

# SIMULAÇÃO DA POTÊNCIA REQUERIDA PARA UM TANQUE DE CONDICIONAMENTO DE REAGENTES POR MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL<sup>1</sup>

Rodrigo Cesar de Miranda<sup>2</sup>  
Leandro Soares de Oliveira<sup>3</sup>

## Resumo

O principal objetivo desse trabalho é determinar, pela mecânica dos fluidos computacional (CFD), a potência transferida do impelidor ao fluido em um tanque com agitação mecânica. A metodologia adotada consiste em comparar a curva de potência obtida em laboratório com a curva simulada por CFD. Para tal, simulou-se um tanque piloto ASME 10% com quatro chicanas e um impelidor de quatro pás inclinadas a 45°, no qual foram utilizados água e polpa de minério de ferro. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os valores obtidos experimentalmente, sendo que o valor médio da diferença relativa da potência simulada para a determinada experimentalmente foi de 6,6%, quando se utilizou água, e de 3,6% para a polpa de minério. Também, foi possível avaliar os perfis de velocidade da suspensão de minério de ferro no tanque. Os perfis de velocidade permitiram detectar regiões de possível acúmulo de material sólido. Assim, por essa metodologia, foi possível determinar a potência necessária a dado sistema de agitação com polpa de minério, além de identificar possíveis regiões de sedimentação do material sólido.

**Palavras-chave:** Mecânica dos fluidos computacional; Tanques com agitação mecânica; Polpa de minério de ferro.

## SIMULATION OF POWER REQUIRED TO A REAGENT CONDITIONING TANK BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

### Abstract

The main objective of this paper was to determine by computational fluid dynamics (CFD) the power transferred by the impeller to the fluid in a mechanically stirred tank. The methodology adopted consisted of comparing a power curve obtained in laboratory with a curve simulated by CFD. In this work, an ASME 10% pilot tank with four baffles and four-blade 45° pitched blade turbine was simulated, in which a suspension of iron ore in water (pulp) was used. The numerical results agreed well with the values obtained experimentally, whereas the average value for the relative difference between the simulated power and that determined experimentally was 6.6%, when just water was used, and 3.6% for the iron ore pulp. Also, the velocity profiles of the iron ore pulp in tank were analyzed and regions of possible accumulation of solid material were detected. Therefore, with the proposed methodology, it is feasible to determine the power necessary to promote a good mixture of ore pulp in stirred tanks, and also to identify regions where solid material sedimentation might occur.

**Key words:** Computational fluid dynamics; Mechanical stirred tank; Iron ore pulp.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

<sup>2</sup> Engenheiro Químico MSc, Engenheiro de Processos da CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

<sup>3</sup> Engenheiro Químico PhD, Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.

# 1 INTRODUÇÃO

Os reagentes de flotação são utilizados para o controle das características das interfaces envolvidas no processo. Alguns reagentes designados como coletores são escolhidos de forma que o ataque ao mineral a ser flotado seja preferencial, outros são utilizados para facilitar a ação do coletor e há também os que visam a suprimir sua ação no mineral não desejado, melhorando a seletividade. Assim, fica clara a relevância dos reagentes no desempenho da flotação, não obstante sejam estes os que introduzem o maior custo operacional ao processo.<sup>(1,2)</sup>

Através do condicionamento de reagentes, busca-se promover o contato eficaz entre o reagente e a polpa, garantindo uma melhor eficiência do processo de flotação. Um condicionamento adequado também evita o uso excessivo de reagentes, reduzindo os custos operacionais. O tanque com agitação mecânica é um dos equipamentos mais utilizados no condicionamento dos reagentes devido à sua simplicidade operacional, ao baixo custo de instalação e a facilidade de controle.

