

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESGASTE EROSIVO EM TUBULAÇÃO DE 4" PARTE II: TRANSPORTE DE ÁGUA, AR E AREIA, EM UM ESCOAMENTO ANULAR<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 uma tubulação de 4" transportando água, ar e areia, através de técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O trabalho foi realizado utilizando o software Fluent (Ansys Inc.). Como se trata de um escoamento trifásico é necessária a utilização de modelos capazes de prever o comportamento das diferentes fases na simulação. Foi utilizado então o modelo VOF (*Volume of Fluid*) para a predição do escoamento do par de fluidos ar-água, e o modelo de fase discreta para a predição do movimento das partículas erosivas. Utilizou-se a metodologia Urans (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*), e modelo k- $\omega$ -SST para predição do escoamento anular, pois se trata de um problema transiente. A modelagem das fases contínuas (ar-água) é feita separadamente da modelagem da fase discreta. O particulado simulado foi injetado pelo acoplamento de uma via. De acordo com as velocidades propostas, foi observado qual padrão de escoamento deveria ser formado. Através da literatura tem-se que quando o ar tem uma velocidade superficial de 15 m/s e a água tem uma velocidade superficial de 1,5 m/s, o padrão de escoamento a ser formado é o padrão anular. Isto foi confirmado pela simulação. Pôde-se observar as regiões que sofreram mais desgaste erosivo nestas condições, fornecendo inclusive informações sobre a decantação desse particulado sólido para a parte inferior da tubulação como resultado da ação da força da gravidade.

**Palavras-chave:** CFD; Simulação numérica; Desgaste erosivo; Trifásico.

## NUMERICAL SIMULATIONS OF EROSION WEAR IN 4 in. PIPE: WATER-SAND-AIR TRANSPORT, IN AN ANNULAR FLOW

### Abstract

This work has as main objective, to evaluate the erosive wear in a 4 inches pipe, transporting water, air and sand, through CFD (*Computational Fluid Dynamics*) techniques. The work was done using the software Fluent (Ansys Inc.). Because it involves a three phase flow phenomena, it is necessary to use models capable of predicting the behavior of the different phases on the simulation. So the model VOF (*Volume of Fluid*) was chosen to predict the pair of fluids water-air, and the discrete phase model to predict the erosive particles movement. The Urans (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*) methodology was used, with the k- $\omega$ -SST model to predict the annular flow, because it is a transient problem. The continuous phase modeling (water-air) is done separately from the discrete phase modeling. The particles simulated were injected by the one way coupling. According to the proposed velocities, it was observed which flow pattern should be formed. Through the literature when the air has the superficial velocity of 15 m/s and the water has the superficial velocity of 1,5 m/s, the flow pattern to be formed is the annular. This was confirmed by the simulation. It was possible to observe regions suffering more erosive wear in these conditions, giving also informations about the decantation of this solid particles to the inferior part of the pipe as a result from the gravity force.

**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> *Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica e doutorando em Engenharia 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

Como sequência da primeira parte deste trabalho<sup>(5)</sup>, em que foram utilizadas simulações numéricas para avaliação do desgaste erosivo em escoamentos bifásicos, este trabalho começa a tratar os escoamentos trifásicos, envolvendo água, ar e areia. Nestes tipos de escoamento é importante salientar a forma como deve ser tratado do ponto de vista numérico. Há um escoamento bifásico entre água e ar e após algum tempo as partículas são injetadas para a formação das três fases e conseqüentemente do desgaste erosivo.

Quando se trata de um escoamento bifásico do tipo ar-água, deve-se remeter a renomados autores como Taitel e Dukler<sup>(1)</sup> em seu trabalho de 1976, Mandhane<sup>(2)</sup> em seu trabalho de 1974 e Ovid Baker<sup>(3)</sup> de 1954. Estes autores estudaram as condições e os padrões de escoamento que poderiam ser formados quando em um escoamento bifásico ar-água. Os padrões de escoamento são as formas geométricas, com suas características físicas, que essa interação entre os fluidos podem adquirir. Estes padrões dependem basicamente das velocidades superficiais envolvidas, dos fluidos envolvidos, do diâmetro da tubulação e da inclinação da mesma. Alguns padrões de escoamento podem ser observados na Figura 1.



