

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESGASTE EROSIVO EM UMA TUBULAÇÃO DE 4" PARTE I: TRANSPORTE DE AR-AREIA EM TUBULAÇÕES DE AÇO E ALUMÍNIO<sup>1</sup>

Renato Pacheco Silva<sup>2</sup>  
Sinésio Domingues Franco<sup>3</sup>  
Aristeu da Silveira Neto<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desgaste erosivo em dois materiais diferentes (aço 4130 e alumínio comercialmente puro), transportando ar e areia, nas velocidades de 10 m, 15 m e 25 metros por segundo, através de técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A geometria foi determinada a partir de uma geometria do equipamento experimental, *Loop*, que reproduz em escala real o escoamento bifásico (líquido com partículas de areia dispersas). Foi utilizada uma curva de 90°, de uma tubulação de 4" de diâmetro. Através do software Fluent (ANSYS, Inc.), realizou-se a simulação numérica. A metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes Equations*), e o modelo de turbulência k- $\omega$ -SST, juntamente com um modelo de fase discreta foram utilizados. O acoplamento necessário, foi o de duas vias Euler-Lagrange. O modelo de erosão padrão do software foi o utilizado para cálculo da perda de material devido ao desgaste erosivo. O ponto chave destas simulações está no coeficiente de restituição, que varia em função do material utilizado. Foi possível observar as diferenças de comportamento entre os dois materiais, pela análise do desgaste erosivo nas diferentes velocidades, o que representa a variação de quantidade de movimento linear da partícula a coeficientes de restituição diferentes. É, inclusive, possível a detecção do tempo de vida de uma tubulação nestas condições de operação, devido a uma falha provocada por desgaste erosivo puro.

**Palavras-chave:** CFD; Simulação numérica; Desgaste erosivo; Coeficiente de restituição.

## NUMERICAL SIMULATIONS OF EROSION WEAR IN 4 in. PIPE: SAND-AIR TRANSPORT IN STEEL AND ALUMINUM PIPES

### Abstract

This work has as main objective, to evaluate the erosion wear in two different materials (4130 steel and commercially pure aluminum), transporting air and sand, in the velocities of 10 m, 15 m and 25 meters per second, through CFD (*Computational Fluid Dynamics Techniques*). The geometry was determined by the experimental equipment, *Loop*, which reproduces in real scale the two-phase flow (liquid with sand particles dispersed). It was used a 90° elbow, from a 4 inches diameter pipe. The numerical simulation was done through Fluent (ANSYS, Inc.) software. RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes Equations*) methodology and the k- $\omega$ -SST turbulence model, coupled with the discrete phase model were used. The necessary coupling was the two-ways Euler-Lagrange coupling. The erosion model used was the standard from the software, to calculate the material loss due to erosive wear. The key point in this kind of simulation is over restitution coefficient, which varies in function of the material tested. It was possible to observe different behavior between the two materials, by the erosive wearing analysis in the different velocities, which represents the particle momentum variation in different restitution coefficients. It is also possible to predict the pipe lifetime in this operation conditions due to a damage caused by the pure erosive wear.

**Key words:** CFD; Numerical simulation; Erosive wear; Restitution coefficient.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Mestre em Eng. Mecânica e doutorando em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Brasil.

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica e Professor Associado, UFU, Brasil.

<sup>4</sup> Pós-doutor em Engenharia Mecânica e Professor Titular, UFU, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de ferramentas computacionais para a solução de problemas de engenharia vem ganhando cada dia mais espaço na rotina do engenheiro. Ainda que no ambiente acadêmico, pesquisas da área de engenharia, uma ciência aplicada, têm demonstrado grande tendência na utilização desses tipos de ferramenta como alternativa, e em um futuro próximo, como procedimento para confecção de projetos de engenharia bem estruturados. Nesse contexto que se encontra a solução numérica de problemas de engenharia.

