

## ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE DEFEITOS EM PLACAS DE ORIFÍCIO: UMA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO DE FALHA

Filipe Rodrigues da Silva, [filiperodss@gmail.com](mailto:filiperodss@gmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, Vitória, Brasil.

**Resumo.** O objetivo desse artigo é apresentar um estudo experimental sobre a influência dos defeitos físicos e de instalação de uma placa de orifício, sobre a medição de vazão, bem como, verificar a aplicabilidade de uma metodologia de diagnóstico de falha que utiliza uma terceira tomada de pressão a jusante da placa de orifício para identificação de erros na medição de vazão. Os experimentos são realizados para números de Reynolds de  $6 \times 10^4$ ,  $8 \times 10^4$  e  $1 \times 10^5$  e pressões de operação de 3 e 5 bar. O fluido de trabalho é o ar atmosférico e a placa de orifício possui razão entre diâmetros de 0,5. Os defeitos, bloqueio parcial do orifício, empenamento e instalação invertida, são analisados. O software MATLAB é utilizado para implementação da metodologia de diagnóstico de falha. A metodologia foi capaz de prever desvios na medição de vazão para o bloqueio parcial na placa de orifício e para a instalação invertida, porém, para um leve empenamento, ela não detectou a falha. Erros na medição de vazão de até 78,17% foram observados no caso da obstrução parcial do orifício.

**Palavras chave:** Placas de orifício, Defeitos, Coeficiente de Descarga, Análise de Falha.

**Abstract.** The aim of this paper is to present an experimental study about the influence of physical and installation defects of an orifice plate on flow measurement, as well as verify the applicability of a fault diagnosis methodology that uses a third pressure tap downstream of the orifice plate to identify errors in the flow measurement. The experiments are carried out for Reynolds numbers of  $6 \times 10^4$ ,  $8 \times 10^4$  and  $1 \times 10^5$  and operating pressures of 3 and 5 bar. The working fluid is atmospheric air and the orifice plate has a diameter ratio of 0.5. Partial blockage of an orifice plate, warpage and reversed installation are analyzed. MATLAB software is used to implement the fault diagnosis methodology. The methodology was able to predict deviations in the flow measurement for the partial blockage in the orifice plate and for the inverted installation. However, for a slight warpage, it did not detect the failure. Flow measurement errors of up to 78,17% were observed in the case of partial orifice obstruction.

**Keywords:** Orifice Plate, Defects, Discharge Coefficient, Failure Analysis.

### 1. INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo a medição de vazão de óleo e gás natural é um dos itens de maior atenção por parte dos técnicos e engenheiros. A resolução conjunta ANP/Inmetro (2013) estabelece os requisitos técnicos mínimos que um sistema de medição de óleo e gás natural precisa ter com o objetivo de garantir a confiabilidade das medições realizadas. Diversos estudos referentes a defeitos físicos e erros de instalação de placas de orifício foram realizados ao longo dos anos com o objetivo de identificar sua influência sobre a medição de vazão.

Jepson e Chipchase (1973) estudaram os efeitos do empenamento em uma placa de orifício com razão entre diâmetros  $\beta = 0,2$ . Para uma razão  $h/D$  de aproximadamente 0,018 a vazão foi subestimada em aproximadamente 1.65%,  $h$  é a máxima distância entre a placa de orifício e uma lâmina reta de comprimento  $D$  apoiada sobre a face a montante da placa,  $D$  é o diâmetro interno da tubulação.

Ting (1993) realizou um estudo experimental em que a medição de vazão foi realizada por uma placa de orifício em condições diferentes das recomendadas pela ISO 5167-2, tais como, instalação invertida, planicidade, rugosidade da tubulação e escoamento de gás úmido. Dentre as condições analisadas, a que provocou o maior desvio na medição da vazão foi a instalação invertida. Para o ar escoando em uma tubulação de 6",  $\beta=0,4$  e número de Reynolds ( $Re$ )=80680, a vazão foi subestimada em até 17% em relação a um bocal sônico de referência.

