

EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA E FÍSICA DA EROÇÃO EM CICLONES

T. A. SEDREZ^{1*}, R. K. DECKER¹, D. NORILER¹, H. F. MEIER¹

¹Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Engenharia Química
*e-mail: thisedrez@gmail.com

RESUMO

A erosão é o desgaste mecânico na parede dos equipamentos por partículas transportadas por escoamento de fluido. Este fenômeno representa um grave problema nas unidades de FCC (craqueamento catalítico fluido), especialmente em ciclones, reduzindo a vida útil do equipamento e causando paradas não programadas. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a erosão causada pelo impacto das partículas de catalisador de FCC em uma geometria de ciclone otimizada para operar com altas vazões, mediante a realização de estudos experimentais conjugados com estudos de simulação numérica. O escoamento gás-sólido foi estudado por meio da abordagem euleriana-lagrangeana com o modelo de turbulência RSM-SSG (*Reynolds Stress Model* – Quadrático). A taxa de erosão foi calculada por dois modelos de erosão. Experimentações físicas foram realizadas para validar os resultados numéricos com ciclones construídos em gesso para acelerar o processo de erosão. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância qualitativa com os dados experimentais, mostrando a região na parede do ciclone onde a erosão é mais evidente e, de forma quantitativa em alguns dos casos estudados.

1 INTRODUÇÃO

Ciclones são amplamente utilizados nas indústrias para a separação de partículas sólidas de uma corrente gasosa, por terem sua geometria simplificada, alta eficiência na coleta de partículas, e baixo custo de investimento e manutenção. No entanto, o contato das partículas sólidas com as paredes do ciclone causa erosão. A erosão vem se tornando um grande problema industrial, principalmente em escoamentos gás-sólidos, limitando o tempo de vida dos equipamentos e ocasionando paradas não programadas nas plantas industriais (UTIKAR et al., 2010).

Segundo Bitter (1963) o desgaste resultante do impacto das partículas de movimento livre em um sólido é definido como erosão, sendo esse desgaste puramente

mecânico e observado em sistemas em que as partículas se movem a altas velocidades.

De acordo com a literatura, Finnie (1960) propôs a primeira derivação analítica de um modelo de corte erosivo para uma única partícula atingindo um material, discutindo algumas condições do escoamento que podem levar a erosão e analisando o mecanismo de remoção para materiais dúcteis e frágeis. A partir daí, outros modelos de erosão surgiram.

Encontram-se, na literatura, muitos estudos de erosão, tanto do ponto de vista experimental quanto numérico. A abordagem Euler-Lagrange é predominante e fatores como velocidade (MAZUMDER, 2012), taxa mássica, tamanho da partícula (DENG et al., 2013) e modelos de erosão (PEREIRA; SOUZA; MARTINS, 2014) são avaliados nos mais variados estudos e geometrias, como em

cotovelos, dutos, tês, curvas, ciclones e calhas.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a erosão em ciclones causada por partículas de FCC, tanto do ponto de vista experimental quanto numérico. Para tal se utilizou ciclones feitos em gesso na experimentação física para acelerar a erosão, possibilitando o cálculo da taxa de erosão e a observação dos locais erodidos (KRAKNER et al. (2013)). E, um dispositivo para estabilização do vórtice.

O estabilizador de vórtice é uma placa originalmente colocada a 1/3 do final do cone do ciclone para estabilizar o vórtice central nessa região e, conseqüentemente, é uma alternativa para diminuir a erosão nesta área (CHEN et al. (2010)). A localização do estabilizador está relacionada ao fato de que a velocidade angular aumenta quando gás e sólido se movimentam da seção cilíndrica para a cônica. A intenção é de que o vórtice terminará na placa plana e que a intensidade de espirais de sólido abaixo da placa seja reduzida.

Para a simulação numérica, a abordagem Euler-Lagrange juntamente com o modelo de turbulência RSM e os modelos de erosão geral (DET NORSKE VERITAS, 2007) e de Oka, Okamura e Yoshida (2005) e Oka e Yoshida (2005) foram utilizados no

software comercial FLUENT 14.0 (ANSYS, 2011) para estudos em um ciclone otimizado por Sgrott et al. (2015). O efeito da velocidade de entrada do gás no ciclone foi avaliado para uma taxa mássica de sólidos fixa tanto do ponto de vista experimental quanto numérico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados nas experimentações física e numérica estão apresentados a seguir.

2.1 Experimentação Física

Os experimentos físicos deste trabalho foram realizados na Unidade Experimental de Dutos e Ciclones (UE-DC), apresentada na Figura 1. Na unidade, um tubo de Pitot (02) é conectado a um sensor diferencial de pressão para medir a velocidade média de entrada do gás; um exaustor (09) mantém a velocidade constante. A fase sólida é carregada no sistema através de um alimentador de sólidos (06). As partículas são separadas por meio de um ciclone (08) e um filtro de mangas (11). O detalhamento do ciclone Sgrott_103-500 está apresentado pela Tabela 1, acompanhado da Figura 2, sendo a espessura da parede de gesso de 10 mm. Os ciclones confeccionados em gesso foram feitos em partes, conforme mostra a Figura 3 e, os moldes impressos em

Figura 1 - Representação ilustrativa da Unidade Experimental de Dutos e Ciclones (UE-DC).

