JOURNAL OF EDUCATION, SCIENCE AND HEALTH – JESH
Revista de Educação, Ciência e Saúde
DOI: https://www.doi.org/10.52832/jesh.v3i1.185
Home page: www.jeshjournal.com.br
e-ISSN: 2763-6119

SIMULAÇÃO DO DESGASTE EROSIVO EM UMA TUBULAÇÃO UTILIZANDO COMPUTIONAL FLUID DYNAMICS CFD

SIMULATION OF EROSIVE WEAR IN A PIPE USING COMPUTIONAL FLUID DYNAMICS CFD

SIMULACIÓN DEL DESGASTE EROSITIVO EN UNA TUBERÍA MEDIANTE COMPUTIONAL FLUID DYNAMICS CFD

Bruno Diego Meireles Spolaor[1*]; **Leandro Cardoso da Silva**[2]

[1]Bacharel em Engenharia Mecânica, Faculdades Metropolitanas Unidas (FMU) 2019. Pós-graduando em Projetos Mecânicos Industriais, Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Simonsen, São Paulo, SP, Brasil; [2]Doutorando em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo (USP). Docente do curso de Especialização em Projetos Mecânicos Industriais, Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Simonsen, São Paulo, SP, Brasil.
*Autor correspondente: bruno.spolaor@senaisp.edu.br.

Recebido: 22/11/2022 | **Aprovado**: 30/12/2022 | **Publicado**: 13/02/2023

Resumo: Com o avanço da tecnologia e a otimização dos processos de engenharia, pesquisa e desenvolvimento, a simulação computacional se mostra uma importante ferramenta para analisar problemas complexos e prever fenômenos físicos de forma relativamente simples e rápida. O objetivo desse estudo, usando a tecnologia de *Computional Fluid Dynamics* (CFD) disponível no *software* Ansys®, foi realizar a simulação de um escoamento bifásico, composto por vapor de água e partículas de carvão mineral, escoando por uma tubulação de alumínio. Através dessa simulação, obter dados referentes a erosão sofrida, em decorrência da turbulência e atrito do escoamento. Por meio desses resultados, foi possível verificar os locais onde há maior incidência e previsibilidade de erosão. Paralelo à análise de erosão, com os dados de pressão total do sistema, foi possível comparar a taxa de erosão com a pressão máxima na tubulação e constatar que o local com maior desgaste, também é o de maior incidência de pressão.

Palavras-chave: Erosão. Simulação. Tubulação.

Abstract: With the advancement of technology and the optimization of engineering processes, research and development, computer simulation is an important tool to analyze complex problems and predict physical phenomena in a relatively simple and fast way. The objective of this study, using the Computational Fluid Dynamics (CFD) technology available in the Ansys® software, was to simulate a two-phase flow, composed of water vapor and coal particles, flowing through an aluminum pipe. Through this simulation, obtain data regarding the erosion suffered, as a result of turbulence and friction of the flow. Through these results, it was possible to verify the places where erosion is most prevalent and predictable. Parallel to the erosion analysis, with the total pressure data from the system, it was possible to compare the erosion rate with the maximum pressure in the pipe and verify that the location with the greatest wear is also the one with the highest incidence of pressure.

Keywords: Erosion. Simulation. Pipe.

Resumen: Con el avance de la tecnología y la optimización de los procesos de ingeniería, investigación y desarrollo, la simulación por ordenador es una herramienta importante para analizar problemas complejos y predecir fenómenos físicos de forma relativamente sencilla y rápida. El objetivo de este estudio, utilizando la tecnología de dinámica de fluidos computacional (CFD) disponible en el software Ansys®, era realizar la simulación de un flujo bifásico, compuesto por vapor de agua y partículas de carbón, que fluye a través de una tubería de aluminio. Mediante esta simulación, se obtuvieron datos relativos a la erosión sufrida, debida a la turbulencia y a la fricción del flujo. Por medio de estos resultados, fue posible verificar los lugares donde hay mayor incidencia y previsibilidad de erosión. Paralelamente al análisis de erosión, con los datos de presión total del sistema, fue posible comparar la tasa de erosión con la presión máxima en la tubería y verificar que el lugar con mayor desgaste es también el de mayor incidencia de presión.

