

## Análise do Diferencial de Pressão para a Estimativa de Pluma de Vazamento

Elson A. Nascimento<sup>1</sup>, William A. Tavares<sup>2</sup>, Lorena B. Calazan<sup>3</sup>, Lucas R. W. Carneiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil/UFF

<sup>2</sup>Engenheiro Civil – Pesquisador, Contrato UFF/Petrobras

<sup>3</sup>Aluna de graduação do Curso de Engenharia Civil/UFF

<sup>4</sup>Aluno de graduação do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental/UFF

Niterói, 26 de abril de 2021.

### RESUMO

*Uma das fases do projeto de pesquisa para a quantificação de vazamentos de óleo/gás em poços subsea a partir de imagens envolve a reprodução do fenômeno em condições de laboratório. Para isso, desenvolveu-se um aparato representado por um sistema de pressurização conectado a um microtubo para a injeção do fluido em um reservatório transparente. Durante a realização dos experimentos foi observada a necessidade do cálculo da estimativa das vazões obtidas para cobrir intervalos não cobertos pelos experimentos. A presente pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de uma expressão ou fórmula empírica para estimar o valor das vazões de óleo/gás medidas no laboratório. A metodologia tomou por base a fórmula de orifício acrescida de uma função para ajuste entre os valores calculados e os medidos de vazão de ar em tubo de 1.0 mm de diâmetro. Tanto as vazões calculadas pela fórmula de orifício quanto as medidas nos experimentos apresentaram distribuição linear com coeficientes de correlação superiores a 0,9 para ambos os métodos. Então, o erro entre as duas distribuições foi representado também por uma reta, tendo como variável dependente o próprio diferencial de pressão. Desta forma, os termos da equação da referida reta dos erros foram adicionados à fórmula do orifício para o cálculo ou estimativa das vazões obtidas no experimento. Os resultados da comparação entre os valores de vazão medidos e os calculados a partir da fórmula desenvolvida apresentaram afastamentos entre 16,4% e 2,0 %, quando aplicados os diferenciais de pressão entre 0,026 m.c.a. e 0,096 m.c.a., respectivamente. Portanto, os resultados mostram-se promissores recomendando-se a sua aplicação a outros intervalos de pressão e diâmetros de microtubos para definição da sua abrangência da fórmula.*

### APLICABILIDADE NA INDÚSTRIA

- 1) Conhecendo-se o diferencial de pressão entre o poço e o solo marinho e as medidas de vazão por imagem, poderá ser estimada a área equivalente como parâmetro indicativo da causa do vazamento.
- 2) A partir de sucessivas medições de vazamentos, poderá ser definida a equação do vazamento do poço permitindo estimar o vazamento máximo esperado em função da variação de pressão do reservatório.

## 1. Introdução

A proposta de quantificação de vazamentos em poços submarinos, por meio de imagem, baseia-se no estudo da pluma de dispersão, representada pelo deslocamento de bolhas e/ou gotas a partir dos pontos de vazamentos. Como é sabido que para que exista um escoamento de um fluido é necessário haver um diferencial de pressão entre o ponto de origem e o ponto de destino deste fluido, a causa relacionada ao surgimento da pluma, com base no conceito de escoamento de potenciais, poderá ser uma nova maneira de abordar o problema, ressaltando-se que, até o momento, não foram identificados registros técnicos científicos sobre este tipo de abordagem do assunto.

Uma das fases do projeto de pesquisa para a quantificação de vazamentos de óleo/gás em poços *subsea*, a partir de imagens, envolve a reprodução do fenômeno em condições de laboratório. Para isso, desenvolveu-se um aparato representado por um sistema de pressurização conectado a um micro tubo para a injeção do fluido em um reservatório transparente. Durante a realização dos experimentos foi observada a necessidade do cálculo da estimativa das vazões obtidas para cobrir intervalos não cobertos pelos experimentos. A presente pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de uma expressão ou fórmula empírica para estimar o valor das vazões de óleo/gás medidas no laboratório.

## 2. Metodologia

A presente abordagem surgiu a partir dos conceitos básicos de Mecânica dos Fluidos relacionados à teoria dos escoamentos de potenciais [1, 2]. Ou seja, para que haja escoamento é necessária a existência de diferenciais de pressão e condutividade no meio ou algum elemento que permita a transferência de massa ou propriedade entre estes dois pontos. São inúmeras as condições de emprego deste conceito, não se restringindo somente aos fluidos, englobando, portanto, toda a área dos Fenômenos de Transporte, como por exemplo, a transferência de calor e massa [3, 4].

