

COMPARATIVO ENTRE EXPERIMENTO E SIMULAÇÃO NUMÉRICO- EXPERIMENTAL DO DESGASTE EROSIVO EM TUBULAÇÃO DE 4” TRANSPORTANDO ÁGUA E AREIA A 5,4 m/s¹

Renato Pacheco Silva²
Sinésio Domingues Franco³
Aristeu da Silveira Neto⁴

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desgaste erosivo em uma tubulação de 4” transportando água e areia, através de técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), comparando os resultados com experimentos realizados nas mesmas condições. Para a parte experimental foi utilizada interferometria a laser para medir a perda de espessura e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para observação do mecanismo de erosão atuante. No equipamento *Loop* foi utilizada uma curva de 90° projetada para receber um corpo de prova curvo. Foi medido o desgaste erosivo na curva, em uma amostra de alumínio comercialmente puro após 4 horas de ensaio. Dados os mesmos parâmetros do experimento como condições de contorno, foi realizada a simulação numérica do desgaste erosivo através de um software comercial de CFD Fluent (ANSYS, Inc). Utilizando a abordagem de Euler-Lagrange, a metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*), o modelo de turbulência k- ω -SST e o modelo de erosão padrão do software, foi simulado o escoamento da fase contínua acoplado à fase dispersa para determinação do desgaste erosivo. O acoplamento utilizado foi o de duas vias. Observou-se via simulação, um desgaste muito pequeno da tubulação. Isto de fato foi observado na interferometria, onde não foi possível quantificar o desgaste erosivo. Ainda assim, pôde-se observar o comportamento diferenciado nos ângulos de ataque próximos a 45°, o que era esperado de acordo com o observado na simulação. Pela análise via MEV, observou-se os sulcos formados pelo destacamento de material no processo erosivo.

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

COMPARISSON BETWEEN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL-EXPERIMENTAL SIMULATION OF THE EROSIVE WEAR IN 4” PIPE TRANSPORTING WATER AND SAND AT 5,4 m/s

Abstract

This work has as its main objective to evaluate the erosive wear in a 4” pipe transporting water and sand, through CFD (*Computational Fluid Dynamics*) techniques, comparing the results with experiments in the same conditions. On the experimental part, it was used laser interferometry to measure the thickness loss and scanning electronic microscope (SEM) to observe the erosion mechanism acting. In the *Loop* equipment it was used a 90° elbow projected to receive an elbow coupon. It was measured the erosive wear in the elbow, in an aluminum commercially pure coupon after 4 hours of experiment. Given the same parameters of the experiment as boundary conditions, it was realized the numerical simulation of the erosive wear through a CFD commercial software Fluent (ANSYS, Inc.). Using the Euler-Lagrange method, RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) methodology, the turbulence model k- ω -SST and the standard erosion model of the software, it was simulated the continuous phase flow coupled to a dispersed phase to determine the erosive wear. The coupling used as the two-way coupling. It was observed through simulation, a very small erosive wear of the pipe. This was also observed in the interferometry process, which was unable to quantify the wear. It was possible to observe the different behavior on the attack angles next to 45°, which was expected according to the simulation results. Through SEM, some grooves formed by the material detachment during the erosive process could be observed.

Key words: CFD; Numerical simulation; Erosive wear. *Loop*.

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

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

³ Doutor, Eng. Mecânica e Professor Associado, UFU, Brasil.

⁴ Pós-doutor, Eng. Mecânica e Professor Titular, UFU, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nas linhas de produção de petróleo, é muito comum a presença de particulados como elementos erosivos. Estes elementos erosivos podem ser muito danosos às tubulações, pois além de causarem erosão potencializam a corrosão levando ao sinergismo entre erosão e corrosão. Além da importância técnica do fenômeno a importância econômica associada a extração mineral motiva e incentiva a busca por novas tecnologias para a predição destes tipos de problemas que ocorrem em campo.