Singh, *et al.*, (2010), realizou uma simulação numérica em placas de orifício com  $\beta=0,4$  e  $\beta=0,5$ , número de Reynolds variando de  $1,5 \times 10^4$  a  $1,0 \times 10^6$  e espessura da placa variando de 3,5 mm a 9 mm. Concluiu que a espessura da placa de orifício possui uma influência sobre o coeficiente de descarga dentro da incerteza do mesmo. Observou-se um aumento no coeficiente de descarga de até 0,73%.

Reader-Harris, *et al.* (2021), calculou a incerteza combinada do coeficiente de descarga a partir da base de dados usada no desenvolvimento da equação de Reader-Harris/Gallager. Esse conjunto de dados continha informações como

rugosidade relativa do tubo, raio da borda do orifício a montante, planicidade, entre outros. Ele concluiu que os valores obtidos para incerteza foram muito semelhantes aos valores recomendados pela norma ISO 5167-2 e que não seria fácil obter uma redução significativa da incerteza por meio da coleta de novos dados e ajuste da equação do coeficiente de descarga.

Este artigo apresenta a influência dos defeitos físicos e de instalação de uma placa de orifício sobre a medição de vazão, bem como, verifica a aplicabilidade da metodologia de diagnóstico de falha proposta por Steven (2008). A forma gráfica de apresentação é baseada nos trabalhos de Steven (2010).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Experimento

O circuito de teste está localizado no NEMOG (Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás) nas dependências da Universidade Federal do Espírito Santo. A tubulação da seção de teste é feita de aço, classe #150 psi (52,4mm x 12m de trecho reto cada ramificação).

O experimento foi realizado para as seguintes condições operacionais: pressão ( $P$ ) de 3 e 5 bar, números de Reynolds ( $Re$ ) de  $6 \times 10^4$ ,  $8 \times 10^4$  e  $1 \times 10^5$ . Duas placas de orifício com razão de diâmetros ( $\beta$ ) iguais a 0,5 e em conformidade com a norma ISO 5167-2 foram utilizadas. A instalação invertida e o bloqueio parcial do orifício foram avaliados com a placa A, e o empenamento com a placa B. O tempo experimental para cada ponto de operação foi de no mínimo 5 minutos, e um filtro linear de suavização foi utilizado no tratamento dos dados por meio do software MATLAB. Os principais equipamentos que compõe o circuito podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais equipamentos utilizados no experimento

Equipamento	Especificação
Compressor	Kaeser ASD-40 / 125 psi / 40HP
Transmissores de pressão diferencial	Smar - LD 301 D3 / Smar - LD 301 D2
Manômetro	Smar - LD 301 D3
Sensor de temperatura	Zurich T.420.I (0 à 100°C)
Fluido de trabalho	Ar atmosférico
Placa de orifício	$\beta = 0,5$
Tubulação	Aço - classe #150 psi - $D = 52,4\text{mm}$
Sistema de aquisição de dados (supervisório)	LabVIEW - <i>National Instruments</i>

### 2.2. Metodologia de diagnóstico de falha

A metodologia de diagnóstico de falha na medição de vazão por placas de orifício foi proposta por Steven (2008) e baseia-se no cálculo de três pressões diferenciais. Uma terceira tomada de pressão ( $P_3$ ) a jusante da placa de orifício é utilizada a distância  $6D$  da mesma. A Figura 1 mostra um esquema da instalação e o respectivo gráfico do campo de pressão. A Figura 2 mostra a seção de teste.

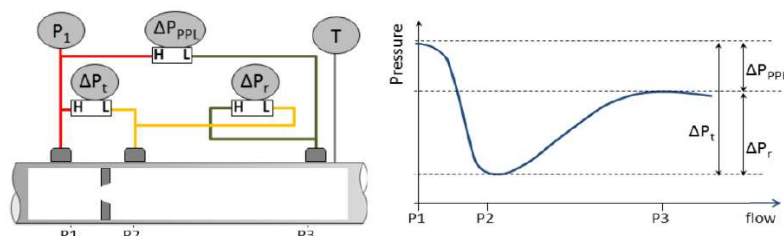


Figura 1 - Esquema da seção de teste e gráfico do campo de pressão (Büker, 2014)



Figura 2 - Seção de Teste

A primeira pressão diferencial obtida é a pressão diferencial tradicional  $\Delta P_t = P_1 - P_2$  que é a utilizada para o cálculo da vazão mássica informada pelo medidor, a segunda, a perda de pressão permanente  $\Delta P_{PPL} = P_1 - P_3$ , e a terceira, a pressão recuperada  $\Delta P_r = P_3 - P_2$ .  $P$  é a pressão manométrica,  $T$  a temperatura a jusante da placa e os índices 1, 2 e 3 referem-se a localização das tomadas de pressão, ver Fig. 1.