Neste primeiro trabalho é feita a solução de problemas de engenharia envolvendo o desgaste erosivo de tubulações transportando ar e areia. É um tipo de escoamento denominado bifásico em que a fase contínua é o ar e a areia é a fase dispersa. Com a solução deste tipo de problema, espera-se comparar situações semelhantes utilizando dois materiais diferentes: alumínio comercialmente puro e aço 4130. A grande diferença entre estes dois materiais quando se trata de solução numérica, é o diferente coeficiente de restituição dos dois materiais interagindo com o grão de areia. O coeficiente de restituição é relação entre velocidade depois do impacto pela velocidade antes do impacto. É, então, a resultante de uma componente tangencial e de uma componente normal à superfície interna do tubo. Este coeficiente normalmente é determinado de forma experimental. Na literatura existem alguns dados de coeficientes de restituição para alguns materiais, como pode ser encontrado no trabalho de Chen, McLaury e Shirazi<sup>(1)</sup> e também no trabalho de Forder, Thew e Harrison<sup>(2)</sup>.

No escoamento em uma tubulação é importante saber qual o regime de operação que se irá trabalhar. Este regime se refere ao escoamento, se ele é turbulento ou não e depende basicamente do fluido envolvido, do diâmetro da tubulação e da velocidade que esse fluido escoar. A relação entre estas características do escoamento dá origem ao número de Reynolds, que é  $\rho U D / \mu$ , onde  $\rho$  e  $\mu$  são a densidade e viscosidade do fluido da fase contínua,  $U$  é a velocidade e  $D$  é o diâmetro da tubulação. Quando este número adimensional se encontra acima de aproximadamente 2.300 diz-se do escoamento estar no regime turbulento. Como característica dos escoamentos turbulentos, são instáveis, apresentam multiplicidade de escalas, tridimensionalidade, rotacionalidade, alta difusibilidade, imprevisibilidade e é um fenômeno contínuo (Silveira-Neto, A., 2002<sup>(3)</sup>). A escolha da metodologia a ser utilizada também é outro fator importante na simulação numérica. Existem metodologias que proporcionam resultados mais fiéis do ponto de vista físico do escoamento, ou seja, representam melhor a física da turbulência, e existem também metodologias que apesar de serem menos fiéis do ponto de vista físico, proporcionam bons resultados com baixo custo computacional, o que para a indústria se mostra bastante interessante. Para as metodologias, existem diversos modelos, cada um com sua aplicação mais bem sucedida.

Outro fator importante é a forma como se trata os particulados em um meio contínuo. Uma forma muito utilizada é a abordagem da fase discreta como partículas Lagrangianas. Esta forma de modelagem é chamada de DPM (*Discrete Phase Model*) e se utiliza de um acoplamento entre fase contínua (Euleriana) e fase discreta (Lagrangiana) para se determinar o campo de velocidade das partículas.

A partir da solução das fases envolvidas em um escoamento é que se tem a possibilidade de se determinar o movimento da partícula e se utilizar de um modelo de erosão.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Como se trata de uma solução numérica de um problema, o único equipamento necessário é um computador de alto desempenho. O computador utilizado foi uma Workstation da Dell modelo T5500 com dois processadores Intel Xeon E5670 (com quatro núcleos cada), 24 gigabytes de memória RAM.

Para a solução do escoamento da fase contínua, foi utilizada a metodologia RANS e o modelo k- $\omega$ -sst. Para os componentes relativos à velocidade, a metodologia RANS, tem a seguinte decomposição da variável:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1)$$

Onde  $\bar{u}_i$  representa a média da velocidade e  $u'_i$  representa as flutuações da velocidade. Assim sendo, tem-se o mesmo padrão para qualquer outro escalar que pode ser referente à pressão, à energia ou concentração de espécies:

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i \quad (2)$$

Substituindo as expressões nessa forma para as variáveis do escoamento, dentro das equações de momento e continuidade, têm-se as equações escritas na forma de um tensor cartesiano que segue na Equação 3.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4)$$

Estas duas equações são chamadas de Média de Reynolds para as equações de Navier-Stokes com as velocidades e outras variáveis da solução agora representando uma média (de conjunto ou temporal) dos valores. Termos adicionais aparecem agora, como representações da turbulência. O tensor de Reynolds,  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ , por sua vez deve ser modelado de forma a fechar a equação de Navier-Stokes.