A partir da segunda metade do século vinte, a evolução dos tanques com agitação mecânica e as teorias sobre agitação e mistura cresceram surpreendentemente. Inicialmente as análises eram exclusivamente experimentais, fazendo uso das leis de conservação da mecânica dos fluidos, sendo o principal interesse obter estimativas da potência requerida pelos agitadores.<sup>(3)</sup> Ao longo dos anos, foram realizados outros estudos relacionados à dinâmica do fluido nos tanques com agitação mecânica e diferentes configurações geométricas. Novas técnicas experimentais permitem uma melhor compreensão da ação dos impelidores em diferentes regimes, além do advento da mecânica dos fluidos computacional (CFD, do inglês, *computational fluid dynamics*), que contribui bastante para formação desse conhecimento.<sup>(4)</sup>

Tradicionalmente, o projeto de tanques com agitação mecânica é fundamentado em correlações de parâmetros gerais, como perda de carga e capacidade de bombeamento. Correlações de tempo de mistura estão disponíveis na literatura pertinente, entretanto sua aplicação fora da faixa de parâmetros estudados vem se mostrando freqüentemente dificultosa. Pesquisadores, projetistas e engenheiros de processos usam cada vez mais CFD para analisar o escoamento e o desempenho desse tipo de equipamento, possibilitando resultados de maior credibilidade e consistência.<sup>(5)</sup>

A CFD pode ser definida como a resolução numérica das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia para sistemas físicos, através de rotinas computacionais. Para sua simulação, é necessário inicialmente definir o objeto de estudo para então descrevê-lo no programa a ser utilizado. Primeiramente, é necessário descrever a geometria do processo por meio de uma representação prática, considerando-se apenas os principais detalhes para capturar seu comportamento real. A geometria é então discretizada em uma determinada quantidade de células computacionais, sendo este o conjunto de localizações discretas e referidas como malha. Uma vez criada a malha, as definições físico-químicas do processo devem ser aplicadas. Somente após essas etapas é que o programa poderá resolver as equações de conservação apropriadas para toda a malha utilizando um procedimento iterativo. Após a convergência numérica, é possível analisar criticamente os resultados obtidos.

Os impelidores mais utilizados na indústria mineral são os impelidores de pás inclinadas (PBT, do inglês, *pitched blade turbine*) à 45° de inclinação. Este tipo de

impelidor gera um escoamento axial, que causa uma região de recirculação entre o eixo do impelidor e a parede do tanque. Além disso, o bombeamento do fluido é para baixo, em forma de leque. Pode ocorrer uma pequena região de recirculação logo abaixo ao cubo do impelidor, sendo causada pela intensidade de agitação do impelidor e da altura do mesmo no tanque.<sup>(3,6)</sup>

O principal custo operacional de um sistema de agitação é o energético. A potência dissipada em um processo de agitação pode ser estimada de várias maneiras dependendo do processo, regime do escoamento e tipo de fluido. No entanto, para um escoamento turbulento monofásico, o cálculo da potência tem sido principalmente aproximado por meio de análise dimensional e medidas experimentais de torque.<sup>(7)</sup> As Curvas de Potência de um tanque com agitação mecânica podem ser aproximadas por equações empíricas na forma:

$$Po = \frac{a}{Re} + b \left( \frac{10^3 + 0,6 \cdot f \cdot Re^\alpha}{10^3 + 1,6 \cdot f \cdot Re^\alpha} \right)^d \quad \text{Eq 1}$$

O primeiro termo à direita da igualdade descreve o comportamento da curva para região laminar, tendo o parâmetro a um valor próximo ao valor do Número de Potência, quando o número de Reynolds (Re) for igual a um. O parâmetro b é diretamente proporcional a fatores geométricos e descreve o valor de Re na faixa de escoamento turbulento. O parâmetro d determina o formato da curva na região de transição.<sup>(8)</sup> Na Tabela 1, apresentam-se as constantes utilizadas para um PBT com 4 pás a 45° de inclinação.

