

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DETECÇÃO DE VAZAMENTO EM OLEODUTO CONTENDO CONEXÃO TÊ

M. de V. ARAÚJO<sup>1</sup>, F. D. T. de LUNA<sup>2</sup>, S. R. de FARIAS NETO<sup>3</sup>, A. G. B. de LIMA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química

<sup>3</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química

<sup>4</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

E-mail para contato: morganamva@gmail.com

**RESUMO** – Diante o grande número de acidentes na indústria petrolífera envolvendo dutos, diversas pesquisas vêm buscando o aperfeiçoamento das tecnologias de detecção de vazamento, mas para isto se faz necessário o conhecimento do comportamento do fluido no interior da tubulação. A análise de escoamento em dutos contendo vazamento, através de perfis de velocidade, temperatura e pressão, por exemplo, é muitas vezes viável de ser realizada utilizando modelos computacionais, visto que os parâmetros podem ser modificados com uma maior facilidade, o que possibilita um aumento na variedade de ensaios. O trabalho exposto no artigo consiste em simular em CFD (fluidodinâmica computacional) o escoamento de petróleo em uma tubulação contendo uma conexão tê e um vazamento no duto principal. O objetivo principal do trabalho é analisar como as vazões nas seções de entrada influenciam na detecção do vazamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos acidentes industriais envolvem o rompimento de tubulações, causados por corrosões, falha de soldagem ou forças naturais, resultando em grandes prejuízos ambientais e financeiros. As redes de dutos são monitoradas de forma a detectar com rapidez o início de um vazamento para que as medidas cabíveis sejam realizadas para evitar ou amenizar desastres.

A localização da tubulação é um fator extremamente importante e que deve ser considerada na escolha do método de detecção de vazamentos, pois a sensibilidade do equipamento pode ser influenciada por fatores externos, como, por exemplo, as correntes marítimas, em caso de dutos no mar, o clima, em dutos expostos ao ar livre e as propriedades do subsolo, em dutos enterrados. As redes de dutos são formadas por tubos de diversos diâmetros e acessórios a exemplo de válvulas, joelhos e conexões tê. Logo, estes acessórios também devem ser considerados na escolha do método de monitoramento.

Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas visando o aperfeiçoamento das tecnologias de detecção de vazamento, onde é necessário o conhecimento do comportamento do(s) fluido(s) no interior da tubulação (Araújo *et al.*, 2013(a, b); Barbosa *et al.*, 2012; Habib *et al.*, 2012 e Sousa, 2007).

A necessidade de mais informações sobre o comportamento hidrodinâmico em uma conexão tê na presença de vazamento motivou o desenvolvimento do presente trabalho. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo estudar numericamente o escoamento de óleo em uma tubulação acoplada a uma conexão tê e analisar a influência da mudança nas vazões volumétricas nas entradas na detecção do vazamento via medição de pressão.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Domínio de estudo

O domínio físico adotado para o estudo da hidrodinâmica do fluxo de óleo consiste em uma conexão tê horizontal onde o duto principal possui 6 metros de comprimento e o duto secundário tem 3 metros, ambos com diâmetro de 0,1 m (Figura 1). O orifício de vazamento tem 0,8 cm de diâmetro e está localizado 1,5 m da Seção B, conforme ilustra a Figura 1. A representação do domínio computacional foi feita com o auxílio do ICEM-CFD 12.1.

A malha representativa é do tipo hexaédrica, permitindo o maior controle do refinamento nas regiões desejáveis, e contém aproximadamente 642 mil elementos de controle (Figura 2).

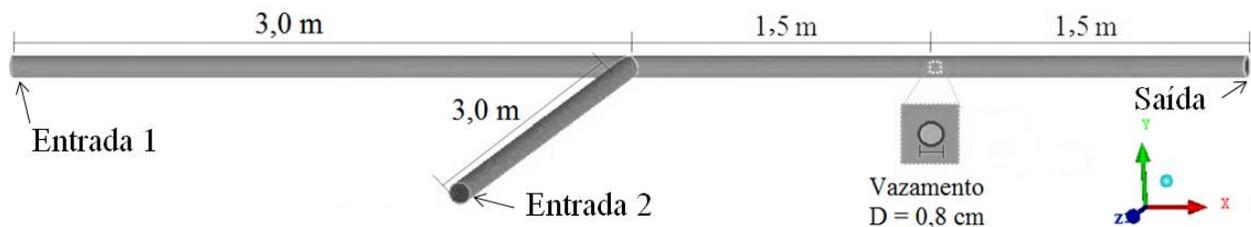


Figura 1 – Domínio físico da conexão tê.