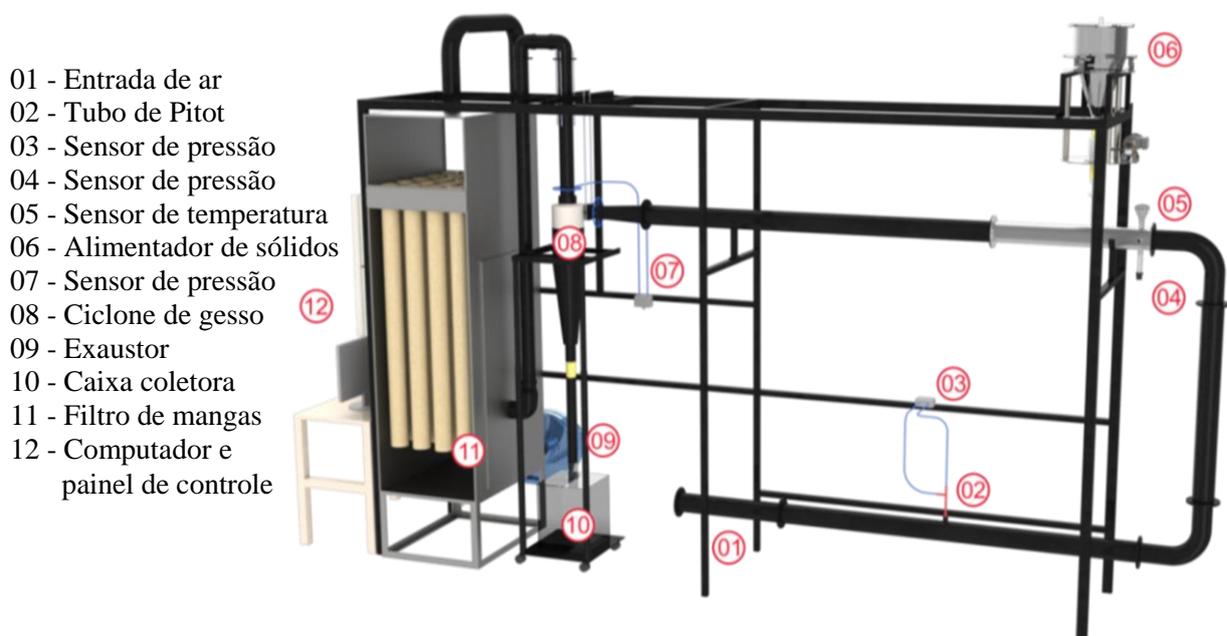
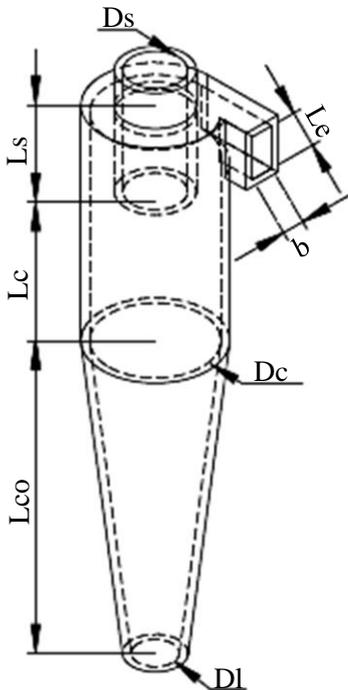


Tabela 1 - Detalhamento do ciclone Sgrott_103-500.

Relações Geométricas	Dimensões (mm)
Ds	73,8
Dc	150
Dl	54,9
Le	60,3
Ls	111,6
Lc	210,6
Lco	441,3
b	30,9

Figura 2 - Ciclone Sgrott_103-500.



uma impressora 3D. O ciclone montado é apresentado na Figura 4. Na experimentação física, o estabilizador de vórtice também foi utilizado, a 1/3 do final do cone (Figura 5). Esta peça é feita de aço inoxidável e sua área de passagem é ligeiramente maior que a área da saída do cone.

A taxa mássica de sólidos foi mantida constante (11,8 g/s) e a velocidade de gás na entrada do ciclone foi variada (25, 30 e 35 m/s) em três baterias de experimentos. O Grupo 1 não utilizou estabilizador de vórtice e colocou-se um reforço estrutural ao redor da

Figura 3 – Moldes e peças em gesso. a) tampas; b) duto de saída; c) entrada; d) cilindro e e) cone.

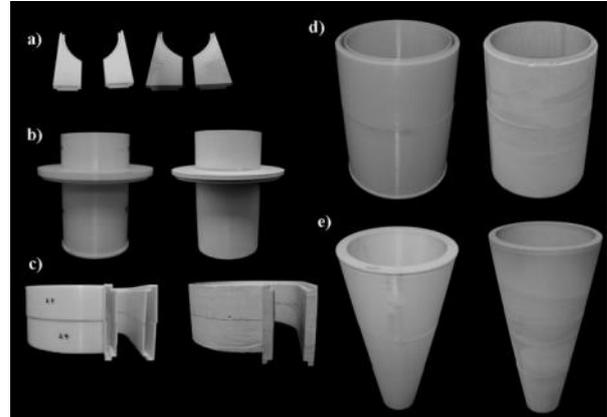


Figura 4 – Ciclone em gesso.