Modelando-se o tensor de Reynolds pela hipótese de Boussinesq para obtenção dos gradientes das velocidades médias obtêm-se:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (5)$$

Menter, Kuntz & Langtry<sup>(4)</sup>, em seu trabalho publicado em 2003, mostraram o equacionamento para o modelo k- $\omega$ -sst, que foi utilizado neste trabalho. Consiste basicamente nas disposições das equações de transporte para k e  $\omega$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(U_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(U_i \omega)}{\partial x_i} = & \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \\ & + 2(1 - F1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (7)$$

$$F1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (8)$$

O modelo é um modelo híbrido, e é através da função F1 que se ativa o modelo k- $\omega$  ou k- $\epsilon$ . Quando F1 é zero, o modelo identifica que se está no interior do escoamento, longe da parede, ativando o modelo k- $\epsilon$ . Quando F1 é um, o modelo identifica que se está na região próxima à parede, ativando o modelo k- $\omega$ . A viscosidade turbulenta é determinada por:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (9)$$

As constantes para este modelo são:

$$\beta^* = 0,09, \alpha_1 = \frac{5}{9}, \beta_1 = \frac{3}{40}, \sigma_{k1} = 0,85, \sigma_{\omega 1} = 0,5, \alpha_2 = 0,44, \beta_2 = 0,0828, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 2} = 0,856.$$

Para fazer a previsão da trajetória da partícula, integra-se o balanço de forças na partícula, que é escrita utilizando um referencial Lagrangiano. Este balanço de forças, como na segunda lei de Newton, iguala o produto massa vezes aceleração da partícula com as forças externas atuando na mesma e é escrito no plano cartesiano da seguinte forma:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (10)$$

Onde  $F_x$  é um termo de aceleração adicional (força por massa de uma unidade de partícula),  $F_D(u - u_p)$  é a força de arrasto por massa de uma unidade de partícula,  $u$  é a velocidade da fase contínua,  $u_p$  é a velocidade da partícula,  $\mu$  é a viscosidade molecular do fluido,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $\rho_p$  é a densidade da partícula e  $d_p$  é o diâmetro da partícula. Sendo:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (11)$$

Outras forças podem estar associadas para serem implementadas outras condições, como a força requerida para acelerar o fluido que envolve a partícula ou forças referentes a um sistema rotativo, como uma turbomáquina por exemplo. Todas estas forças são acopladas ao termo  $F_x$ .

A transferência de quantidade de movimento linear da fase contínua para a fase discreta, é feita examinando a mudança de quantidade de movimento na partícula quando ela passa por cada volume de controle. É computada da seguinte forma:

$$F = \sum \left( \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{outras} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (12)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\rho_p$  é a densidade da partícula,  $d_p$  é o diâmetro da partícula,  $Re$  é o número de Reynolds relativo,  $u_p$  é a velocidade da partícula,  $u$  é a velocidade do fluido,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $\dot{m}_p$  é o fluxo de massa das partículas,  $\Delta t$  é o passo de tempo e  $F_{outras}$  é qualquer outra força que venha a interagir no problema.

Essa troca de quantidade de movimento, aparece como um termo fonte de quantidade de movimento no balanço da quantidade de movimento da fase contínua.

Após a modelagem do escoamento, deve-se modelar a erosão. No estudo da modelagem da erosão, é muito importante ter a percepção de como uma fase contínua pode interagir com a fase dispersa (partículas erosivas). Existem basicamente duas formas de se tratar este tipo de problema. Uma seria considerar os efeitos da fase contínua na fase dispersa e vice-versa, e outra seria considerar somente os efeitos da fase contínua na fase dispersa. Neste trabalho foi utilizado acoplamento chamado de acoplamento de duas vias, em que se resolve o escoamento da fase contínua e injetando ao mesmo tempo as partículas para a solução do movimento das partículas lagrangianas, verificando a influência de uma fase na outra e vice-versa. O modelo de erosão utilizado foi o padrão do software Fluent (ANSYS, Inc.), que está descrito no Fluent Theory Guide<sup>(5)</sup> e assim como a maioria dos modelos de erosão, depende em grande parte de constantes obtidas experimentalmente para alimentar a modelagem. O modelo de erosão é dado por:

$$R_{erosão} = \sum_{p=1}^{N_{partículas}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (13)$$

Onde as variáveis envolvidas são funções do diâmetro da partícula, do ângulo de impacto e da velocidade da partícula.