Cada pressão diferencial permite calcular uma vazão mássica, conforme descrito nas Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3), os índices,  $t$ ,  $r$  e  $PPL$ , fazem referência a respectiva pressão diferencial definida anteriormente.

$$\dot{m}_t = EA_t \varepsilon C_d \sqrt{2\rho \Delta P_t} + x\% \quad (1)$$

$$\dot{m}_r = EA_r K_r \sqrt{2\rho \Delta P_r} + y\% \quad (2)$$

$$\dot{m}_{PPL} = AK_{PPL} \sqrt{2\rho \Delta P_{PPL}} + z\% \quad (3)$$

O fator de perfil de velocidade,  $E$ , é definido como  $1/\sqrt{1-\beta^4}$ , onde  $\beta=d/D$ , sendo,  $d$ , o diâmetro do orifício,  $A_t$ , a área do orifício,  $A$ , a área interna da seção transversal da tubulação,  $\rho$ , a massa específica do fluido,  $C_d$ , o coeficiente de descarga,  $\varepsilon$ , o fator de expansão,  $K_r$  e  $K_{PPL}$ , os coeficientes referentes aos cálculos de  $\dot{m}_r$  e  $\dot{m}_{PPL}$  respectivamente, e,  $x\%$ ,  $y\%$  e  $z\%$ , as incertezas referentes aos cálculos das vazões mássicas.

A equação de Reader-Harris/Gallager prevê o cálculo do coeficiente de descarga em função do número de Reynolds, da razão entre diâmetros, e do tipo de tomada de pressão utilizada na placa de orifício, e seu uso é recomendado pela norma ISO 5167-2. O fator de expansão  $\varepsilon$ , também é calculado de acordo com uma equação definida na referida norma, e leva em consideração os efeitos da compressibilidade do gás.

Um medidor de vazão sem defeitos e instalado de acordo com os padrões recomendados pela norma ISO 5167-2, deverá apresentar as três vazões mássicas iguais, com variações dentro da incerteza da medição, portanto, pode-se derivar o cálculo de  $K_r$  e  $K_{PPL}$ , ver Eq. (5) e Eq. (6), em função dos parâmetros geométricos, do coeficiente de descarga, do fator de expansão e do  $PLR$ , que é a razão entre  $\Delta P_{PPL}$  e  $\Delta P_t$ , e tem seu valor previsto na ISO 5167-2 para distância  $6D$  a jusante do medidor, conforme a Eq. (4).

$$PLR_{previsto} = \sqrt{1-[\beta^4(1-C_d^2)]-C_d\beta^2} / \sqrt{1-[\beta^4(1-C_d^2)]+C_d\beta^2} \quad (4)$$

$$K_r = \varepsilon C_d / \sqrt{1-PLR_{previsto}} \quad (5)$$

$$K_{PPL} = E\beta^2 \varepsilon C_d / \sqrt{PLR_{previsto}} \quad (6)$$

As diferenças entre as vazões mássicas podem ser calculadas conforme as Eq. (7), Eq. (8) e Eq. (9) abaixo:

$$\psi\% = [(\dot{m}_{PPL} - \dot{m}_t) / \dot{m}_t] \cdot 100\% \quad (7)$$

$$\lambda\% = [(\dot{m}_r - \dot{m}_t) / \dot{m}_t] \cdot 100\% \quad (8)$$

$$\chi\% = [(\dot{m}_r - \dot{m}_{PPL}) / \dot{m}_{PPL}] \cdot 100\% \quad (9)$$

Se ao menos uma dessas diferenças for maior que a respectiva incerteza combinada relativa as vazões mássicas, é um indicativo de que a medição da vazão informada pelo medidor não está correta. As Eq. (10), Eq. (11) e Eq. (12) mostram os valores admissíveis para essas diferenças.