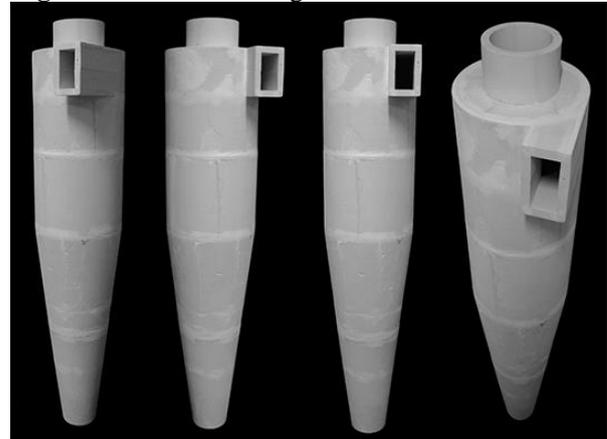
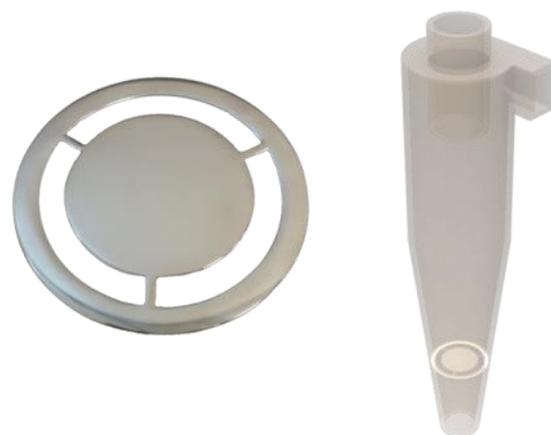
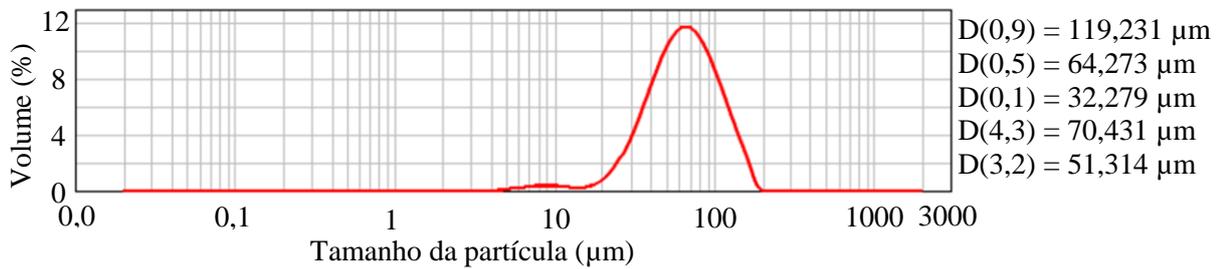


Figura 5 – Estabilizador de vórtice.



entrada do ciclone para possibilitar maior erosão no corpo do ciclone; o Grupo 2 foi idêntico ao Grupo 1, porém utilizou o

Figura 6 – Distribuição granulométrica das partículas de FCC.



estabilizador de vórtice; e o Grupo 3 não utilizou o reforço estrutural na estrada.

O material particulado utilizado foi partículas de FCC. A Figura 6 apresenta a distribuição granulométrica das partículas, sendo que a massa específica do material é de 1400 kg/m³.

2.2 Experimentação Numérica

A metodologia proposta para a simulação numérica consiste na aplicação de técnicas de CFD para resolver um escoamento gás-sólido com erosão.

2.2.1 Modelagem Matemática

A abordagem euleriana-lagrangeana com acoplamento de duas vias foi usada neste trabalho para representar o escoamento gás-sólido em ciclones. O campo hidrodinâmico do gás é simulado pelas equações RANS em conjunto com modelo de turbulência RSM - Quadrático. As partículas sólidas são assumidas esféricas. A movimentação das partículas é analisada pelo método de rastreamento lagrangeano. A dispersão turbulenta das partículas devido à turbulência na fase gasosa foi prevista pelo modelo de trajetória estocástico DRW (*Discrete Random Walk*).

2.2.2 Modelos de Erosão

No código FLUENT (ANSYS, 2011) a erosão é exibida como fluxo de erosão e definida como a massa de material removido por unidade de área da superfície e tempo no qual as partículas sólidas atingem a superfície do material (kg/m².s).

$$E_R = \sum_{p=1}^{n_p} \frac{\dot{m}_p E}{A_{face}} \quad (1)$$

onde E_R é o fluxo de erosão (kg/m².s), \dot{m}_p a taxa mássica de sólidos (kg/s), E a erosão adimensionalizada e A_{face} a área da face da célula (m²). Dois modelos para o cálculo da erosão foram utilizados neste trabalho.

O modelo geral de erosão (DET NORSKE VERITAS, 2007):

$$E = Kf(\alpha)v_p^n \quad (2)$$

onde K é a velocidade máxima da partícula em que o limite elástico é atingido, cujo valor atribuído foi $7,48195 \times 10^{-5}$ (m/s)⁻ⁿ neste trabalho, $f(\alpha)$ a função do ângulo de impacto, v_p a velocidade de impacto da partícula (m/s) e n o coeficiente da velocidade da partícula, assumido como 1,2.

