

DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DE EROÇÃO CAUSADA POR MISTURA ÁGUA-SÓLIDO

Stefano Malavasi^{1*}; Gianandrea Vittorio Messa²; Arnaldo Righini³; José Gilberto Dalfré Filho⁴

Resumo No presente trabalho, o escoamento no interior de um tanque de mistura é numericamente investigado, de maneira a desenvolver um aparato experimental para o estudo de erosão de concreto. O tanque é equipado com um rotor de pás inclinadas que movem a mistura de água e sólidos, e causa a erosão do concreto pelo impacto das partículas sólidas. Hipóteses específicas foram assumidas sobre as características das partículas que permitem angariar informações sobre a interação com o fundo do tanque, empregando um modelo RANS, de fase única. Após verificar a consistência dos resultados, as soluções numéricas foram comparadas aos dados experimentais da Literatura aberta. Em seguida, verifica-se o efeito da variação da velocidade de rotação (400 a 900 rpm) e da distância do rotor ao fundo do tanque (0.33 a 0.59 vezes o diâmetro do rotor) no campo de velocidades próximo ao fundo. Uma discussão sobre o efeito dos parâmetros na erosão é feita.

Palavras-chave Tanque de mistura, CFD, Erosão de concreto

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL APPARATUS FOR THE STUDY OF EROSION DUE TO WATER-SAND MIXTURE

Abstract In the present work the flow inside a mixing tank is numerically investigated in order to develop an experimental bench for the study of the erosion of a brittle material. The tank is equipped by a pitched blade turbine impeller which moves a mixture of water and solid particles around and causes the solids to impact against the erodible concrete base. Specific assumptions about the characteristics of the particles allow gathering information about their interactions with the tank bottom by means of a single-phase RANS model. After verifying the consistency of the solution, the numerical predictions were compared with experimental data from open literature. Afterwards, it is studied the effect of varying the impeller speed (within the range 400-900 rpm) and the distance between the impeller and the tank bottom (within 0.33 and 0.59 times the impeller diameter) upon the velocity field close to the bottom. A discussion about the influence of these parameters upon the wear of the bottom is finally provided.

Keywords Mixing tank, CFD, Concrete erosion.

INTRODUÇÃO

Um importante problema é que, portanto, necessita constante investigação é a previsão de quantificação de erosão. A erosão é um dos principais problemas em sistemas hidráulicos em que há transporte de fluidos e de partículas sólidas. Para se equacionar a erosão, devem-se levar em consideração três componentes: a superfície sólida, as partículas sólidas que removem material da superfície e o fluido que carrega as partículas sólidas. Entretanto, inúmeras variáveis são associadas a cada componente e, conseqüentemente, não se consegue equacioná-la facilmente.

¹ Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32 20133 Milão (Itália), e-mail: stefano.malavasi@polimi.it

² Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32 20133 Milão (Itália), e-mail: gianandrea.messa@mail.polimi.it

³ Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32 20133 Milão (Itália), e-mail: arnaldo.righini@mail.polimi.it

⁴ Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, 19 35212332 Campinas (Brasil), e-mail: dalfre@fec.unicamp.br

Mas, foi determinado por Haugen et al. (1995), que a erosão depende principalmente da velocidade das partículas U_p , do ângulo α entre o alvo e a trajetória da partícula, bem como das propriedades das partículas e da superfície sólida. A erosão é tipicamente quantificada em termos de seus parâmetros globais, de maior significância para as aplicações em geral. Entre estes parâmetros a taxa de erosão E_L , que é definida como a redução da espessura da área exposta à erosão pela unidade de tempo.