$$\phi\% = \sqrt{(x\%)^2 + (z\%)^2} \quad (10)$$

$$\xi\% = \sqrt{(x\%)^2 + (y\%)^2} \quad (11)$$

$$v\% = \sqrt{(y\%)^2 + (z\%)^2} \quad (12)$$

Semelhante ao caso das vazões mássicas, um medidor funcionando corretamente deve fornecer um valor do  $PLR_{medido}$  próximo ao valor do  $PLR_{previsto}$ , com variações dentro da incerteza combinada. Além disso, é possível derivar outros dois parâmetros referentes a razão entre pressões diferenciais que são o  $PRR$  e o  $RPR$ , estes são definidos como a razão entre  $\Delta P_r$  e  $\Delta P_t$ , e a razão entre  $\Delta P_r$  e  $\Delta P_{PPL}$ , respectivamente. Os valores previstos de  $PRR$  e  $RPR$  são obtidos a partir dos valores previstos do  $PLR$ , maiores detalhes sobre essa dedução ver Steven (2010). A diferença entre os parâmetros medidos e previstos pela norma são calculados conforme as Eq. (13), Eq. (14) e Eq. (15):

$$\tau\% = [(PLR_{medido} - PLR_{previsto}) / PLR_{previsto}] \cdot 100\% \quad (13)$$

$$\gamma\% = [(PRR_{medido} - PRR_{previsto}) / PRR_{previsto}] \cdot 100\% \quad (14)$$

$$\eta\% = [(RPR_{medido} - RPR_{previsto}) / RPR_{previsto}] \cdot 100\% \quad (15)$$

Os valores admissíveis para essas diferenças são calculados conforme as Eq. (16), Eq. (17) e Eq. (18):

$$a\% = \sqrt{(e\%)^2 + (f\%)^2} \quad (16)$$

$$b\% = \sqrt{(o\%)^2 + (i\%)^2} \quad (17)$$

$$c\% = \sqrt{(j\%)^2 + (l\%)^2} \quad (18)$$

Onde  $a\%$ ,  $b\%$  e  $c\%$ , são as incertezas combinadas referentes aos parâmetros  $\tau\%$ ,  $\gamma\%$  e  $\eta\%$ . As incertezas referentes às razões de pressões diferenciais medidas são  $e\%$ ,  $o\%$  e  $j\%$ , e as incertezas referentes às razões de pressões diferenciais previstas são  $f\%$ ,  $i\%$  e  $l\%$ . A pressão diferencial tradicional ( $\Delta P_t$ ) pode ser inferida como a soma de  $\Delta P_r$  com  $\Delta P_{PPL}$  e comparada com o respectivo valor medido conforme a Eq. (19), essa diferença é chamada de  $\delta$ . Um valor admissível prático para essa diferença, denominada  $\theta$ , é de 1%, e cobre a maior parte das faixas de pressões diferenciais medidas, conforme sugerido por Bükler (2014).

$$\delta\% = [(\Delta P_{t, inferido} - \Delta P_{t, medido}) / \Delta P_{t, medido}] \cdot 100\% \quad (19)$$

A Tabela 2 mostra o cálculo dos pontos coordenados. A Figura 3 mostra o gráfico denominado “caixa de diagnóstico de falha”, os vértices do quadrado têm coordenadas (1,1), (1,-1), (-1,1), (-1,-1), a abcissa é a diferença entre as vazões mássicas normalizadas em relação às diferenças admissíveis, e a ordenada é a diferença entre as razões de pressões diferenciais medidas e previstas normalizadas em relação às diferenças admissíveis. Como todos os pontos encontram-se no interior da “caixa”, a placa de orifício opera dentro dos limites da normalidade.

