a seguir ISO 5167*98.

$A = ((19\,000 \beta)/R_D)^{0,8}$, $M'_2 = 2 L'_2/(1 - \beta)$.

Tabela 2

- Para as tomadas *corner taps* (somente ISO 5167*98):

$$L_1 = L'_2$$

- Para as tomadas *flange taps* (AGA3 e ISO 5167*98):

$$L_1 = L'_2 = 25,4/D \text{ (sendo } D \text{ em milímetros)}$$

- Para as tomadas *radius taps* (somente ISO 5167*98):

$$L_1 = 1; L'_2 = 0,47$$

No trabalho está sendo considerada a equação para coeficientes de descarga de acordo com a norma ISO 5167-1, e para efeito de simplificação estamos supondo a utilização de tomadas *corner taps* para as devidas análises que serão feitas sob forma de cálculos.

2.1.7. Tomadas de Impulso em Placas de Orifício

a) Tomadas de Flange (*Flange taps*)

As tomadas de flange são de longe as mais populares. Os flanges para placas de orifício, já são feitos com os furos das tomadas, perfurados e com rosca, podendo ser do tipo rosqueado ou soldado.

Após os flanges serem rosqueados ou soldados na tubulação é necessário perfurar através da parede do tubo usando o próprio furo do flange como modelo e acesso. Os furos devem ser isentos de rebarbas e faceados com o tubo. No caso de flange tipo *welding neck* não é necessário refurar, mas deve-se tomar o cuidado com a soldagem deste com a tubulação. Eles devem estar concêntricos com a tubulação, e as rebarbas de solda dentro da tubulação devem ser eliminadas para evitar distúrbios na passagem do fluido os quais poderiam causar imprecisões na medição (SENAI-ES, 1999).

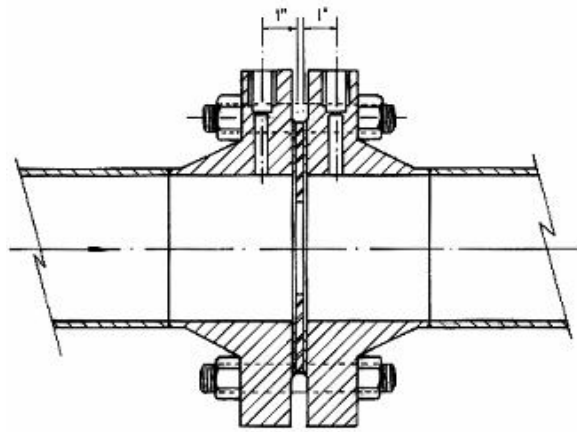


Fig. 10 - Tomada *flange taps*.

b) Tomadas de tubulações (*Pipe taps*)

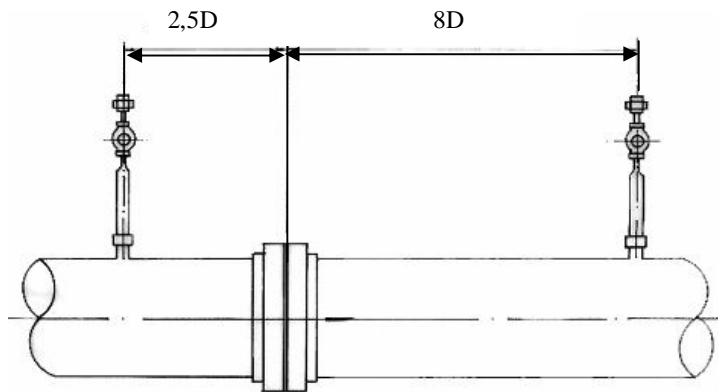


Fig. 11 - Tomadas *pipe taps*.

As tomadas de tubulação (montante: $2,5D$ do tubo distante da placa, jusante: $8D$ de distância), permitem a medição direta da perda de carga permanente atual. O diferencial de pressão é menor que em outros tipos de tomada, para a mesma vazão e mesmo diâmetro de orifício.

A rugosidade da parede a jusante pode criar uma perda de carga adicional e ocasionar erros na medição.

d) Tomada de Canto (*Corner taps*)

As tomadas de canto são constituídas nos flanges de placa e são usadas principalmente para tubos abaixo de 2 polegadas de diâmetro. A placa de orifício situa-se numa reentrância dos flanges. A tomada de pressão feita através de uma estreita passagem concêntrica num anel piezométrico entalhado na face do flange.

Suas vantagens são as mesmas das tomadas nos flanges, porém são mais sujeitas a entupimentos que as tomadas de flanges (SENAI-ES, 1999).

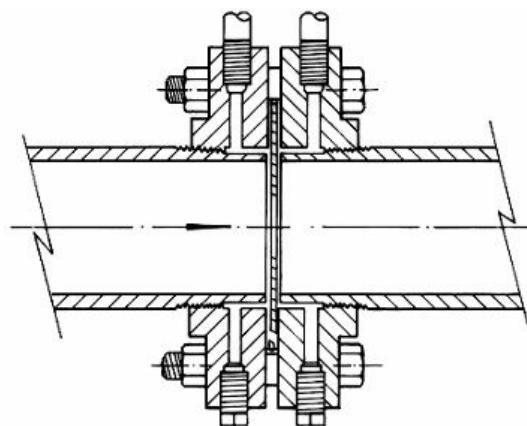


Fig. 12 - Tomadas *corner taps*.

e) Tomadas tipo *Radius taps*.

Nessa disposição, a tomada de alta pressão é colocada a $1D$ da face montante da placa e a tomada de baixa pressão a $0,5D$ da mesma face montante da placa de orifício (Delmée, 2003).

Existem diferenças quanto à precisão e também limites referentes ao número de Reynolds entre elas e, portanto, seu uso não é freqüente, embora apresente a vantagem de ter sua distância da tomada de baixa pressão independente da relação entre os diâmetros β (SENAI-ES, 1999).

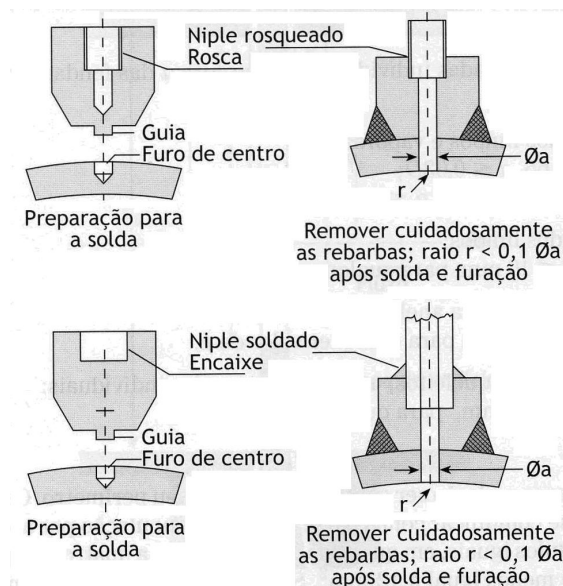


Fig. 13 - Tomadas Δp soldadas na tubulação

2.1.8. Inspeção de parâmetros construtivos em placas clássicas

Independente do tipo de tomada, as placas de orifício clássicas, segundo as normas ISO 5167 e AGA3, devem ser fabricadas e instaladas de acordo com determinadas especificações mínimas. Valores uma vez fora das especificações determinadas podem influenciar na medição da vazão, por isso é necessário seguir a rigor os limites impostos pelas normas.

A inspeção de uma placa de orifício implica na verificação ou medição de quinze itens, dos quais no Laboratório de Metrologia da UFRN intervimos nos seguintes.