Figura 1. (a) Escoamento intermitente *slug* e (b) Escoamento anular. Fonte: Simultaneous flow of oil and gas, Ovid Baker, 1954.

Neste trabalho, foi adotado como referência a nomenclatura de Taitel & Dukler<sup>(1)</sup> e seu mapa de escoamento, elaborado de forma analítica. O mapa pode ser observado na Figura 2 comparado com o mapa de Mandhane<sup>(2)</sup>, que foi elaborado a partir de dados experimentais. Neste gráfico, tendo as velocidades superficiais do par de fluidos envolvidos, consegue-se determinar o possível padrão de escoamento a ser formado. A velocidade superficial é a velocidade do fluido se ele estivesse em um escoamento monofásico.

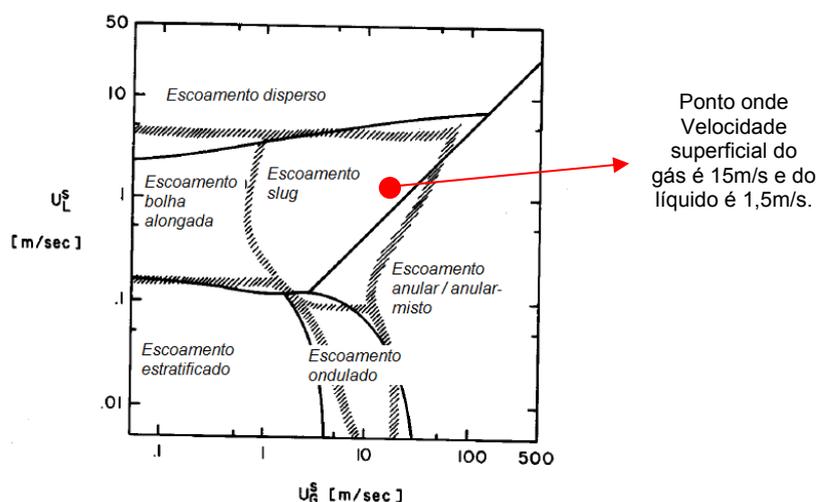


Figura 2. Mapa de Mandhane (1973) comparado com mapa de Taitel e Dukler (1976).

O padrão anular, que é o utilizado neste trabalho, apresenta uma fase líquida formando um filme nas paredes do tubo e o gás escoando pelo interior do filme. Este tipo de escoamento é um escoamento de difícil reprodução tanto experimental quanto numericamente. Envolve uma sequência complexa de mecanismos físicos de quebra e formação de bolhas e gotículas, formação de filme e coalescência de gotas e gotículas, assim como um bombeamento pelas paredes da tubulação.

Além da determinação do padrão de escoamento a ser formado, é interessante observar que desta vez há um par de fluidos a serem tratados, e portanto, um modelo deve ser escolhido para isso. Existem diversos modelos de escoamentos bifásicos e para que a predição do padrão de escoamento se repita na sua forma numérica, é necessário escolher o modelo correto. Estes modelos podem ser modelos Eulerianos a um fluido ou Euler-Euler, dependendo da forma como trata as multifases.

No modelo Euleriano, as duas fases envolvidas são tratadas matematicamente como fases contínuas interpenetrantes (Fluent Theory Guide, 2010)<sup>(4)</sup>. Utiliza-se então o conceito de fração de volume da fase, considerando que o local onde uma fase está presente não pode ser ocupado pela outra fase. Isto é conseguido através de um sistema de equações de espaço e tempo cujas somas são iguais a um.

De acordo com o Fluent Theory Guide (2010)<sup>(4)</sup>, no modelo Euleriano VOF, o escoamento é tratado como uma única fase escoando, mas com propriedades diferentes, caracterizando então o fluido como bifásico. Utiliza-se uma técnica de captura da interface a uma malha fixa euleriana. O interesse nessa forma de modelagem é somente encontrar a posição da interface. De acordo com Miranda F. C. (2010)<sup>(5)</sup>, esta forma de modelagem é uma modelagem a um fluido, onde existe a solução de apenas um conjunto de equações de conservação em todo o domínio.