Palabras-clave: Erosión. Simulación. Tubería.

1 INTRODUÇÃO

Tubulação é o conjunto de condutos fechados utilizados para o transporte interno de fluidos líquidos, gasosos, materiais pastosos ou que contenham partículas sólidas em suspensão. O sistema de tubulação também inclui conexões, flanges, válvulas, suportes, entre outros componentes. Seu projeto, operação e manutenção demandam compreender conceitos de construção, de materiais e de testes (Nayyar, 1999; Telles, 2001).

A erosão de superfícies através do impacto de partículas sólidas é classificada como desgaste, sendo esse um fenômeno complexo ocasionado por diversos processos ocorridos simultaneamente, envolvendo características mecânicas, químicas e de materiais. Esse desgaste é ocasionado por partículas suspensas no fluido ou pela ação direta do respectivo fluido (Ruff & Wiederhorn, 1979; Nayyar, 1999). De acordo com Shipley & Becker (2002) falhas por desgaste são resultado da remoção do material superficial por partículas sólidas, gerando perda de material, atrito, perda de carga interna e criação de detritos. Os danos em tubulações ocorrem em locais onde há mudança de fluxo, como curvas e cotovelos.

A erosão é um processo de perda gradual de material sofrida por uma superfície, em decorrência do impacto ocasionado por partículas sólidas que são transportadas através de fluidos. A capacidade de uma partícula ocasionar danos a uma superfície sólida está vinculada à sua energia de impacto, levando em consideração sua massa e velocidade. A forma da partícula, sua rugosidade, ângulo de impacto formado com a superfície e a frequência com que as partículas colidem também são fatores que podem ser considerados (Budinski, 2013).

Parâmetros como a quantidade de partículas erodentes, sua dureza, formato e tamanho, além de aditivos presentes nos fluidos, influenciam diretamente no processo de erosão (Kleis & Kulu, 2007). A ação da erosão em uma superfície acontece através da fratura, acarretando remoção do material e consequentemente, diminuição da massa (Budinski, 2013). Frações do material são removidas em virtude de pequenas trincas e cortes, ou uma combinação de fatores que ocorrem lentamente ao longo do tempo, em razão das propriedades físicas da partícula e da superfície (Duan & Karelin, 2003).

Diversos fenômenos físicos da engenharia podem ser descritos através de equações diferencias parciais, sendo a resolução delas, para geometrias arbitrárias, praticamente impossível por meio de métodos analíticos clássicos. O método dos elementos finitos consiste em uma aproximação numérica para a resolução dessas equações e resolver problemas como análise de tensões e escoamento de fluidos através de simulação computacional (Fish & Belytschko, 2007).

De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007) *Computional Fluid Dynamics* (CFD) analisa sistemas que envolvam fluxo de fluidos e seus fenômenos, abrangendo diversas áreas como aerodinâmica e turbomáquinas. Sendo esse tipo de análise cada vez mais utilizada no desenvolvimento de produtos e processos industriais. Esse método analítico também oferece diversos tipos de vantagens como a redução de prazos e custos, capacidade de analisar sistemas complexos ou em condições perigosas.

O *software* de simulação Ansys®, utiliza a tecnologia de fluidodinâmica computacional para a resolução de problemas de fluxo de fluidos compressíveis e incompressíveis, laminares e turbulentos, e modelos matemáticos dos fenômenos dos transportes aliados a geometrias complexas (Ansys, 2013). Esse *software* utiliza a

abordagem de Euler-Lagrange para a realização do cálculo numérico. Esse modelo híbrido permite realizar a interação entre a fase líquida, através do modelo Euleriano, e a fase particulada através do modelo Lagrangeano. Resolvendo as equações de Navier-Stokes na fase fluída e o rastreamento das partículas na fase dispersa, considerando um fluxo bifásico turbulento (Duan & Karelin, 2003; Ansys, 2013).