Tabela 2- Pontos coordenados de diagnóstico de falha da medição de vazão por placas de orifício

Comparação entre as vazões mássicas	$x_1 = \psi\% / \phi\%$	$x_2 = \lambda\% / \xi\%$	$x_3 = \chi\% / v\%$
Comparação entre as razões de pressões diferenciais	$y_1 = \tau\% / a\%$	$y_2 = \gamma\% / b\%$	$y_3 = \eta\% / c\%$
Comparação entre $\Delta P_{t, inferido}$ e $\Delta P_{t, medido}$	$x_4 = \delta\% / \theta\%$		

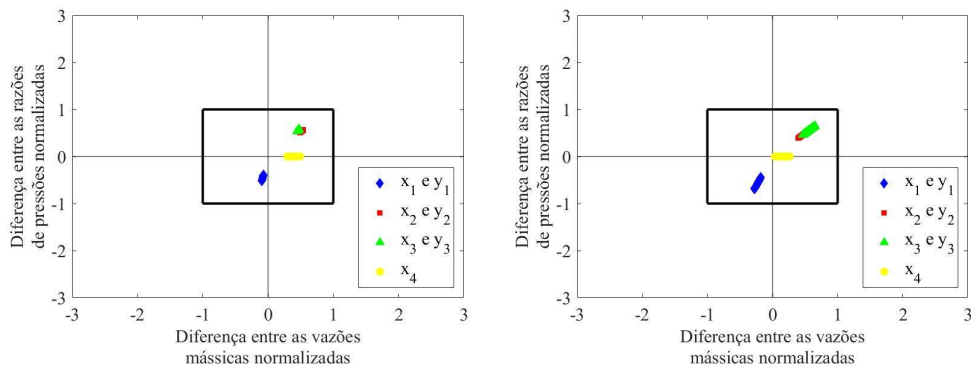


Figura 3 – Caixa de diagnóstico normalizada -  $P = 3$  bar;  $Re = 1 \times 10^5$ : placa A (à esquerda), placa B (à direita)

O diagnóstico só é válido por que o ponto  $(x_4, 0)$ , que indica se existe algum problema em relação as medições das pressões diferenciais, encontra-se dentro da caixa, caso o contrário, dever-se-ia primeiramente investigar as falhas nos transmissores de pressão diferencial, para posteriormente proceder com a análise dos defeitos na placa de orifício.

### 3. RESULTADOS

Inicialmente, calculou-se as incertezas combinadas dos parâmetros de diagnóstico, relatados no capítulo anterior, para as placas de orifício A e B sem defeito. Alguns parâmetros apresentaram valores acima da incerteza combinada e, portanto, foram utilizados como referência para o cálculo dos valores admissíveis. Como as incertezas calculadas estão com 95% de confiança, é necessário que os valores admissíveis para os parâmetros tenham um valor superior as mesmas ou superior aos valores de referência obtidos experimentalmente, para que se evite falsas indicações de problemas na medição de vazão (Steven, 2010). A adoção de um valor admissível maior que a incerteza combinada ou valor de referência, é na verdade, um ajuste da sensibilidade do método de diagnóstico. Quando se aumenta o valor admissível dos parâmetros de diagnóstico, diminui-se o risco de falsos alarmes, porém, a sensibilidade para detecção de erros também é diminuída. Para os defeitos estudados nesse artigo e após alguns testes, adotou-se um fator de sensibilidade de 20% sobre os valores de referência das placas sem defeito. Os valores admissíveis para os parâmetros são mostrados na Tabela 3. A caixa de diagnóstico de falha é apresentada apenas para  $P = 3$  bar e  $Re = 1 \times 10^5$ , haja vista que os outros pontos experimentais apresentaram os mesmos resultados quanto a identificação de falha no medidor de vazão.