A partir dos resultados obtidos na primeira etapa deste trabalho, submetido por Silva, Silveira-Neto e Franco<sup>(5)</sup>, e, ainda resultados obtidos por outros autores como Chen, Mclaury e Shirazi (2006)<sup>(6)</sup>, a mesma metodologia (URANS e modelo de fase discreta) foi aplicada a um escoamento trifásico.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Como se trata de uma continuação de um trabalho<sup>(5)</sup>, os mesmos procedimentos que foram utilizados na primeira parte foram utilizados para este trabalho com a diferença de que neste trabalho o cálculo é feito na forma transiente e é necessária a utilização de um modelo euleriano para multifases.

Para o cálculo transiente, a média das variáveis é feita temporalmente, representando assim, não uma média global, mas uma média temporal. A metodologia que faz esta média é a URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*). Juntamente com esta metodologia, o mesmo modelo de turbulência foi utilizado: k- $\omega$ -SST.

Para a modelagem do escoamento bifásico entre ar e água utilizando o modelo VOF, a captura da interface entre as fases é dada pela Equação 1, que é uma equação de continuidade para a fração de volume de uma ou mais fases representadas por q e p.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

Onde  $\dot{m}_{pq}$  e  $\dot{m}_{qp}$  são as quantidades de massa transferidas da fase p para q e q para p, respectivamente e  $S_{\alpha_q}$  é um termo fonte de valor padrão zero neste caso.  $\alpha_q$  é a fração de volume da fase q e é resolvida através de um esquema de interpolação implícito ou explícito. Neste caso utilizou-se o esquema implícito.

Quando utilizando o esquema implícito, existem algumas opções para a interpolação, como Upwind ou QUICK, por exemplo. Foi utilizado neste problema o esquema Upwind de segunda ordem que tem acurácia maior do que o de primeira ordem. O esquema implícito segue de acordo com a Equação 2.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[ S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (2)$$

Onde a notação f, indica a posição na face.

As propriedades dos materiais envolvidos são calculadas a partir do valor de  $\alpha$  que funciona como uma forma de ponderação de propriedades. Se em um sistema bifásico, por exemplo, a propriedade densidade é calculada da seguinte maneira:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3)$$

Sendo assim, na interface ou em qualquer outra região do escoamento, é possível encontrar o valor da densidade, que varia entre um fluido e outro. Todas as outras propriedades, como viscosidade, por exemplo, são calculadas dessa mesma forma. Como uma única equação de quantidade de movimento é resolvida, a velocidade resultante é compartilhada pelas duas fases. A Equação 4 mostra essa equação, que por sua vez é dependente das propriedades encontradas em cada volume de controle.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{-T})] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

Sobre a turbulência gerada e os valores de k e de  $\omega$ , as mesmas equações para o transporte de k e de  $\omega$  descritas na primeira parte deste trabalho<sup>(5)</sup>, são utilizadas no caso do escoamento multifásico. Desta forma, as duas fases compartilham de um único conjunto de equações de transporte.

Por se tratar de um escoamento multifásico entre água e ar, a tensão interfacial passa a ter sua importância. A tensão utilizada foi a encontrada na literatura no valor de 0,076 N/m.

Estando resolvida a parte do escoamento bifásico entre ar e água, a terceira fase que é areia, segue também a mesma forma como foi utilizada na primeira parte deste trabalho<sup>(5)</sup>. A diferença é que por se tratar de um problema muito mais complexo utilizou-se o acoplamento de uma via, ou seja, não foi levada em conta a influência da fase Lagrangiana na fase Euleriana. Isto devido ao fato do diâmetro das partículas envolvidas ser muito pequeno. Apesar de ser um problema transiente, não foi utilizada a formulação transiente para o modelo de fase discreta. Assumiu-se então um determinado momento em que o escoamento anular estava desenvolvido e injetou-se os particulados. Assumir o escoamento como desenvolvido, significa qualitativamente observar um fluido escoar internamente a outro fluido. Este outro fluido por sua vez forma um anel ao redor do fluido que escoar no interior. Na Figura 4 pode-se observar como foi tratado o escoamento anular como desenvolvido.

A Figura 3 mostra a geometria utilizada, assim como as condições de contorno do problema.