Desse modo, o objetivo do presente estudo é realizar uma análise de desgaste por erosão em uma tubulação, utilizando a tecnologia de *Computional Fluid Dynamics* (CFD) através do *software* Ansys®, e por meio dos resultados gerados, avaliar os pontos que sofrem maior degradação e estão mais propensos a falhas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização da análise, foi utilizado o modelo k-épsilon (k-ε), um modelo de turbulência padrão, amplamente utilizado e difundido. Conforme Ansys (2013) esse modelo se baseia nas equações de transporte de energia cinética (k) e a taxa de dissipação das partículas (ε). A turbulência da energia cinética e a taxa de dissipação são obtidas através das seguintes equações:

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

Nessas equações, G_k representa energia cinética de turbulência gerada devido aos gradientes de velocidade média. G_bé a geração de energia cinética de turbulência devido à flutuabilidade. Y_M representa a dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação geral. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes. σ_k e σ_ε são os números turbulentos de Prandtl para k e ε. S_k e S_ε são termos de origem estabelecidos pelo usuário.

Dentre os padrões disponíveis para a análise de erosão, foi utilizado o padrão genérico do *software*, que é regido pela seguinte equação:

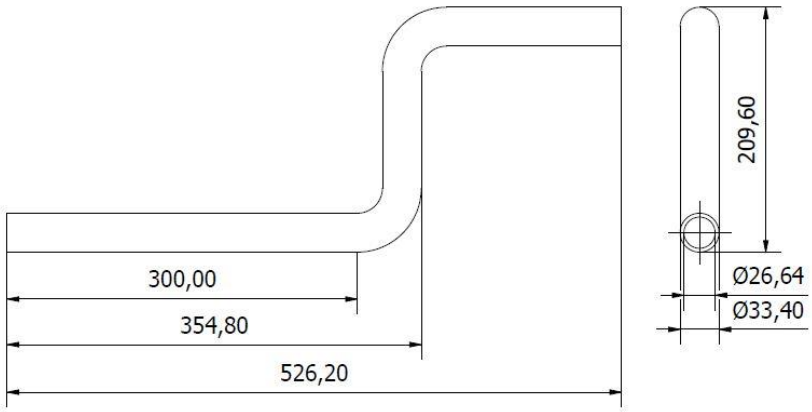
$$R_{erosion} \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{\dot{m}_p C(\mathrm{d}_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{FACE}} \quad (3)$$

Sendo $C(\mathrm{d}_p)$ uma função relacionada ao diâmetro das partículas erodentes, α o ângulo de impacto que as partículas formam ao atingir a superfície da parede, $f(\alpha)$ a função relacionada ao ângulo de impacto entre a partícula e a superfície, v a velocidade relativa da partícula, $b(v)$ é a função da velocidade relativa da partícula e A_{FACE} é a área da face da partícula na parede atingida. O cálculo da taxa de erosão é realizado e o resultado

exibido em virtude da quantidade de material removido.

Para ser usado como a base desse estudo, foi desenvolvida e modelada uma tubulação utilizando três segmentos retos e dois segmentos curvos, como parâmetros dos tubos comerciais e curvas de raio longo de 1" (uma polegada) *schedule* 40, sendo assim, o modelo se assemelha a uma tubulação real. Para otimizar a análise, não foi levado em consideração o tipo de união dos tubos e curvas, resultando em um modelo inteiriço (Figura 1).

Figura 1 – Tubulação para análise (dimensões em milímetros).

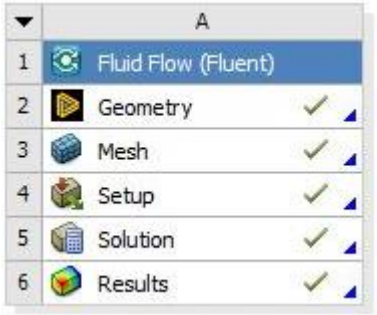


Fonte: Autores (2022).

2.1 Parâmetros analíticos

O *software* Ansys® realiza os parâmetros analíticos, utilizando os passos *Geometry* (para importação/criação e tratamento de um modelo tridimensional). *Mesh* (para geração da malha computacional a ser analisada). *Setup* (onde serão inseridas as condições e variáveis que incidirão no modelo em análise). *Solution* (onde serão obtidos os resultados da análise). *Results* (onde poderemos analisar e comparar os resultados obtidos) (Figura 2).

Figura 2 – Comando do *software* Ansys® *(Fluid flow fluent)*.