- Planeza da placa: plana ou empenada (medir o desvio de planeza).
- Medição da rugosidade superficial da placa.
- Medição de pelo menos quatro diâmetros do furo da placa.
- Média das medições do item anterior.
- Medição da espessura da placa.
- Temperatura durante a medição da placa.
- Identificação de quem realizou o serviço e data da inspeção.
- A placa possui abertura cônica ou não? Qual ângulo do cone?

a) Faces a montante e a jusante

A face à montante terá de ser plana. Será considerada plana quando o interstício entre uma régua de comprimento D , colocada ao longo de um diâmetro, e a face da placa for inferior a $0,005.(D-d)$, isto é, com inclinação em relação a uma perpendicular ao eixo inferior a 0,5%. A montante nominal não deve apresentar rebarbas, riscos ou outras imperfeições (Delmée, 2003). Porém, o desvio de planicidade medido nas calibrações de placas de orifício no Laboratório de Metrologia da UFRN é realizado através de uma máquina de medir por coordenadas.

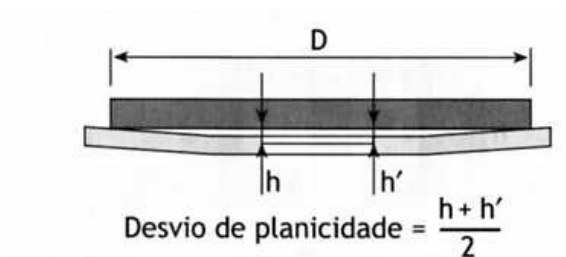
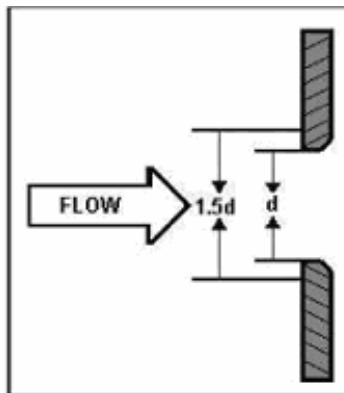


Fig. 14 - Medição de planicidade

A face à jusante, por outro lado, tem de ser paralelo à face à montante. Não é necessário atingir a mesma qualidade do estado da superfície que é exigido para a montante, os quais serão julgados por um simples exame visual (MEDEIROS; LIMA et al, 2006)

b) Rugosidade da placa

A rugosidade da face montante da placa de orifício tem de ser inferior a $0,0001d$, sendo determinada na direção radial, dentro de um círculo concêntrico ao orifício, que não seja inferior a $1,5d$, como visto na figura abaixo (Martins, 1998 citado por MEDEIROS; LIMA et al, 2006):



Indication of the diameter $1.5d$ to be considered for the determination of the roughness of the plate.

Fig. 15 - (Fonte: MEDEIROS; LIMA et al, 2006)

A rugosidade superficial das faces a montante e a jusante da placa de orifício, não deve exceder $50 \mu\text{pol}$ de R_a , medido com um valor de “cut-off” não inferior a $0,03 \text{ pol}$ (ARAÚJO & LINK, 2004). A medição da rugosidade superficial de uma placa de orifício é mostrada na figura abaixo:



Fig. 16 - Medição de rugosidade superficial de placas de orifício.

c) Diâmetro do orifício

O valor obtido do diâmetro do furo da placa de orifício é dado pela média de três ou mais medições do furo, sendo que nenhum dos valores pode variar, do valor médio, mais do que as tolerâncias

apresentadas na tabela 3. A medição do diâmetro do furo de uma placa de orifício, realizada no laboratório de metrologia da UFRN, é ilustrada na figura abaixo:

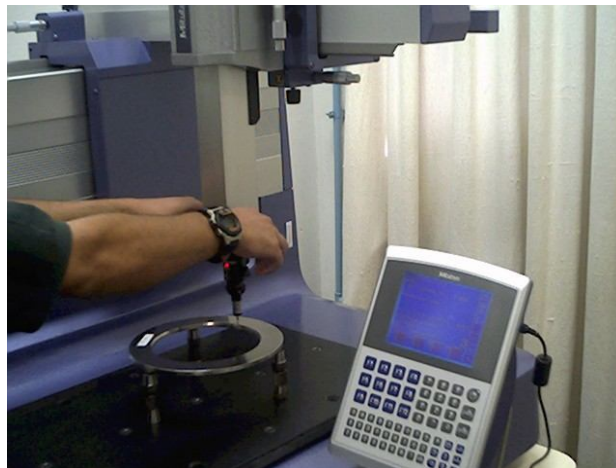


Fig. 17 - Processo de medição do diâmetro do furo.

Diâmetro do orifício da placa (pol)	Tolerância (\pm pol)
$\leq 0,250$ ^(a)	0,0003
0,251 a 0,375 ^(a)	0,0004
0,376 a 0,500 ^(a)	0,0005
0,501 a 0,625	0,0005
0,626 a 0,725	0,0005
0,726 a 0,875	0,0005
0,876 a 1,000	0,0005
$> 1,000$	0,0005 pol/(pol de diâmetro)

^(a) O uso de diâmetros menores não é proibido, porém as incertezas nas medições são maiores que as usuais.

Tabela 3 – Tolerância de circularidade para o furo da placa de orifício (d_m).

O Diâmetro d é geralmente limitado entre $0,1D$ e $0,8D$. Entretanto, para calcular o valor do diâmetro do orifício da placa, o diâmetro de referência d_r é determinado, calculado a uma temperatura de referência (t_r) usando a seguinte equação (Araújo & Link, 2004):

$$d_r = d_m [1 + \alpha_1 (t_r - t_m)]$$

Onde:

α_1 = coeficiente de expansão linear do material da placa;

d_r = diâmetro do orifício da placa calculado à temperatura de referência (t_r);

d_m = diâmetro do orifício da placa medido à temperatura (t_m);

t_m = temperatura da placa durante as medições;

t_r = temperatura de referência da placa de orifício.

d) Aresta de entrada G

A aresta G à montante não deverá apresentar imperfeições, rebarbas, isto é, defeitos visíveis à olho nu. Esta aresta deverá ser “viva”.

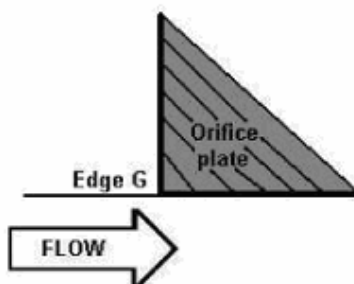


Fig. 18 - Detalhe da borda G do orifício (Fonte: MEDEIROS; LIMA et al, 2006)

e) Arestas de saída H e I

As arestas H e I à jusante estão dentro da região de saída do fluxo. Entretanto, os requisitos para sua qualidade são menos rigorosos do que aquelas para a aresta G; Então, neste caso, pequenos defeitos são aceitáveis (Martins, 1998 citado por MEDEIROS; LIMA et al, 2006).

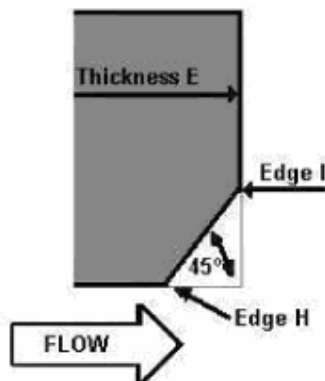


Fig. 19 - Detalhe das arestas H e I. (Fonte: MEDEIROS; LIMA et al, 2006)

f) Espessuras E e e

A espessura E da placa deve ser inferior a $0,05D$ e igual ou superior a e , para tubos superiores a 3 pol, e poderá ser 3mm, no caso de tubulações de 2 pol (Delmée, 2003). Uma atenção maior deve ser tida para que as deformações plásticas e elásticas da placa, devido à diferencial de pressões na operação não excedam a planicidade limite que está especificada pela norma.