Diferentes modelos, a sua maioria de natureza empírica, foram desenvolvidos para relacionar a erosão com os parâmetros de influencia citados. Como exemplo, foi desenvolvida a equação 1 por Tilly (1979), que é de largo emprego:

$$E_L = \frac{C(m_p K F(\alpha) U_p^n)}{\rho_w A} \quad (1)$$

Em que C é uma constante que depende da unidade de medida dos demais parâmetros; m_p é a vazão mássica das partículas que atingem a área A ; ρ_w é a massa específica do material da superfície sólida; K e n são constantes numéricas que dependem das propriedades dos sólidos carreados, do material alvo e do fluido e F é um parâmetro adimensional que varia de 0 a 1 como função do ângulo de impacto α . Duas funções comumente observadas e que relacionam estes parâmetros adimensionais são evidenciadas na Fig. 1, para materiais dúcteis e frágeis Haugen et al. (1995). A tendência das curvas verificadas na Fig. 1 pode ser explicada considerando-se que os dois seguintes mecanismos físicos contribuem para a erosão Arefi et al. (2005): (1) a deformação decorrente do ataque erosivo normal à superfície, associada a produção e a interação entre fraturas ditas anulares. Este mecanismo é caracterizado por maiores ângulos de impacto ($\alpha \sim 30-90^\circ$) sendo o principal mecanismo para o concreto; (2) o ataque erosivo paralelo à superfície decorrente das partículas angulosas que removem pedaços por uma ação similar a ferramentas de corte. Este mecanismo é associado a pequenos ângulos de impacto ($\alpha < 40^\circ$) e é característico de materiais dúcteis, como o aço. Complexos modelos de erosão foram desenvolvidos por Bitter (1963) e Hashish (1988) e que permitem estimar a taxa de erosão a partir da combinação dos dois mecanismos.

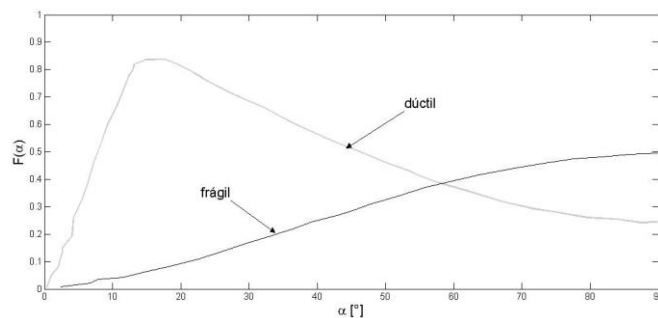


Fig. 1: Comportamento de F como função do ângulo de impacto para materiais dúcteis e materiais frágeis (Haugen, 1995).

Os modelos de erosão são frequentemente acoplados a modelos computacionais bifásicos, a partir da analogia com o caso do escoamento em tubulações Nesic e Postlethwaite (1993); Wood et al. (2001); Wood et al. (2004); Frawley et al. (2010) e em válvulas de controle Haugen et al. (1995); Nøkleberg e Sønrtvedt (1998); Wallace et al. (2004). Em particular, a principal preocupação é a erosão causada por partículas de areia impactando nos materiais dúcteis. A boa concordância entre as taxas de erosão previstas e as obtidas revela a adequabilidade desta aproximação combinada.

Contudo, poucas pesquisas se preocuparam com o caso de materiais, como o do concreto. Em um trabalho anterior, Dalfré Filho et al., (2000) consideraram o processo de erosão do concreto, colocado no fundo de um tanque cheio de água e de esferas de aço de tamanhos diferentes. Uma pá rotacionava as esferas sobre o concreto, causando sua erosão. O objetivo dos autores foi relacionar a composição de diferentes amostras de concreto com a taxa de erosão. Uma cooperação recente entre a Universidade de Campinas e o Politecnico di Milano objetiva, agora, determinar os processos dinâmicos, empregando um aparato similar ao de Dalfré Filho et al. (2000). A ideia é analisar o escoamento da mistura bifásica dentro do tanque experimentalmente e numericamente e, então, correlacionar a extensão e a distribuição da erosão aos parâmetros fluidodinâmicos mais significantes. Para garantir consistência com as aplicações da engenharia civil, o material sólido particulado consistirá de areia ao invés de esferas de aço.