A associação entre modelagem computacional de um escoamento bifásico com erosão e um *Loop* capaz de transportar fluidos com a presença de particulados é um exemplo de novas tecnologias e é o objetivo deste trabalho.

O equipamento *Loop* consiste basicamente em um circuito fechado com duas bombas de deslocamento positivo ou uma bomba centrífuga. Um injetor de partículas faz a injeção de areia e um hidrociclone separa as partículas erosivas da fase contínua após sua passagem pela seção de teste. A Figura 1 mostra como esse equipamento pode ser operado.

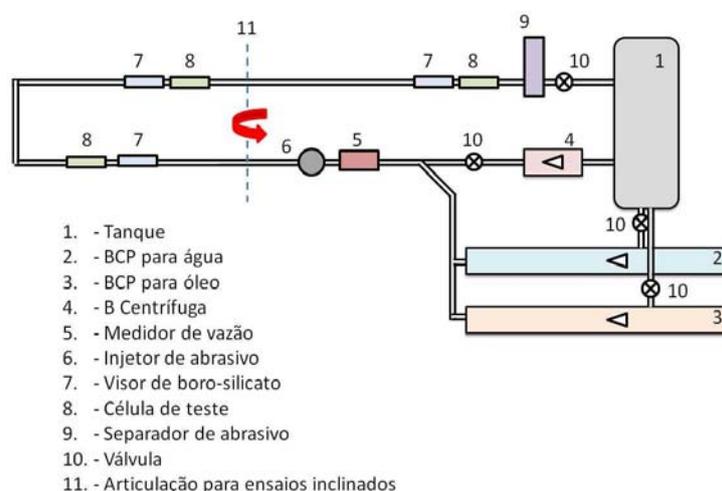


Figura 1. Esquema do equipamento *Loop*.

Foi projetado um porta amostra e um corpo de prova para realização do experimento. O fenômeno foi simulado via CFD para comparação dos resultados. A velocidade de operação de 5,4 m/s foi a velocidade máxima comportada pelo equipamento experimental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais adotados neste trabalho em sua parte experimental começaram com a construção de um porta amostra em curvas. Esta etapa consistiu no projeto e fabricação deste porta amostra para que fosse capaz de receber uma amostra curva (90°) sujeita a um desgaste erosivo no equipamento *Loop*. A figura 2 mostra o projeto e sua montagem no *Loop*. Este projeto foi baseado no projeto do porta amostra de Chen, Mclaury e Shirazi (2006)⁽¹⁾.

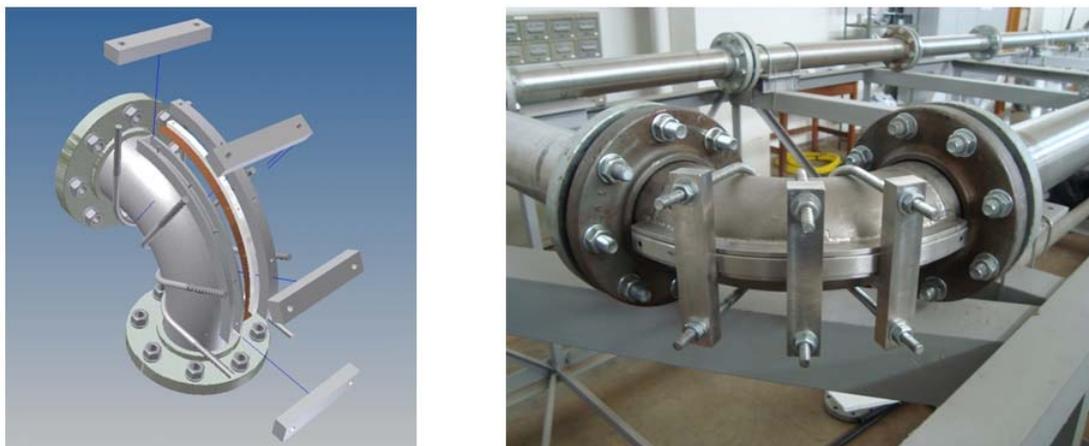


Figura 2. (a) Modelo do porta amostra e (b) Montagem no Loop.