A geometria e malha utilizada é mostrada na figura 1 e as condições de contorno são mostradas na Tabela 1.

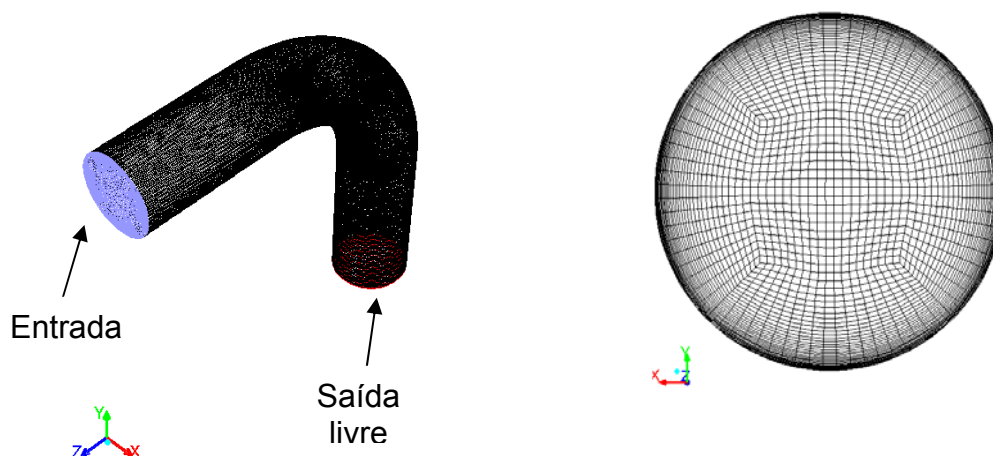


Figura 1. Geometria e malha utilizadas.

Tabela 1. Condições de contorno

Face azul	Condição de entrada de velocidade
Face vermelha	Condição de saída livre
Face preta	Condição de parede
Aceleração da gravidade	9.81 m/s <sup>2</sup> na direção e sentido do eixo x negativo
Malha	1130880 células

As variáveis utilizadas como condição de contorno para a partícula na tubulação são dadas pela Tabela 3 e as condições da fase discreta estão na Tabela 2. Nos coeficientes de restituição, a variável theta é o ângulo no qual uma partícula impinge em uma superfície.

**Tabela 2.** Condições da fase discreta

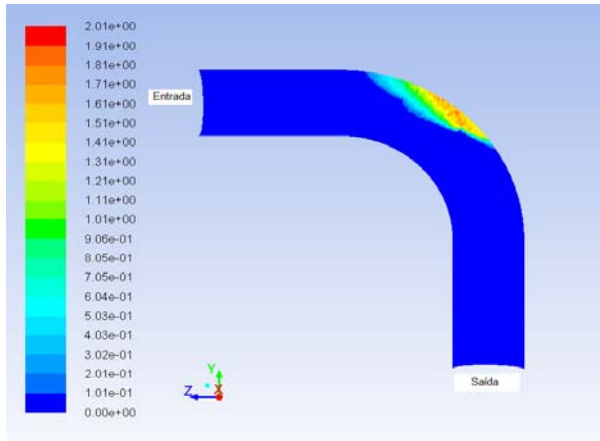
Distribuição de partículas	Distribuição normal pela área da face de entrada de velocidade, com diâmetro mínimo de 150 $\mu\text{m}$ e máxima de 350 $\mu\text{m}$
Face azul	Injeção de partículas igualmente distribuídas pela área na direção do eixo z negativo
Face vermelha	Condição de escape de partículas
Face preta	Condição de parede com reflexão de partículas