Tabela 3 – Valores admissíveis para os parâmetros de diagnóstico ajustados pelo fator de sensibilidade de 20%

Parâmetros de diagnóstico	Placa A	Placa B
$\phi\%$ ( $\dot{m}_t$ e $\dot{m}_{PPL}$ )	4,02%	4,02%
$\xi\%$ ( $\dot{m}_t$ e $\dot{m}_r$ )	3,16%	5,91%
$v\%$ ( $\dot{m}_r$ e $\dot{m}_{PPL}$ )	4,26%	6,73%
$a\%$ ( $PLR_{medido}$ e $PLR_{previsto}$ )	1,46%	3,22%
$b\%$ ( $PRR_{medido}$ e $PRR_{previsto}$ )	6,09%	12,12%
$c\%$ ( $RPR_{medido}$ e $RPR_{previsto}$ )	7,12%	13,85%
$\theta\%$ ( $\Delta P_{t, inferido}$ e $\Delta P_{t, medido}$ )	1,00%	1,00%

#### 3.1. Instalação invertida

Realizou-se o experimento com a placa de orifício instalada de forma invertida em relação ao sentido do escoamento, ou seja, com a face que possui a borda do orifício reta a jusante ao invés de a montante da placa. O escoamento encontra na face a montante uma região com chanfro em vez de uma borda reta, isso faz com que a variação da pressão entre a face a montante e a face a jusante da placa seja menor do que na condição padrão. A vazão foi subestimada em até 12,34%, ver Tabela 4, esse valor está de acordo com os trabalhos de Steven (2010) e Ting (1993), em que a vazão foi subestimada em até 15% e 17%, respectivamente. A Figura 4 mostra o gráfico de diagnóstico de falha em que a coordenada  $(x_4, 0)$  encontra-se dentro da caixa, ou seja, os transmissores de pressão diferencial estão medindo corretamente e o resultado do teste é confiável. Os outros pontos aparecem fora da caixa, o que indica um erro na medição de vazão. A Figura 5 mostra o erro na medição de vazão em função do número de Reynolds.

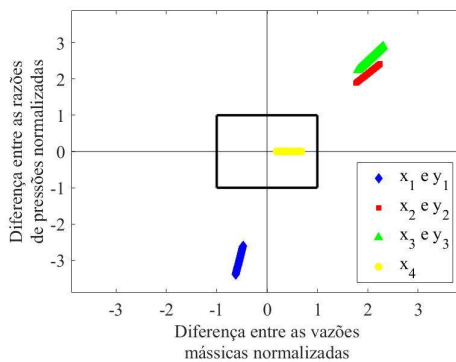


Figura 4 - Caixa de diagnóstico normalizada -  $P = 3$  bar,  $Re = 1 \times 10^5$  (Placa de orifício instalada de forma invertida)

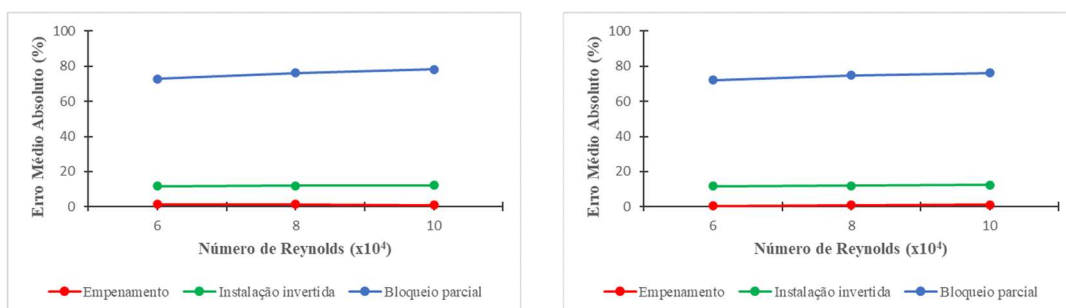


Figura 5 - Erro Médio Absoluto (%):  $P = 3$  bar (a esquerda),  $P = 5$  bar (a direita)

Tabela 4 - Erro Médio Absoluto (%) em relação a medição de vazão realizada por uma placa de orifício em conformidade com a ISO 5167-2

Experimento		Erro Médio Absoluto (%)		
$P$ (bar)	$Re$	Instalação invertida	Bloqueio parcial	Empenamento
3	$6 \times 10^4$	11,68	72,78	1,41
3	$8 \times 10^4$	11,93	76,22	1,32
3	$1 \times 10^5$	12,22	78,17	1,24
5	$6 \times 10^4$	11,64	72,03	0,47
5	$8 \times 10^4$	11,99	74,80	0,87
5	$1 \times 10^5$	12,34	76,10	1,17