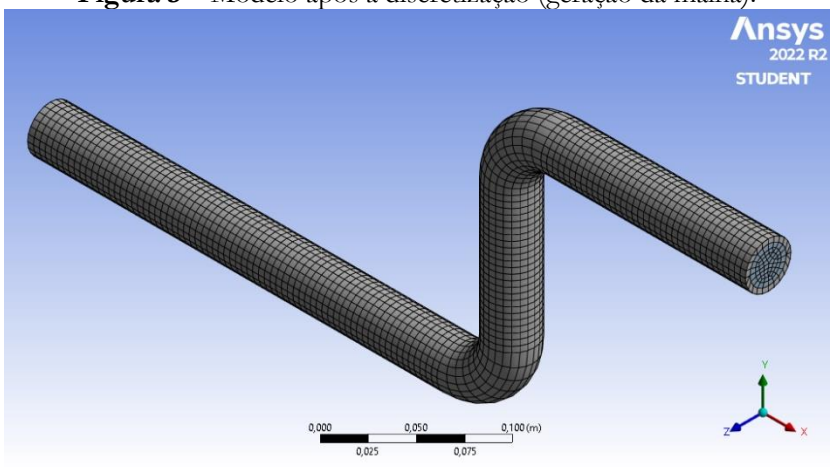
Fonte: Autores (2022).

2.2 Discretização do modelo

Foram utilizados os parâmetros padronizados preestabelecidos pelo *software* , denominados *default models,* para a geração da malha. Podemos notar na Figura 3, que tanto o modelo como o domínio computacional foram discretizados. Segundo Fish & Belytschko (2007) o conceito básico dos elementos finitos consiste em subdividir

o modelo em fragmentos, denominados elementos, conectados por nós, dando origem a malha para a realização do cálculo numérico.

Figura 3 – Modelo após a discretização (geração da malha).



Fonte: Autores (2022).

Na figura 4 vemos as estatísticas avançadas da malha, apresentando o número de elementos *elements* e de nós *nodes* que constituem a malha.

Figura 4 – Estatísticas da malha.

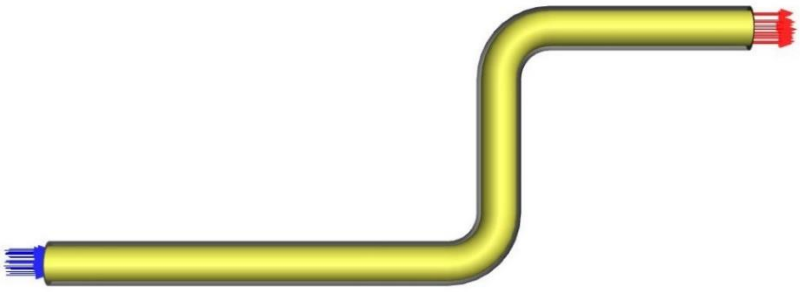
Statistics	
Nodes	17579
Elements	13152

Fonte: Autores (2022).

2.3 Análise computacional

Na Figura 5 pode-se verificar o modelo dentro do ambiente de *setup*, o modelo da tubulação se encontra transparente, o domínio computacional referente ao fluido em amarelo, a região com vetores em azul será a zona de entrada de fluxo *Inlet* e a região com vetores em vermelho será a de saída de fluxo *Outlet*.

Figura 5 – Modelo no ambiente de *setup*.



Fonte: Autores (2022).

Como parâmetro inicial, foi estabelecido a ação da gravidade em -9,81 m/s² na direção Y. A fim de se obter uma análise mais próxima da realidade.

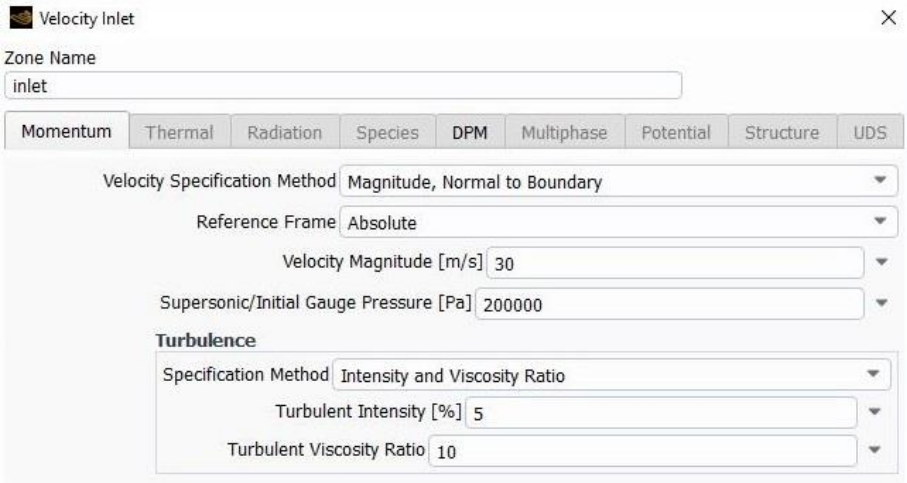
Para a composição do escoamento bifásico foi utilizado como fluido, vapor de água padrão do *software*,