**Tabela 1** – Constantes da Equação 1 para PBT com 4 pás a 45° de inclinação

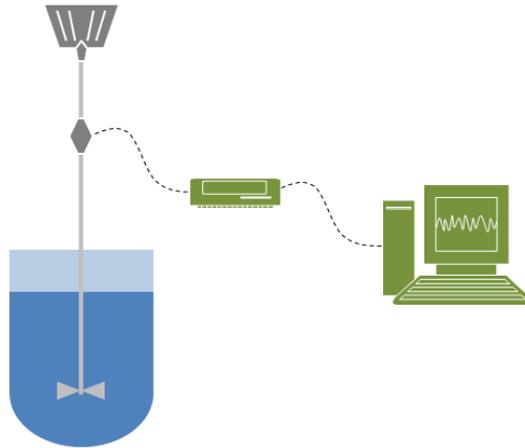
<b>SPOGIS [8]</b>	a	51,20126
	b	1,35
	f	3,5475
	d	0,1340
	α	0,66

Neste trabalho, estudaram-se a potência transferida pelo impelidor ao fluido e os perfis de velocidade em um tanque com agitação mecânica, utilizando o CFD.<sup>(9)</sup> Os perfis de velocidade permitem avaliar aspectos geométricos e parâmetros operacionais que possibilitam uma melhor eficiência de projetos desses tanques. A potência define o custo fixo do projeto e o custo operacional do processo.

## 2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

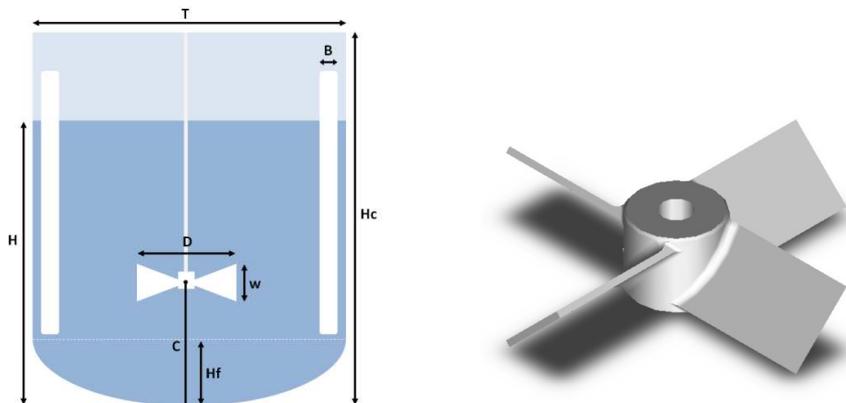
Para validar o desempenho dos modelos de CFD utilizados no processo de simulação, são necessários dados experimentais detalhados. O procedimento adotado nesse trabalho consistiu em comparar a curva de potência obtida em laboratório com a curva simulada.

Para obtenção da curva de potência, utilizou-se o sistema de tanque com agitação mecânica do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional, nas instalações da FEQ – Unicamp. Este sistema, como mostrado esquematicamente na Figura 1, é basicamente composto por um tanque piloto de eixo de agitação centrado, movido por um motor e acoplado a um inversor de frequência. Através de um torquímetro Magtrol TM 307, coletam-se as medidas de torque, velocidade e potência, sendo estas medidas tratadas por programas dedicados.



**Figura 1** – Esquema da montagem experimental.

O tanque piloto do experimento tem a capacidade de 75 L, com seu diâmetro interno  $T$  de 380 mm e o fundo toro esférico tipo ASME 10% de 74 mm de profundidade  $H_f$ . A altura de costado  $H_c$  do tanque é de 693 mm, sendo preenchido com fluido até a altura  $H$  de 380 mm, proporcionando um volume final de 40 L. Foram usadas quatro chicanas, sendo suas larguras  $B$  de 30 mm, distantes 5 mm da parede do tanque. Tanto as chicanas, quanto as pás dos impelidor, têm a espessura de 2,5 mm. A presença das chicanas é importante para evitar a formação de redemoinhos na superfície do líquido. Como impelidor, foi utilizado um do tipo pás inclinadas composto por 4 pás a  $45^\circ$  de inclinação, com 127 mm de diâmetro  $D$  e 23 mm de altura  $W$ . Na Figura 2, apresentam-se as dimensões características do tanque de agitação e o impelidor utilizado nos experimentos.