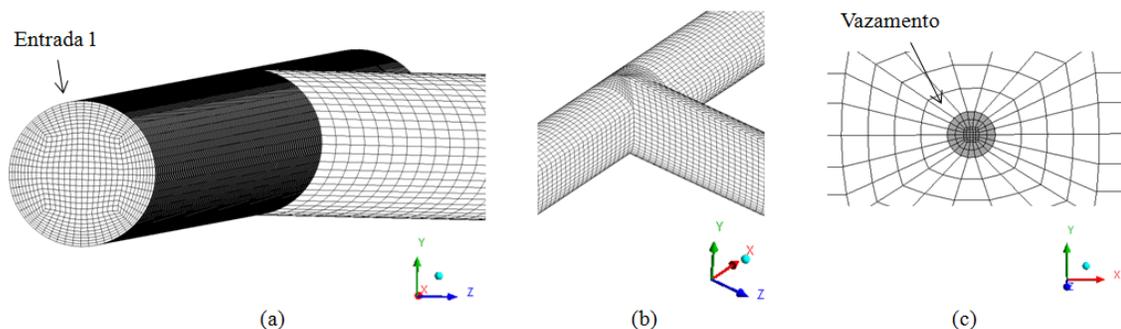


Figura 2 – Malha hexaédrica e seu refinamento na (a) Seção A, (b) na interseção e (c) no vazamento.

## 2.2. Modelagem matemática

As equações governantes que descrevem o escoamento monofásico de óleo na conexão têm, conservação da massa e do momento, são representadas pelas Equações 1, 2, 3 e 4 (Ansys CFX, 2009). Foram assumidas condições de fluido Newtoniano e incompressível, processo isotérmico, fluxo turbulento e ausência de reação química e de efeito gravitacional.

O estudo consistiu de duas etapas: uma permanente e uma transiente.

a) Para o escoamento permanente, têm-se:

- Equação da conservação da massa

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

onde,  $\rho$  e  $\mathbf{U}$  são a densidade e o vetor velocidade, respectivamente.

- Equação da conservação do momento

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

onde  $p$  é a pressão e  $\boldsymbol{\tau}$  é o tensor de cisalhamento.

b) Para o escoamento transiente, têm-se:

- Equação da conservação da massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3)$$

onde  $t$  é o tempo.

- Equação da conservação do momento

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (4)$$

onde  $p$  é a pressão e  $\boldsymbol{\tau}$  é o tensor de cisalhamento.

O modelo de turbulência escolhido para todas as simulações é o modelo  $k-\varepsilon$  padrão, que é classificado como modelo de duas equações: equação da energia cinética turbulenta  $k$ , e a da taxa de dissipação turbulenta  $\varepsilon$ . Foi escolhido por ser um dos mais notáveis modelos de turbulência e ser considerado o modelo padrão industrial.

### 2.3. Condições de contorno

As condições de contorno para todos os casos são descritas na Tabela 1. Os casos 1, 2 e 3 são permanentes e não possuem vazamento, e foram usados como condições iniciais para os Casos 4, 5 e 6, respectivamente. Essa metodologia foi adotada pela necessidade de se obter um perfil de escoamento definido antes da ocorrência do vazamento.

Tabela 1 – Dados usados nas simulações

Simulação	Entrada 1	Entrada 2	Saída	Vazamento	Regime de escoamento
Caso 1	18 L/s	18 L/s	101325 Pa	Condição de parede (tubo liso)	Permanente
Caso 2	24 L/s	12 L/s	101325 Pa	Condição de parede (tubo liso)	Permanente
Caso 3	12 L/s	24 L/s	101325 Pa	Condição de parede (tubo liso)	Permanente
Caso 4	18 L/s	18 L/s	101325 Pa	101325 Pa	Transiente
Caso 5	24 L/s	12 L/s	101325 Pa	101325 Pa	Transiente
Caso 6	12 L/s	24 L/s	101325 Pa	101325 Pa	Transiente

### 2.4. Propriedades físico-químicas

As propriedades do óleo utilizado nas simulações foram extraídas de Araújo *et al.* (2013). A densidade tem o valor de  $860 \text{ kg/m}^3$  e a viscosidade um valor de  $0,044 \text{ Pa.s}$ .