Para os ensaios realizados, um material deve ser adotado. O material a ser adotado deve garantir o desgaste erosivo puro e facilitar a determinação de variáveis como coeficiente de restituição, por exemplo. O coeficiente de restituição é um coeficiente que relaciona a velocidade da partícula antes e depois do impacto com a parede da tubulação. O material então escolhido foi o alumínio.

Após a escolha do material dos corpos de prova, deve-se então fabricá-los. Estes devem estar em conformidade com o porta amostra e com o instrumento de medição de desgaste erosivo, de modo que se possa garantir o desgaste erosivo na amostra e se consiga medir esse desgaste. A forma como será feita a medição também deve ser clara, sendo neste caso a utilização do processo de interferometria a laser e microscopia eletrônica de varredura.

Como etapa seguinte, segue a preparação dos corpos de prova. Para que o transiente do desgaste erosivo seja menor, pede-se uma superfície com um bom acabamento (polido). Quando ocorre o desgaste erosivo, existe um tempo entre o início e o regime de desgaste erosivo, o qual é chamado de transiente do desgaste erosivo. Utilizou-se nesta preparação então quatro etapas, consistindo cada etapa na utilização de uma granulometria de lixa sucessivamente mais fina que a anterior iniciando-se com uma lixa #200 e o acabamento final com uma lixa #1000.

O corpo de prova foi colocado no porta amostra e organizou-se as condições de operação. Deve-se fixá-las bem para que não haja vazamento de água. A velocidade de operação do escoamento deve ser bem selecionada, assim como o tempo de duração do ensaio, a vazão de abrasivo e diâmetro do abrasivo, para se garantir que haja desgaste erosivo.

Após estes procedimentos segue a realização dos experimentos e as análises laboratoriais dos resultados obtidos. A duração dos experimentos foi de 4 horas, com intervalos de meia em meia hora para a reposição da areia utilizada e intervalos diários depois de uma hora de ensaio para resfriamento da água que chega a 50°C (o limite do equipamento é 60°C). A reposição da areia serve inclusive para que se mantenha o mesmo padrão de material abrasivo, evitando um efeito de perda de abrasão que ocorre em grãos de areia que perdem arestas de corte ao longo do tempo.

A caracterização topográfica da amostra foi feita a partir do equipamento TalySurf CLI 2000, da marca TaylorHobson. O equipamento é capaz de medir características da superfície da amostra em uma seção ou em uma área. Neste trabalho a amostra foi dividida em nove seções de medição que estão contidas em um intervalo de ângulo de 90°. A cada 9° tomou-se uma seção de medição. A Figura 3 mostra como

são as marcas de medição. As marcas de medição servem como referência para que se possa realizar uma interferometria antes do ensaio e outra depois, sempre na mesma seção. Como as marcas incluem um risco por toda a amostra e outro risco a 60° cruzando o primeiro risco, por relação trigonométrica, sempre é possível saber onde foi realizada a leitura anterior⁽¹⁾.



Figura 3. Marcas na amostra para interferometria.

Para o ensaio erosivo, deve-se levar em conta o diâmetro médio dos grãos de partícula erosiva, o material dos grãos da partícula, velocidade da fase contínua, tempo de ensaio, diâmetro da tubulação, raio de curvatura e inclinação do experimento. Com base na figura 4 admite-se uma distribuição normal do diâmetro das partículas, com a média em 244 µm de diâmetro.