O presente trabalho ilustra o primeiro estágio deste projeto. Simulações numéricas foram feitas preliminarmente ao projeto experimental com o objetivo de maximizar a erosão no fundo do tanque de forma a torná-lo claramente detectável em um tempo menor de teste. Como para o material cimentício, a erosão é devida principalmente ao ataque normal, o aparato é projetado para aumentar o ângulo de impacto das partículas. Por esta razão, um rotor de pás inclinadas a 45 graus é empregado, pois este dispositivo produz um fluxo axial direcionado ao fundo do tanque. Um esquema do aparato é evidenciado na Fig. 2.

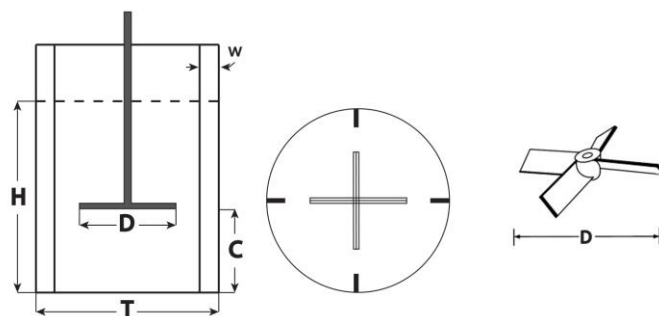


Fig. 2 Esquema do aparato: detalhes do tanque, defletores e rotor.

O tanque cilíndrico tem diâmetro $T=0.15$ m e é equipado com quatro defletores laterais distribuídos uniformemente de tamanho $w=T/10$. O diâmetro do rotor D é igual a $T/2$ e a distancia do rotor ao fundo do tanque C é variado no intervalo $0.33-0.59D$. A rotação do rotor N é expressa em termos do número de revoluções por unidade de tempo, variando de 400 a 900 rpm. O tanque é similar ao testado por Kresta e Wood (1993) em seu trabalho experimental, mas diferentes intervalos de C e N são aqui considerados.

O objetivo desta investigação é determinar o efeito da distancia e da velocidade sobre o potencial erosivo no fundo do tanque e, portanto, dos parâmetros fluidodinâmicos que mais afetam a erosão, a saber, velocidade de impacto e ângulo de impacto.

O campo de escoamento obtido do modelo Reynolds *Averaged Navier-Stokes* (RANS) de uma fase é usado para a simulação das partículas. Esta hipótese é valida para valores baixos do número de Stokes das partículas. Basicamente, o interesse dos autores é avaliar a erosão causada por partículas menores as quais atendem a hipótese assumida. Deve-se destacar que este trabalho numérico será calibrado pelo modelo experimental detalhado, empregando-se também o escoamento bifásico.

MODELO MATEMÁTICO E VALIDAÇÃO

A formulação em regime permanente e incompressível com as equações baseadas no RANS é resolvida, com o tensor de tensões de Reynolds avaliado pelo modelo de turbulência padrão $k-\epsilon$, como realizado em investigações numéricas prévias em tanques de mistura Fokema et al. (1994). O fluido empregado é água a 15°C.

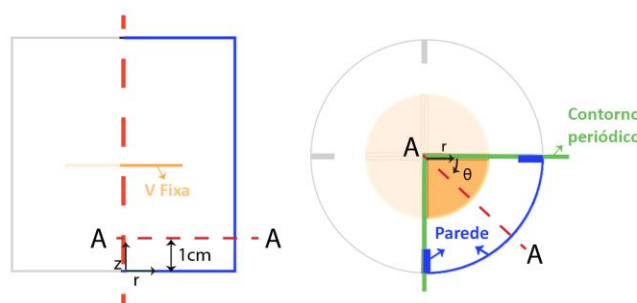


Fig. 3 Esquema do domínio computacional e condições de contorno: vista lateral e superior. Corte AA genérico evidenciado.