A parte cilíndrica e do orifício deve ter espessura compreendida entre $D/200$ e $D/50$. Quando por motivo de robustez, a espessura E da placa é maior que a parte cilíndrica e do orifício, a face à jusante da placa deve receber um chanfro de 45° (Delmée, 2003).

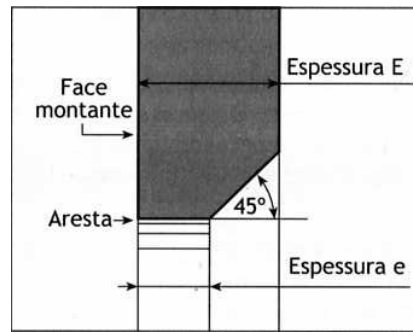


Fig. 20 - Espessura da placa (E) e do orifício (e).

g) Ângulo do chanfro

Quando a espessura E da placa for superior à espessura e do orifício, a placa deverá ser chanfrada na jusante. A superfície cônica deverá ser usinada com cuidado e o ângulo do chanfro deverá ser $45^\circ \pm 15^\circ$. A placa não poderá ser chanfrada se sua espessura E for inferior ou igual a $0,02D$.

h) Materiais de fabricação

A placa pode ser fabricada com qualquer material e por qualquer método de fabricação, mas sempre de acordo com descrições anteriores. De um modo geral a placa será fabricada em metal com boas características de resistência à erosão e à corrosão (os aços inox AISI 316 e 304 são geralmente empregados).

i) Rugosidade da parede interna da tubulação

Um ponto importante ainda a ser verificado quando se trata de medição de vazão por medidores como placa de orifício seria a rugosidade em trechos retos na parede interna da tubulação, próxima à instalação da placa. Essa rugosidade influencia sobre o coeficiente de descarga. Como a rugosidade não é expressa no cálculo do coeficiente de descarga, os seus limites são estabelecidos de modo que os coeficientes de descarga estão contidos no grau de incerteza previamente estabelecida, ver tabela 4 (Martins, 1998 citado por MEDEIROS; LIMA et al, 2006).

Material	Conditions	k (mm)
Brass, copper, glass, aluminium, plastic	Smooth and without sediments	< 0.03
	New without sewing	< 0.03
	New with sewing	< 0.10
Steel	Lightly rusty	0.10 to 0.20
	Incrusted	< 0.50 to 2
	Bituminized, new	0.03 to 0.05
	Bituminized, used	0.10 to 0.20
	Galvanized	0.13
Cast iron	New	0.25
	Rusty	1.0 to 1.5
	Bituminized	0.03 to 0.05

*Data in agreement with the norm ISO 5167, 1991

Tabela 4 - Valores usuais de rugosidade. (Fonte: MEDEIROS; LIMA et al, 2006)

Os valores da rugosidade superficial k_r , especificada em unidades de comprimento, dependem de vários fatores, tais como altura, distribuição, angulação e outros aspectos geométricos dos elementos da rugosidade da parede do tubo (ISO 5167, 1991).

As perdas por atrito dependem do diâmetro e extensão da tubulação, da rugosidade das paredes, da viscosidade do fluido, do número de Reynolds, dos tipos e da quantidade de conexões. Para os fluxos turbulentos, o fator de atrito é encontrado em função do número de Reynolds.

A rugosidade aumenta com o uso devido à corrosão e incrustação. A taxa desse aumento depende do material do tubo e do fluido. Tubulações com maior rugosidade relativa podem ser utilizadas se estas estiverem dentro dos limites indicados na tabela 4, pelo menos 10D a partir da face de entrada do orifício da placa (ISO 5167, 1991).

2.1.9. Cuidados complementares

As normas ISO 5167 e AGA 3 estabelecem ainda que as placas sejam instaladas concentricamente à linha de processo, que esta não deve ser ovalizada (circularidade definida) e que não haja qualquer desalinhamento que possa provocar um degrau apreciável na emenda do tubo com o flange ou do flange com o bloco-orifício a montante da placa.

a) Circularidade

Portanto, num comprimento a 2D a montante da placa de orifício, a tubulação deve ser cilíndrica. A tubulação será considerada tal se, nesse comprimento de 2D, nenhuma diâmetro, em qualquer plano, diferir mais que 0,3% do diâmetro médio, medido de acordo com as normas.

b) Concentricidade e perpendicularidade

A placa de orifício deverá ser centralizada em relação ao tubo, aonde a distância e_{cl} medida na paralela ao eixo da tomada, entre a linha de centro da tubulação e a linha de centro da placa, deverá ser inferior a:

$$0,0025D / (0,1 + 203\beta^4)$$

A distância e_{cn} , medida na perpendicular ao eixo da tomada, entre a linha de centro da tubulação e a linha de centro da placa, deverá ser inferior a:

$$0,005D / (0,1 + 203\beta^4)$$

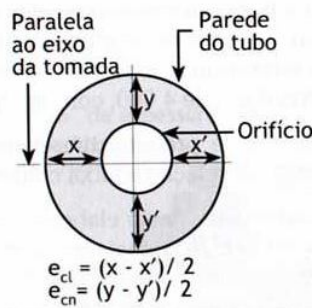


Fig. 21 - Concentricidade

Se a linha de centro da placa, no alinhamento do eixo de uma das tomadas, tiver uma excentricidade tal que:

$$0,0025D / (0,1 + 203\beta^4) < e_{cl} \leq 0,005D / (0,1 + 203\beta^4)$$

uma incerteza adicional de 0,3% deverá ser acrescentada aritmeticamente à incerteza do coeficiente de descarga C. Caso exceda o maior valor, o desvio não estará coberto pelas normas (Delmée, 2003).

2.2. Tolerâncias

Quando se mede as dimensões de diferentes peças cujo funcionamento foi experimentado e considerado adequado, verifica-se que essas dimensões podem oscilar dentro de certos limites, mantendo-se as condições de funcionamento anteriormente previstas. A diferença entre as duas medidas limites admissíveis, ou seja, entre os valores máximo e mínimo, chama-se tolerância.

Esse sistema moderno de fabricação requer que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto às dimensões, forma e acabamento.

2.2.1. Tolerâncias geométricas

As tolerâncias de fabricação são insuficientes para se determinar exatamente como a deve estar a peça depois de pronta para evitar que haja trabalho posterior.

Pela comparação da peça real fabricada com a ideal especificada pelo projeto e mostrada no desenho da peça pode-se determinar que são diferentes. O grau dentro do qual dentro do qual a peça real difere da projetada, determinado pela qualificação da usinagem, caracteriza *exatidão de fabricação*. Em muitos casos, os desvios da peça original para a peça realmente fabricada podem ser indicados previamente, enquadrando-se assim nas chamadas tolerâncias geométricas, representadas pelos desvios de forma e posição. Esses desvios provêm da falta de rigidez da máquina-ferramenta, de um dispositivo de

usinagem, da perda do gume cortante de uma ferramenta e outros inúmeros fatores que influenciam diretamente na qualidade final de uma peça usinada.

Um erro de forma corresponde à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. A forma de um elemento será correta quando cada um dos seus pontos for igual ou inferior ao valor da tolerância dada. A diferença de forma deve ser medida perpendicularmente à forma geométrica teórica, tomando-se cuidado para que a peça esteja apoiada corretamente no dispositivo de inspeção, para não se obter um falso valor.

Os erros de forma são ocasionados por vibrações, imperfeições na geometria da máquina, defeito nos mancais e nas árvores etc. Tais erros podem ser detectados e medidos com instrumentos convencionais e de verificação, tais como réguas, micrômetros, comparadores ou aparelhos específicos para quantificar esses desvios.