**Tabela 3.** Variáveis empíricas utilizadas nas condições de contorno

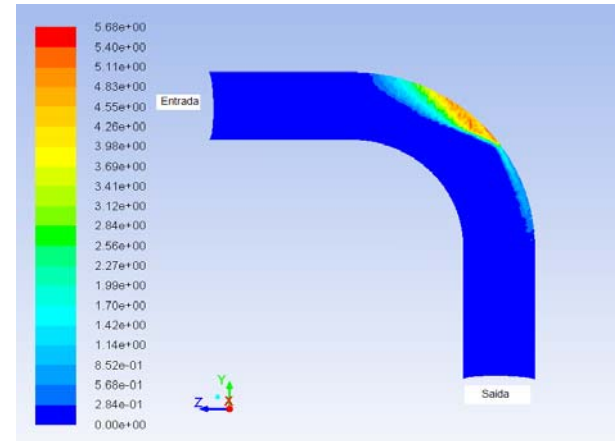
Coeficiente de reflexão paralelo (areia impingindo no Alumínio)	$0,998 - 1,66\theta + 2,11\theta^2 - 0,67\theta^3$
Coeficiente de reflexão perpendicular (areia impingindo no Alumínio)	$0,993 - 1,76\theta + 1,56\theta^2 - 0,49\theta^3$
Coeficiente de reflexão paralelo (areia impingindo no aço)	$1 - 0,78\theta + 0,84\theta^2 - 0,21\theta^3 + 0,028\theta^4 - 0,022\theta^5$
Coeficiente de reflexão perpendicular (areia impingindo no aço)	$0,988 - 0,78\theta + 0,19\theta^2 - 0,024\theta^3 + 0,027\theta^4$
Função do ângulo de impacto	Uma <i>piecewise linear</i> para materiais de comportamento dúctil
Função da velocidade	Valor constante de 2,6
Função do diâmetro da partícula	Valor constante de 1,8e-9

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

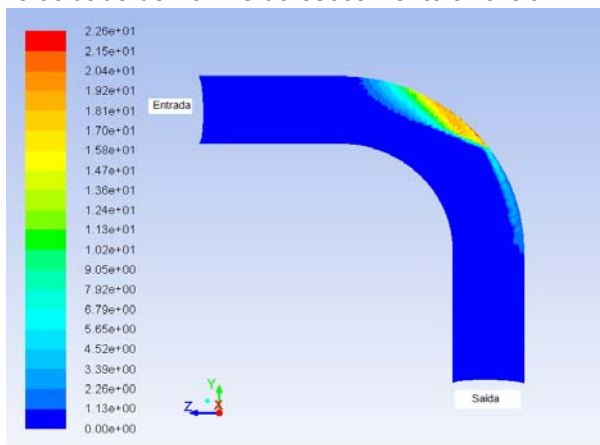
As Figuras 2, 3 e 4, mostram o desgaste erosivo nas velocidades de 10, 15 e 25 m/s respectivamente, para o caso do material alumínio comercialmente puro. Já as Figuras 5, 6 e 7, mostram o desgaste erosivo nas mesmas velocidades só que para o aço 4130. Todas estas figuras mostram os resultados para a meia calha inferior. Nas simulações onde a fase contínua é o ar, caracterizando os escoamentos internos às tubulações a altas velocidades, efeitos interessantes podem ser observados, como por exemplo, a ausência de indicadores de desgaste erosivo na região de entrada do escoamento. Sendo assim, os efeitos da condição de contorno de intensidade turbulenta de 3% não têm um efeito decisivo no cálculo do desgaste erosivo, ou seja, pode ser considerado desprezível dado um escoamento desenvolvido como condição de contorno.



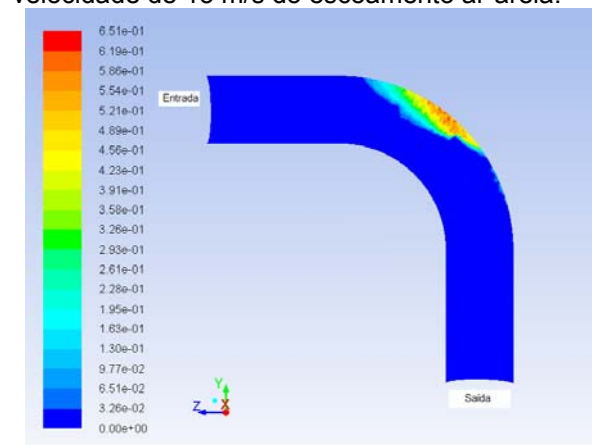
**Figura 2.** Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 10 m/s do escoamento ar-areia.