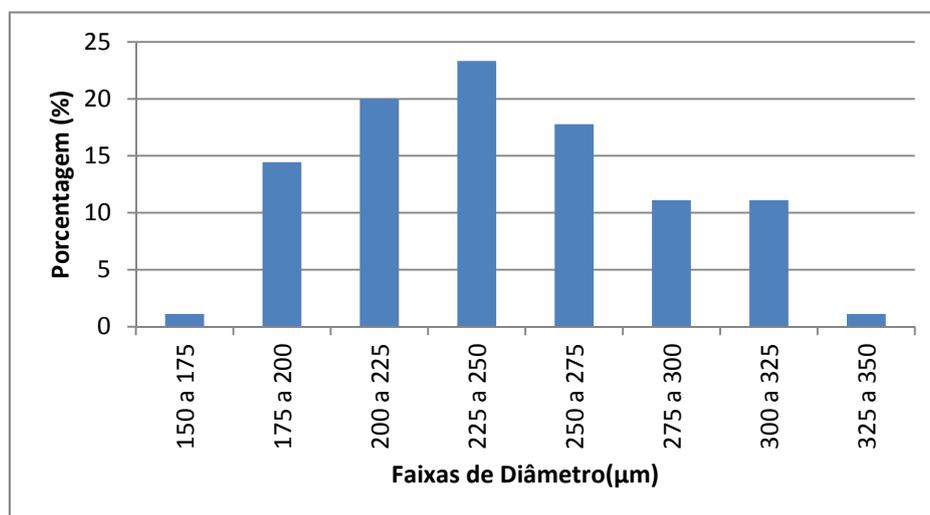


Figura 4. Distribuição de diâmetro de partícula abrasiva por porcentagem.

Para o cálculo do diâmetro médio das partículas foram realizadas análises laboratoriais com microscopia ótica, com a finalidade de se obter a distribuição de diâmetro das partículas (Figura 5). Foram coletadas medições do perímetro de noventa partículas aleatoriamente e estes dados foram distribuídos em oito faixas (Figura 4).

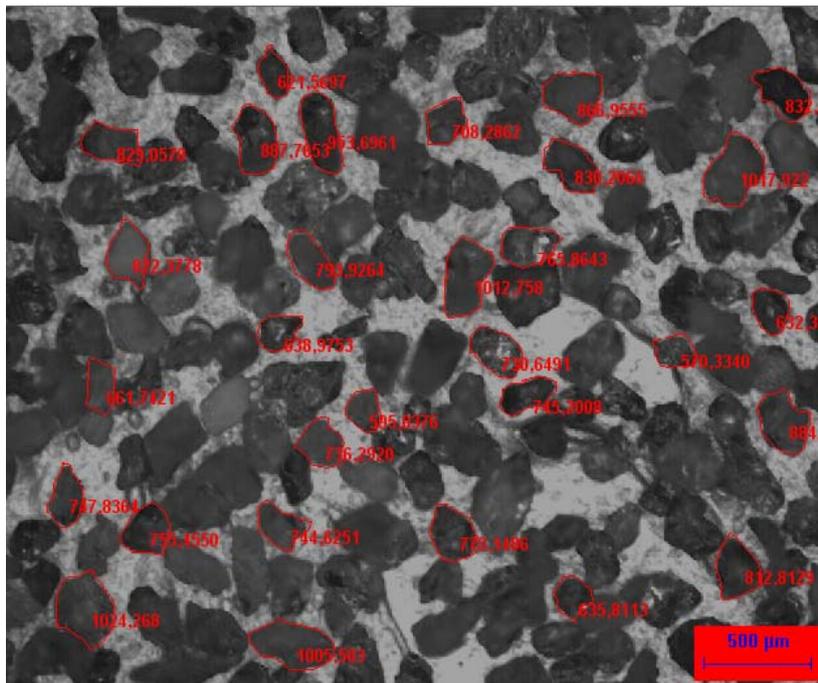


Figura 5. Medição do perímetro para determinação do raio.