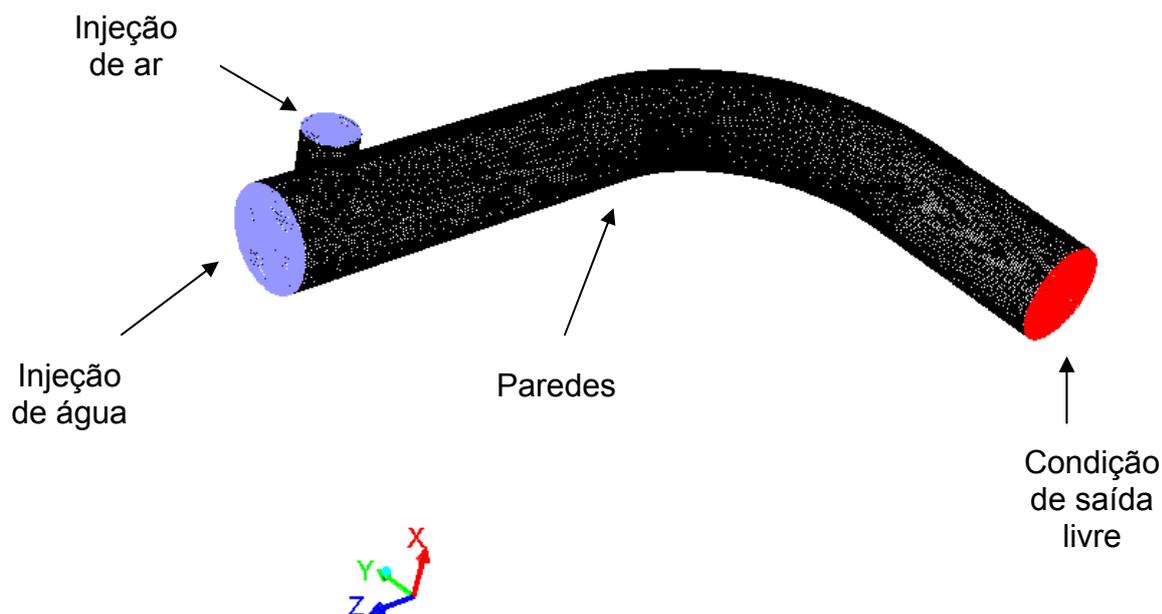


Figura 3. Malha e geometria utilizada no escoamento bifásico.

As condições de contorno da fase discreta podem ser observadas na Tabela 1, e as variáveis utilizadas nas condições de contorno, podem ser observadas na Tabela 2. O material utilizado foi o alumínio. Os coeficientes de restituição foram obtidos na literatura<sup>(7)</sup>.

Tabela 1. Condições de contorno 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 água a 1,5 m/s)	Injeção de partículas igualmente distribuídas pela área na direção do eixo z negativo
Face azul (Injeção de ar a 15 m/s)	Condição de escape de partículas
Face vermelha	Condição de escape de partículas
Face preta	Condição de parede com reflexão de partículas

Tabela 2. Variáveis empíricas utilizadas nas condições de contorno

Coefficiente de reflexão paralelo (areia impingindo no Alumínio)	$0,998 - 1,66\theta + 2,11\theta^2 - 0,67\theta^3$
Coefficiente de reflexão perpendicular (areia impingindo no Alumínio)	$0,993 - 1,76\theta + 1,56\theta^2 - 0,49\theta^3$
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

A Figura 4 mostra o escoamento bifásico entre ar e água, formando o padrão anular. O resultado mostra em azul a fração volumétrica representando 100% de ar, e em vermelho a fração volumétrica representando 0% de ar, ou seja, 100% de água. É muito importante este resultado no sentido de se ter atingido o padrão de escoamento anular via simulação numérica. A Figura 5 mostra em outro corte, o padrão anular atingido.

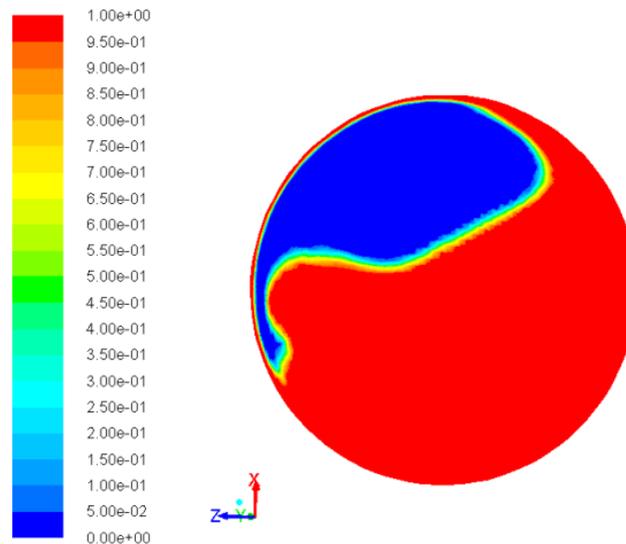


Figura 4. Seção transversal mostrando a fração volumétrica.