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise da perturbação causada na pressão do sistema com o aparecimento do vazamento, foram tomados valores de pressão média na Entrada 1 (Seção 1), na Entrada 2 (Seção 2), na Seção 3 (seção transversal em  $x = 3,8 \text{ m}$ ) e na Seção 4 (seção transversal em  $x = 4,2 \text{ m}$ ), como ilustra a Figura 3. Os valores de pressão temporais nas quatro seções e para os Casos 4, 5 e 6 são exibidos nas Figuras 4, 5, 6 e 7.

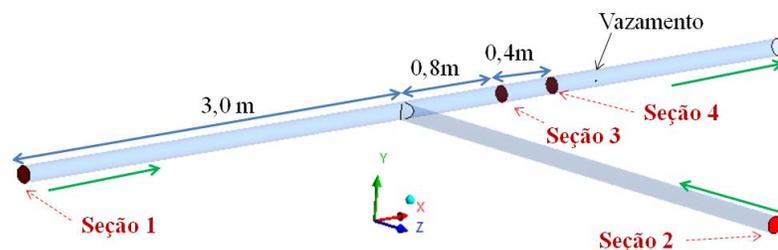


Figura 3 – Seções transversais usadas para obter valores de pressão média.

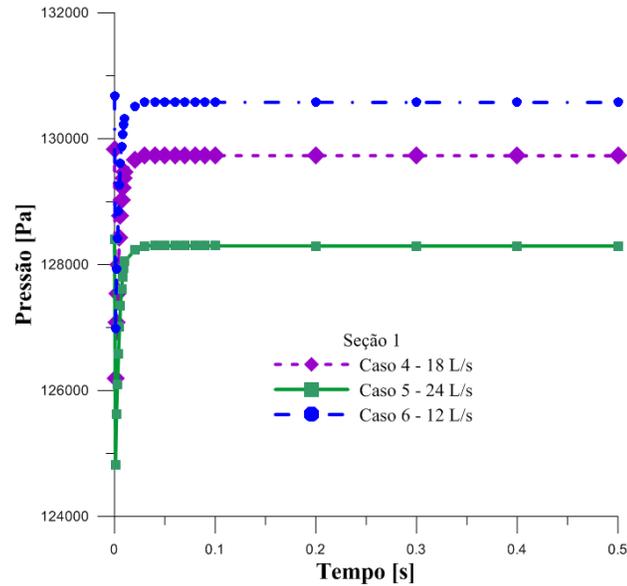


Figura 4 – Variação temporal da pressão média na seção 1 e na presença de vazamento.

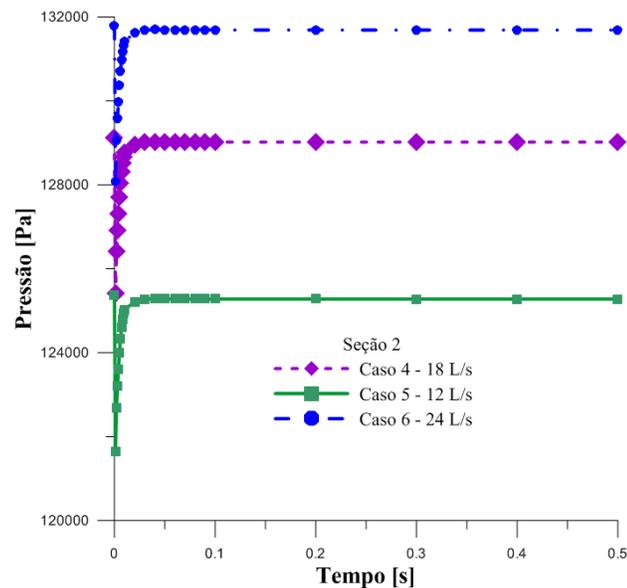


Figura 5 – Variação temporal da pressão média na seção 2 e na presença de vazamento.