Um microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo Supra 40, foi utilizado para a observação dos mecanismos de desgaste erosivo no corpo de prova. As amostras foram preparadas da seguinte forma:

- Cortadas e separadas 3 amostras:
 - Uma a aproximadamente 20°
 - Uma a aproximadamente 45°
 - Uma a aproximadamente 70°
- Limpas no ultrassom com álcool por 410 segundos;
- Secadas;

Após preparadas, as três amostras foram colocadas no porta amostra do microscópio eletrônico de varredura e foram observadas imagens com inclinação de 23° e ampliação de 200x, 800x e 2.000x. Com essas aproximações é possível captar inclusive o risco formado pelo impingimento de um grão de partícula erosiva, mostrando o mecanismo predominante de microcorte e microsulcamento, e ainda uma possível interação com a formação de óxidos de Alumínio.

A análise computacional da erosão foi realizada utilizando um *software* comercial para a dinâmica dos fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O *software* em questão é o *software* Fluent (ANSYS, Inc.).

A análise do escoamento foi feita através da metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*), utilizando o modelo k- ω -SST. Para a análise da fase discreta, assim como o desgaste erosivo, foi utilizado o modelo de fase discreta DPM (*Discrete Phase Model*), utilizando as mesmas condições do experimento como condições de contorno, como velocidades, diâmetro de tubulação. Utilizando estes modelos implementados no *software* Fluent (Ansys, Inc.), foi realizada a simulação computacional para que haja um comparativo entre o resultado do teste e o resultado numérico. Toda esta metodologia numérica utilizada, pode ser buscada nos trabalhos de Silva, Franco e Silveira-Neto⁽²⁾ e Silva, Franco e Silveira-Neto⁽³⁾.

As condições de contorno utilizadas são as mesmas utilizadas no experimento (distribuição normal do diâmetro, velocidade de 5,4 m/s). Como o material é um material de comportamento dúctil, a erosão em função do ângulo de impacto deve

ser adotada. A Figura 6 mostra essa curva⁽⁴⁾. O coeficiente de restituição também deve ser adotado e a Figura 7 mostra qual a curva utilizada para este coeficiente, onde e_{tan} é a componente tangencial e e_{nor} é a componente normal do coeficiente de restituição, sendo *poly* a curva obtida por um função polinomial e *pie* obtida por uma função por partes. Como a velocidade da partícula influencia no desgaste erosivo e o diâmetro da partícula também, utilizou-se os valores de 2.6 e 1.8e-9, respectivamente, como condições de contorno⁽¹⁾.

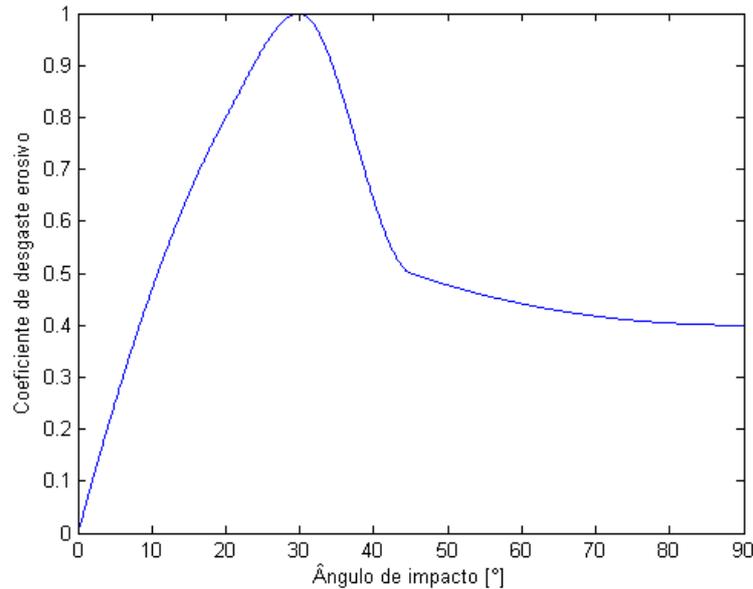


Figura 6. Coeficiente de desgaste em função do ângulo de impacto.

