

SIRQUEIRA; Vinícius de Oliveira Menezes<sup>1</sup>, ALVES; Ingrid Heloisa da Silva<sup>2</sup>

## RESUMO

**RESUMO.** O processo de erosão danifica máquinas e tubulações com o decorrer do tempo a ponto de deixá-las inoperantes a depender da profundidade erodida pelas partículas. Uma das técnicas utilizadas para poder prever o momento de executar um tratamento químico ou uma manutenção preventiva na superfície do material onde ocorre a erosão é a utilização de simulações CFD para poder prever a erosão na superfície erodida com os parâmetros do processo que acontecem na realidade. Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e validação de um modelo CFD bifásico para a análise de erosão em tubulações. O modelo desenvolvido computacionalmente foi validado com experimentos da literatura e em seguida foram realizadas análises de diferentes materiais na tubulação e das partículas, além da variação de parâmetros de operação. Tendo como resultado um modelo CFD validado e com resultados coerentes com a teoria, o modelo se mostra preparado para ser utilizado na predição de erosão em sistemas de tubulação e máquinas.**ABSTRACT.** The erosion process damages machines and pipes over time to the point of leaving them inoperative depending on the depth eroded by the particles. One of the techniques used to be able to predict the time to perform a chemical treatment or preventive maintenance on the surface of the material where erosion occurs is the use of CFD simulations to be able to predict erosion on the eroded surface with the process parameters that happen in reality. This work aims to develop and validate a two-phase CFD model for the analysis of erosion in pipes. The computationally developed model was validated with experiments from the literature and then analyzes were made of different materials in the piping and of the particles, in addition to the variation of operating parameters. As a result of a validated CFD model and with results consistent with the theory, the model is ready to be used in the prediction of erosion in piping systems and machines.<sup>1</sup>

## INTRODUÇÃO

A erosão é um desgaste físico que consiste na perda de material causada pelo impacto de partículas sólidas ou líquidas ou decorrente da implosão de bolhas formadas no fluido devido ao fenômeno da cavitação (BHUSHAN, 1999; SILVA, 2008). O processo de erosão causa desgastes em pás de hélices e em ventiladores, em tubulações com diferentes tipos de fluidos, em bombas hidráulicas e em sistemas de fluxo. Em certo momento esses desgastes causados pela erosão podem interromper o processo, danificar drasticamente as tubulações e equipamentos ou até causar acidentes graves a depender do equipamento e do tipo e condições do fluido transportado (WEE E YAP, 2019).

O desgaste causado por partículas sólidas ou duras é conhecido como erosão causada por impacto ou deslizamento de partículas contra superfícies. Nesse caso, essas partículas estão presentes em líquidos ou gases em escoamento. A energia cinética das partículas é convertida em energia de impacto, o que resulta em tensões de contato na superfície erodida do material (SILVA, 2008). As variáveis que influenciam na taxa de erosão foram classificadas em variáveis relativas ao impacto, variáveis relativas à partícula erosiva e variáveis relativas ao material. As variáveis relativas ao impacto dependem da velocidade das partículas, do ângulo de impacto com relação à superfície e do fluxo de partículas. As variáveis relativas à partícula erosiva dependem da densidade, tamanho, dureza e a tenacidade da partícula. As variáveis relativas ao material dependem da densidade, microestrutura, dureza e tenacidade (FINNIE, 1995; SILVA, 2008). A

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Santa Cruz, oliveiravini@uesc.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Santa Cruz, ihsalves@uesc.br

Dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês Computational Fluid Dynamics (CFD), é uma tecnologia desenvolvida para simular e permitir analisar o comportamento de fluidos em diferentes situações. Realizando a variação de diferentes parâmetros como a velocidade, temperatura, pressão e concentração dos fluidos, a análise CFD demonstra de forma 3D ou 2D estes resultados do fluido de maneira que se possa verificar o comportamento e eventuais desequilíbrios no sistema (FLOW,2019).