A função do ângulo de impacto para este modelo é dada por uma expressão polinomial:

$$f(\alpha) = \sum_{i=1}^n A_i \alpha^i \quad (3)$$

sendo A_i os coeficientes do polinômio ($A_1 = 2,4647 \times 10^{-3}$, $A_2 = 2,9284 \times 10^{-4}$ e $A_3 = 2,1974 \times 10^{-6}$) e α o ângulo de impacto.

O modelo de Oka (OKA; OKAMURA; YOSHIDA, 2005; OKA; YOSHIDA, 2005):

Figura 7 – Variação da predição da erosão com o número de partículas computacionais.

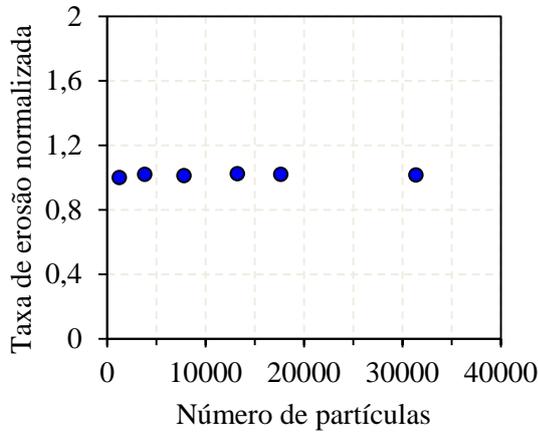


Tabela 2 – Condições de contorno.

Condições	Configuração
Entrada de ar	<i>Velocity-inlet</i> : 25, 30 e 35 m/s
Saída de sólido	<i>Pressure-outlet</i> : 0 Pa
Saída de ar	<i>Pressure-outlet</i> : 0 Pa
Injeção de partículas	Material: catalisador de FCC Injeção: arquivo externo Número de partículas: 3.847 Diâmetro: 64 μm Velocidade: 25, 30 e 35 m/s Taxa mássica total: 11,8 g/s
Parede	<i>Wall</i> : sem deslizamento Coeficiente de restituição normal e tangencial: 0,9 e 0,5

$$E = 1 \times 10^{-9} E_v \rho_w \quad (4)$$

$$E_v = f(\alpha) E_{90} \quad (5)$$

$$E_{90} = L (H_v)^{k_1} \left(\frac{v_p}{v'} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d'} \right)^{k_3} \quad (6)$$

Nas equações acima E_v é a erosão volumétrica (mm^3/kg), ρ_w a massa específica da parede ($2780,6 \text{ kg/m}^3$), E_{90} os danos de erosão a ângulo de impacto normal (mm^3/kg), L constante (40), H_v dureza de Vickers

(0,5884 GPa), k_1 , k_2 e k_3 expoentes e são -0,14, 1,2 e 0 respectivamente; v' a velocidade de referência ($=v_p$), d' o diâmetro de referência ($=d_p$) e d_p o diâmetro da partícula (64 μm).

A função do ângulo de impacto é:

$$f(\alpha) = (\text{sen} \alpha)^{n_1} (1 + H_v (1 - \text{sen} \alpha))^{n_2} \quad (7)$$

com n_1 e n_2 sendo 0,67 e 5,2.

2.2.3 Condições de Simulação

Na simulação numérica, um número representativo de partículas é calculado ao invés de simular o número exato de partículas correspondente à vazão mássica. A Figura 7 mostra um estudo de independência da solução numérica com o número de partículas. A partir desse estudo é possível verificar que não existe mudança significativa na erosão com o aumento do número de partículas, a partir de aproximadamente 4000 partículas. A injeção das partículas no domínio é realizada por um arquivo externo, como condição de entrada da fase particulada.

A interação normal e tangencial entre partículas e parede foi efetuada com coeficientes de restituição de 0,9 e 0,5, respectivamente. A massa específica e viscosidade do ar são $1,225 \text{ kg/m}^3$ e $1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$; a massa específica e o diâmetro da partícula são 1400 kg/m^3 e 64 μm .

As condições de contorno estão apresentadas na Tabela 2. O algoritmo SIMPLEC foi usado para o acoplamento pressão-velocidade. A interpolação da pressão foi calculada pelo método *Presto* e a interpolação do momento pelo método *second order upwind*. O escoamento foi transiente com 5 s de duração e passo de tempo igual a 0,001 s.

2.2.4 Quantificação da Incerteza Numérica (GCI)

A técnica GCI (*Grid Convergence Index*) foi utilizada para quantificação da incerteza numérica. Essa técnica é utilizada para estimar o erro de discretização em simulações de CFD foi empregada conforme recomendações de Celik et al. (2008).

Para o teste de malha, utilizaram-se três malhas distintas, com uma razão de crescimento dos elementos de 20 % em todas as direções. A malha esparsa foi confeccionada com aproximadamente 224 mil elementos, a malha intermediária com 448 mil e a malha refinada com 785 mil elementos. Os resultados analisados para pressão mostraram que o GCI da malha refinada é relativamente menor quando comparado com a malha esparsa, indicando que a dependência da simulação com o tamanho da célula foi reduzida. Tendo em vista que essa redução foi relativamente alta, a solução independente está quase alcançada, fazendo com que a malha refinada seja utilizada para as simulações numéricas deste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Grupos 1 e 2 foram comparados entre si e o Grupo 3 foi comparado com os resultados numéricos.