**Figura 3.** Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 15 m/s do escoamento ar-areia.

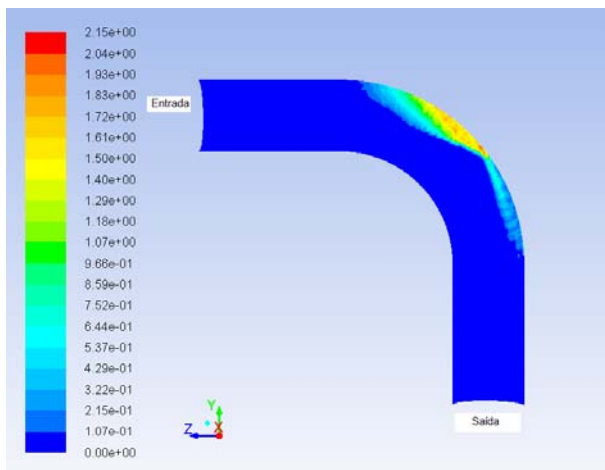


**Figura 4.** Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 25 m/s do escoamento ar-areia.

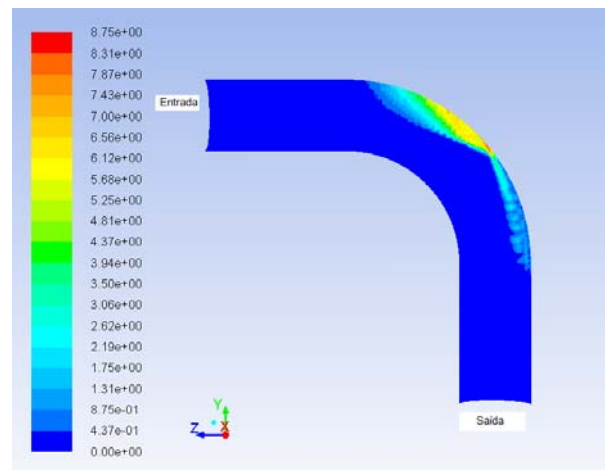


**Figura 5.** Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 10 m/s do escoamento ar-areia.

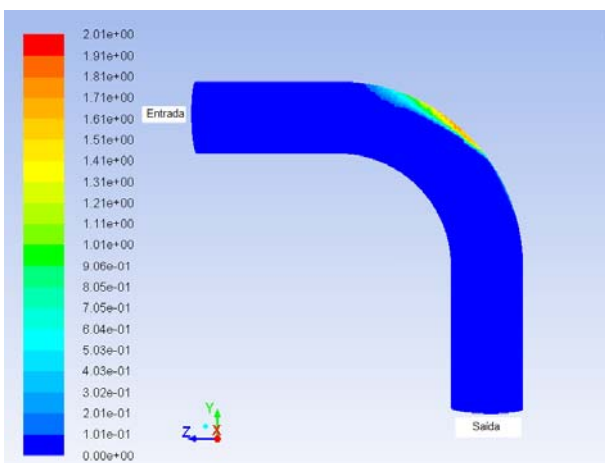
As Figuras 8 e 9 mostram o desgaste erosivo na meia calha superior, somente para o caso das velocidades de 10 m/s para o alumínio e o aço, respectivamente. Os resultados mostram os desgastes erosivos tanto na meia calha superior como na inferior, do Aço e do Alumínio, a altas velocidades, representando um risco efetivo de falha em serviço. Porém, como efeito de validação da simulação, observa-se um desgaste mais concentrado na região inferior, devido à ação da gravidade.