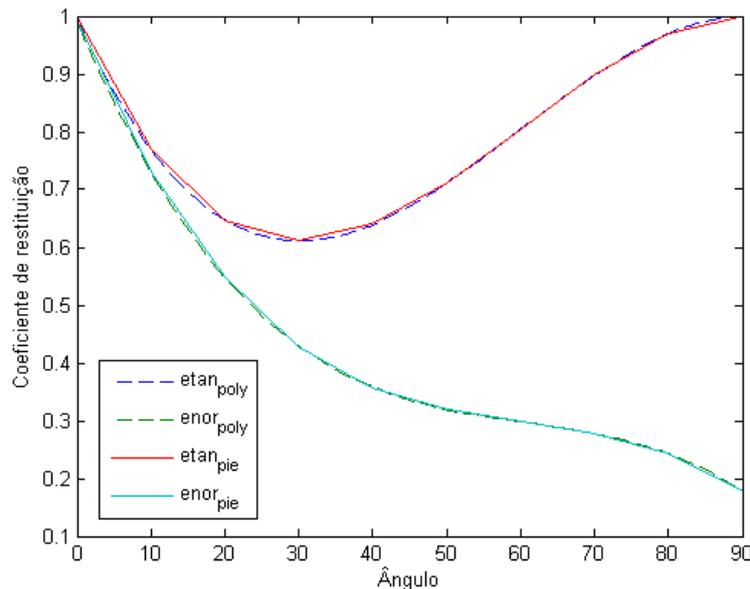


Figura 7. Coeficiente de restituição segundo uma função polinomial e uma função por partes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos se dividem entre os resultados experimentais e os resultados da simulação numérica.

A erosão máxima no Alumínio, um material de comportamento dúctil, é esperada que seja a ângulos de impacto de 30° (Zum Gahr, 1987)⁽⁵⁾. Esta informação é conhecida, mas não é possível saber exatamente onde ocorreu este tipo de impacto na amostra utilizada, sem uma análise microscópica para tentar identificar o mecanismo de erosão. Na seção de teste, o esperado era que acontecesse a máxima erosão em ângulos de 45°. As Figuras 8, 9 e 10, mostram a variação da espessura do corpo de prova em três diferentes locais: a 27° a 63° e a 45°. Como esperado, a 45° foi a região que ocorreu o maior desgaste, que foi apresentado na forma de aumento de espessura do material (Figura 10).

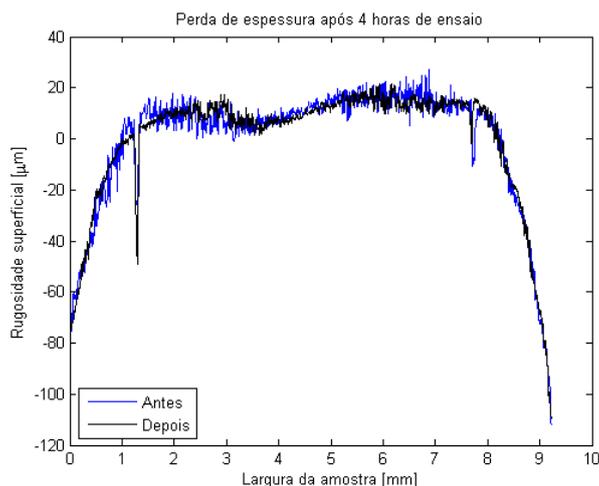


Figura 8. Variação da espessura da amostra a 27°.

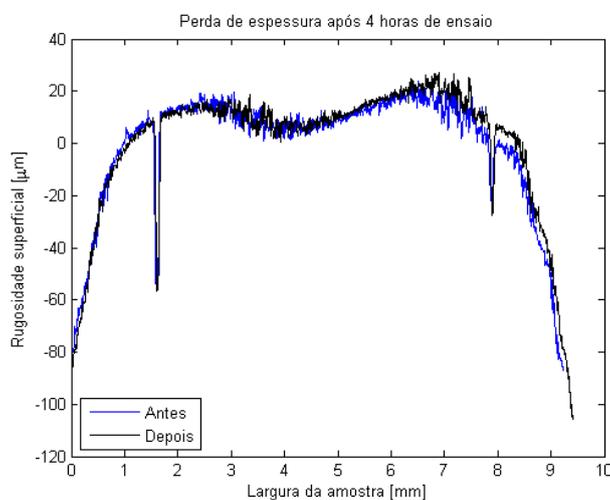


Figura 9. Variação da espessura da amostra a 63°.