3.1 Comparação entre os Grupos 1 e 2

Os Grupos 1 e 2 possuem reforço estrutural ao redor da região de entrada e são sem e com estabilizador de vórtice, respectivamente. Os ciclones estão enumerados de 1 a 3, sendo 1 correspondente a menor velocidade (25 m/s) e 3 a maior velocidade (35 m/s). A taxa mássica de sólidos utilizada foi de 11,8 g/s. Os grupos também possuem siglas, G1 refere-se ao Grupo 1 e G2 ao Grupo 2. A Figura 8 apresenta uma imagem externa da parede oposta à entrada do ciclone. Nesta imagem pode ser observado um possível efeito do

Figura 8 – Ciclones erodidos.

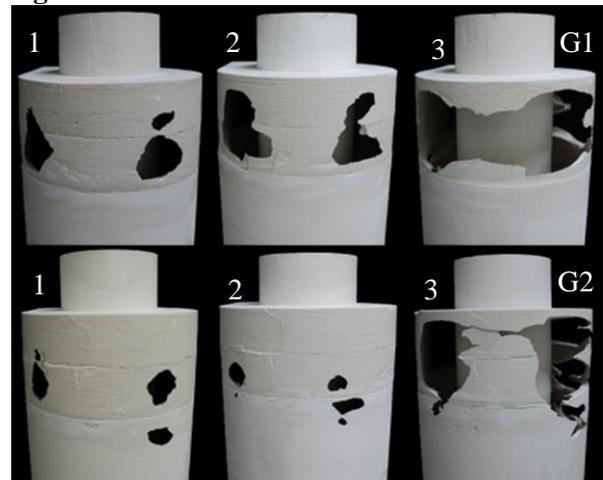


Figura 9 – Erosão na região de entrada.

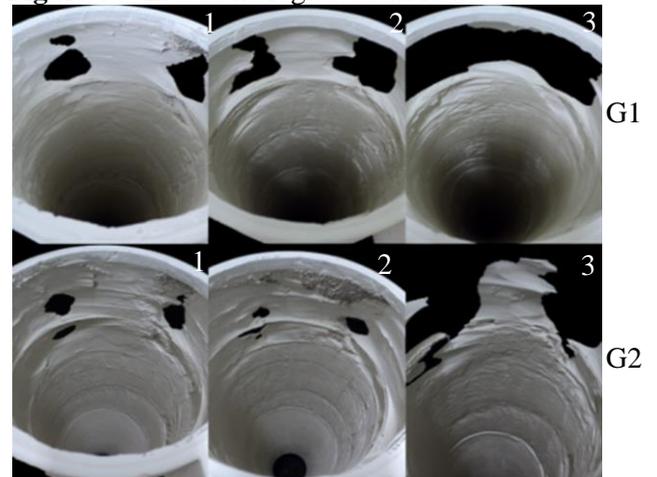
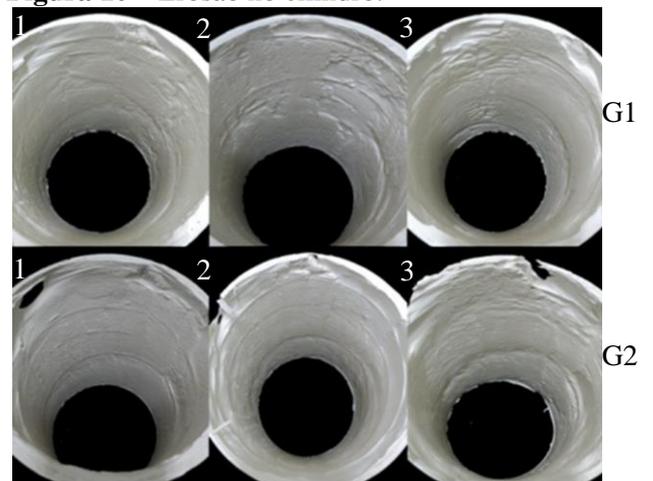


Figura 10 – Erosão no cilindro.



estabilizador de vórtice na redução da erosão

Figura 11 – Erosão no cone.

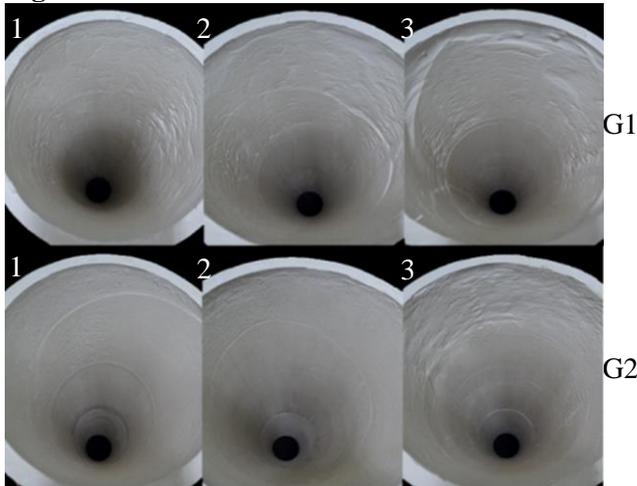
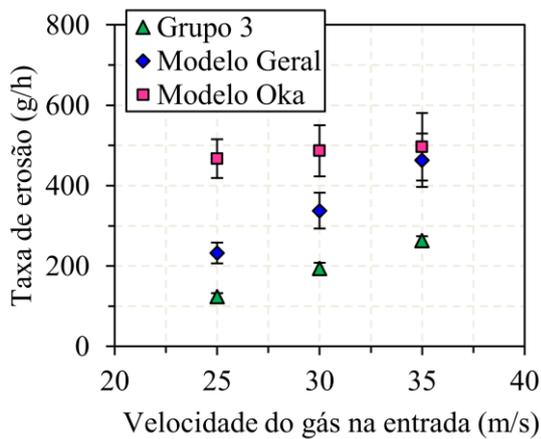


Figura 12 - Comparação da taxa de erosão global.