O domínio computacional é evidenciado na Fig. 4, em que é evidente que a geometria do sistema foi explorada de maneira a similar um quarto do tanque, reduzindo os esforços computacionais. Condições de contorno periódicas são aplicadas aos dois lados do domínio. Condição de não escorregamento é aplicada a todas as superfícies sólidas, a saber, fundo e superfície lateral, bem como as pás. A função de equilíbrio de parede de Launder e Spalding (1972) é empregada para modelar o efeito de turbulência na proximidade da parede. O rotor é modelado como um disco bidimensional sobre o qual a velocidade, a energia cinética de turbulência e a taxa de dissipação são impostas. As distribuições destas variáveis são obtidas por interpolação dos dados experimentais coletados por Kresta e Wood (1993), reportados por Fokema et al. (1994). As medidas sugerem que a velocidade, a energia cinética de turbulência, e a taxa de dissipação variam ao longo da direção radial apenas. A Fig. 5 evidencia as medidas das componentes de velocidade (normalizadas com respeito à velocidade da ponta $V_{tip} = \pi ND$) ao longo das direções angular, radial e axial, assim como as funções analíticas obtidas da interpolação. Um procedimento similar foi aplicado a energia cinética de turbulência e a taxa de dissipação. Os perfis obtidos foram, então, impostos para todo o trabalho. Para produzir um único campo de pressão, um valor arbitrário de pressão é especificado em uma das células no domínio.

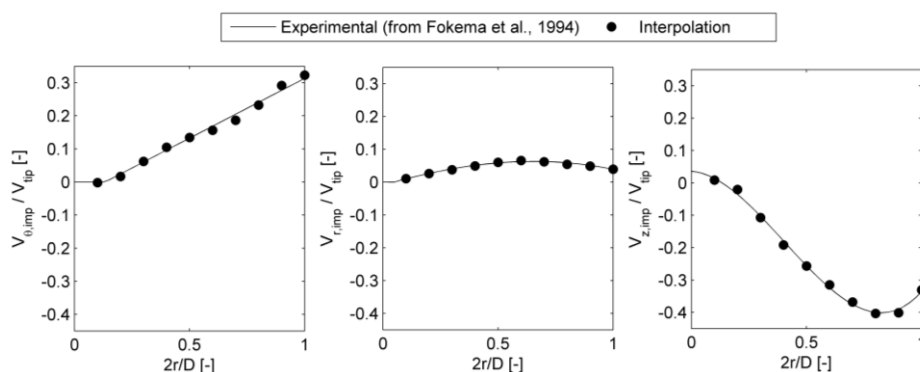


Fig. 4 Perfis de velocidade ao longo da direção radial no rotor: dados experimentais de Kresta e Wood (1993) por Fokema et al. (1994) – e interpolações.

O CFD comercial, código PHOENICS, de propósito geral, foi empregado para a solução numérica de volume finito análogo ao modelo RANS. Isto foi feito usando o algoritmo SIMPLEST de Spalding (1980). Os cálculos são desenvolvidos seguindo a formulação elíptico-escalonada nas quais as variáveis são avaliadas no interior das células e as componentes de velocidade na face das células. A diferenciação central é empregada para os termos de difusão, enquanto os termos de convecção são discretizados usando o esquema híbrido de Spalding (1972). O procedimento de cálculo é organizado em camada por camada, nas quais todas as variáveis dependentes são resolvidas na camada corrente, antes da rotina do *solver* mover-se para a próxima camada. O procedimento de solução numérica requer apropriada relaxação das variáveis de campo para atingir a convergência.

Uma malha estruturada de coordenadas polares cilíndricas é usada para discretizar o domínio. Um estudo de malha independente foi feita para determinar a discretização ótima do domínio com referência ao módulo de velocidade V e da sua orientação Φ ao longo do corte AA, da Fig 4, situado a 1 cm acima do fundo do tanque. Para o estudo de sensibilidade do grid, a seguinte configuração, investigado experimentalmente por Kresta e Wood (1993), foi considerada: velocidade do rotor $N = 400$ rpm e distância ao fundo $C = 0.59D$. Três malhas diferentes foram empregadas: células de 15 (angular) por 20 (radial) por 40 (axial) (Grid 1); 20 por 30 por 46 (Grid 2); 25 por 45 por 49 (Grid 3). As soluções obtidas nas duas malhas mais finas (Grid 2 and 3) são muito próximas, enquanto aquela da Grid 1 desvia-se suavemente das demais. Assim, é empregada a discretização correspondente ao Grid 2, que provou-se capaz de produzir uma solução numérica consistente.