As vazões volumétricas foram escolhidas de forma a possuírem o mesmo valor na saída do duto. A soma das vazões nas Entradas 1 e 2 é sempre 36 L/s. As Figuras 4 e 5 exibem resultados esperados, onde o declínio da pressão seguido de sua elevação tem valores distintos, pois em cada seção há uma vazão volumétrica distinta. As quedas iniciais de pressão para cada caso e em cada seção são expostas na Tabela 2. As diferenças entre as pressões antes do vazamento e após 0,5 s, tempo suficiente para a estabilização da pressão, também são expostas na mesma tabela.

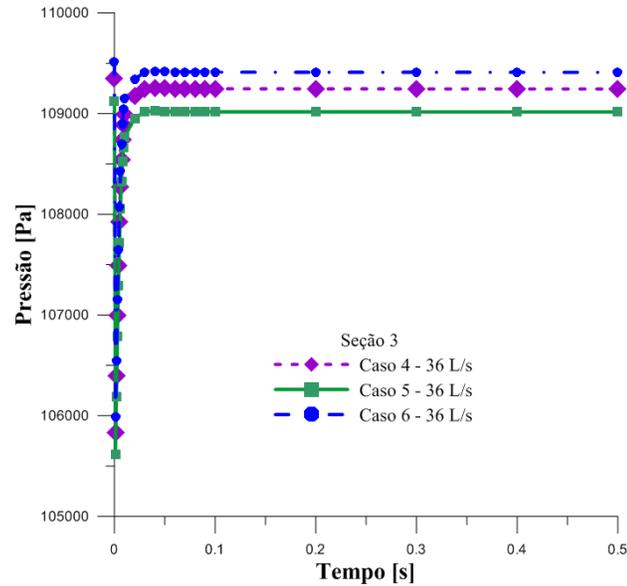


Figura 6 – Variação temporal da pressão média na seção 3 e na presença de vazamento.

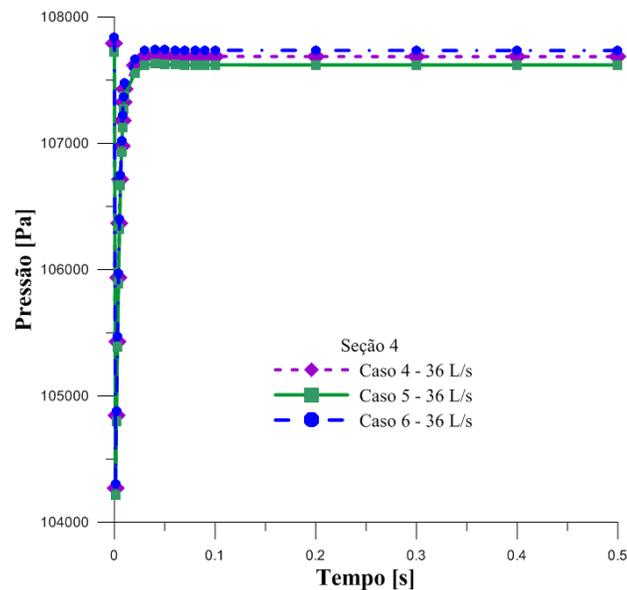


Figura 7 – Variação temporal da pressão média na seção 4 e na presença de vazamento.

É interessante observar, nas Figuras 6 e 7, que nas seções transversais 3 e 4, flui a mesma vazão volumétrica para os três casos, porém o valor inicial, o valor do declínio máximo e o valor de estabilização da pressão são diferentes para cada situação. De acordo com as figuras citadas, as pressões medidas na Seção 3 sofrem uma maior influência do efeito de borda da conexão tê, pois estão mais próximas da mesma. Esse comportamento é caracterizado pelo fato das pressões médias temporais serem distintas para cada caso.

Tabela 2 – Variações de pressão para os Casos 4, 5 e 6.