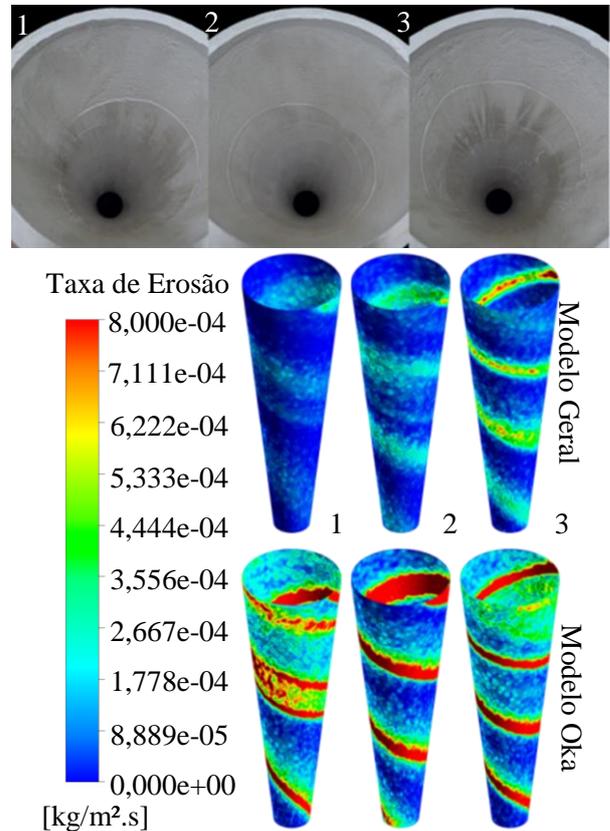
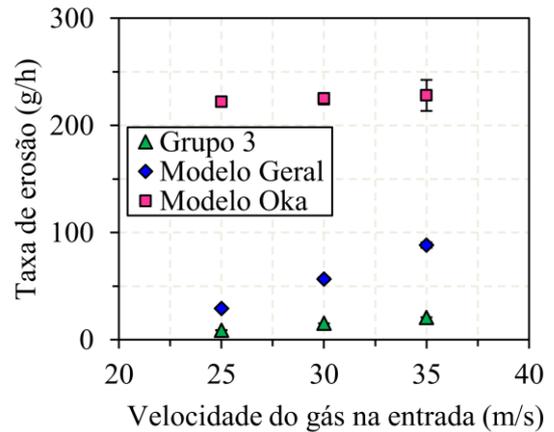
nesta região. A Figura 9 mostra a região de entrada vista pelo lado de dentro, e também é possível notar diferença na erosão quando o Grupo 1 é comparado ao Grupo 2.

Na parte cilíndrica, observa-se um efeito contrário, ou seja, visivelmente esta região aparenta estar mais erodida no Grupo 2 (com estabilizador de vórtice) do que no Grupo 1 (sem estabilizador de vórtice) (Figura 10).

Na Figura 11, nota-se novamente o efeito do estabilizador de vórtice na erosão dos cones.

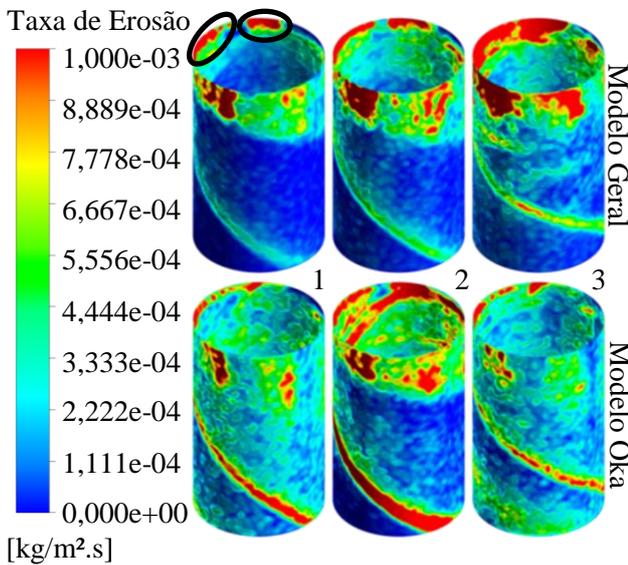
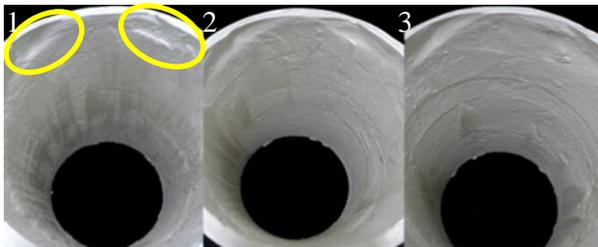
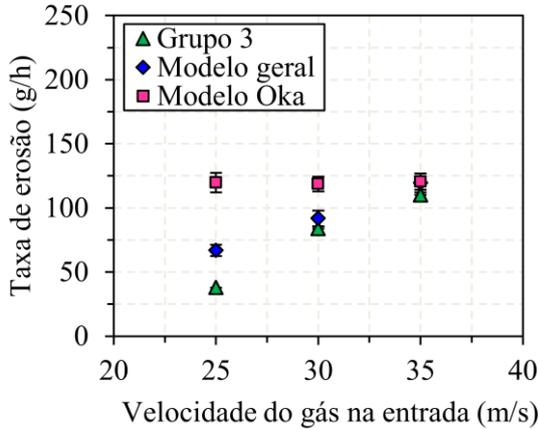
3.2 Comparação entre o Grupos 3 e as Simulações