**Figura 2** – Dimensões características do tanque de agitação e tipo impelidor utilizado.

Dois tipos de fluidos foram estudados: (1) água e (2) polpa de minério de ferro com baixa porcentagem de sólidos. O experimento com água foi utilizado para verificação da metodologia de simulação de tanques agitados.

A polpa de minério foi utilizada para examinar como o sólido influencia a curva de potência e também verificar o desempenho da simulação de tanque agitado com suspensão de sólidos. Essa polpa foi preparada para o volume de 40 L a 17,5% de sólidos em massa (5,8% v/v), na qual o sólido possui densidade de  $3.525 \text{ kg/m}^3$  e o diâmetro médio de suas partículas é de  $62 \mu\text{m}$  ( $D_{50}$ ).

A estimativa da densidade e da viscosidade da polpa como fluido monofásico foi feita por meio de correlações de transporte hidráulico homogêneo de sistemas particulados.<sup>(10)</sup> A densidade é dada pela ponderação das densidades do sólido e líquido com a respectiva fração volumétrica. A viscosidade efetiva da suspensão depende da natureza da mistura, através da relação entre taxa de deformação e tensão cisalhante e condições de escoamento. Assim, a polpa de minério utilizada apresentava uma densidade de  $1.145 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade estimada de  $1,24 \text{ cP}$ .

### 3 SIMULAÇÃO DO PROCESSO

Nesta análise, utiliza-se o pacote ANSYS 11.0, o qual fornece um ambiente de trabalho integrado para o desenvolvimento e o gerenciamento de projetos de CFD, desde a construção da geometria até a simulação.

Modelou-se o tanque piloto e seus internos, como descrito na seção anterior. Como o tanque apresenta simetria em torno de seu eixo, simplificou-se a geometria a ser simulada, possibilitando um esforço computacional menor. Assim, optou-se por utilizar  $\frac{1}{4}$  do tanque. Na malha, empregaram-se elementos tetraédricos com razão de aspecto de 20%. O objetivo foi gerar uma malha homogênea. Nas paredes, foram utilizados prismas, além de um refinamento dos elementos na região próxima à pá do impelidor. Na Figura 3, são mostradas a geometria e malha utilizadas.



**Figura 3** – Geometria e malha utilizada na simulação.

Os dois tipos de fluidos foram simulados para a mesma geometria e mesmas condições de contorno, sendo um a água e o outro a polpa de minério de ferro. Neste estudo, considerou-se a polpa como fluido Newtoniano, já que esta apresentou uma baixa relação volumétrica de sólido, sendo de  $5,8\% \text{ v/v}$ .<sup>(11)</sup> O objetivo dessa consideração é aproximar o comportamento fluidodinâmico de um modelo monofásico a um modelo multifásico.

As rotações utilizadas na simulação foram as mesmas utilizadas nos experimentos: 520 rpm, 624 rpm, 728 rpm, 832 rpm, 936 rpm e 1.040 rpm. Nessas rotações,  $Re$  é maior que 10.000, o que garante que o escoamento seja turbulento.

A simulação será conduzida pelo método de sistemas de referências múltiplas (MRF, do inglês, *multiple reference frame*),<sup>(12)</sup> com o modelo padrão de  $k-\epsilon$  para a

turbulência<sup>(6,13)</sup> e a função de interpolação High Resolution, tendo como critério de parada o resíduo máximo em 0,001. Como condições de simulação:

- não deslizamento nas paredes do sistema;
- superfície livre do líquido sem ação da tensão superficial e deformação;
- líquido monofásico, uniforme e contínuo;
- fluido Newtoniano;
- propriedades físicas constantes; e
- regime permanente.

O programa calcula o torque exercido na superfície formada pelo eixo e pelo impelidor em relação ao centro de rotação através das forças de pressão produzidas pelo momento do escoamento, além de contabilizar as forças viscosas provenientes do cisalhamento.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados experimentais e as simulações do tanque piloto, utilizando os dois fluidos estudados, água e polpa de minério. Todas as simulações convergiram para o resíduo máximo de  $10^{-3}$ .