De acordo com as técnicas utilizadas para a medição dos resultados experimentais, não foi possível quantificar experimentalmente o valor do desgaste erosivo puro. Também não foi obtido o desgaste erosivo puro, como pode ser observado na Figura 11. Este é um fato muito interessante, pois esperava-se que houvesse uma diminuição da espessura da parede. Como não houve erosão pura, os pontos de maior erosão sofreram oxidação, provavelmente pelo impacto contínuo e subsequente que removeu a camada apassivadora do alumínio. Isto fez com que ao invés de reduzir espessura, o material aumentasse a espessura. Ainda assim pode-

se observar via microscopia, os sulcos referentes ao desgaste erosivo pelo mecanismo de microcorte e microsulcamento na região de maior desgaste.

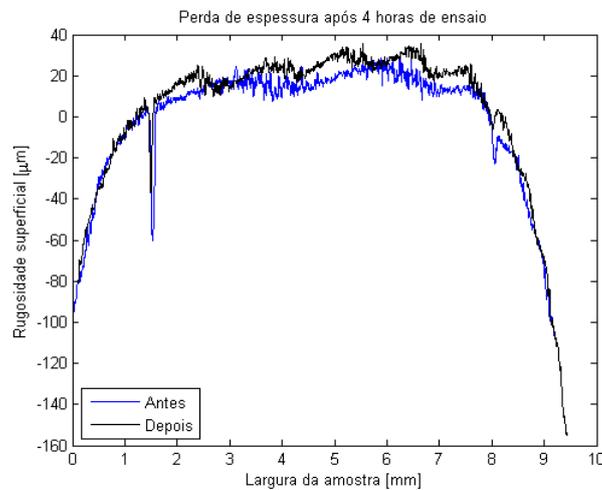


Figura 10. Variação da espessura da amostra a 45°.

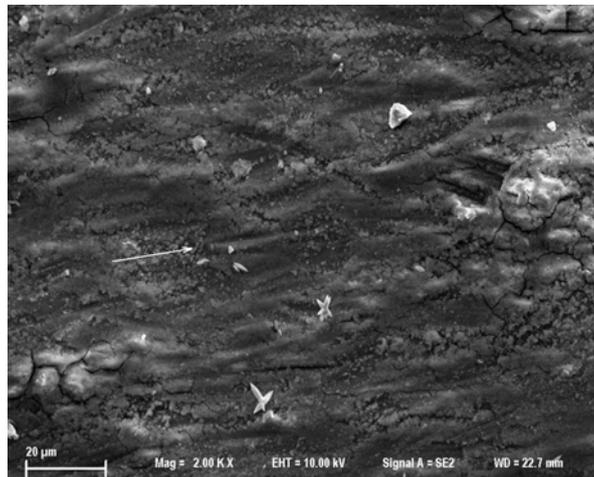


Figura 11. MEV na região de ângulo de aproximadamente 45° com ampliação de 2.000x.

Assim como no teste experimental, as taxas de desgaste erosivo na simulação (Figuras 12 e 13) são muito pequenas. Nos resultados da simulação o valor um da ordem de $8.04e-4$ mm/ano. Com este desgaste obtido via simulação, a falha (período em que uma tubulação com parede de 1 mm será perfurada devido à severidade do desgaste erosivo) ocorreria em um período de aproximadamente 1.200 anos. Pode-se inclusive dizer, a partir da simulação, que dadas as condições de vazão de particulado e vazão de água, em um escoamento similar e similares condições de material e operação, seria mais provável a falha desta tubulação por outros meios do que por desgaste erosivo puro. Observa-se também a região inferior da tubulação, concentrando a maior taxa de desgaste erosivo, por ação da força gravitacional. Provavelmente com um número de Reynolds mais alto, seria mais difícil de observar esse efeito gravitacional. Mas ainda assim, existiria⁽²⁾.