As soluções para problemas de hidrodinâmica possuem um grande apoio nas observações práticas e experimentais que, em geral, podem ser explicadas pela teoria, mas nem sempre têm dedução, diretamente, a partir dos princípios da Mecânica dos Fluidos. Neste contexto, encontram-se, por exemplo, as dezenas de fórmulas empíricas para o cálculo de perdas de cargas em tubulação, como a de Darcy-Weisbach e a de

Hazen-Williams [5, 6], que são amplamente aplicadas nas metodologias de cálculo hidráulico.

No presente trabalho, foi utilizada como base a fórmula de orifício (eq. 1) que é fundamentada no Teorema de Bernoulli e na Equação de Torricelli [5, 6].

$$Q = C_d \times S \times \sqrt{2 \times g \times \Delta P} \quad (1)$$

onde,

$Q$  = vazão volumétrica ( $m^3/s$ );

$C_d$  = coeficiente de descarga;

$S$  = área do orifício ( $m^2$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\Delta P$  = diferencial de pressão (m.c.a.);

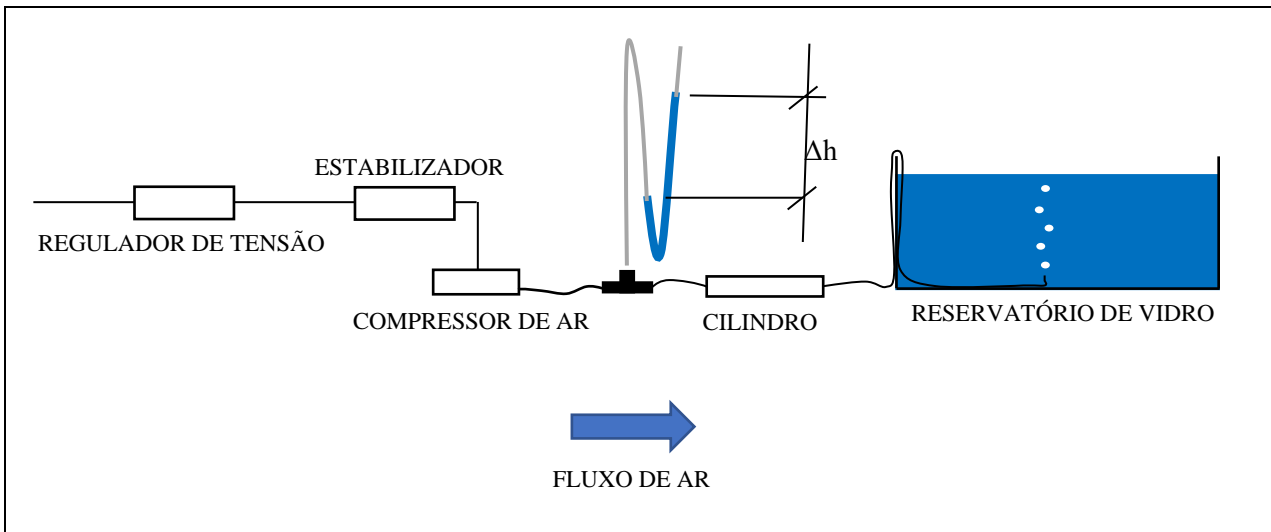
### 3. Desenvolvimento

Foram realizados testes experimentais em laboratório, a fim de simular vazamentos de ar e obter os dados de pressão e vazão em cada simulação. Em seguida, a partir dos dados obtidos e utilizando a fórmula de orifícios, foram calculadas as vazões de cada teste. Posteriormente, foi feita uma comparação entre os resultados experimental e calculado, e obtida uma equação de erros.