como partícula erodente foi utilizado antracite, que se trata de partículas de carvão mineral com alto teor de carbono, também padrão do *software* e como material da tubulação utilizamos alumínio convencional.

Os fluxos multifísicos são compostos por uma fase de material que contenha uma resposta inercial particular, interagindo com o fluxo no qual ele está imerso, sendo agrupado em quatro categorias, sendo, gás-líquido ou fluxo líquido-líquido, fluxo gás-sólido, fluxo líquido-sólido e fluxos trifásicos (Ansys, 2013).

Os padrões de entrada do fluido foram especificados com a velocidade de 30 m/s e com pressão inicial de 200000 Pa. Esses padrões resultam em um escoamento turbulento dentro do modelo de análise (Figura 6).

Figura 6 – Parâmetros de fluxo.



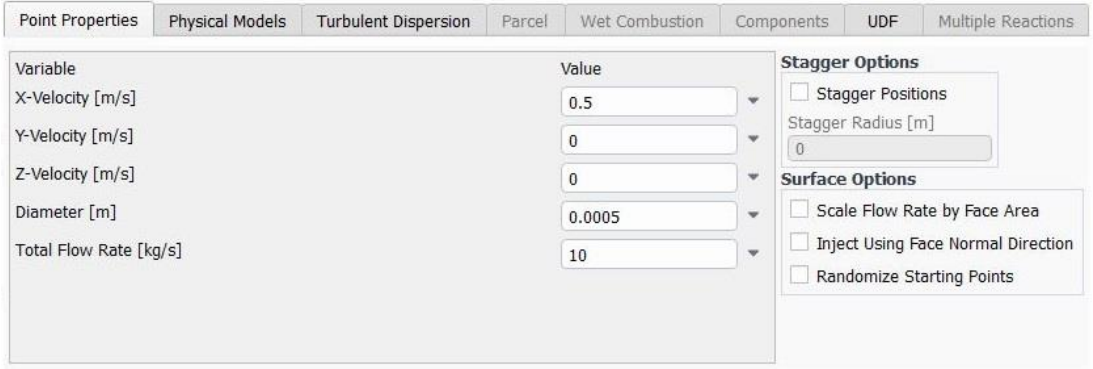
Fonte: Autores (2022).

Para Versteeg & Malalasekera (2007) os tipos de fluxos encontrados de forma prática, como os simples e os bidimensionais, passam a ser instáveis a partir de um determinado número de Reynolds, tornando-se turbulentos, desenvolvendo um estado de movimento desordenado e aleatório fazendo com que a pressão e velocidade do fluxo variem continuamente.

2.4 Propriedades das partículas

Nas propriedades das partículas (Figura 7), foi determinada a velocidade das partículas de antracite suspensas no fluido, seu diâmetro e a vazão mássica em seu domínio. Foi utilizada a velocidade no eixo X de 0.5 m/s, diâmetro de 0.0005 m e vazão mássica de 10 kg/s.

Figura 7 – Propriedades das partículas erodentes.



Fonte: Autores (2022).