Figura 13 - Comparação da taxa de erosão no cone.



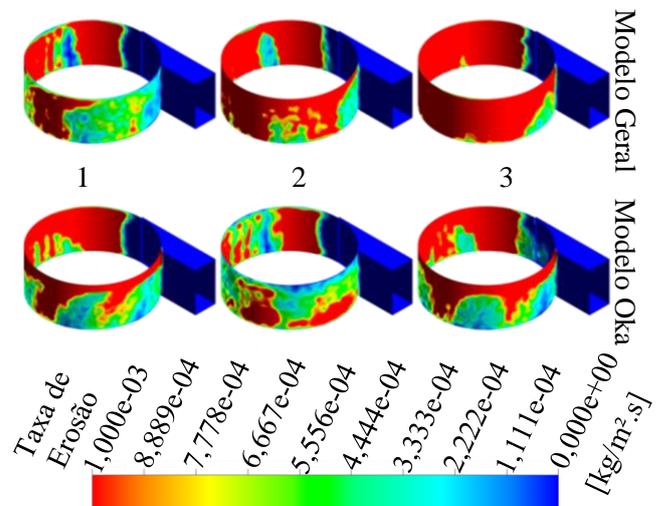
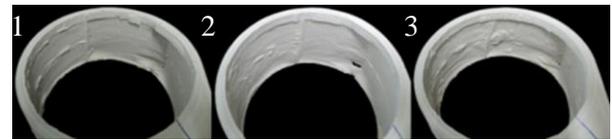
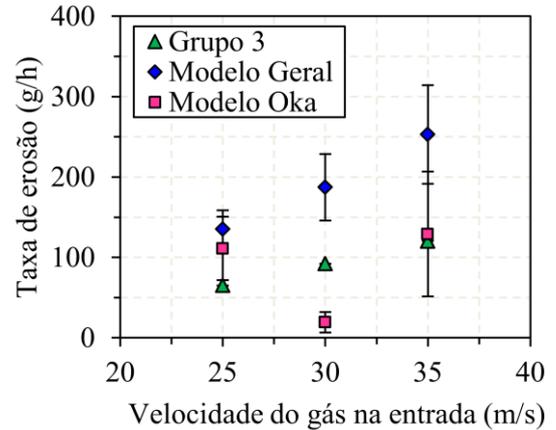
Apresentam-se nesta seção as taxas de erosão globais e por partes. O Grupo 3 foi utilizado para a comparação com os resultados numéricos. A Figura 12 apresenta a taxa de erosão global dos ciclones. Os resultados experimentais mostram que a taxa de erosão aumenta com o aumento da velocidade do gás na entrada do ciclone. Esse

Figura 14 – Comparação da taxa de erosão no cilindro.



comportamento também é detectado pela simulação numérica, porém ambos os resultados numéricos superestimam a taxa de erosão. Para este caso, o modelo geral correlacionou melhor a influência da velocidade que o modelo Oka, que mantém a taxa de erosão quase constante com o aumento da velocidade. Para a erosão no

Figura 15 – Comparação da taxa de erosão na entrada.



cone, nota-se que a taxa de erosão experimental é relativamente pequena. A Figura 13 exibe as taxas de erosão nos cones, que também aumenta com o aumento da velocidade, porém de maneira mais sutil. Visivelmente é difícil de afirmar o aumento da erosão. Do cone 1 para o 2, pela imagem, quase não se nota diferença, por exemplo. Observando as imagens dos cones simulados, nota-se a diferença de predição dos locais da erosão entre os modelos. O modelo Oka apresenta intensa erosão na região cônica,

enquanto que o modelo geral apresenta uma erosão menos severa. As taxas de erosão apresentadas no gráfico também mostram que o modelo Oka superestimou a erosão no cone.

A erosão no cilindro, Figura 14, apresenta os melhores resultados preditos pelos modelos de erosão utilizados. Para as velocidades de 30 e 35 m/s o modelo geral conseguiu prever quantitativamente a taxa de erosão e o modelo Oka, para a velocidade de 35 m/s. Outra observação importante se deve ao fato de que o modelo geral conseguiu prever locais de erosão que são observados nos experimentos físicos, como por exemplo, as áreas que estão destacadas na Figura 14. Nota-se que pelo modelo Oka a erosão é mais distribuída ao longo de todo o cilindro.