O modelo foi validado com respeito aos dados experimentais de Kresta e Wood (1993) para a condição de escoamento já considerada para o estudo de grid independente. ($N = 400$ rpm; $C = 0.59D$). A comparação foi feita com respeito a velocidades axial V_z e a velocidade tangencial V_θ ao longo da distância radial situada a distância de 0.75 cm do fundo do tanque. A componente radial não foi considerada, pois é consideravelmente menor que as demais. A boa concordância entre as medidas experimentais e os resultados numéricos, como visto na Fig. 5, assegura a confiabilidade do modelo numérico.

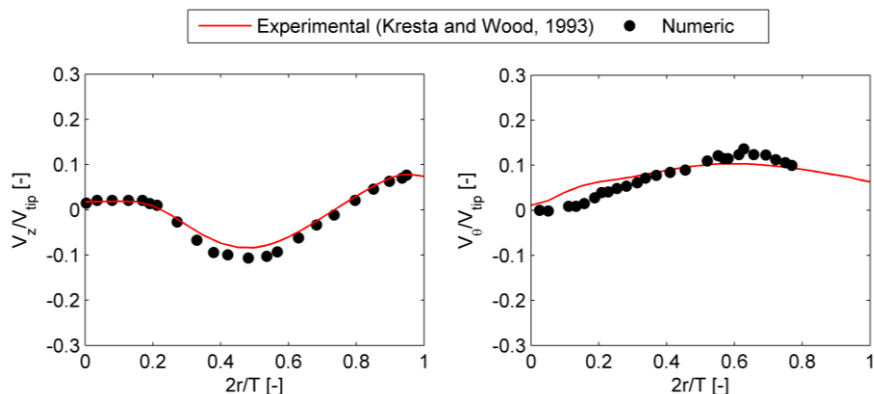


Fig. 5 Distribuição das velocidades axial (esquerda) e angular (direita) a uma distância de 0.75 cm do fundo do tanque: comparação entre os resultados numéricos e os experimentais de Kresta e Wood (1993).

RESULTADOS

No presente trabalho, a simulação de escoamento com o modelo RANS é usada para adquirir informação preliminar a respeito da interação entre as partículas e o fundo do tanque. Como explicitado, este procedimento levou em consideração as restrições do número de Stokes da partícula, que deve ser suficientemente baixo para que a velocidade das partículas não seja discrepante da velocidade do fluido. Por outro lado, há um limite mínimo para o número de Stokes das partículas, para que as mesmas consigam impactar contra a base. Para tanto, é assumida a hipótese que as partículas seguem o fluido até certa distância do fundo e daí, mantém a mesma velocidade. Isso significa que se assumiu que a velocidade do fluido nesta distância de referência é representativa da velocidade de impacto das partículas. Esta distância de referência está relacionada à espessura da camada limite da base do tanque; o valor de 1,0 cm foi julgado adequado para as condições de escoamento consideradas neste trabalho, com a ressalva de que mais investigações serão realizadas sobre este assunto específico. Assim, a distribuição de velocidade V e a orientação ϕ serão evidenciadas ao longo do corte AA (Fig. 3), a qual está situada 1 cm acima do fundo. O efeito do aumento da velocidade de rotação do rotor é primeiro, considerado. A Fig. 6 mostra os perfis de V (normalizados com relação a velocidade de ponta V_{tip}) e ϕ ao longo do corte AA para três diferentes valores de rotação N , considerando-se a distância $C=0.45D$.