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo CFD para análise de erosão em tubulações com escoamento bifásico. Para isso, o modelo é desenvolvido e validado com base em resultados experimentais obtido por Vieira (2016). Em seguida, são realizadas análises variando diferentes parâmetros das variáveis que influenciam na taxa de erosão como a velocidade do fluido, fluxo de partículas, material das partículas e materiais da tubulação. Com esses resultados é possível prever computacionalmente o gradiente e locais de erosão em tubulações com diferentes situações, permitindo que se possa evitar danos maiores em sistemas, realizar manutenção preventiva ou desenvolver técnicas de redução de erosão em tubulações.

## **METODOLOGIA**

O modelo foi esboçado no SolidWorks e simulado no Flow Simulation, suplemento do SolidWorks. Uma síntese das etapas do desenvolvimento deste trabalho é apresentada na Figura 1.

A primeira etapa consistiu em uma revisão da literatura e foram estudados os resultados do trabalho desenvolvido por Vieira (2016), referente à análise experimental de erosão máxima em um cotovelo de aço 316 com fluxo de ar e areia, em que foram utilizados transdutores ultrassônicos para medir a perda de material ocasionada. Em seguida, foi configurado o modelo CFD no Flow Simulation com as mesmas condições do experimento, executando a simulação com diferentes malhas para encontrar a melhor configuração que permitisse obter resultados aproximados com o experimento de referência. A comparação entre os valores experimentais e simulados pelo modelo CFD desenvolvido permitiu a validação deste, possibilitando realizar outros tipos de análises computacionais. Dessa forma, foi estudada através da simulação computacional utilizando o modelo desenvolvido a influência da variação da velocidade de escoamento do fluido, da vazão de partículas que entram no sistema, assim como do material das partículas – além da areia, foi utilizado ferro e alumínio. Além disso, foi alterado o material da tubulação para alumínio 6061 e ferro. Verificou-se a influência de todos esses aspectos na erosão resultante.

### **2.1 Modelo matemático**

A modelagem computacional realizada nesse trabalho no Flow Simulation é governada por um modelo matemático de erosão apresentado na Equação 1.

Onde  $Re$  é a taxa de erosão em massa ( $kg/m^2s$ ),  $N_e$  é o número de partículas analisadas,  $m_p$  é a taxa de fluxo de massa para uma trajetória calculada a partir da taxa de fluxo de massa total injetada ( $kg/s$ ),  $dS$  é a superfície da malha do local analisado,  $C(dp)$  é a função que define como a erosão depende do diâmetro da partícula  $dp$  (mm),  $f(\theta)$  é a função que define como a erosão depende do ângulo  $\theta$  de impacto da partícula,  $V$  é a velocidade relativa da partícula que é definida como a diferença entre a velocidade da partícula  $U_p$  e a velocidade da parede que é  $U_P$  (m/s),  $b(V)$  é uma função que define como a erosão depende da velocidade relativa das partículas  $V$ , e  $K$  é o coeficiente de proporcionalidade de erosão que, quando outros parâmetros são especificados, se tem o valor padrão de  $2 \times 10^{-3}$ .

A taxa de erosão de massa total resultante (ou seja, a taxa de erosão referida à massa de material erodido) é determinada com a Equação 2.

Onde  $R_{me}$  é a taxa de massa erodida ( $kg/s$ ),  $dS$  é a superfície da malha que nesse caso está em função do número de células da malha.

A taxa de erosão (ou seja, a taxa de erosão referida à profundidade) é calculada conforme a Equação 3.

Onde  $R_{Le}$  é a taxa de erosão em relação a profundidade (mm/ano) e  $\rho_w$  que é a densidade do material da parede ( $kg/m^3$ ).

### **2.2 Modelo CFD**

O desenvolvimento do modelo foi dividido em três etapas: o modelo geométrico da peça, condições de contorno e a criação da malha. As etapas serão apresentadas nos próximos subtópicos.