#### 3.1 Testes Experimentais

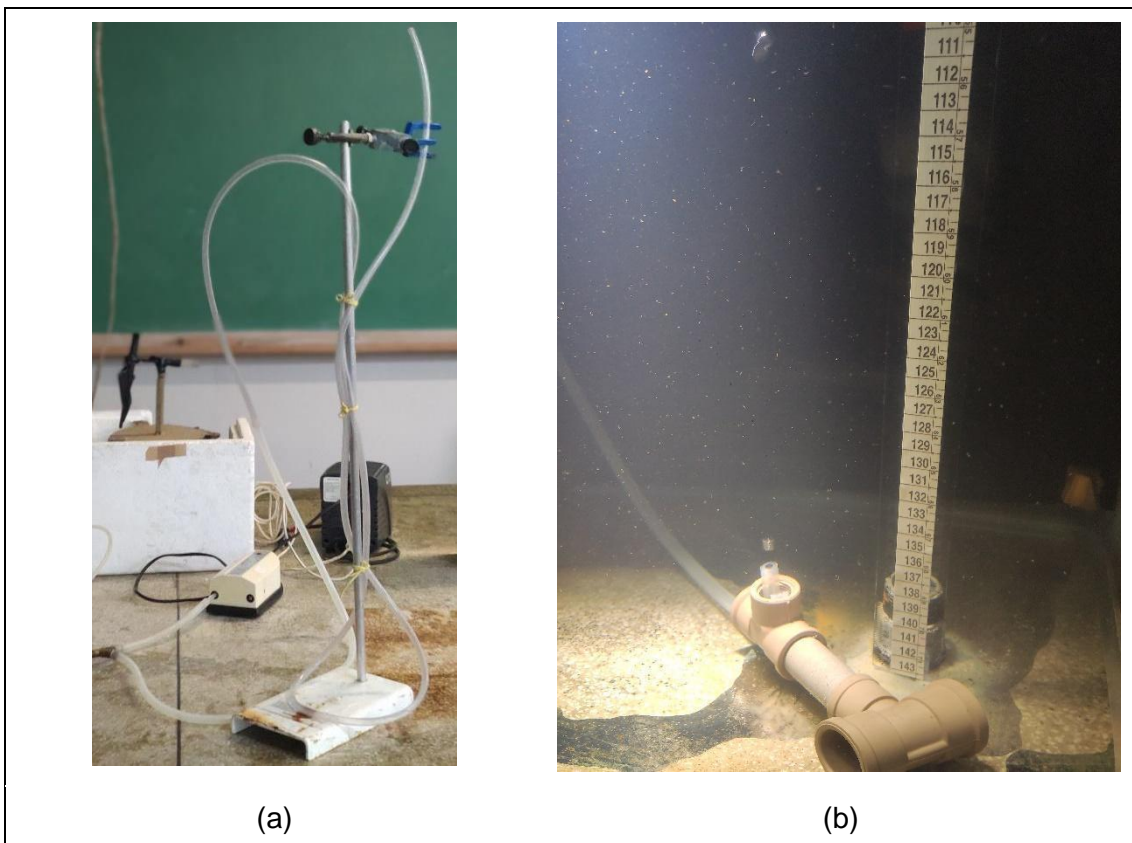
O objetivo dos testes experimentais foi simular vazamentos de ar em água da rede e obter os dados de pressão e vazão de cada teste. Para isso, foi montado um aparato (Figura 1) composto por um compressor de ar, ligado a um regulador de tensões e conectado, em série, a um manômetro “em U”. Ao variar a tensão do sistema, a vazão de ar também era alterada. Adicionalmente, o regulador de tensões foi ligado a um estabilizador, para evitar oscilações involuntárias na vazão.

Figura 1. Esquemático do aparato experimental



A pressão interna  $P_I$  do sistema de injeção de ar foi obtida através de um manômetro “em U” (Figura 2a). A pressão externa  $P_E$  foi considerada igual à carga d’água exercida sobre o ponto do vazamento (Figura 2b).

Figura 2. (a) Manômetro "em U" e (b) vista do interior do reservatório utilizado para os testes.



O diferencial de pressão  $\Delta P$ , então, foi calculado pela diferença entre as pressões internas e externas em cada medição (eq. 2).

$$\Delta P = P_I - P_E \quad (2)$$

Para a determinação da vazão experimentalmente  $Q_{exp}$ , foi utilizado o método direto, ou seja, volume dividido por tempo (eq. 3). Para determinar o volume  $V_{ar}$ , as bolhas de ar em ascensão foram coletadas em um béquer. O intervalo  $\Delta t$  da medição foi medido por um cronômetro.