### 3.2. Bloqueio parcial do orifício

Durante o escoamento no interior de dutos, detritos podem se alojar no orifício do medidor, o que leva a um aumento significativo na pressão diferencial tradicional ( $\Delta P_t$ ), e como consequência, um erro na medição de vazão. Nesse experimento, um disco de alumínio com um orifício em formato de “meia lua” foi colocado na face a montante da placa de orifício. Para facilitar a centralização do disco com a placa, utilizou-se um pouco de graxa entre eles durante a instalação. A Figura 6 mostra a imagem do disco de alumínio e da placa de orifício utilizada.



Figura 6 - Disco de alumínio (à esquerda); placa de orifício  $\beta = 0,5$  (à direita)

A vazão foi superestimada em até 78,17%, ver Tabela 4, isso se deve ao aumento significativo na pressão diferencial decorrente do bloqueio parcial do orifício provocado pela placa de alumínio. Steven (2010), em seu experimento relativo ao bloqueio parcial do orifício, utilizou uma pedra de formato irregular para simular esse caso, ver Figura 7. Um desvio na medição de vazão de até 117% foi observado. A obstrução de formato irregular impôs variações maiores de pressão durante o escoamento do ar através do orifício da placa, o que pode explicar o maior erro na medição de vazão apresentado em seu trabalho em relação ao experimento relatado nesse artigo. A Figura 8 mostra um grande distanciamento dos pontos em relação ao centro do gráfico, o que caracteriza um maior desvio na medição de vazão.



Figura 7 – Placa de orifício  $\beta = 0,5$ : bloqueio parcial (a esquerda); empenamento (a direita) (Steven, 2010)

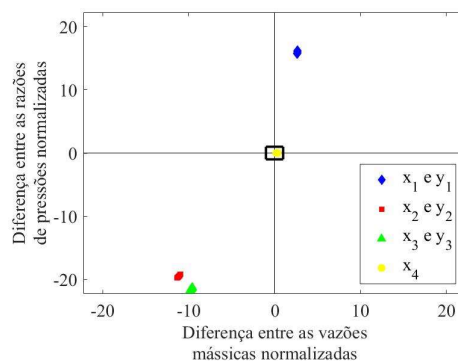


Figura 8 - Caixa de diagnóstico normalizada -  $P = 3$  bar;  $Re = 1 \times 10^5$  (Bloqueio parcial do orifício)

### 3.3. Empenamento

A deformação plástica ou elástica devido à pressão diferencial na placa de orifício pode acarretar erros na medição de vazão. Nesse experimento a deflexão foi obtida por meio de uma prensa hidráulica. A Figura 9 mostra a face a montante da placa antes e depois do empenamento, e a máquina utilizada. As condições de planicidade recomendadas pela ISO 5167-2 são que a máxima distância ( $h$ ) entre a placa de orifício e uma lâmina reta de comprimento  $D$  apoiada sobre a face a montante da placa, deve ser menor que  $0,005(D-d)/2$ , no caso deste experimento deve ser menor que 0,006 mm. Com o auxílio de um relógio comparador determinou-se o valor máximo após o empenamento de 1,25mm, que foi cerca de 208 vezes o valor máximo recomendado pela norma e ocorreu nas proximidades do orifício. A vazão foi subestimada em até 1,41%, ver Tabela 4. A metodologia de diagnóstico falha não foi capaz de detectar a falha devido a esse nível de empenamento. Uma redução no fator de sensibilidade não alteraria o resultado, pois houve uma aproximação dos pontos de diagnóstico em relação ao centro do gráfico, ver Fig.10.