A simulação numérica do padrão de escoamento bifásico anular ar-água atingiu resultados concisos comparando com o mapa de escoamento de Taitel & Dukler<sup>(1)</sup>. As velocidades superficiais utilizadas, se colocadas no mapa teórico vão estar na região de transição aproximada entre *slug* e anular. É de sabida dificuldade a simulação deste padrão de escoamento, principalmente em tubulações horizontais.

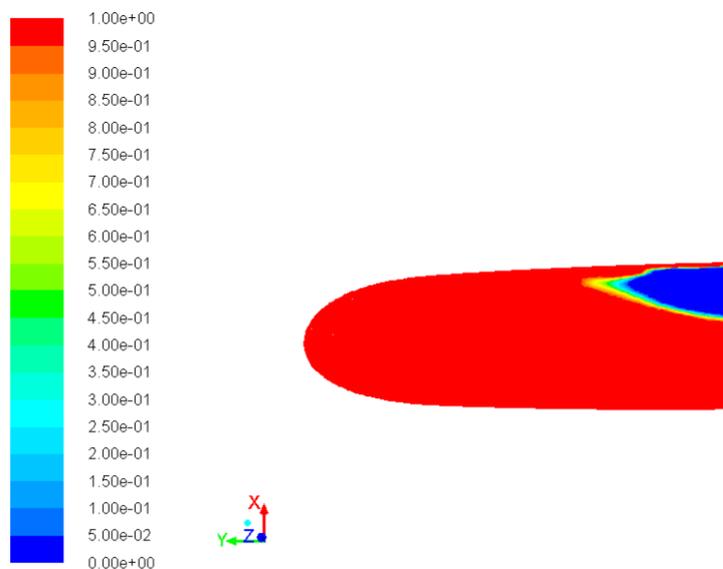
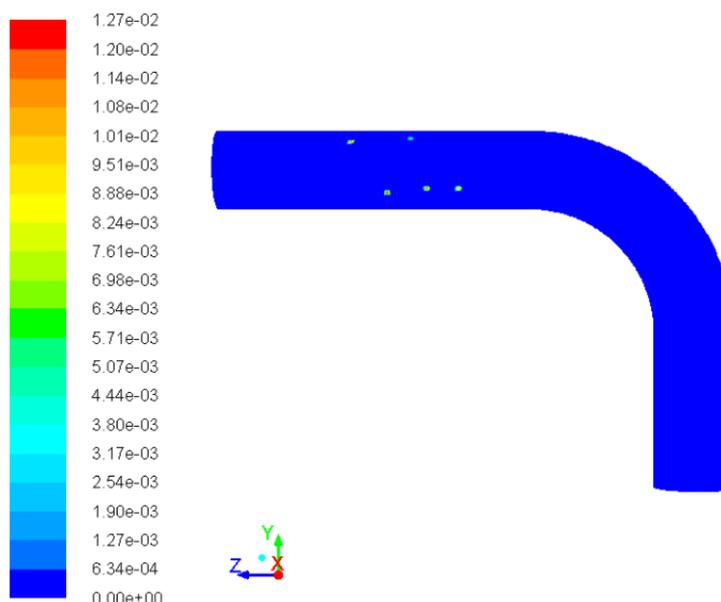


Figura 5. Vista da formação do padrão anular em outro corte.

Com o padrão anular atingido, foram injetadas as partículas erosivas e, utilizando o modelo de erosão padrão do software Fluent (Ansys, Inc.), foi feita a previsão do desgaste erosivo em um escoamento trifásico. A Figura 6 mostra esse desgaste obtido.