O Número de Potência é um adimensional utilizado para determinar a potência necessária para a operação de um determinado impelidor, sendo expresso pela razão entre a força de arrasto imposta pelo fluido ao impelidor e a força de inércia. Considerando que a potência  $P$  consumida é o produto do torque aplicado pela velocidade de rotação  $N$ , então:

$$Po = P/\rho N^3 D^5 \quad \text{Eq 2}$$

O estudo do tanque com o fluido água serve para melhor compreender o comportamento do escoamento e de balize para a análise do fluido polpa de minério. Na Tabela 2, apresentam-se os resultados de potência obtidos pelo experimento e pela simulação e a comparação entre esses resultados, utilizando a água como fluido. As diferenças relativas entre esses valores são apresentadas, sendo que a média destas é de 6,6%.

**Tabela 2** – Avaliação dos resultados obtidos com a água como fluido

Rotação [rpm]	P [mW]			Po		
	exp	sim	dif	exp	sim	dif
520	27308	28994	6,13%	1,27	1,35	5,17%
624	46635	49695	6,17%	1,26	1,34	6,56%
728	74365	78880	6,56%	1,26	1,34	6,07%
832	110626	117640	6,07%	1,26	1,34	6,34%
936	155929	167028	6,34%	1,25	1,34	7,12%
1040	213264	229375	7,12%	1,24	1,34	7,55%

O escoamento encontra-se em regime turbulento ( $Re > 10.000$ ), apresentando como característica o fato de que o Número de Potência se mantém constante com o aumento do Número de Reynolds. O valor médio encontrado para o Número de Potência foi de 1,34, sendo o valor médio obtido pelo experimento de 1,26 e o valor dado pela literatura de 1,27.

Os resultados calculados para as potências mostraram-se coerentes com os experimentais, sendo a diferença média de 6,6% considerada aceitável. Significa dizer que a energia mecânica fornecida pelo impelidor está sendo transferida ao fluido. Como o Número de Potência é diretamente proporcional à potência, tem-se seu valor com o mesmo desvio do valor obtido experimentalmente.