A Figura 15 mostra as taxas de erosão para a entrada do ciclone. Curiosamente neste caso o modelo geral superestimou a erosão acima do modelo Oka, com boa predição da taxa de erosão com o modelo Oka para a velocidade de 35 m/s. Nota-se, pela imagem, diferença nos locais de erosão preditos pelos modelos de erosão. Sabe-se que o modelo Oka leva em conta os danos de erosão a ângulos de impacto normal; dessa maneira, como a região de entrada possui os maiores ângulos de impacto, estima-se que essa seja a razão pela qual a taxa de erosão calculada seja inferior à taxa de erosão calculada pelo modelo geral.

4 CONCLUSÕES

O estudo de erosão para diferentes velocidades e diferentes modelos de erosão em ciclones foi realizado através do *software* FLUENT 14.0 da ANSYS e comparado com estudos físicos. Um dispositivo para estabilização do vórtice também foi testado.

Visualmente, o estabilizador de vórtice apresentou redução da erosão, principalmente na região cônica e na região de entrada.

O modelo geral apresentou melhores resultados qualitativos do que o modelo Oka e

em alguns casos, o modelo geral previu quantitativamente as taxas de erosão.

Em função dos resultados obtidos, supõe-se que o modelo Oka seja mais apropriado para geometrias que contenham ângulo de incidência de partículas perto de 90° como, por exemplo, em curvas.

NOMENCLATURA

α	ângulo de impacto [°]
A_{face}	área da face da célula [m ²]
A_i	constante
b	largura da entrada [mm]
d'	diâmetro de referência [m]
d_p	diâmetro da partícula [m]
D_C	diâmetro do cilindro [m]
D_I	diâmetro da saída inferior [m]
D_S	diâmetro da saída superior [m]
E	erosão adimensionalizada [-]
E_R	fluxo de erosão [kg/m ² .s]
E_v	erosão volumétrica [mm ³ /kg]
E_{90}	danos de erosão a ângulos de impacto normal [mm ³ /kg]
$f(\alpha)$	função do ângulo de impacto [-]
H_v	dureza de Vickers [GPa]
K	velocidade máxima da partícula em que o limite elástico é atingido [(m/s)-n]
k_1, k_2, k_3	constantes
L	constante
L_C	distância entre o final do duto e o início do cone [mm]
L_{CO}	altura da seção cônica [mm]
L_e	altura da seção de entrada [mm]
L_S	altura do duto de saída [mm]
\dot{m}_p	taxa mássica de sólidos [kg/s]
n	coeficiente da velocidade
n_p	número de partículas
n_1, n_2	constantes
ρ_w	massa específica da parede [kg/m ³]

v_p velocidade da partícula [m/s]
 v' velocidade de referência [m/s]

REFERÊNCIAS

ANSYS. FLUENT 14.0 - Theory guide. **Ansyc Inc**, 2011.

BITTER, J. G. A. A study of erosion phenomena: Part I. **Wear**, v. 6, n. 1, p. 5–21, maio 1963.

CELIK, I. B; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J.; COLEMAN, H.; RAAD, P. E. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **ASME Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, 2008.

CHEN, Y.; NIESKENS, M.; KARRI, R.; KNOWLTON, T. M. Developments in cyclone technology improve FCC unit reliability. **Petroleum Technology Quarterly**, p. 65–71, 2010.

DENG, Y.; LIU, Y.; CHEN, Y.; ZHANG, Y. Numerical simulation of the erosion in the 90° elbow. **AIP Conference Proceedings**, v. 1547, p. 671–683, 2013.

DET NORSKE VERITAS. **Erosive wear in piping systems**, 2007.

FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. **Wear**, v. 3, n. 2, p. 87–103, 1960.

KRAXNER, M.; PORTENKRICHNER, M.; PILLEI, M.; KOFLER, T.; MUSCHELKNAUTZ, U. Empirical Erosion Tests: Uniflow Cyclone as an Alternative to Reverse Flow Cyclones for a Longer Lifetime? **AICHe Annual Meeting**, 2013.

MAZUMDER, Q. H. Effect of liquid and gas velocities on magnitude and location of maximum erosion in u-bend. **Open Journal**

of Fluid Dynamics, v. 02, n. 02, p. 29–34, 2012.

OKA, Y. I.; OKAMURA, K.; YOSHIDA, T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. **Wear**, v. 259, n. 1-6, p. 95–101, 2005.

OKA, Y. I.; YOSHIDA, T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. **Wear**, v. 259, n. 1-6, p. 102–109, jul. 2005.

PEREIRA, G. C.; SOUZA, F. J. DE; MARTINS, D. A. DE M. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows. **Powder Technology**, v. 261, p. 105–117, jul. 2014.

SGROTT, O. L.; NORILER, D.; WIGGERS, V. R.; MEIER, H. F. Cyclone optimization by COMPLEX method and CFD simulation. **Powder Technology**, v. 277, p. 11–21, 2015.

UTIKAR, R.; DARMAWAN, N.; TADE, M.; LI, Q.; EVANS, G.; GLENNY, M.; PAREEK, V. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. In: OH, H. W. (Ed.). **Computation Fluid Dynamics**. Croatia: InTech, 2010. p. 241–266.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a PETROBAS (termo cooperativo 0050.0070334.11.9) pelo suporte financeiro que permitiu a realização deste trabalho.