**Figura 6.** Erosão no escoamento trifásico em mm/ano.

A região onde ocorreu o maior desgaste erosivo foi também a região com maior intensidade turbulenta. Isto pode ser mostrado na Figura 7. Devido à baixa velocidade superficial de injeção de água, as partículas erosivas, que foram injetadas na mesma seção, atingiram níveis de energia muito pequenos acarretando em um acúmulo na parte inferior da tubulação. Fisicamente isto está de acordo com a teoria. Como resultado, um desgaste de  $1,27e-02$  mm/ano foi observado na parte superior da parede da tubulação. Este desgaste na parte superior provavelmente ocorreu por possíveis partículas que atingiram a fase gasosa (ar) que tinha velocidades muito maiores (15 m/s), e conseqüentemente, níveis de energia muito maiores. A Figura 7 mostra a diferença entre os níveis de turbulência alcançados nas diferentes regiões da tubulação. Mesmo com esse maior desgaste atingido na região superior do tubo, os valores de perda de espessura são muito pequenos. Uma perda de  $1,27e-02$  mm/ano resulta em uma falha prevista em 78 anos para uma tubulação de 1 mm de espessura de parede. Pode ser considerada nula a possibilidade desta tubulação falhar por desgaste erosivo puro.

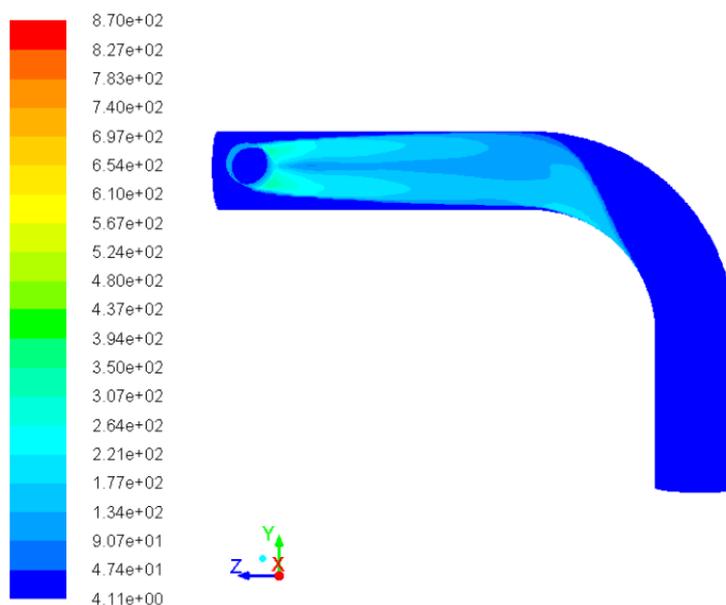


Figura 7. Níveis de turbulência em %, na região de entrada de ar.

## 4 CONCLUSÃO

O problema do desgaste erosivo em um escoamento trifásico é um problema de natureza física muito complexa. É um desafio muito grande trabalhar com este tipo de problema, principalmente do ponto de vista numérico. Muitas fontes de erro podem estar associadas na simulação deste tipo de problema.

A obtenção do padrão de escoamento de acordo com o mapa de escoamento teórico proposto foi um grande êxito deste trabalho. O ponto referente às velocidades envolvidas no mapa de escoamento pode ser observado na Figura 2.

Não existem muitos trabalhos na literatura para dizer se quantitativamente os valores de desgaste erosivo estão próximos ao que acontece em campo. Seria inclusive muito difícil de repetir a simulação de forma experimental. Com isto verifica-se a grande necessidade de se utilizar metodologias numéricas para representar fisicamente problemas complexos de engenharia, mesmo sem comparativos experimentais, pois observa-se que nestes casos, experimento e simulação numérica estão evoluindo juntos.

## 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 Taitel, Y., Dukler, A. E., A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal Gas-Liquid flow, AIChE Journal 22, pp. 47-55, 1976.
- 2 Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K. , A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 1, pp. 537-553, 1974.
- 3 Baker, O., Simultaneous Flow of Oil and Gas, Oil and Gas Journal 53, pp. 185-195, 1954.
- 4 Fluent 12.1 Theory Guide – 2010.

- 5 Silva, R. P., Franco, S. D., Silveira-Neto, A. S., Simulação numérica do desgaste erosivo em uma tubulação de 4" parte I: transporte de ar-areia em tubulações de aço e alumínio, Trabalho submetido no 67° Congresso da ABM, 2012.
- 6 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.
- 7 Forder, A., Thew, Martin, Harrison, D., A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves, *Wear* 216, pp. 184-193, 1998.