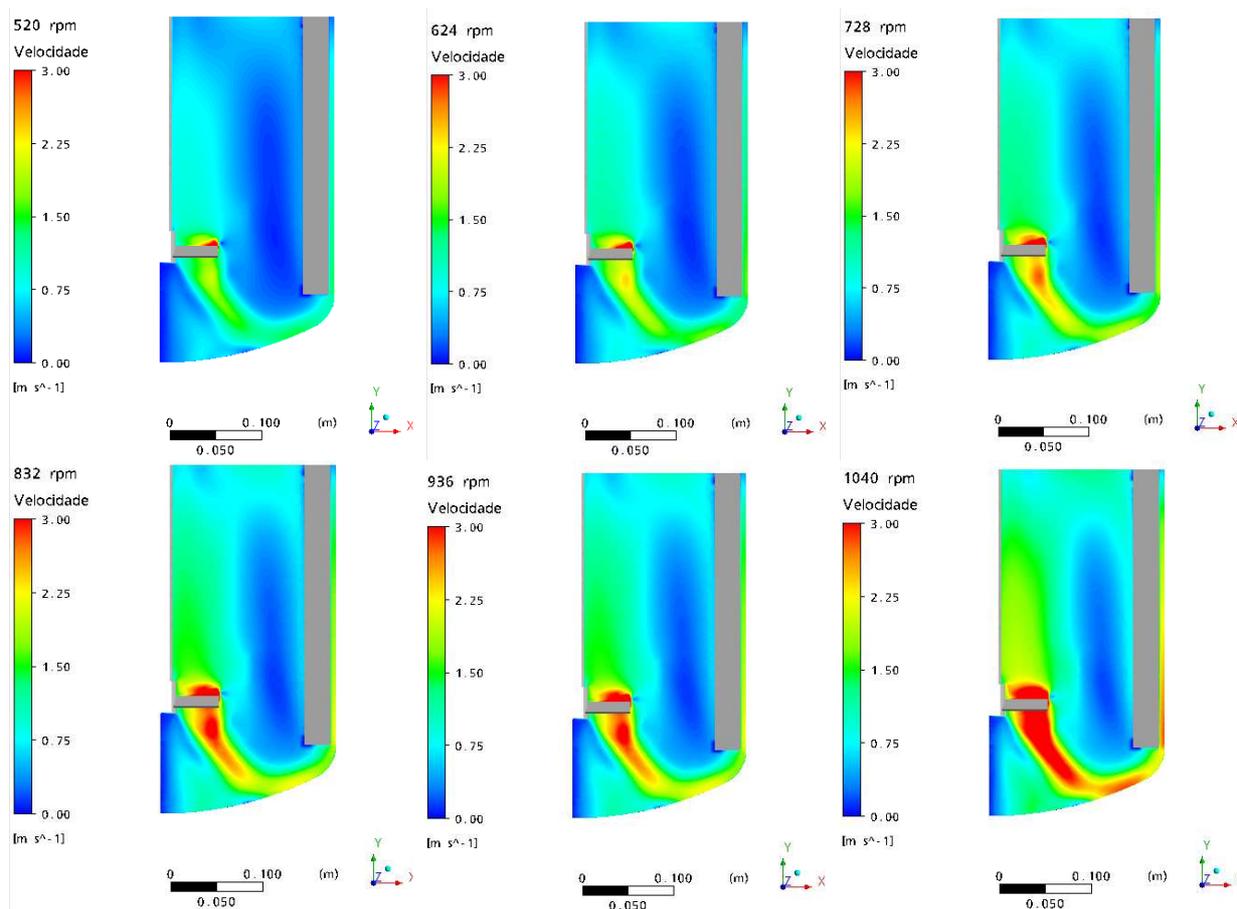
Na Tabela 3, apresentam-se os resultados obtidos da simulação utilizando a polpa de minério de ferro. O escoamento também se encontra em regime turbulento ( $Re > 10.000$ ), com o Número de Potência se mantendo constante com o aumento do Número de Reynolds. O valor médio encontrado para o Número de Potência é de 1,35, sendo o valor médio obtido pelo experimento de 1,35. As diferenças relativas entre esses valores são apresentadas, sendo que a média destas é de 3,6%.

**Tabela 3** – Avaliação dos resultados obtidos com a polpa como fluido

Rotação [rpm]	P [mW]			Po			
	med	exp	sim	dif	exp	sim	dif
520		35502	33128	6,69%	1,44	1,35	6,69%
624		59685	57542	3,59%	1,40	1,35	3,59%
728		90995	91266	0,30%	1,35	1,35	0,30%
832		132678	136090	2,57%	1,32	1,35	2,57%
936		187935	193637	3,03%	1,31	1,35	3,03%
1040		252532	265502	5,14%	1,28	1,35	5,14%

Pela Figura 4, podem-se comparar as distribuições de velocidades para as diferentes rotações do impelidor simulado com polpa de minério. Comparam-se as distribuições de velocidades para as diferentes rotações, sendo que a velocidade do escoamento aumenta com a aceleração da rotação do impelidor.

O impelidor promove o movimento fluido, convertendo energia mecânica em energia cinética. Assim, quanto mais alta a rotação do impelidor, mais energia é transferida ao fluido e, conseqüentemente, maior a intensidade do escoamento interno ao tanque, porém sem alterar significativamente o perfil de velocidades. A Figura 4 também demonstra as características típicas de escoamento para o impelidor PBT com 4 pás a 45° de inclinação, em que o perfil de velocidades no plano xy é do tipo axial. O perfil de velocidades no plano xz também está coerente com o esperado, apresentando regiões de recirculação logo após a pá e a chicana.