	Queda inicial de pressão				Diferença entre a pressão inicial e final			
	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Seção 4	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Seção 4
Caso 4	3641 Pa	3716 Pa	3518 Pa	3521 Pa	106 Pa	105 Pa	106 Pa	106 Pa
Caso 5	3578 Pa	3734 Pa	3504 Pa	3507 Pa	104 Pa	104 Pa	104 Pa	103 Pa
Caso 6	3705 Pa	3706 Pa	3532 Pa	3534 Pa	107 Pa	107 Pa	108 Pa	107 Pa

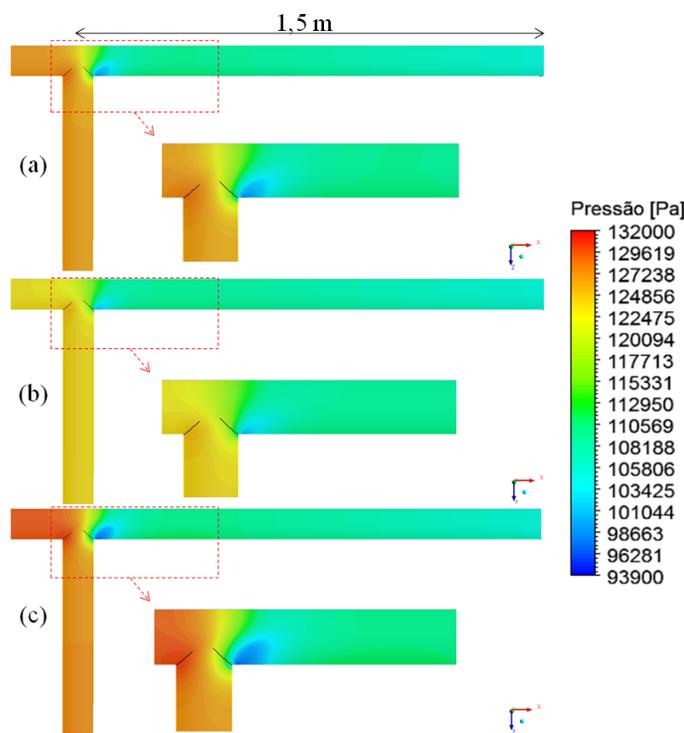


Figura 8 – Campo de pressão em região que antecede o vazamento e no tempo igual a 0,2 s  
 (a) Caso 4, (b) Caso 5 e (c) Caso 6.

A Figura 8 mostra o comportamento da pressão nas regiões que antecede o orifício de vazamento no tempo de 0,2 s, tempo necessário para que, segundo as Figuras 4, 5, 6 e 7, a pressão local se estabilize. O fluido ao entrar pelo duto secundário tende a seguir em frente ao invés de percorrer pelo duto principal, e esse comportamento gera um alto gradiente de pressão da região que circunda a conexão. Como no Caso 6 a vazão volumétrica que entra pelo duto secundário é maior do que a que entra pelo duto principal, o gradiente de pressão torna-se maior.

## 4. CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) O modelo matemático proposto mostrou-se capaz de avaliar o escoamento dentro da conexão tê.
- b) Foi possível verificar o escoamento tridimensional e turbulento no interior da tubulação e na presença de vazamento;
- c) As vazões volumétricas no duto principal e no duto secundário influenciam na detecção do vazamento.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, CNPq, FINEP, PETROBRAS, ANP/UFCG/PRH-25 e RPCMOD.

## 6. REFERÊNCIAS

ANSYS Inc., CFX-Theory Manual Guide, 2009.

ARAÚJO, M. V.; LUNA, F. D. T.; BARBOSA, E. S.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. Numerical Study of Oil Flow in Tee Junction with Leaks. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, v. 6, n. 2, p. 1-11, 2013.

ARAÚJO, M. V.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. Theoretical Evaluation of Two-Phase Flow in a Horizontal Duct with Leaks. *Advances in Chemical Engineering and Science*, v. 3, n. 2, p. 6-14, 2013.

BARBOSA, L. M.; LIMA, A. G.; FARIAS NETO, S. R. Non-isothermal transient three-phase flow (heavy oil, water and gas) in vertical pipeline: the effect of leakage. *International Journal of Modeling and Simulation for Petroleum Industry*, p. 23-31, 2012.

NAIK-NIMBALKAR, V. S.; PATWARDHAN, A. W.; BANERJEE, I.; PADMAKUMAR, G. E VAIDYANATHAN, G. Thermal Mixing in T-junctions. *Chemical Engineering Science*, v. 65, p. 5901-5911, 2010.

SOUSA, J. V.; SODRÉ, C. H.; LIMA, A. G.; FARIAS NETO, S. R. (Janeiro de 2013). Numerical Analysis of Heavy Oil-Water Flow and Leak Detection in Vertical Pipeline. *Advances in Chemical Engineering and Science*, v. 3, p. 9-15, 2013.