Definições, conforme NBR 6405/1988 (AGOSTINHO, 1977):

- Superfície real: superfície que separa o corpo do ambiente.
- Superfície geométrica: superfície ideal prescrita nos desenhos e isenta de erros. Exemplos: superfícies planas, cilíndrica, esférica.
- Superfície efetiva: superfície levantada pelo instrumento de medição. É a superfície real, deformada pelo instrumento.

Na verificação das placas de orifício, analisaremos alguns tipos de tolerâncias geométricas como poderão estar influenciando na determinação da vazão, como planicidade, circularidade (enfoque maior), além do desvio angular que trata-se de uma tolerância de posição.

2.2.1.1. Diferença do plano (planeza)

É a distância entre dois planos paralelos, entre os quais deve encontrar-se a superfície real:

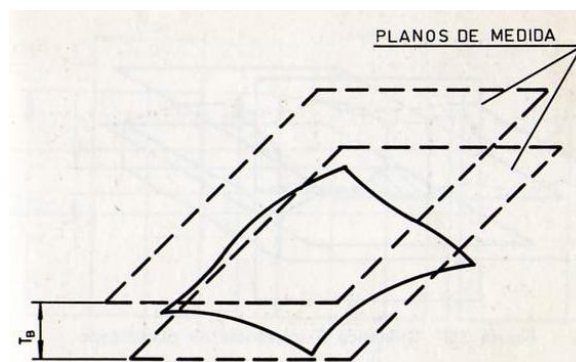


Fig. 22 – Diferença do plano T_B (Fonte: AGOSTINHO, 1977)

A medição da diferença de plano é relativamente simples. A peça deve ser alinhada segundo um plano de comparação (mesa de desempenho, por exemplo) de modo que três pontos da superfície da peça tenham distâncias iguais ao plano de referência. A diferença medida não deve ser em nenhum ponto maior que a tolerância T_B (Agostinho, 1977).

De uma maneira mais geral, a tolerância de planeza é medida através da intersecção de um plano perpendicular aos planos de medida A e B, sendo que o desvio do plano ideal f_B deve estar incluso à tolerância T_B , conforme ilustração na Figura 23.

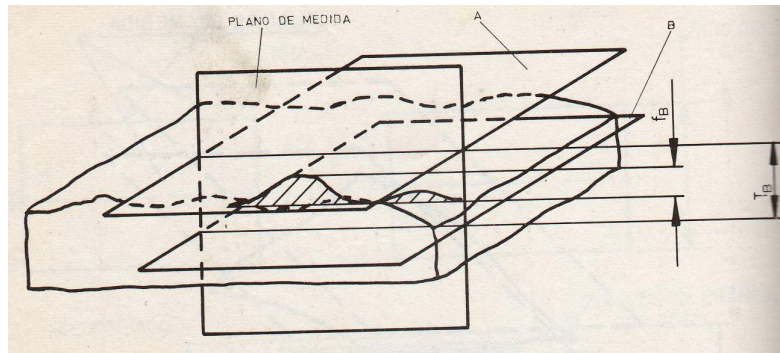
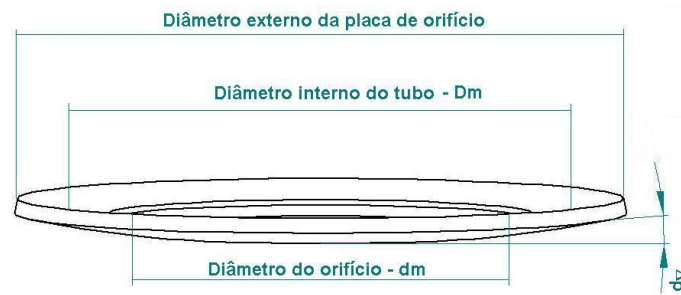


Fig. 23 - Diferença e tolerância de planicidade (Fonte: AGOSTINHO, 1977)



Δp : Desvio da planeza

Fig. 24 - Desvio de planeza de placas de orifício.

2.1.1.2. Diferença do círculo (circularidade)

As diferenças do círculo real para o círculo teórico são genericamente denominadas ovalizações. Define-se como diferença admissível do círculo (ovalização admissível) T_c como a diferença dos diâmetros D e d de dois círculos concêntricos entre os quais deve encontrar-se o perfil real T_r . Dessas próprias definições, conclui-se que $T_c = 2T_k$, ou seja, no caso a diferença admissível é o dobro da tolerância de forma, conforme mostra a figura:

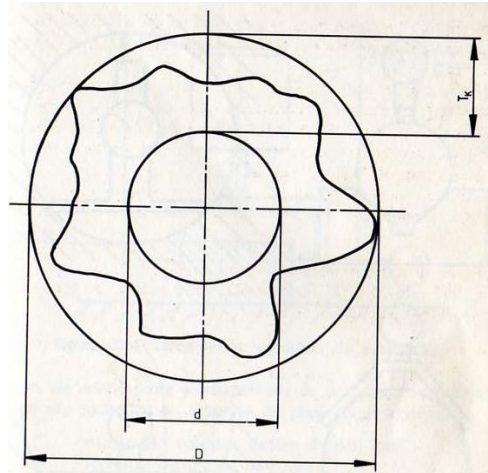


Fig. 25 - Ovalização (Fonte: AGOSTINHO, 1977)

Portanto, levando-se em consideração os diâmetros d e D , mostramos no presente trabalho se devido ao erro de circularidade da placa de orifício, haveriam diferenças significativas ou não na determinação da vazão.

2.2.1.3. Diferença Angular

Existem dois métodos para se medir a tolerância angular: o primeiro define como diferença angular a diferença entre o ângulo máximo e mínimo entre os quais podem-se localizar duas superfícies. Portanto, a diferença angular admissível T_α é a diferença de ângulos entre os quais se podem localizar duas superfícies, conforme a figura abaixo:

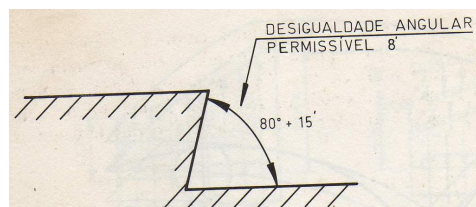


Fig. 26 - Tolerância angular (Fonte: AGOSTINHO, 1977)

Nas placas de orifício que possuem uma angulação semelhante a esta, sua tolerância é $45^\circ \pm 15^\circ$, como é mostrado na figura 5.

Tantos os desvios de forma como os de posição, apesar de serem conceituados separadamente como desvios individuais, dificilmente ocorrerão sozinhos na fabricação de uma peça. Além disso, todas as verificações industriais desses desvios sempre são feitas acumulando-se os dois desvios através de uma única medição, por meio de instrumentos universais, como é o caso da máquina de medir por coordenadas (MMC) (Agostinho, 1977).

2.2.2. Tolerância de acabamento superficial

2.2.2.1. Rugosidade

É o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na:

- qualidade de deslizamento;
- resistência ao desgaste;
- transferência de calor;
- qualidade de superfícies de padrões e componentes ópticos;
- possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- resistência à corrosão e à fadiga;
- vedação;
- aparência.

O parâmetro de rugosidade mais usado baseia-se nas medidas de profundidade da rugosidade. R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem. Pode ser calculado da seguinte forma:

$$Ra = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |y| \cdot dx \quad \text{OU} \quad Ra = \frac{A}{L_c}$$

Onde: A = média da soma das áreas acima e abaixo da linha média;

Lc = comprimento analisado para a obtenção de A.