Para prever a trajetória de uma partícula de fase discreta é integrado o equilíbrio de forças na partícula, que é escrito em um referencial Lagrangeano. Equilibrando as forças e igualando a inércia da partícula com as forças que atuam sobre a mesma (Ansys, 2013). Por meio das seguintes equações:

$$\frac{d\vec{u}_p}{d_t} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (4)$$

Sendo $\vec{F}$ um termo de aceleração adicional (força/unidade de massa da partícula, $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ a força de arrasto por unidade de massa da partícula, $\vec{u}$ a velocidade da fase fluida, $\vec{u}_p$ a velocidade da partícula, μ a viscosidade molecular do fluido, ρ a densidade do fluido, ρ_p a densidade da partícula , d_p o diâmetro da partícula e Re o número de Reynolds relativo.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_D Re}{24} \quad (5)$$

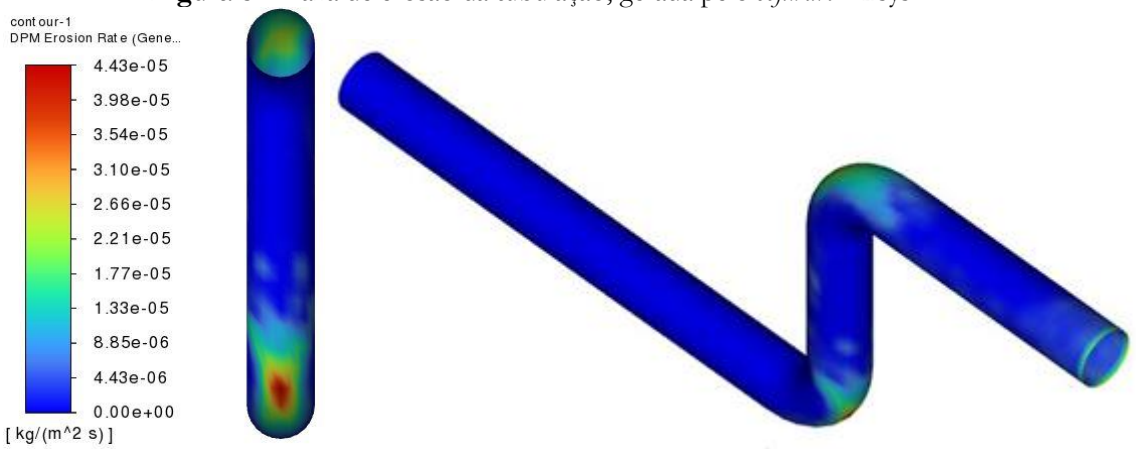
O número relativo de Reynolds pode ser descrito através da seguinte equação:

$$R_e \equiv \frac{\rho\, d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (6)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização da simulação, os resultados da análise de taxa de erosão foram gerados e exibidos através de um gráfico em cores. Os resultados obtidos puderam ser avaliados visualmente no modelo, através das cores correspondentes conforme Figura 8.

Figura 8 – Taxa de erosão da tubulação, gerada pelo *software* Ansys®.

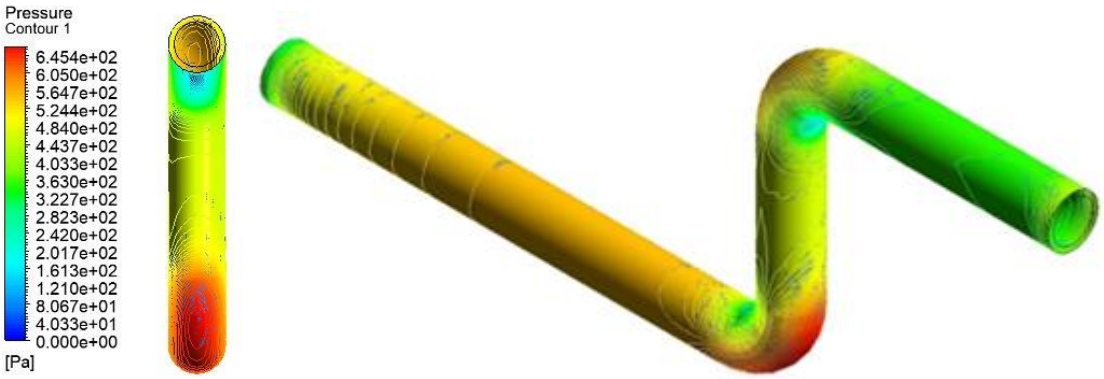


Fonte: Autores (2022).