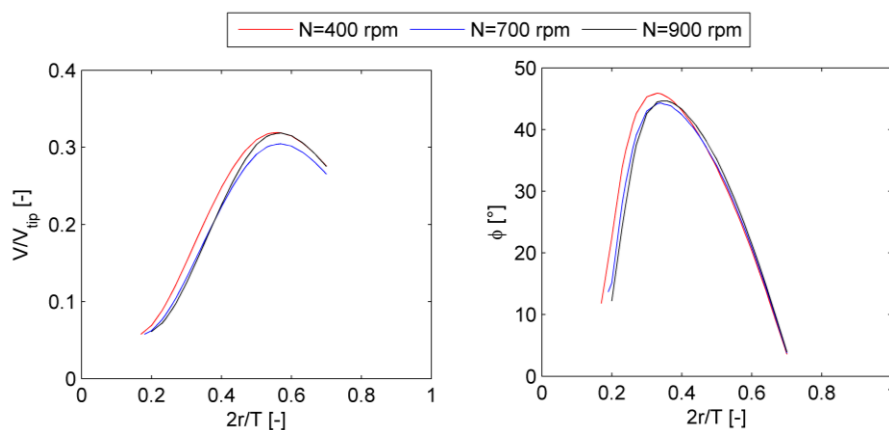


Fig. 6 Módulo de velocidade e orientação na região de impacto ao longo do corte AA para valores diferentes de rotação. A distância C é $0.45D$.

Somente a região de impacto da partícula ($V_z < 0$), foi evidenciada, enquanto a região de recuperação ($V_z > 0$) foi excluída. Os gráficos da Fig. 8 evidenciam a velocidade de rotação não afeta substancialmente V/V_{tip} então, V varia quase linearmente com N (pois $V_{tip} = \pi ND$). Isto sugere que um aumento na rotação do rotor determina um aumento na taxa de erosão, mas não afeta a extensão da área exposta a erosão.

Em seguida, o efeito da variação da distância do rotor ao fundo foi investigado. A Fig. 7 evidencia os perfis de V/V_{tip} e Φ ao longo do corte AA para tres diferentes valores de distância C , a saber, $0.33D$, $0.45D$ e $0.59D$. Em todos os casos, a velocidade do rotor é $N=700$ rpm e, como na Fig. 8, somente a região de impacto da partícula é evidenciada ($V_z < 0$).

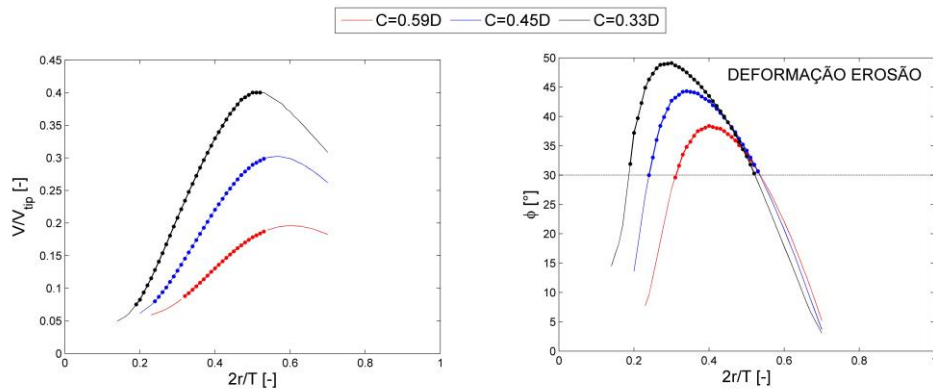


Fig. 7 Módulo de velocidade e orientação na região de impacto ao longo do corte AA, para diferentes valores de distância ao fundo. A velocidade do rotor é 700 rpm. As regiões de erosão potencial ($\Phi > 30^\circ$) foram destacadas com marcas circulares.

Os resultados indicam que o módulo de velocidade e sua orientação e a extensão da região de impacto aumenta com o decréscimo de C , isto é, à medida que o rotor é deslocado para o fundo. Isto significa que um decréscimo de C produz um aumento não apenas da taxa de erosão, mas também da área potencialmente exposta a ela. Como o fundo do tanque consiste de material cimentício, o mecanismo de erosão predominante é aquele que requer ângulos de impacto acima de 30° , bem como altos valores de velocidade de impacto. Na Fig. 7 os perfis de velocidade foram destacados com marcas circulares nas regiões de erosão, caracterizadas por $\Phi > 30^\circ$. A análise combinada dos gráficos sugere que, se ocorre, a erosão é provavelmente, mais efetiva nas regiões mais caracterizadas por um ângulo suficientemente grande, aliado as maiores magnitudes de velocidade de impacto.