$$Q_{exp} = V_{ar}/\Delta t \quad (3)$$

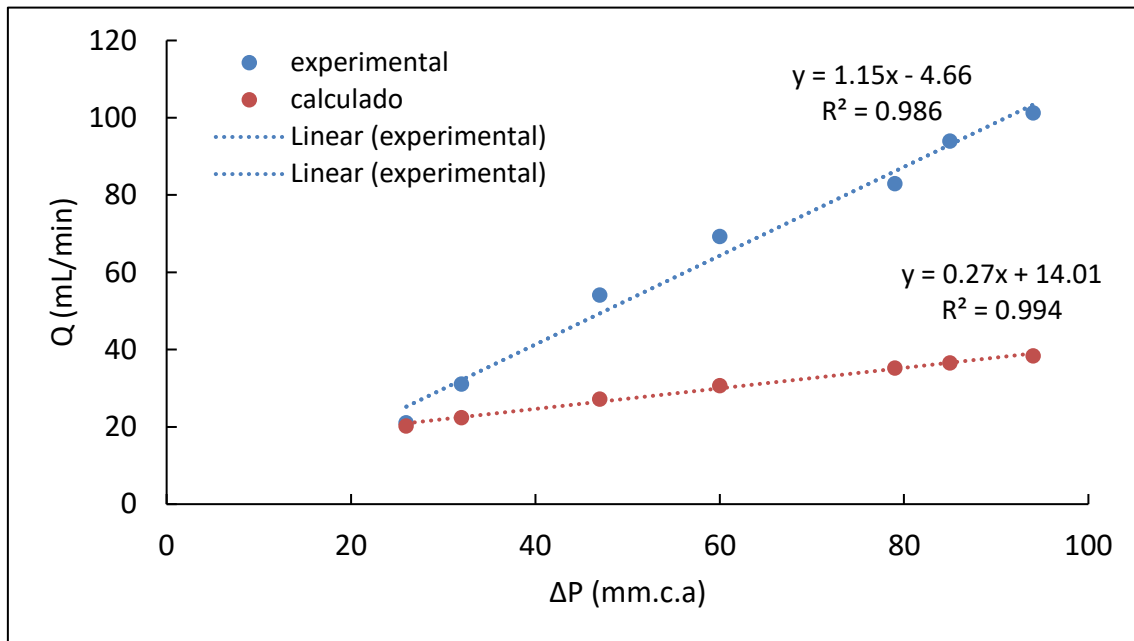
### 3.2 Cálculo da Vazão

A partir dos dados de pressão, foi possível utilizar a fórmula de orifício (eq. 1), que tem sido amplamente utilizada para o cálculo hidráulico e o respectivo dimensionamento de orifícios, bocais tubos curtos e vertedores de parede delgada [5, 6], que é constituída pela multiplicação da área do orifício, velocidade e coeficiente de descarga.

A área  $S$  do orifício foi calculada a partir do diâmetro do tubo capilar. Para o coeficiente de descarga  $C_d$  está sendo adotado o valor de 0,6, podendo ainda atingir a 1,0, conforme tem sido utilizado em cálculo de dispositivos hidráulicos [5, 6].

### 3.3 Definição da Equação de erros

Os resultados de vazão em função do diferencial de pressão, tanto experimentais quanto calculados, foram plotados em um gráfico (Figura 3), a fim de compará-los. Observou-se que, para a faixa de vazão utilizada, o comportamento tanto dos resultados experimentais quanto dos calculados se aproximam de uma reta. Portanto, através do método de regressão linear, foram obtidas as equações dessas retas, cujos valores de  $R^2$  verificam a premissa inicial, que era ter dados suficientemente próximos da linha de regressão.

Figura 3. Vazão  $Q$  (mL/min) versus Diferencial de pressão  $\Delta P$  (mm.c.a.)

Observando ainda os resultados, pode-se perceber que a diferença entre vazão experimental e vazão calculada é crescente à medida em que se aumenta o diferencial de pressão. Com o objetivo de ajustar as duas retas de aproximação, foi obtida a equação 6 a partir da diferença dos resultados observados em função do diferencial de pressão, através do método de regressão linear.