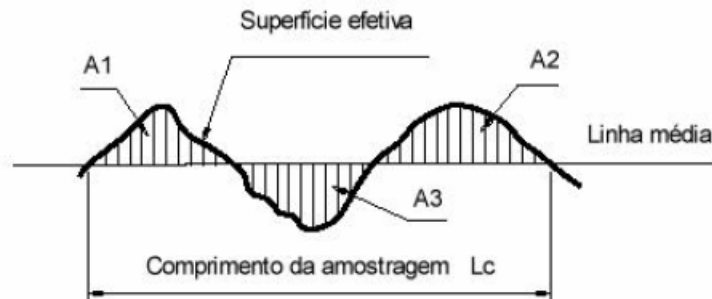


Fig. 27 - Ilustração esquemática para obtenção de Ra.

As medições de rugosidade Nas placas de orifício serão medidas com o rugosímetro que dispomos no laboratório de metrologia da UFRN. A influência dessa rugosidade está embutida no coeficiente de descarga. Analisaremos experimentalmente então, a influência causada por tal nível de rugosidade, na determinação da vazão.

2.2.3. Análise de dimensões

Ao projetista responsável pelos cálculos e desenhos do produto, não basta, para que o projeto fique completo, apenas o cálculo de dimensionamento.

As tolerâncias especificadas são um reconhecimento do fato de que a perfeição dimensional ou de forma não pode ser atingida. Portanto, é indispensável para o controle de fabricação das peças. O principal objetivo na fabricação das peças deverá ser um fluxo contínuo do produto final que a fábrica deve colocar no mercado consumidor.

Operações de montagem mal dimensionadas podem causar um aumento considerável nos custos de fabricação, além da redução do faturamento. Pode ocorrer ainda, a rejeição do produto pelo consumidor devido a sua má qualidade.

Conclui-se, portanto, que existe uma solução de compromisso entre qualidade final do conjunto e seu custo operacional. Esta solução deverá ser procurada e adotada para cada caso em particular, após análise das peculiaridades de cada produto e da indústria que vai fabricá-lo.

2.3. Automação do controle dimensional

A utilização do computador na metrologia dimensional e/ou controle de qualidade geométrica não é uma questão de racionalização de mão-de-obra e sim, em primeiro plano, a própria viabilização econômica e/ou técnica da medição. Através do computador, seja ele dedicado (embutido no sistema de medição) ou de uso genérico (microcomputador) alcança-se:

- Redução dos erros de medição de forma a tornar o instrumento adequado (à tarefa de controle geométrico);
- Rapidez, de forma que o processo tornar-se economicamente viável dentro do processo produtivo;
- Solução de problemas complexos de aquisição e processamento dos dados, viabilizando tecnicamente a medição;
- Viabilização de manipulação de grande volume e em curto intervalo de tempo, de forma a produzir informações sobre o andamento (instantâneo) do processo produtivo;
- Simplificação da mecânica e da eletrônica tornando os sistemas de medição relativamente mais baratos.

O controle dimensional do produto acabado, como única operação de controle no processo produtivo, pode ser altamente prejudicial em função de refugo de grandes lotes e de ser altamente sujeito a erros. Isto faz com que estações de controle sejam levadas junto ao processo de usinagem com o intuito de identificar, mais cedo, o aparecimento de peças fora de comportamento dos meios de produção e, através de realimentação, corrigirem o processo de forma que não se efetive o aparecimento de dimensões fora de tolerâncias

2.3.1. Máquinas de medir por coordenadas

Ao longo de alguns anos ocorreu intenso desenvolvimento tecnológico nos processos de usinagem das peças, destacando-se o surgimento dos centros de usinagem com comando numérico. Paralelamente, refinaram-se as exigências quanto à conformidade geométrica dos componentes de sistemas mecânicos resultando em especificações mais severas de projeto, de modo a garantir um elevado desempenho funcional dos mesmos. Pelo não desenvolvimento da tecnologia de medição no mesmo ritmo, criou-se uma defasagem tecnológica a tal ponto, que o controle de certas peças tornava-se extremamente difícil e economicamente inviável. A aplicação racional da tecnologia de medição por coordenadas tornou-se viável com o desenvolvimento dos computadores que passaram a ter:

- enormes potencialidades matemáticas;
- flexibilidade de comunicação e conexão com um processo;

- resistência a ambientes industriais;
- pequeno porte e baixo custo.

Através de uma máquina de medir por coordenadas (figuras 28 e 29) determinam-se, de forma universal, com um mínimo de dispositivos e instrumentos específicos, as coordenadas de certos pontos sobre as peças a controlar. Tais pontos convenientemente processados pelo computador associado resultam os parâmetros geométricos da peça. O desenvolvimento das máquinas de medir por coordenadas (MMC) foi favorecido ainda pela evolução dos sistemas de medição de deslocamento eletrônicos, que permitem elevar a sua qualidade e viabilizaram a sua integração com sistemas automatizados de fabricação. As MMCs têm em comum com tais sistemas a característica de grande flexibilidade.



Figs. 28 e 29 - Calibração de placas de orifício por coordenada no laboratório de metrologia da UFRN.

2.3.2. Configurações mecânicas

Os cálculos de comprimentos, distâncias entre eixos, diâmetros, ângulos, desvios de planicidade e todos os outros parâmetros geométricos, são feitos a partir das coordenadas de pontos medidos em relação a um sistema coordenado definido pela máquina de medir. Esses cálculos, em geral, não se baseiam exatamente nos pontos de contato do sensor com a peça, mas sim nas posições dos centros do sensor após o contato, e na compensação do seu raio conforme condições específicas de cada tipo de elemento medido. Para constituir uma máquina universal de medir, é suficiente capacitá-la a operarem três coordenadas lineares ortogonais. No entanto, a eficiência é aumentada significativamente, se houver à disposição o recurso do movimento angular em um dos planos coordenados, especialmente tratando-se de peças simétricas de rotação, como engrenagens, discos de cames, etc. A forma construtiva esta muito relacionada com o volume de medição, com a área de acesso para a peça, com a incerteza de medição e algumas vezes com a própria tecnologia acumulada por certo fabricante.

Os fabricantes em geral equipam suas máquinas com mancais pneumáticos, como é o caso da MMC que dispomos no laboratório de metrologia da UFRN para as devidas calibrações, e que será utilizada para

medições nas placas de orifício no projeto. Esses mancais pneumáticos permitem um movimento com mínimo de atrito, favorecendo alcançar elevado nível de precisão para a MMC.

2.4. Incerteza de medição

A incerteza é um parâmetro associado com o resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão do valor que poderia razoavelmente ser atribuído ao mensurando (valor convencional), caracterizando um intervalo com um determinado nível de confiança. A incerteza de medição compreende, em geral, diversos componentes, mais os quais foram agrupados em duas categorias, de acordo com os métodos usados para estimar seus valores numéricos. Essas categorias são as incertezas padronizadas tipos A e B:

- A incerteza padronizada tipo A, é determinada pela análise estatística de uma série de observações.
- Incerteza padronizada tipo B é um método de avaliação da incerteza sem ser por análise estatística, como por exemplo, especificação de catálogo, *handbooks*, certificados de calibrações etc..

Qualquer medição, de uma forma ou de outra, está sujeita a erros, pois o valor verdadeiro não é conhecido, e sim uma estimativa do valor verdadeiro. O estabelecimento da incerteza de medição permite estimar melhor a faixa de valores dentro do qual o valor verdadeiro, provavelmente, deve estar.

A utilização de medidores de vazão para venda de produtos, conservação de energia, proteção ambiental e aumento de eficiência de processos, torna imperativo o conhecimento da incerteza de medição.

O erro é normalmente composto por duas parcelas:

- Erro aleatório é a diferença entre o valor médio resultante de uma série de medições do mesmo mensurando e o resultado de uma medição sob condições de repetibilidade e a discrepância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro da quantidade medida devido a fatores externos tais como ruído, leitura mal realizada, falha na alimentação, etc. Pode ou não ser considerado para efeitos estatísticos.
- Erro sistemático (*Systematic Error*) é a diferença entre o valor médio resultante de uma série de medições do mesmo mensurando e o valor verdadeiro ou convencional do mensurando. É a parcela de erro que está sempre presente nos sistemas de medições sem calibração. O erro sistemático pode ser minimizado ou eliminado pela calibração.