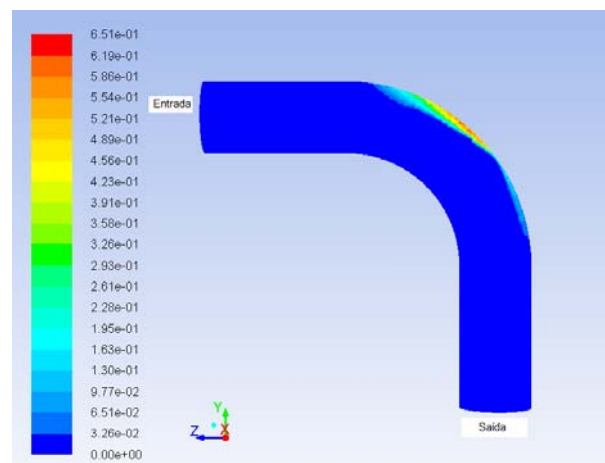
**Figura 6.** Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 15 m/s do escoamento ar-areia.



**Figura 7.** Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 25 m/s do escoamento ar-areia.



**Figura 8.** Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 10 m/s do escoamento ar-areia.



**Figura 9.** Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 10 m/s do escoamento ar-areia.

Alguns fatos interessantes a serem observados, é que com o incremento da velocidade há um incremento direto da energia cinética e que com a mudança do material do Alumínio para aço, o aço é mais resistente ao desgaste erosivo em condições semelhantes. Considerando que a energia cinética aumenta com o quadrado da velocidade, a taxa de desgaste erosivo também aumentará com aproximadamente o quadrado da velocidade (Zum Gahr, 1987)<sup>(6)</sup>. Ou seja, aumentando a velocidade em 1,5 vezes, o desgaste erosivo deve aumentar em torno de 2,25 vezes. É o que acontece aproximadamente nos resultados observados quando se passa de uma taxa de desgaste erosivo de 2,01 mm/ano a uma velocidade de 10 m/s (Figura 2) para uma taxa de 5,68 mm/ano a uma velocidade de 15 m/s (Figura 3), no caso do alumínio. O mesmo acontece com o aço.

Outro fator interessante no transporte de particulados em um meio contínuo como o ar, é que devido à sua viscosidade muito menor do que a da água nota-se que a fase contínua tem pouca influência na mudança de trajetória da partícula. Isto significa dizer, que dada a velocidade da fase discreta, a mesma colidirá com a parede da tubulação a uma velocidade e trajetória muito semelhantes às quais a partícula tinha na entrada da tubulação. Isto porque o tempo de relaxação é dividido pela viscosidade, e quanto menor o tempo de relaxação, mais rápido a partícula



tenderá a se adaptar à velocidade e trajetória imposta pela fase contínua (Svarovsky L., 1984)<sup>(7)</sup>.

#### **4 CONCLUSÃO**

Os resultados mostraram evidências físicas da validade das simulações numéricas para o desgaste erosivo, como a presença da gravidade atuando, a variação do desgaste erosivo de acordo com a velocidade utilizada, e a diferença esperada quando o desgaste erosivo ataca diferentes materiais, como o aço e o alumínio. É possível também perceber, o quanto os modelos numéricos para erosão dependem de variáveis determinadas experimentalmente.

O software Fluent (Ansys Inc.) se mostrou uma ferramenta muito robusta e flexível para este tipo de problema.

#### **Agradecimentos**

Agradecimento a todas as agências financiadoras de pesquisa do país, em especial para este trabalho a Fapemig, CNPq e Petrobras, e à faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Uberlândia.

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 Chen X.H., McLaury B.S. and Shirazi S.A., Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow, *Wear* 261, pp. 7–8, 2006.
- 2 Forder, A., Thew, Martin, Harrison, D., A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves, *Wear* 216, pp. 184-193, 1998;
- 3 Silveira-Neto, A., *Turbulência nos fluidos aplicada*, 1.a Edição, 2002.
- 4 Menter, F. R., Kuntz, M., Langtry, R., Ten years of industrial experience with the SSST turbulence model, *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Otterfing, Germany, 2003.
- 5 *Fluent 12.1 Theory Guide – 2010*.
- 6 Zum Gahr, K. H., *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier, 1987.
- 7 Svarovsky, L., *Hydrocyclones*, Holt, 1984.