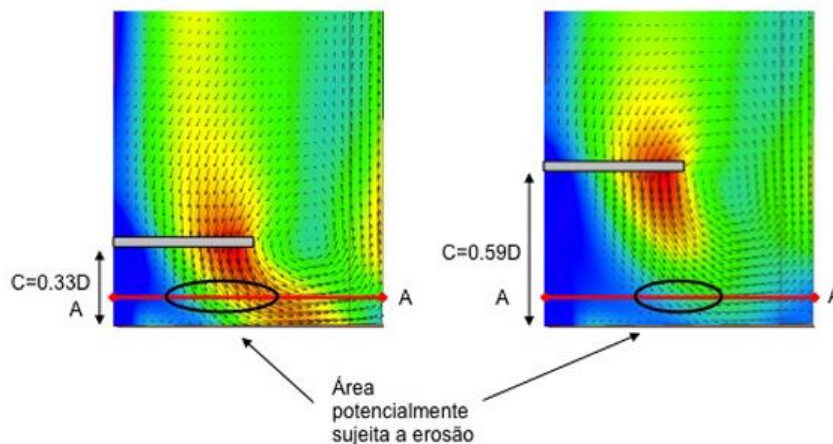


Fig. 8 Distribuição de velocidades e vetores sobre um plano vertical equidistante de dois defletores adjacentes para dois distintos valores de distância ao fundo do tanque. A velocidade de rotação é 700 rpm. O corte AA e a área potencialmente sujeita a erosão ($\Phi > 30^\circ$) são destacadas.

De maneira a esclarecer o efeito da variação da distância do rotor ao fundo do tanque no campo de escoamento, a Fig. 8 mostra a distribuição do módulo de velocidade sobreposto ao vetor velocidade, num plano vertical equidistante de dois defletores adjacentes para os casos $C=33D$ e $C=0.59D$ (em ambos casos, a velocidade de rotação é 700 rpm). Os gráficos confirmam as conclusões dos perfis que estão representados na Fig. 7. Para $C=0.33D$, espera-se erosão mais

destacada, pois se caracterizam ângulos de impacto suficientemente grandes e maiores velocidades quando comparados a $C=0.59D$. O resultado numérico sugere que a erosão provavelmente ocorrerá abaixo das extremidades do rotor, onde V e Φ são concomitantemente grandes.

CONCLUSÃO

No presente trabalho, o escoamento de água no interior de um tanque de mistura foi investigado numericamente, de maneira a angariar resultados preliminares para o desenvolvimento de um aparato experimental para o estudo da erosão produzida pela mistura de água e sólidos sobre o concreto. A análise baseou-se em duas hipóteses: (a) as partículas sólidas acompanham o fluido, com exceção da proximidade das paredes; (b) as partículas tem inércia suficiente para manter a mesma velocidade na proximidade da região da parede. Desta forma, considerou-se boa aproximação emprestar o valor da velocidade do fluido, obtida na fronteira com a proximidade da parede, para simular a velocidade de impacto das partículas contra a superfície. Para tanto, se usou o modelo RANS, uma fase.

Após verificar a consistência do modelo numérico e validá-lo empregando os dados experimentais da Literatura aberta, foi investigado o efeito da variação da velocidade de rotação e da variação da distância do rotor ao fundo do tanque sobre a velocidade de impacto estimada e do ângulo de impacto das partículas, que são os parâmetros que mais afetam a taxa de erosão. Como a superfície da parede consiste de material cimentício (frágil), o foco principal é o desgaste que ocorrerá para grandes valores de ângulos de impacto e velocidades (Fig.1). A velocidade do rotor influencia o módulo da velocidade de impacto, mas não o ângulo de impacto (Fig. 6), assim, não é afetada a extensão da região potencialmente exposta a erosão. Por outro lado, a redução da distância ao fundo aumenta tanto a extensão da área de erosão, bem como o módulo da velocidade (Figs. 7 e 8), logo aumentando a área potencialmente exposta a erosão.