#### **2.2.1 Modelo geométrico da peça**

A peça de análise tem a geometria de um tubo com diâmetro de 76,2mm e comprimento vertical de 1000mm, conectado por um cotovelo de 90° com raio de curvatura de 114,3mm. Na outra conexão do cotovelo é conectado um tubo horizontal com comprimento de 600mm. As dimensões foram estabelecidas de acordo com o trabalho de Vieira (2016) e, de acordo com Wee e Yap (2019) permitem um bom equilíbrio entre nível de refinamento de malha e custo computacional. O desenho esquemático da peça é ilustrado na Figura 2.2.2.2.

#### **Condições de contorno**

As condições de contorno no modelo CFD são aplicados para a peça apresentada na Figura 2. Para a validação do modelo é realizado um comparativo com o modelo experimental com partículas de areia de 150 µm e tubulação de aço 316, comparativo esse apresentado na Tabela 1.

Após a validação do modelo CFD com o experimento foram realizadas análises com tubulações e partículas de diferentes materiais. Nas Tabelas 2 e 3 são expostas as densidades dos materiais das tubulações e das partículas.

Após a validação do modelo CFD com o experimento foram realizadas análises com tubulações e partículas de diferentes materiais. Nas Tabelas 2 e 3 são expostas as densidades dos materiais das tubulações e das partículas.

O fluido utilizado nas simulações é o ar que tem densidade de 1,125 kg/m³ e viscosidade de 1,8x10-5 kg/ms.

Segundo estudos sobre o número de partículas necessário para análise da taxa de erosão, foi constatado que a taxa de erosão será independente acima de 20 mil partículas, valor esse estipulado no modelo CFD adotado nesse trabalho. A utilização de 20 mil partículas também foi considerada de modo que não aumente de maneira severa o custo computacional no estudo de partículas do Flow Simulation (WEE E YAP, 2019).

#### **2.3.2. Criação de malha**

Foi desenvolvido uma malha hexaédrica, devido ao seu melhor detalhamento e oferecer resultados mais confiáveis. A malha tem 407,447 células no total e 101,656 células de fluidos em contato com o sólido, com um nível inicial de malha máximo no Flow Simulation e refinamento de canal avançado.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **3.1 Validação dos resultados**

Os resultados simulados pelo modelo CFD são validados comparando com os resultados de erosão máxima do experimento do trabalho de Vieira (2016) com base em quatro velocidades: 11, 15, 23 e 27 m/s. Os valores comparados são apresentados na Tabela 4, mostrando que no caso 3 o desvio é o maior, no valor de 25,9%, e no caso 4 se tem o menor desvio, no valor de 2,9%, em relação a erosão experimental.

Os resultados apresentados na Tabela 4 são ilustrados graficamente na Figura 3.

A Figura 4 apresenta a erosão na tubulação nos 4 casos propostos para a validação do modelo.

#### **3.2 Aumento progressivo de velocidade e fluxo de massa de partículas**

O modelo CFD validado foi utilizado para realizar simulações variando parâmetros para analisar a influência na erosão. Na Tabela 5 são apresentados os resultados da variação da velocidade do fluido e o fluxo de partículas em 10% partindo do Caso 4 do modelo experimental, que tem como velocidade 27 m/s e 0,00238 kg/s de fluxo de partículas, obtendo uma erosão de 55,59 mm/ano no modelo CFD. A análise é realizada até uma variação de 50%.

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram como o aumento da velocidade impacta de maneira muito mais significativa do que o aumento do fluxo de partículas, chegando diferença que representa 109,5% maior do que o Caso 9 da erosão variando o fluxo de partículas.

Na Figura 5 os resultados apresentados na Tabela 5 são ilustrados para cada caso.

Na Figura 6 são apresentados os resultados da erosão em dois casos dos apresentados na Tabela 5 e na Figura 5, onde a do tipo A é a da variação de fluxo de partículas e a do tipo B a de variação da velocidade do fluido. Os resultados ilustrados são para o Caso 5A e 9B.

#### **3.3 Análise de erosão variando o material da tubulação**

A segunda análise realizada foi mudando o material da tubulação e simulando no mesmo modelo validado. Os materiais analisados, além do aço 316, foram alumínio 6061 e o ferro, os resultados de erosão em cada material da tubulação por partículas de areia no modelo CFD são apresentados na Tabela 6.

