

AVALIAÇÃO DA EROÇÃO EM UMA CURVA DE BASE QUADRADA UTILIZANDO CFD

Diego Alves de Moro Martins, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia,
moromartins@gmail.com

Francisco José de Souza, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia,
fjsouza@mecanica.ufu.br

Resumo. Neste trabalho foram simulados casos em um duto curvo com base quadrada, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional, com a intenção de avaliar um determinado modelo de erosão e verificar a influência da variação dos principais parâmetros de simulação nos resultados. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais retirados da literatura.

Palavras chave: CFD, Erosão, Duto curvo, RANS

1. INTRODUÇÃO

Uma decorrência comum em escoamentos gás-sólido é o desgaste causado pela colisão de partículas com superfícies. Este desgaste abrasivo é conhecido como erosão, e na maior parte dos casos é indesejável, pois os impactos das partículas podem danificar o corpo ou peça. Provavelmente, a maior reincidência de problemas com erosão ocorra em processos industriais, comprometendo equipamentos e causando prejuízos. Na indústria petrolífera, especificamente nos setores de transporte e processamento, os efeitos do desgaste erosivo afetam diretamente a eficiência e segurança do processo. As partículas de areia geradas na extração do petróleo ou partículas catalisadoras deliberadamente adicionadas para acelerar reações químicas atuam como ameaças à integridade dos componentes de transporte e de processamento de uma instalação petrolífera, tais como tubos, separadores ciclônicos e válvulas de segurança. A erosão nestes sistemas e componentes podem ter consequências graves, causando prejuízos consideráveis para a empresa. (Stack e Abdulrahman, 2004). Neste contexto, o estudo sobre o efeito da erosão tem sido muito útil, tanto na área acadêmica quanto na indústria, e a abordagem pode ser através de experimentos e/ou análises teóricas. Neste trabalho foram simulados casos, utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamic*), com a finalidade de prever a erosão em uma curva de base quadrada. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais de Mason e Smith (1972).

2. MODELAGEM

A geometria utilizada nas simulações foi um duto de seção quadrada, feito de acrílico, com curvatura de 90°. A seção quadrada tem lado $D=1$ pol, e raio da curvatura $r=10$ pol. O duto antes da seção curva tem doze pés de comprimento. A entrada de fluido se localiza no duto vertical e a saída no duto horizontal, com o escoamento ascendente. O fluido utilizado foi o ar, com velocidade de entrada de 85,3768 m/s. As partículas injetadas foram de alumina, com diâmetro de 60 μm . A Fig. 1 mostra o esquema do experimento realizado por Mason e Smith (1972).

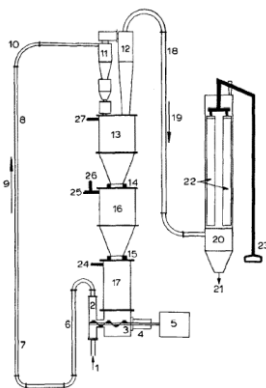


Figura 1. Esquema do experimento realizado por Mason e Smith (1972) (Mason e Smith, 1972, pg. 325).

A geometria simulada consiste nas regiões 7 e 8, duto de entrada, região 10, seção de teste, e a saída da seção de teste. O comprimento da saída não foi informado pelos autores. No presente trabalho o comprimento da saída utilizado foi de dois pés.

3. MÉTODOS NUMÉRICOS

Para prever as regiões de desgaste e verificar os parâmetros mais influentes na erosão em dutos curvos, simulações numéricas foram realizadas utilizando o código computacional UNSCYFL3D (Unsteady Cyclone Flow 3D). Este foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Universidade Federal de Uberlândia (MFlab). No código UNSCYFL3D as equações médias ou filtradas de Navier-Stokes são resolvidas utilizando o método dos volumes finitos em malhas não estruturadas, em ambiente de computação paralela. O escoamento gás-partícula é solucionado com a abordagem Euleriana-Lagrangiana. Para a modelagem da turbulência existem as opções de simulações de grandes escalas (LES - Large Eddy Simulation) ou médias de Reynolds (RANS - Reynolds Average Navier-Stokes Equations). Para a erosão foram implementados modelos com diferentes características, a fim de verificar quais se adequam aos casos simulados.

No código utilizado os campos de velocidade gerados com a solução da fase Euleriana alimentam as equações que calculam o movimento das partículas Lagrangianas, estas equações são baseadas na segunda lei de Newton. As velocidades de impacto e os ângulos de impacto das partículas com a parede alimentam as correlações utilizadas para predição da erosão. Neste estudo foi utilizada a correlação de erosão proposta por Grant e Tabakoff (1973).

$$E_r = K_1 f(\alpha) u_p^2 \cos^2(\alpha) (1.0 - e_t^2) + f(u_{p,n}) \quad (1)$$

$$f(\alpha) = \left\{ 1.0 + K_4 \left[K_2 \sin \left(\frac{\pi \alpha}{2 \alpha_0} \right) \right] \right\}^2 \quad (2)$$

$$f(u_{p,n}) = K_3 [u_p \sin(\alpha)]^4 \quad (3)$$

$$K_4 = \begin{cases} 1, & \alpha < \alpha_0 \\ 0, & \alpha > \alpha_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$e_t = 1.0 - 0.001 u_p \sin(\alpha) \quad (5)$$

sendo u_p a velocidade de impacto da partícula, α o ângulo de impacto da partícula, α_0 o ângulo de impacto máximo de erosão, K_1 , K_2 , K_3 e α_0 são constantes que dependem do par material erodido e material erodente, retiradas de Grant e Tabakoff (1973) e e_t o coeficiente de restituição tangencial.