Desenvolvimentos prévios a este trabalho trataram da simulação do escoamento fluido-partícula, no interior do tanque, por modelos bifásicos. Assim, reproduzindo mais adequadamente as interações entre as partículas e o fundo do tanque. Uma vez construído o aparato experimental, este será usado para correlacionar a erosão do fundo aos parâmetros fluidodinâmicos mais significativos da mistura bifásica. O aparato poderá, também, receber modificações, de acordo com a finalidade desejada de estudo. Por exemplo, retirando-se os quatro obstáculos laterais para a investigação da erosão de materiais dúcteis, cujo mecanismo preponderante de erosão é distinto ao de materiais frágeis.

REFERÊNCIAS

- AREFI, B.; SETTARI, A.; ANGMAN, P. (2005). Analysis and simulation of erosion in drilling tools. *Wear* 259, pp. 263-270.
- BITTER, J.G.A. (1963). A study of erosion phenomena: part I. *Wear* 6, pp. 5–21.
- DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B.; PAULON, W.A. (2000). Desgaste nas superfícies hidráulicas e a resistência a abrasão do concreto. *Ingeniería Estructural* 8(20), pp. 18-22.
- FOKEMA, M.D.; KRESTA, S.M.; WOOD, P.E. (1994). Importance of Using the Correct Impeller Boundary Conditions for CFD Simulations of Stirred Tanks. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 72, pp. 177-183.

FRAWLEY, P.; O'MAHONY, A.P.; GERON, M. (2010). Comparison of Lagrangian and Eulerian Simulations of Slurry Flows in a Sudden Expansion. *ASME Journal of Fluids Engineering* 132, pp. 191-301.

HASHISH, M. (1998). An improved model of erosion by solid particle impact. In *Anais do 7th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Set 1987, 66, pp. 1-9.

HAUGEN, K.; KVERNVOLD, O.; RONOLD, A.; SANDBERG, R. (1995). Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves. *Wear* 186-187, pp. 179-188.

KRESTA, S.M.; WOOD, P.E. (1993). The Mean Flow Field Produced by a 45° Pitched Blade Turbine: Changes in the Circulation Pattern Due to Off Bottom Clearance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 71, pp. 42-53.

LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. (1972). *Mathematical models of turbulence*, Academic Press, London-New York.

NESIC, S.; POSTLETHWAITE, J. (1991). Hydrodynamics of disturbed flow and erosion-corrosion: Part II, two-phase flow study. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69, pp. 704-710.

NØKLEBERG, L.; SØNTVEDT, T. (1998). Erosion of oil&gas industry choke valves using computational fluid dynamics and experiment. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 19, pp. 636-643.

SPALDING, D.B. (1980). *Heat-transfer and Chemical-reaction Processes*, CFDU Report HTS/80/1, Imperial College, London – UK, 1980.

SPALDING, D.B. (1972). A novel finite-difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives. *International Journal of Numerical Methods in Engineering* 4, pp. 551-559.

TILLY, P. (1979). *Erosion by impact of solid particles. Treatise on material Science and technology*, Academic Press, New York.

WALLACE, M.S.; DEMPSTER, W.M.; SCANLON, T. ; PETERS, J.; MCCULLOCH, S. (2004). Prediction of impact erosion in valve geometries. *Wear* 256, pp. 927-936.

WOOD, R.J.K.; JONES, T.F.; GANESHALINGAM, J.; MILES, N.J. (2004). Comparison of predicted and experimental erosion estimates in slurry ducts. *Wear* 256, pp. 937-947.

R. J. K. WOOD, T. F. JONES, N. J. MILES, AND J. GANESHALINGAM (2001). Upstream swirl-induction for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends. *Wear* 250, pp. 770-778.

slurries in pipeline bends. *Wear* 250, pp. 770-778.