2.4.1. Incerteza na medição de petróleo e gás

A medição de petróleo no estado líquido pode ser feita de dois modos:

- Medição em tanques (tanques cilíndricos em terra e marítimos em navios);

- Medição em Linha (medidores de vazão e volume).

De acordo com (ANDRADE; FERREIRA, et al, 2006) a medição de petróleo em linha se dá através de medidores de vazão e volume que devem ser selecionados dentro uns dos seguintes tipos: deslocamento positivo, turbina ou medidores mássicos tipo Coriolis, com indicação de volume. Outros tipos de medidores podem ser utilizados, desde que sua utilização seja autorizada pela ANP (como é o caso do medidor do tipo ultra-sônico). As medições de gás natural nos pontos de medição da produção devem utilizar placas de orifício, turbinas ou medidores tipo ultra-sônico. Outros tipos de medidores podem ser utilizados se previamente autorizados pela ANP. Os sistemas de medição fiscal de gás devem ser projetados, calibrados e operados de forma que a incerteza de medição seja inferior a 1,5 %. Os demais sistemas de medição devem ter uma incerteza de medição inferior a 3% (no caso de medição para apropriação de gás, a incerteza de medição deve ser inferior a 2%). Já a medição de vazão monofásica pode ser problemática devido às diversas variabilidades tais como variações de propriedades físicas, influência externa da instalação, perfis assimétricos de velocidade, turbulência etc. Em escoamento multifásico, além das variabilidades citadas, ainda estão presentes os arranjos de fases, escorregamento entre as fases, compressibilidade, dissolução, emulsibilidade, evaporação, entre outros. Devido à essa complexidade, diferentes variabilidades estão presentes sozinhas ou combinadas, as quais causarão impacto nas incertezas de medidores multifásicos. Pode-se definir um medidor de vazão mássica multifásico, como um instrumento capaz de medir, sem separação das fases, as vazões de óleo, água e gás, escoando por uma tubulação. Como as condições requeridas para medir a vazão mássica multifásica, são funções da densidade, da velocidade e da fração volumétrica de cada fase, pode-se inferir que um medidor de vazão mássica multifásico seja constituído por: medidor de fração volumétrica, medidor de velocidade e medidor de densidade.

2.4.2. Incerteza na medição de vazão (placa de orifício)

A incerteza da medição de vazão deve ser determinada pela realização de testes confrontando a vazão indicada com os valores indicados por um instrumento padrão de incerteza menor. A incerteza dos elementos deprimogênicos pode ser avaliada na Eq. 2, que consta na norma ISO 5167:

$$iQ_m = \pm \sqrt{(i_c)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}\right)^2 \cdot (i_D)^2 \cdot \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)^2 \cdot (i_d)^2 + (i_\varepsilon)^2 + \frac{1}{4}(i_{\Delta p})^2 + \frac{1}{4}(i_\rho)^2} \% \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

iQ_m a incerteza sobre a vazão mássica;

i_C a incerteza sobre o coeficiente de descarga;

i_D a incerteza sobre o diâmetro D ;

i_d a incerteza sobre o diâmetro d ;

i_ε a incerteza sobre o fator isentrópico;

$i_{\Delta\rho}$ a incerteza sobre a pressão diferencial;

i_ρ a incerteza sobre a massa específica.

Muitos fatores que influenciam na medição da incerteza estão associados a aplicações dos medidores por orifício. Os maiores contribuintes para a medição de incerteza, segundo (HUSAIN, 1995), incluem a previsibilidade do perfil do escoamento, as propriedades dos fluidos em condições de escoamento, a exatidão da equação empírica para o coeficiente de descarga, tolerâncias de fabricação dos componentes dos medidores, bem como a incerteza associada aos dispositivos secundários que monitoram a linha de pressão estática, a pressão diferencial através da placa de orifício, a temperatura de escoamento, etc. Um medidor de vazão por orifício é um dispositivo que, com os cuidados normais na instalação e instrumentação, a exatidão da medição será consistentemente melhor que $\pm 1\%$. Se o erro de medição é maior do que $\pm 1\%$, é provável haver algum erro na instalação ou na instrumentação. Os principais fatores que contribuem para a incerteza de medição para uma placa de orifício sem chanfro, de pequena espessura, concêntrica, são as seguintes:

- Tolerâncias na previsão do coeficiente de descarga;
- Previsibilidade na definição das propriedades físicas do fluido em escoamento;
- Condição de escoamento;
- Tolerâncias de construção nos componentes dos medidores;
- Incerteza de dispositivos/instrumentações secundários;
- Computação e redução de dados.

2.4.3. Incertezas sobre o coeficiente de descarga

As incertezas sobre o coeficiente de descarga i_c vêm sendo estudadas ao longo dos anos, passando de mais de $\pm 1\%$ a $\pm 0,5\%$ nos últimos anos. A norma ISO 5167 atribuiu aos coeficientes de descarga as seguintes incertezas, desde que β , D e R_D sejam aceitos sem erro:

$(0,7 - \beta)\%$ para $0,1 \leq \beta < 0,2$;

$0,5\%$ para $0,2 \leq \beta \leq 0,6$;

$(1,667\beta - 0,5)\%$ para $0,6 \leq \beta < 0,75$.

3. METODOLOGIA

O procedimento inicial consistiu primeiramente na medição e análise de vários parâmetros (circularidade, planeza, diâmetro do orifício, espessura da placa, etc.) importantes nas placas de orifício que vieram a ser calibradas no laboratório de metrologia da UFRN, com a utilização da máquina de medir por coordenadas que dispomos. Além das novas placas que chegaram para calibração e que foram utilizadas no projeto, também usamos documentos recentes de calibração de placas de orifício como fonte de dados.

Uma “inspeção” e análise de vários parâmetros que envolvem esse tipo de medidor, os quais influenciam direta ou indiretamente na vazão, foi realizado e posto como revisão bibliográfica no projeto, para que assim pudéssemos ter uma noção mais ampla enquanto seus usos nos cálculos futuros.

Seguindo, foi criada uma “planilha-programa” no Microsoft Excel, para que pudesse ser avaliado o erro de circularidade das placas que foram medidas para análise. Nessa planilha são feitas suposições para diferencial de pressão, diâmetro da tubulação e velocidade de escoamento do fluido, todos esses valores adequados para esse tipo de aplicação. Para o cálculo do coeficiente de descarga é utilizado a equação de *Reader-Harris/Gallagher* segundo a norma ISO 5167-1 (ver tabela 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	Avaliação do erro de circularidade em placas de orifício									
2										
3	Dados de Entrada		Unidades		Fluido analisado:	Alcool etílico 100% à 20°C				
4	Diâmetro da tubulação (D):	0,1318	m	*						
5	ΔP:	2,50E+04	Pa	*	Placa de orifício calibrada no Laboratório de metrologia UFRN					
6	Diâmetro do orifício (d):	0,065605	m							
7	Massa específica (ρ):	791,5	kg/m ³		Cliente 2	(mm)				
8	Nº de Reynolds (Re _D):	452052,03	-		Diâmetro do orifício	65,605				
9	β = d/D:	0,4977618	-		Espessura da placa	3,182				
10	E = 1/(√(1-β ⁴)):	1,0321838	-		Erro de circularidade	0,026	0,000013			
11	Velocidade de escoamento (V):	5,2	m/s	*	Erro de planeza	0,065				
12	Parâmetro "A":	0,0453387	m ²		Rugosidade	0,77x10 ⁻³				
13	Viscosidade (μ):	0,0012	Pa.s							
14	Coefficiente de descarga (C):	0,6176152	**							
15	Vazão Volumétrica (Q):	0,0171274	m ³ /s		D'	0,065618	β'	0,497860395		
16	Vazão ^o :	0,0171341	m ³ /s		d'	0,065592	β''	0,497663126		
17	Vazão ^o :	0,0171206	m ³ /s							
18										
19	* Considerações atribuídas									
20	** De acordo com a norma ISO 5167									
21	*** Tomada <i>comer taps</i>									
22							Erro			
23	A = ((19000β)/Re _D) ^{0,8}				Nominal	0,01712735	-			
24	D' e d' = diâmetros devido à ovalização da placa				Para D'	0,01713414	0,000407306	m ³ /min		
25					Para d'	0,01712056	-0,000407225	m ³ /min		
26				%	0,039635052	Estimativa	0,00008070	l/min		
27				%	-0,039627199					
28	Aluno: João Batista de La Salles Junior									

Fig. 30 - Imagem da planilha-programa.