O coeficiente de restituição quantifica o quanto de energia foi transferido da partícula para a parede durante o impacto, podendo ser definido como a razão entre velocidades antes e depois do impacto. Nas simulações realizadas foram utilizadas as correlações propostas por Grant e Tabakoff (1975), Jun e Tabakoff (1994), Forder (1998) e Sommerfeld (1999). Essas correlações são em função do ângulo de impacto da partícula e de constantes empíricas que dependem do par material erodido e erodente.

A rugosidade da parede tem um papel muito importante no movimento das partículas, como demonstrado por Laín e Sommerfeld (2012), e consequentemente na predição da erosão. No código UNSCYFL3D a rugosidade na parede é calculada através de um método estocástico que altera o ângulo de impacto da partícula. Esta alteração é realizada através de uma distribuição de Gauss com um desvio padrão que depende da estrutura rugosa da parede e do tamanho da partícula. Infelizmente, este desvio padrão necessita ser calibrado para cada caso, podendo variar de 0° a 10°, com 0° representando uma superfície perfeitamente lisa e 10° representando uma superfície bastante rugosa.

Foram realizados testes com duas malhas computacionais, uma com aproximadamente 600.000 volumes e outra com aproximadamente 1.100.000 volumes hexaédricos. Primeiramente simulou-se a fase fluidica em regime permanente até a convergência em 1e-06, utilizando o modelo de turbulência K-Épsilon Duas Camadas. Nesta, utilizou-se o esquema *up-wind* de 2ª ordem para os termos advectivos e o esquema *up-wind* de 1ª ordem para as equações do modelo de turbulência. O movimento das partículas foi calculado com base nos campos de velocidades convergidos, caracterizando o esquema de uma via para solução do escoamento gás-partícula. Como o escoamento é considerado diluído, não foi necessária a simulação com duas ou quatro vias.

4. RESULTADOS

Os resultados são apresentados na forma de razão de penetração, definida pela Eq. (8). Como os resultados experimentais foram obtidos na forma de profundidade de penetração, a conversão para razão de penetração foi obtida através da divisão da profundidade de erosão pela quantidade mássica de partículas injetadas, aproximadamente 4989,5 kg (Njobuenwu e Fairweather, 2012).

$$Penetration Ratio = \frac{E_r}{\dot{m}p} \quad (8)$$

A Figura 2 mostra os iso-valores da razão de penetração no lado oposto à saída do domínio.

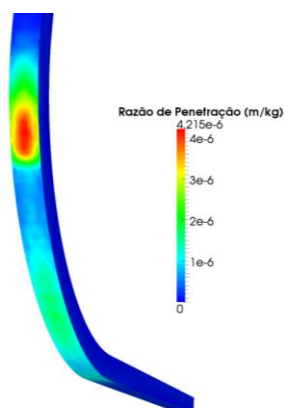


Figura 2. Iso-valores da razão de penetração na curva para o modelo de erosão de Grant e Tabakoff

Observando a Fig. 2, verificam-se duas regiões de erosão: a região primária, onde o desgaste é maior devido aos elevados valores das velocidades de impacto e dos ângulos de impacto das partículas, e a região de erosão secundária resultante da reflexão das partículas no ponto de impacto primário.

Os parâmetros da modelagem foram avaliados quantitativamente, comparando os resultados numéricos com os resultados experimentais (Mason e Smith, 1972). A Fig. 3 mostra a influência do refino da malha computacional na razão de penetração. Foram simulados dois casos: um com a malha de 600.000 volumes e outro com a malha de 1.100.000 volumes.

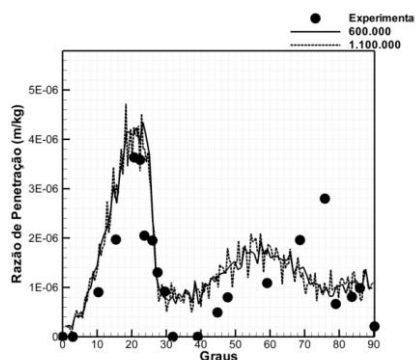


Figura 3 Perfil da razão de penetração ao longo do centro da parede, comparando as malhas utilizadas.

O aumento do número de volumes aumenta a oscilação da erosão ao longo da curva, porém não modifica os resultados na média. Para reduzir esta oscilação é necessária uma maior quantidade de partículas injetadas. Em geral, nota-se que a razão de penetração obtida com a correlação de Tabakoff se aproximou bem dos resultados experimentais na região de erosão primária da curva, porém na região secundária não houve boa concordância. Um provável fator é a deformação causada pela erosão na parede, fato que altera os ângulos de impacto das partículas. Este efeito não contabilizado nas simulações.