**Figura 4** – Distribuições de velocidade para água em diferentes rotações.

Considerando a mesma rotação, não existe diferença significativa entre os perfis de velocidades para os diferentes fluidos. Como a polpa de minério de ferro tem densidade e viscosidade maiores que as da água, esta oferece maior resistência ao movimento do impelidor. Para compensar essa resistência, o sistema de agitação fornece mais energia, ou seja, aumenta a potência, sendo a potência necessária para água de 229 W e para a polpa de 266 W (aumento de 16%).

Pelos critérios adotados na simulação, não é possível obter o perfil de velocidades alterado pela presença de partículas sólidas no sistema de agitação. Então, para uma baixa concentração desses sólidos, considerou-se que as características predominantes do escoamento se mantêm inalteradas. Para análise, será usada a simulação da polpa a 1.040 rpm, como mostrado na Figura 5. Na região assinalada em vermelho, no plano xy da Figura 5, tem-se uma zona de baixa circulação. Este tipo de zona é ruim para um processo envolvendo uma suspensão de sólidos, pois favorece a sedimentação das partículas, uma vez que a velocidade ascendente do fluido é possivelmente menor que a velocidade terminal das partículas em suspensão. Para reduzir, ou até mesmo eliminar esta zona de baixa circulação, poder-se-ia diminuir a distância entre o impelidor e o fundo do tanque, tomando-se o cuidado para que o impelidor não fique muito próximo do fundo. No plano xz da Figura 5, está destacada em vermelho uma região de recirculação provocada pela presença da chicana. Esse comportamento era esperado e demonstra a coerência da simulação. As partículas sólidas, que ocasionalmente sedimentarem perto das regiões da parede do tanque ou das chicanas, logo são

resuspendidas pelas características do escoamento e pelas características geométricas do fundo do tanque.

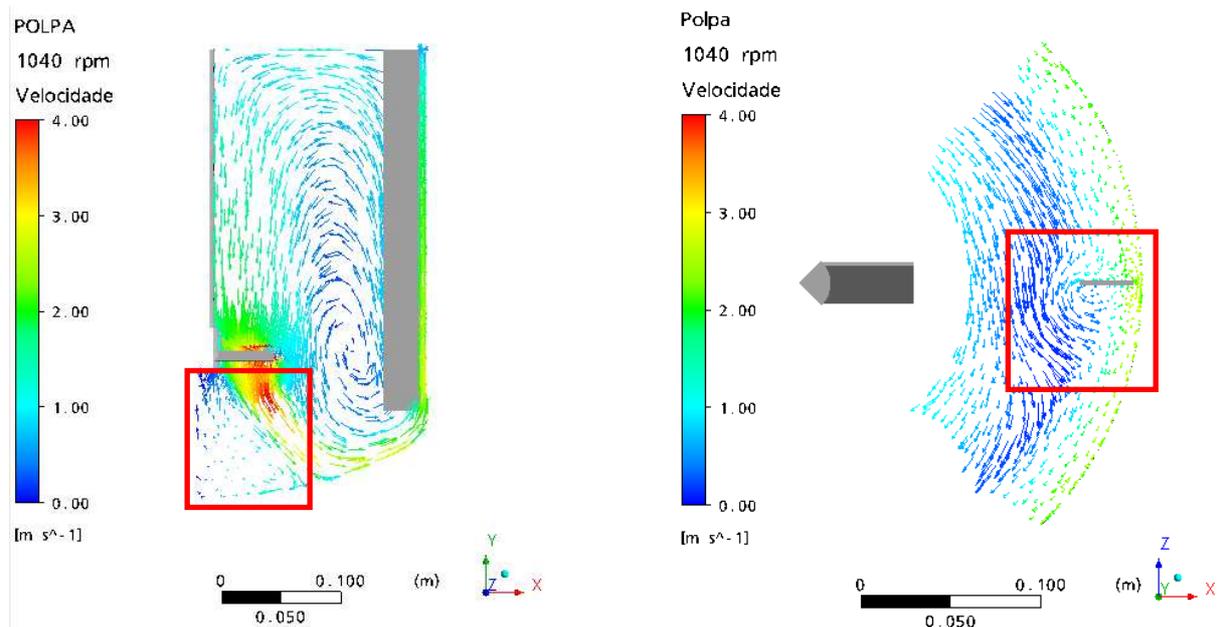


Figura 8 – Vetores de velocidade no plano xy e xz para polpa a 1040 rpm.