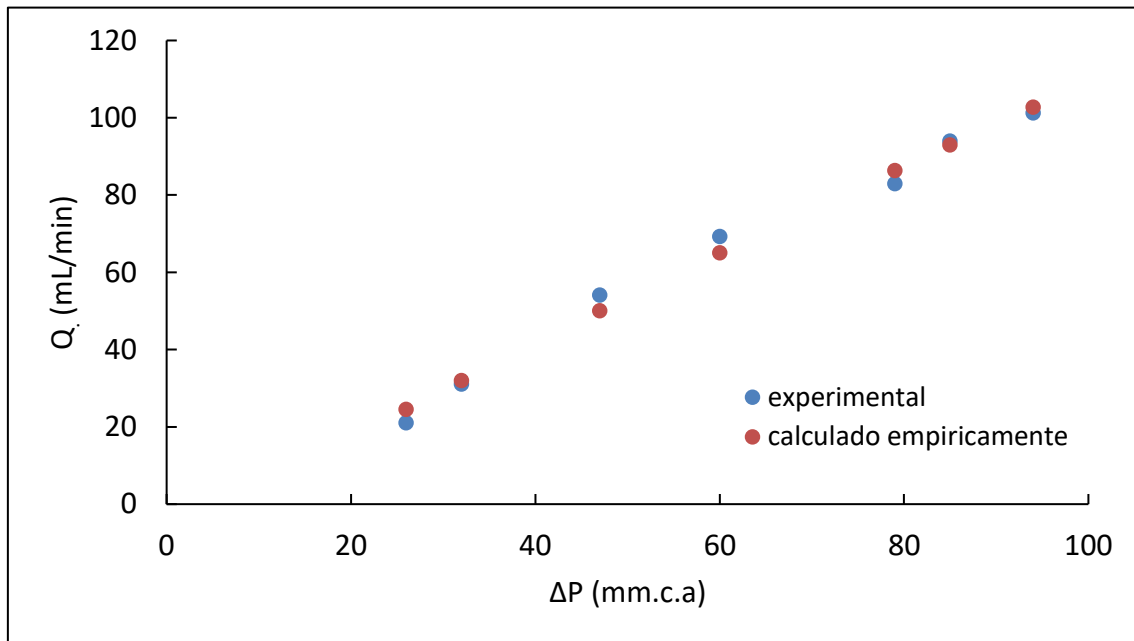
$$Q = 0,88 \times \Delta P - 18,67 \quad (4)$$

Finalmente, essa equação obtida (eq. 4) foi adicionada à fórmula de orifício (eq. 1), de modo que fosse determinada uma equação empírica que expressa os resultados observados do teste realizado em laboratório (eq. 5).

$$Q = C_d \times S \times (2 \times g \times \Delta P)^{0,5} + 0,88 \times \Delta P - 18,67 \quad (5)$$

#### 4. Aplicação da equação empírica

Foi aplicada a equação empírica obtida (eq. 5) para  $C_d = 0,6$  e para os valores de diferencial de pressão medidos em laboratório (Figura 4).

Figura 4. Vazão  $Q$  (mL/min) versus Diferencial de pressão  $\Delta P$  (mm.c.a.)

Observa-se que os resultados obtidos empiricamente a partir da fórmula de orifício se aproximam dos resultados experimentais. O maior erro é observado quando ocorre o menor diferencial de pressão (26 mm.c.a.) e corresponde a 16,4%. Entretanto, para as demais vazões, os erros são menores que 8%, sendo que para os maiores  $\Delta P$  (85 mm.c.a. e 94 mm.c.a.), os erros são menores que 2%.

## 5. Conclusão

Foi obtida empiricamente uma equação que representa a relação entre a vazão e o diferencial de pressão atuante nos testes desenvolvidos em laboratório de forma a buscar uma solução para o processo de quantificação relativo ao vazamento de ar, utilizando um tubo capilar de 1,0mm. Os ajustes encontrados para a equação de orifício original se mostraram adequados para, quando feita uma comparação entre os resultados de sua aplicação e os resultados experimentais, se chegar em coeficientes de correlação com valores de 0,9 e em dados no formato de uma reta, sendo possível verificar taxas de erro entre 2,0% e 16,4%, demonstrando a sua eficácia inicial para os parâmetros e intervalos trabalhados e apresentando potencial para novos estudos com diferentes diâmetros e valores de diferencial de pressão.

## 6. Próximas atividades

- Indicar o erro médio e o desvio padrão dos testes;
- Testar o funcionamento da fórmula empírica para valores de diferencial de pressão fora da faixa adotada, a fim de verificar a adequabilidade da equação;
- Expandir e procurar novas metodologias para a adequação de resultados obtidos utilizando valores diferentes de diâmetro do orifício;
- Adequação do valor do Coeficiente de Descarga ( $C_d$ ), que pode ser modificado tendo em vista novos experimentos;
- Fazer o ajuste de erros para testes de novos diâmetros.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. 6ª ed. McGraw-Hill, 2010.
- [2] FOX R, W.; MCDONALD Alan T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8ª ed. John Wiley and Sons, N.Y., Tradução: LTC, 2014.
- [3] LIENHARD, J. H., *A Heat Transfer Textbook*. 4ª ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2012. Disponível em: [web.mit.edu/lienhard](http://web.mit.edu/lienhard). Acesso em 10/05/2015.
- [4] INCROPERA F. P.; DE WITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 7ª ed. LTC, 2014.
- [5] PORTO, R. M. *Hidráulica Básica*. EESC-USP, 2004.
- [6] AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M.; ARAÚJO, R.; ITO, A. E. *Manual de Hidráulica*. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda. 1998.