Os resultados na Tabela 6 mostram que a erosão na tubulação de aço 316 e

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Santa Cruz, oliveirabrvincius@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Santa Cruz, ihsalves@uesc.br

ferro tem resultados próximos já a erosão na tubulação de alumínio 6061 é mais significativa, chegando em 163,96 mm/ano no Caso 13. Nos outros dois materiais o valor mais alto de erosão foi na tubulação de ferro com 56,22 mm/ano no Caso 13. Resultado que mostra que a densidade do material impacta diretamente na taxa de erosão assim como mostra a Equação 3. Os resultados da Tabela 6 são melhor ilustrados no Figura 7.

#### **3.4 Análise de erosão variando o material das partículas**

A terceira análise realizada com o modelo CFD validado é variando o material das partículas que erodem a tubulação de aço 316. Os materiais das partículas analisadas além da areia são o alumínio e o ferro. Os resultados da erosão na tubulação com partículas de diferentes materiais são apresentados na Tabela 7.

Os resultados da Tabela 7 mostram que as partículas que erodem mais a tubulação são as partículas com ferro como material e as partículas de areia e alumínio ficam com resultados próximos. A maior diferença de erosão está no Caso 17 entre as partículas de alumínio e de ferro erodindo 13,9% a mais. Esse resultado de maior erosão nas partículas de ferro em relação as de alumínio e as de areia vem da diferença de dureza entre as partículas e o material da tubulação. Mesmo com as partículas de ferro o aumento na erosão não foi muito alto em relação as análises nos subtópicos anteriores devido a dureza do material da tubulação que é o aço 316 (MAZUR, 2004; LEVY, 1995; KOSEL, 1995).

Os resultados da Tabela 7 são melhor ilustrados no Figura 8.

#### **4. CONCLUSÃO**

Foi desenvolvido e validado um modelo CFD para verificar a influência de diferentes parâmetros na erosão de uma tubulação com escoamento bifásico. Percebeu-se que o modelo desenvolvido se mostrou coerente com o de validação, obtendo resultados com uma margem de erro aceitável para simulações CFD. Foram realizados estudos com o modelo variando a velocidade do fluido, o fluxo de partículas, o material da tubulação e o material das partículas. Os resultados comprovaram que o aumento da velocidade do fluido e do fluxo de partícula aumenta diretamente a taxa de erosão da tubulação. Já na análise da variação do material da tubulação foi concluído que quanto mais denso o material, menor é a taxa de erosão da superfície erodida. E na análise de variação do material das partículas foi concluído que quanto mais denso o material maior a taxa de erosão da superfície erodida.

O modelo CFD validado pode ser usado como ferramenta preventiva para antever problemas em sistemas hidráulicos e máquinas que sofrem com erosão em seu processo de funcionamento.

#### **5. REFERÊNCIAS**

BHUSHAN, Bharat; KO, Pak Lim. Introduction to tribology. Appl. Mech. Rev., v. 56, n. 1, p. B6-B7, 2003. FINNIE, Iain. Some reflections on the past and future of erosion. Wear, v. 186, p. 1-10, 1995. KOSEL, Thomas H. Solid particle erosion. ASM handbook, v. 18, p. 199-213, 1992. LEVY, Alan V. Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials. Asm International, 1995. MAZUR, Rogério Lago. Análise do desgaste erosivo por partícula sólida em superligas à base de níquel. 2004. SILVA, Flávio José da et al. Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma. 2008. Simulação CFD – Conceitos e aplicação. Tauflow, 2019. Disponível em: < <https://tauflow.com/simulacao-cfd-conceitos-e-aplicacao/> > VIEIRA, Ronald E. et al. Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow. Powder technology, v. 288, p. 339-353, 2016. WEE, Siaw Khur; YAP, Yung Jian. CFD study of sand erosion in pipeline. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 176, p. 269-278, 2019.

**PALAVRAS-CHAVE:** Erosão, CFD, Escoamento, Partículas, Simulação em materiais