Os demais dados, que provêm das medições realizadas, como: circularidade, diâmetro do orifício, espessura da placa, etc, são entrados no programa, o qual então nos indicará as possíveis estimativas de erros, para mais ou para menos, e uma estimativa final, a qual poderia estar sendo medida devido à ovalização da placa de orifício (ver figura 31):

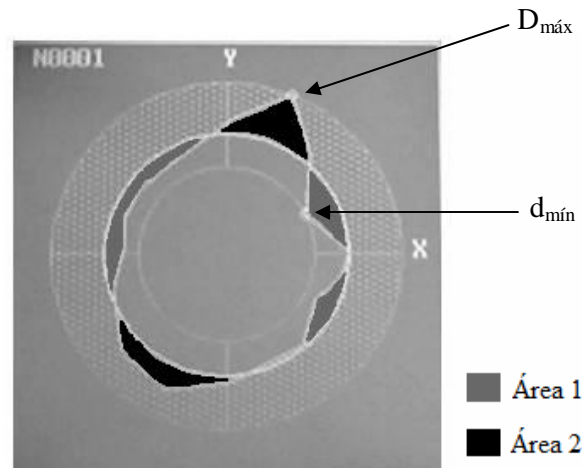


Fig. 31 - Erro de circularidade em placa de orifício.

Portanto, sabemos que o desvio de circularidade seria: $D_{máx} - d_{mín}$ como é visto acima. Na *planilha-programa* criada são calculados três valores para a vazão volumétrica usando diferentes relações de diâmetros β através da Eq. (1). O primeiro valor da vazão volumétrica considera-se a relação de diâmetro β como sendo o diâmetro nominal do orifício da placa (d) que está sendo analisada dividido pelo diâmetro da tubulação (D) estabelecido previamente. Ou seja:

$$\beta = d/D$$

O segundo considerou-se a relação β como o diâmetro nominal do orifício da placa somado à metade do erro de circularidade (D') e depois dividido pelo diâmetro da tubulação correspondente (D):

$$\beta' = D'/D$$

O terceiro valor para a vazão volumétrica considera a relação β agora como o diâmetro nominal do orifício da placa subtraído à metade do erro de circularidade (d') e depois dividido pelo respectivo diâmetro da tubulação (D):

$$\beta'' = d'/D$$

Agora obtivemos três valores de vazões volumétricas com relação a diferentes relações de diâmetros. Calculando a diferença entre os valores de vazão volumétrica encontrados para β' e β'' com o valor da vazão encontrada utilizando o β (diâmetro nominal), encontraremos duas estimativas de erro para a vazão. A primeira considera o erro de vazão através da Área 1, ou seja, o montante de fluido que atravessa a área real da placa, porém não é considerado quando se usa apenas o valor nominal de seu diâmetro, e a segunda através da Área 2, que seria o montante de fluido que é considerado ao se usar o

valor do diâmetro nominal da placa, mas que na verdade não atravessa sua área real, ver figura 31. Desta mesma figura podemos observar que as duas áreas podem ser consideradas aproximadamente iguais, conseqüentemente, o erro de vazão através da Área 1 “compensaria” o erro de vazão pela Área 2. Portanto, a planilha calcula posteriormente a diferença entre esses dois valores, obtendo assim uma estimativa de erro final que é mostrada em *l/min*. Os cálculos foram realizados de posse dos valores medidos na calibração de quatro placas com diâmetros de orifício diferentes, sendo que para as primeira placas o fluido em escoamento considerado foi a água à 20°C e para as duas últimas, o Álcool etílico 100% também à 20°C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições realizadas nas placas de orifício e os resultados obtidos são mostrados em gráficos abaixo:

a) **Placas 1 e 2** (Fluido considerado: Água à 20°C)

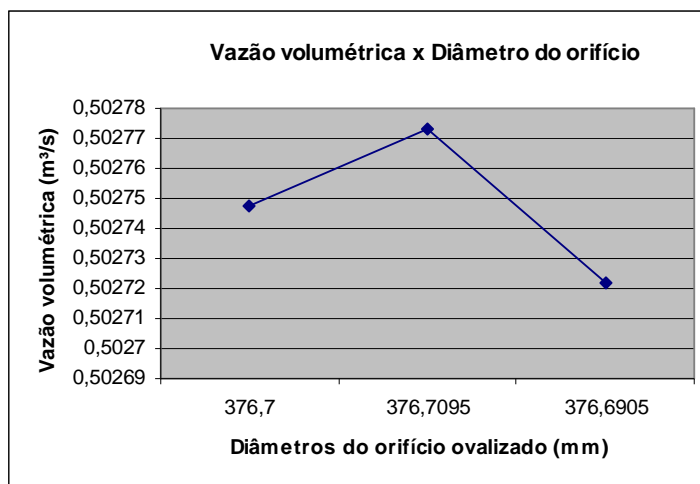


Fig. 32 – Gráfico Vazão volumétrica x diâmetro do orifício (placa 1)

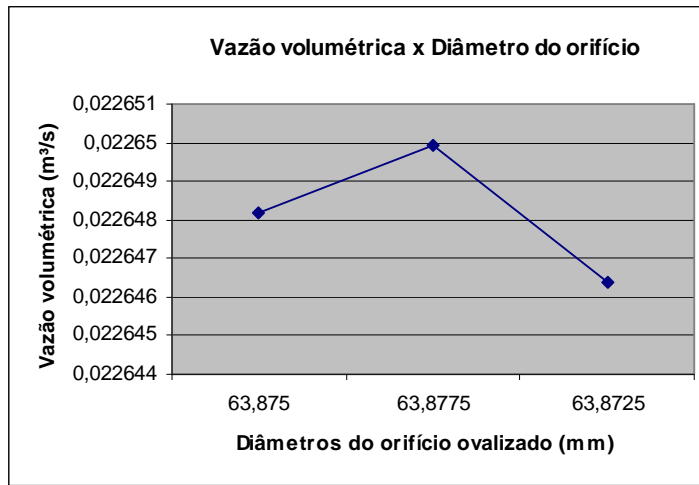


Fig. 33 – Gráfico Vazão volumétrica x diâmetro do orifício (placa 2)

Para a primeira placa analisada pudemos encontrar erros de $\pm 0,0050\%$ para a vazão volumétrica através das áreas 1 e 2 da figura 31, quando considerado o diâmetro ovalizado. Na segunda, observamos erro de $\pm 0,0078\%$.

b) **Placas 3 e 4** (Fluido considerado: Álcool etílico à 20°C)