## 5 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos pela mecânica dos fluidos computacional foi possível estudar a potência transferida pelo impelidor ao fluido e os perfis de velocidade de um tanque piloto tipo ASME 10% com 4 chicanas e impelidor de 4 pás inclinadas a  $45^\circ$  e, na qual, foram utilizados dois fluidos, água e polpa de minério de ferro (5,8% v/v).

A consideração de fluido monofásico newtoniano para polpa de minério com baixa porcentagem de sólidos em volume (5,8% de minério de ferro) mostrou-se eficiente para a determinação da potência. Os resultados numéricos condizem com os valores obtidos experimentalmente, sendo que o valor médio da diferença relativa da potência simulada para a determinada experimentalmente é de 6,6% quando se utiliza água e de 3,6% para a polpa de minério. Os perfis de velocidade permitiram detectar regiões de possível acúmulo de material sólido.

Assim, por essa metodologia, é possível determinar a potência necessária a dado sistema de agitação com polpa de minério, além de identificar possíveis regiões de sedimentação do material sólido. Isso possibilita testar diferentes geometrias do tanque, identificando as características de cada uma delas, podendo comparar, ao final, suas vantagens e desvantagens.

Utilizando testes experimentais, para cada geometria, deve ser produzido um protótipo diferente para obter os dados necessários para comparação. Este é um processo longo, demorado e oneroso para ser realizado.

A utilização da técnica de mecânica dos fluidos computacional na indústria de beneficiamento mineral, principalmente para sistemas de agitação, mostra-se uma área de muito interesse e carente de estudos, devido a grande variedade de situações existentes.

## REFERÊNCIAS

- 1 CHAVES, A. P. (editor) **Flotação: o Estado da Arte no Brasil**. 1ª ed. São Paulo: Signus, 2006. 444 p.
- 2 LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. (editores). **Tratamento de Minérios**. 4ª ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867 p.
- 3 JOAQUIM JÚNIOR, C. F.; CEKINSKI, E.; NUNHEZ, J. R.; URENHA, L. C. **Agitação e Mistura na Indústria**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 222 p.
- 4 MARSHALL, E. M.; BAKKER, A. **Computational Fluid Mixing**. 1ª ed. Lebanon: Fluent Inc., 2003. 152 p.
- 5 BAKKER, A.; HAIDARI, A. H.; OSHINOWO, L. M. Realize Greater Benefits from CFD. **Chemical Engineering Progress**, v.97, n.3, p.45-53, March 2001.
- 6 BAKKER, A.; MYERS, K. J.; WARD, R. W.; LEE, C. K. The Laminar and Turbulent Flow Pattern of a Pitch Blade Turbine. **Chemical Engineering Research and Design**, v.74, part A, p.485-491, May 1996.
- 7 SPOGIS, N. **Metodologia para Determinação de Curvas de Potência e Fluxos Característicos para Impelidores Axiais, Radiais e Tangenciais Utilizando a Fluidodinâmica Computacional**. 2002. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.
- 8 NAGATA, S. **Mixing Principles and Applications**. Tokyo: Kodansha, 1975.
- 9 MIRANDA, R. C. **Simulação de Tanque de Condicionamento de Reagentes por Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais.
- 10 MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2ª ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2002. 152 p.
- 11 POSSA, M. V. **A Importância da Reologia da Polpa no Beneficiamento de Partículas Finas por Processos de Cicloneamento e de Moagem**. Anais do XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2002, Recife.
- 12 LUO, J. Y.; ISSA, R. I.; GOSMAN, A. D. Prediction of Impeller Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference. **ICHEME Symposium Series**, n.136, p.549-556, 1994.
- 13 SILVEIRA NETO, A. **Turbulência nos Fluidos Aplicada**. Uberlândia, 2006.(Apostila).