Figura 9 - Placa de orifício antes do empenamento (à esquerda); placa de orifício após o empenamento (ao centro); empenamento na prensa hidráulica (à direita)

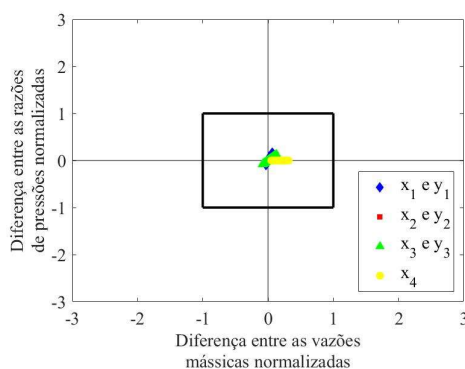


Figura 10 - Caixa de diagnóstico normalizada -  $P = 3$  bar;  $Re = 1 \times 10^5$  (Empenamento)

A Figura 7, mostra a placa de orifício utilizada por Steven (2010) para a avaliação do empenamento. Infelizmente não foi relatado em seu trabalho o valor máximo do desvio de planeza, contudo, percebe-se pela imagem uma deformação bem mais acentuada do que a relatada nesse artigo. Em seu trabalho a vazão foi subestimada em até 7%.

#### 4. CONCLUSÕES

Um estudo experimental de diagnóstico de falha em placas de orifício com razão entre diâmetros  $\beta = 0,5$ , pressões de operação de 3 e 5 bar e número de Reynolds  $6 \times 10^4$ ,  $8 \times 10^4$  e  $1 \times 10^5$  para um escoamento monofásico tendo o ar atmosférico como fluido de trabalho, foi realizado. Os seguintes defeitos foram avaliados: bloqueio parcial do orifício, que superestimou a vazão em até 78,17%; instalação invertida, que subestimou a vazão em até 12,34%; empenamento, que subestimou a vazão em até 1,41%. A obstrução parcial do orifício provocou uma perda de carga significativa no escoamento quando comparada a instalação invertida e ao empenamento, o que levou a um aumento considerável na pressão diferencial, e consequentemente a um maior desvio na medição de vazão, ver Fig.5.

A metodologia de diagnóstico de falha proposta por Steven (2010) foi capaz de detectar falhas na medição de vazão nos casos de instalação invertida e bloqueio parcial do orifício, porém, não foi capaz de detectar falha devido o empenamento da placa. Uma explicação para isso é que a mudança na pressão diferencial provocada pelo empenamento levou a variações nos parâmetros de diagnóstico de falha que permaneceram dentro do intervalo da incerteza combinada da medição. Ao se comparar esse resultado com os experimentos realizados por Steven (2010) para placa de orifício empenada, conclui-se que é necessário maiores deformações para que esse erro seja diagnosticado.

O erro na medição de vazão não variou de forma significativa em relação ao número de Reynolds e a pressão de trabalho. Valores admissíveis diferentes foram observados para as placas de orifício utilizadas, o que indica a necessidade de uma avaliação individualizada desses parâmetros, inclusive para placas com o mesmo valor de  $\beta$ .

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se uma avaliação dessa metodologia de diagnóstico de falha para a terceira tomada de pressão a uma distância superior a  $6D$ , bem como, um estudo do efeito de deformações maiores na placa de orifício sobre a medição de vazão.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Büker, O., 2014. "Swinton technology condition based monitoring (CBM) system (Prognosis)". *Evaluation International*. E1956x14.
- ISO 5167-2, 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full.
- Jepson, P., Chipchase, R., 1973. "Effect of plate buckling on orifice meter accuracy". *Effect of plate buckling on orifice meter accuracy*. Vol.17, p.330-337.
- Reader-Harris, M., Forsyth, C., Boussouara, 2021. "The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient". *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 82, p.102043.
- Resolução Conjunta ANP/Inmetro, 2013. "Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural". 16 jan 2022 <<http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC001995.pdf>>.
- Steven, R., 2008. "Diagnostic methodologies for generic differential pressure flow meters". *North Sea Flow Measurement Workshop*. St. Andrews, Scotland, UK.
- Steven, R., 2010. "Orifice plate meter diagnostics". *White Paper: DP Diagnostics*. Colorado.
- Singh, R., Singh, S.N., Kumar, V.S.S., 2010. "Performance evaluation of orifice plate assemblies under non-standard conditions using CFD". *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. Vol. 17, p. 397-406.
- Ting, V.C., 1993. "Effects of nonstandard operating conditions on the accuracy of orifice meters". *SPE, Chevron Petroleum Technology Co*. Vol. 8, p. 58-62.