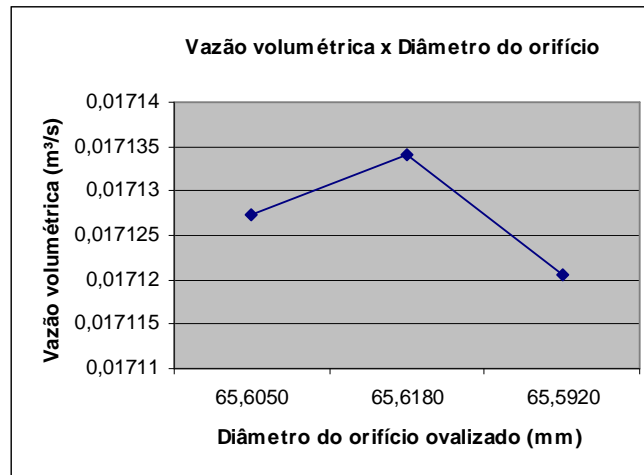


Fig. 34 – Gráfico Vazão volumétrica x diâmetro do orifício (placa 3)

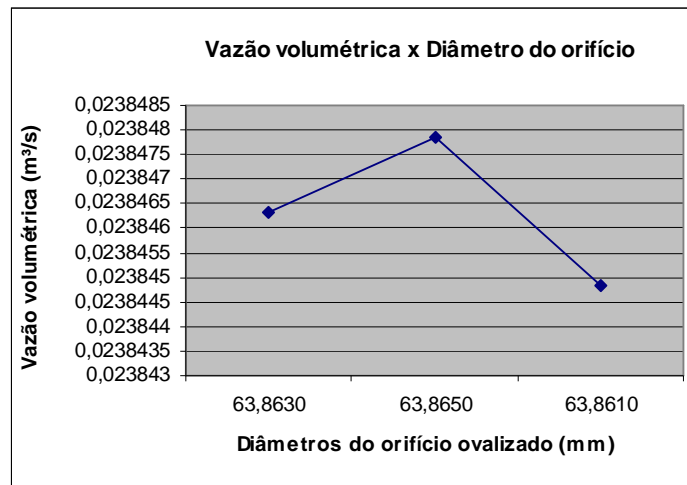


Fig. 35 – Gráfico Vazão volumétrica x diâmetro do orifício (placa 4)

Para as terceira e quarta placas analisadas encontramos erros de $\pm 0,0396\%$ e $\pm 0,006\%$ respectivamente.

Analisando-se esses dados, observamos que o valor da medição de vazão utilizando placas de orifício é afetado pelos seus erros de circularidade, toleráveis quando a placa encontra-se dentro dos limites das tolerâncias impostas pelas normas em seus diversos parâmetros como rugosidade à montante, espessura, planeza. Como as placas medidas correspondem a tais requisitos, os dados mostraram estimativas de erro de cerca de $3,837 \times 10^{-5}$ l/min para a placa 1, $4,16 \times 10^{-6}$ l/min para a placa 2, $8,07 \times 10^{-5}$ l/min para a placa 3 (este valor pode ser observado na figura 30) e $2,81 \times 10^{-6}$ l/min para a placa 4. Portanto, estes valores são insignificantes de um modo que não afeta o resultado de uma medição de vazão real.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se então que, de acordo com a análise dos resultados, os valores da medição de vazão utilizando placas de orifício são afetados pelos seus erros de circularidade. Porém, essa influência é desprezível quando se percebe que os parâmetros tais como rugosidade à montante, espessura, circularidade, planeza, entre outras, das placas analisadas encontram-se dentro dos limites de tolerâncias impostas pelas normas. Baseado em *Araújo & Link, 2004*, vemos na tabela 3 as tolerâncias de circularidade para placas de orifício, e podemos observar que todas as placas analisadas estão conforme. As mesmas também estão dentro das tolerâncias de rugosidade à montante, ou seja, este valor deve estar até $10^{-4}d$.

Segundo as pesquisas realizadas vimos que a vazão é geralmente considerada a variável mais importante dentro do território industrial. A sua importância como variável de processo, chega a ser infinita, e como a mais importante, acaba sendo a mais medida. Em geral, sua medição é a que totaliza o maior erro de medição somado, conforme dados de imprecisão de medição de vazão reunidos em torno do mundo. A medição volumétrica de vazão de líquidos, que é a mais utilizada na maioria dos processos,

depende do conhecimento, comportamento e estudo de outras variáveis que a influenciam, tais como: velocidade de escoamento do fluido, viscosidade, temperatura, pressão, densidade específica e relativa. Assim que forem conhecidos os valores dessas variáveis de influência, será possível compensá-los, descartá-los ou ainda selecionar um tipo de medidor específico para uma determinada aplicação. Observamos então que deve se seguir rigorosamente essas tolerâncias impostas por normas que tratam de medidores de vazão, como a ISO 5167 que seguimos no projeto, visando assim uma medição mais exata, com o mínimo de erro possível. Os processos de fabricação desses tipos de medidores de vazão, amplamente utilizados na indústria do petróleo, estão sujeito a acontecimentos de algum tipo de problema durante sua execução. Isso pode acontecer quando esse processo é realizado por pessoas não aptas a fazer este tipo de trabalho, ou quando os responsáveis não obedecem com rigor as tolerâncias relacionadas. Este tipo de situação poderá estar acarretando em desperdícios de líquidos ou gases e medições incorretas quando estes colocam em uso placas de orifício com valores altos de circularidade, os quais não são permitidos por normas. Daí a importância da calibração regular destes tipos de medidores de vazão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FOX, R.W. e MCDONALD, A.T.. Introdução à Mecânica dos Fluidos, 5ª Edição, Editora LTC, 2001.

GÉRARD, Jean Delmée. Manual de Medição de Vazão. 3ª edição – São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

AGOSTINHO, Oswaldo Luiz, 1943 – Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões, por Oswaldo Luiz Agostinho, Antônio Carlos dos Santos Rodrigues [e] João Lirani. São Paulo, Edgar Blucher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1977.

FRANK, M. White. Fluid Mechanics, Fourth Edition. University of Rhode Island - Kingston. November 1998.

IBARS, Rubén Alcides Franco. Desenvolvimento e avaliação de tubos Venturi para medição de vazão. Piracicaba-SP, 2004.

SCHNEIDER, Paulo. Medição de velocidade e vazão em fluidos. Porto Alegre-RS, 2003.

AZEVEDO, Luís Fernando A.. Introdução à medição de vazão - Métodos experimentais para engenharia mecânica. Rio de Janeiro – PUC-RJ. Ano desconhecido.

ARAÚJO, L.P. de; LINK, W.. Inspeção de placas de orifício. Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste em Instrumentação e Controle – REDIC, 2004.

FRANÇA, Fernando A.. Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas. UNICAMP 2007.

MEDEIROS, A.K. de A.; LIMA, J.F. de; MEDEIROS, G.G. de; SILVA, N.F. Junior; FELIPE, R.N.B; FELIPE, R.C.T. dos S.. Parameters for dimensional inspection of orifice plates and roughness of the straight stretches of the tubing. Braz. arch. biol. technol. vol.49 spe Curitiba Jan. 2006.

Instrumentação Básica II – Vazão, Temperatura e Analítica. SENAI-ES, 1999.

Normas:

ABNT - NBR 13225 - Medição de Vazão de Fluidos em Conduitos Forcados Utilizando Placas de Orifício e Bocais em Configurações Especiais.

ABNT NBR Iso 5167-1 - Medidores de Vazão - Placas de Orifício, Venturis.

Artigos:

ANDRADE, Paulo C.N., FERREIRA, Luiz E.A., ROCHA, Paulo S. de M.. Considerações sobre a incerteza na medição de petróleo e gás. Revista Analytica, Junho/Julho 2006, Nº 23, pág 75.

HUSAIN, Z.D. Theoretical uncertainty of orifice flow measurement. Houston, Texas, 1995.