Através da imagem gerada, pode-se verificar que as curvas são os pontos com maior incidência de erosão, onde há maior turbulência gerada, bem como no bocal de saída, onde ocorre a dispersão das partículas. Constatou-se ainda que o ponto com maior incidência de erosão é na curva inferior da tubulação. A taxa de erosão máxima encontrada foi de 4.43e-05 kg/m²s. Isso nos mostra que há perda de massa na parede da tubulação, ou seja, está ocorrendo desgaste.

A Figura 9 nos mostra quais são os pontos de maior pressão, constatamos que a pressão aumenta gradualmente no segmento de entrada e nas curvas. Podemos observar que o ponto com pressão máxima na tubulação é o segmento da curva inferior resultando em 6.454e+02 Pa.

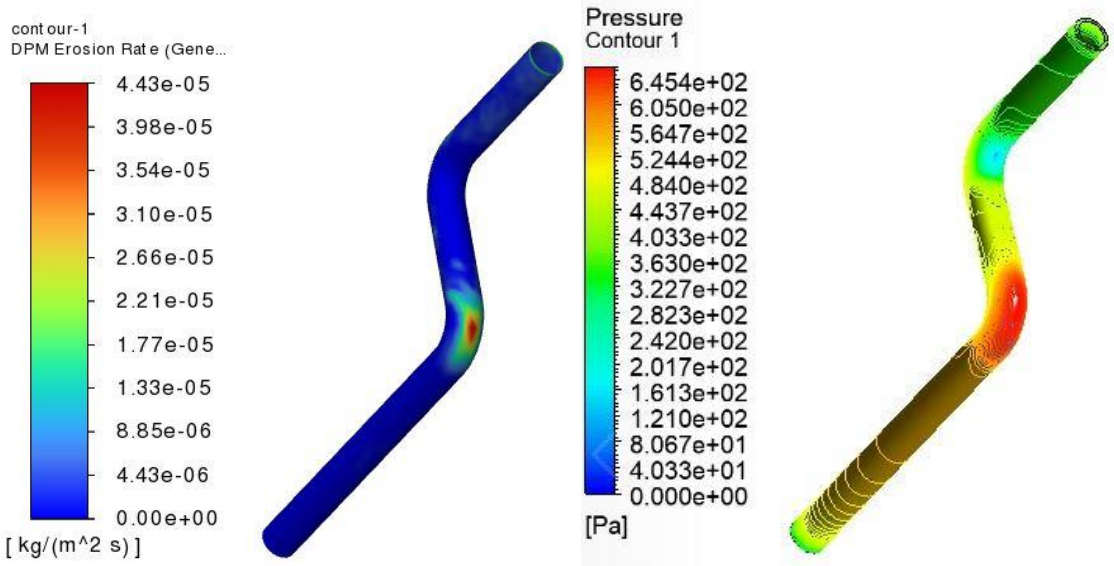
Figura 9 – Pressão máxima no interior da tubulação.



Fonte: Autores (2022).

Fazendo uma analogia entre os modelos de taxa de erosão e de pressão máxima (Figura 10), podemos verificar que a região da curva inferior da tubulação apresenta, tanto maior desgaste por erosão, como é o ponto de maior pressão. Sendo assim, constatamos que a zona com maior incidência de pressão, também é a zona que sofrerá maior desgaste e perda de material.

Figura 10 – Comparação entre o modelo de erosão e o modelo de pressão.



Fonte: Autores (2022).

O estudo realizado por Hamed, Tabakoff & Wenglarz (2006) destaca que o processo de erosão está condicionado a fatores como tamanho, formato e velocidade da partícula, temperatura, turbulência e ângulo de impacto formado com a superfície. Majid *et al.* (2010) apontam que a erosão ocasiona a degradação do material, gerando trincas que resultam em problemas na tubulação como vazamentos ou explosões. A interação entre as partículas sólidas e o fluido escoando gera um impacto erosivo na superfície interna da tubulação, esse impacto ocasiona perda de material e afinamento na espessura dos tubos, sendo essa uma das fontes de falhas em tubulações.