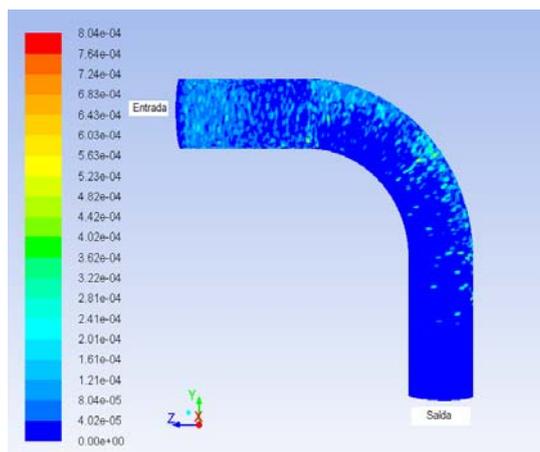


Figura 12. Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 5,4 m/s do escoamento água-areia, no Alumínio.

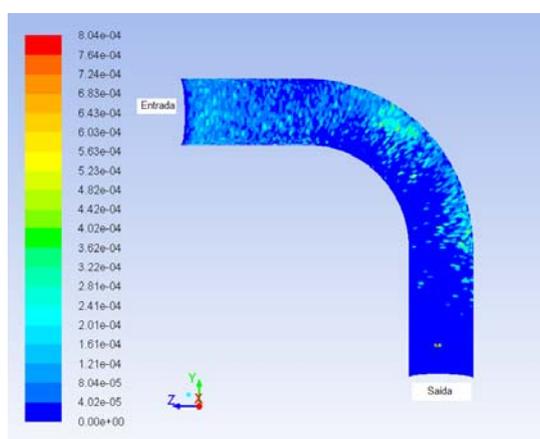


Figura 13. Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 5,4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio.

Observou-se também bastante relevância dos resultados obtidos com relação à condição de contorno na região de entrada da tubulação. Foi utilizada uma intensidade turbulenta de 3%, o que acarretou em uma grande influência no desgaste erosivo obtido na entrada da tubulação. Isto ocorreu pelo fato da velocidade utilizada ser pequena. Quando se aumenta a velocidade, estes fatores passam a ter menos influência.

4 CONCLUSÃO

O equipamento *Loop* apresentou determinadas limitações para a obtenção do desgaste erosivo. Como a bomba centrífuga não consegue operar a velocidades superiores a 5.4 m/s deve-se rodar um ensaio por um tempo muito longo. Mas a bomba centrífuga tem por característica construtiva o aquecimento do fluido de trabalho. Isto limitou outros acessórios do *Loop*, que tem por característica construtiva a operação abaixo dos 60°C. Outro fator importante a ser lembrado, é a utilização de materiais que não sejam tão suscetíveis à corrosão, como o alumínio, para garantir sempre a erosão pura.

Para a simulação numérica, os resultados obedeceram à física do escoamento de forma satisfatória e esperada. Comportou-se de maneira estável. Infelizmente pela dificuldade de se medir um desgaste erosivo tão baixo, não foi possível comparar quantitativamente os resultados numéricos e experimentais.

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 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.
- 3 Silva, R. P., Franco, S. D., Silveira-Neto, A. S., Simulação numérica do desgaste erosivo em uma tubulação de 4” parte II: transporte de água, ar e areia, em um escoamento anular, Trabalho submetido no 67° Congresso da ABM, 2012.
- 4 Fluent 12.1 Theory Guide – 2010.
- 5 Zum Gahr, K. H., *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier, 1987.