Também foram testadas as quatro correlações para o coeficiente de restituição citadas anteriormente.

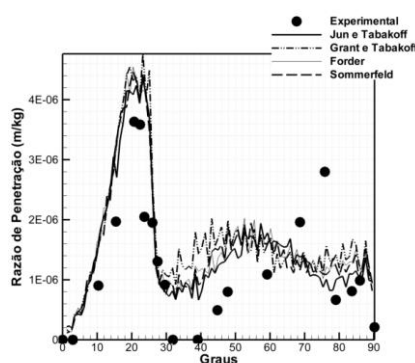


Figura 4 Perfil da razão de penetração ao longo do centro da parede, comparando os modelos de restituição utilizados.

Comparado com os demais, o modelo de restituição proposto por Jun e Tabakoff (1994) gerou resultados um pouco melhores, principalmente na região após o pico de erosão primário.

Foram testados casos com o desvio de 2°, 3,8° e 6°, para a rugosidade. O desvio de 3,8° foi o mesmo utilizado por Njobuenwu e Fairweather (2012).

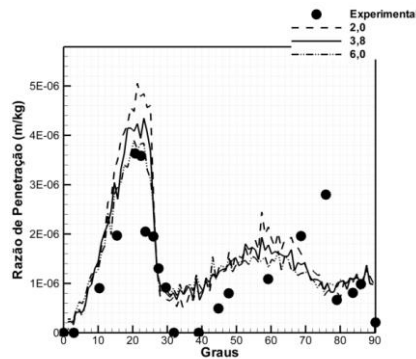


Figura 5 Perfil da razão de penetração ao longo do centro da parede, comparando diferentes rugosidades.

Com o aumento da rugosidade na parede, os resultados melhoraram consideravelmente em comparação com os resultados experimentais. Este efeito ocorre devido ao aumento da uniformidade na distribuição de partículas ao longo da seção do duto, causando uma erosão mais distribuída entre os lados das paredes.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram simulados casos com o intuito de prever a erosão em uma curva de 90° com base quadrada. Os resultados obtidos utilizando CFD foram comparados com resultados experimentais retirados da literatura (Mason e Smith, 1972). A correlação de erosão proposta por Grant e Tabakoff (1973) foi utilizada nas simulações realizadas. Os demais parâmetros da modelagem foram variados. Nos resultados obtidos foi observada uma boa concordância da erosão na região de impacto primário. Nas demais regiões não foi possível prever os resultados, pois a deformação causada pela erosão na curva não foi contabilizada nos resultados numéricos. Esta deformação altera a dinâmica das partículas no escoamento modificando assim o perfil da erosão. Dentre os parâmetros variados, o que mais surtiu efeito foi a rugosidade na parede. Foi observado que com o aumento da rugosidade a concentração das partículas fica mais uniforme no domínio, distribuindo a erosão nas paredes. Neste contexto, conclui-se que os grandes desafios na predição da erosão são: contabilizar a deformação na geometria utilizada e determinar os coeficientes, correlações e constantes empíricas para cada tipo de par de materiais (erodido e erodente).

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, CAPES/PROEX e FAPEMIG pelo suporte financeiro, ao MFLAB pela estrutura física e equipamentos, e ao programa de pós-graduação da faculdade de engenharia mecânica pela oportunidade.

7. REFERÊNCIAS

- Forder, A.; Thew. M e Harrison, D., 1998, "Numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves", *Wear*, 216: 184-193.
- Grant, G. e Tabakoff, W., 1973, "An experimental investigation of the erosion characteristics of 2024 aluminum alloy", (Tech. Rep. 73-37). Cincinnati: Department of Aerospace Engineering, University of Cincinnati.
- Grant T. e Tabakoff. W., 1975, "Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles", *J Aircraft*, 12:471-547.
- Jun, Y. D. e Tabakoff, W., 1994, "Numerical-simulation of a dilute particulate flow (laminar) over tube banks. *Journal of Fluids Engineering*", 116(4), 770-777.
- Laín, S., Sommerfeld, M., 2012. Numerical calculation of pneumatic conveying in horizontal channels and pipes: Detailed analysis of conveying behaviour. *Int. J. Multiphase Flow* 39, 105-120.
- Mason, J. S. e Smith, B. V., 1972, "Erosion of bends by pneumatically conveyed suspensions of abrasive particles", *Powder Technology*, 6(6), 323-335.
- Sommerfeld M. e HUBER, N., 1999, "Experimental analysis and modeling of particle-wall collision", *Int. J. Multiphase Flow* 25, 1457-1489.
- Stack, M.M., Abdulrahman, G.H., 2004. "Mapping erosion-corrosion of carbon steel in oil exploration conditions: Some new approaches to characterizing mechanisms and synergies", Ph.D. thesis, Strathclyde University.