Silva, Franco & Neto (2012) demonstram a análise de erosão em uma tubulação utilizando ferramentas computacionais de simulação para escoamentos bifásicos turbulentos, evidenciando que o maior desgaste ocorre onde há mudança no sentido do fluxo dentro da tubulação e utilizam as análises como ferramentas de validação de projeto. Ramajo *et al.* (2009) ressaltam a importância do uso da tecnologia de *Computional Fluid Dynamics* (CFD) na investigação de possíveis locais de falha em tubulações e avaliação, do ponto de vista construtivo, com a finalidade de mitigar possíveis danos futuros. Arabnejad *et al.* (2015) apresentam uma comparação entre diversos modelos de erosão simulados através de *software* e dados experimentais, sendo os resultados obtidos através das análises, no geral, convergentes com os experimentais.

4 CONCLUSÃO

Podemos concluir que a simulação através de *software* é extremamente vantajosa do ponto de vista analítico, sendo possível alterar os fatores físicos e estruturais de forma relativamente simples e rápida, caso seja necessário. Essa simulação com o uso do *software* Ansys® gerou uma análise de erosão satisfatória, que nos permitiu verificar os pontos que estão propensos a sofrer maior degradação em decorrência da erosão, que são as curvas da tubulação, onde há a mudança no sentido do fluxo. Com a análise simultânea de pressão, observamos que a maior taxa de erosão ocorre na zona de maior pressão da tubulação. Levando esses dados em consideração, podemos avaliar o sistema do ponto de vista de construção, alterando a geometria da tubulação, material, diâmetro e diversos outros aspectos, para sanar ou minimizar a incidência de desgaste por erosão.

Conflitos de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesse. Todos os autores estão cientes da submissão do artigo.

Contribuições dos autores

Bruno Diego Meireles Spolaor contribuiu com o desenvolvimento do modelo, pesquisa, realização da simulação e redação do artigo. Leandro Cardoso da Silva contribuiu com a orientação, análise técnica e revisão da versão final.

REFERÊNCIAS

Ansys, Inc. (2013). ANSYS Fluent Theory Guide 15.0. Canonsburg, PA: Author.

Shipley, R. J., & Becker, W. T. (2002). *ASM handbook vol.11: Failure analysis and prevention*. ASM International.

Arabnejad, H., Mansouri, A., Shirazi, S. A., & Mclaury, B. S. (2015). Evaluation of solid particle erosion equations and models for oil and gas industry applications. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston*. https://doi.org/10.2118/174987-MS

Budinski, K. G. (2013). *Friction, Wear, and Erosion Atlas*. Boca Raton: CRC Press.

Duan, C. G., & Karelin, V. Y. (2003). *Abrasive erosion and corrosion of hydraulic machinery*. London: Imperial College Press.
Fish, J., & Belytschko, T. (2007). *A first course in finite elements*. Chichester: John Wiley & Sons.

Hamed, A., Tabakoff, W. C., & Wenglarz, R. (2006). Erosion and Deposition in Turbomachinery. *Journal of Propulsion and Power*, 22(2), 350–360. https://doi.org/10.2514/1.18462

Kleis, I., & Kulu, P. (2007). *Solid particle erosion: Occurrence, prediction and control*. London: Springer.

Majid, Z. A., Mohsin, R., Yaacob, Z., & Hassan, Z. (2010). Failure analysis of natural gas pipes. *Engineering Failure Analysis,* 17(4), 818–837. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.016

Nayyar, M. L. (1999). *Piping Handbook* (7. ed.). New York: McGraw-Hill.

Ramajo, D., Raviculé, M., Benini, R., Damian, S. M., Storti, M., & Nigro, N. (2009). Diagnose and prediction of erosion-corrosion damage in a pipeline transporting reduced crude oil from the heater to the vacuum distillation tower. *Mecánica Computacional*, 28, 1621-1639.

Ruff, A. W., & Wiederhorn, S. M. (1979). *Erosion by Solid Particle Impact*. National Bureau of Standards, National Measurements Lab. Gaithersburg, MD.

Silva, R. P., Franco, S. D., & Neto, A. da S. (2012) Simulação numérica do desgaste erosivo em uma tubulação de 4" parte I: Transporte de ar-areia em tubulações de aço e alumínio. *67° Congresso da ABM - Internacional*, Rio de Janeiro, 1702-1710. https://doi.org/10.5151/2594-5327-21142

Telles, P. C. S. (2001). *Tubulações industriais: Materiais, projeto, montagem.* (10. ed.). Rio de Janeiro: LTC.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2. ed.). Harlow: Pearson.