

# 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo

## AUTORES:

Lucilla C. Almeida<sup>1</sup>, João A. Aguirre Oliveira Jr.<sup>2</sup> e Ricardo A. Medronho<sup>1</sup>

## INSTITUIÇÃO:

<sup>1</sup>Escola de Química/Universidade Federal do Rio de Janeiro

<sup>2</sup>Engineering Simulation and Scientific Software Ltda.

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.*

## **Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo**

### **Resumo**

O uso de hidrociclones para separação líquido/líquido, embora objeto de pesquisas há muitas décadas, somente recentemente tem sido aplicado industrialmente. Uma das aplicações de hidrociclones líquido/líquido é na indústria do petróleo. A remoção de pequenas gotículas de óleo dispersas na água salgada, que é produzida juntamente com os hidrocarbonetos provenientes de um poço petrolífero, é tradicionalmente uma empreitada difícil. Isto se deve ao pequeno diâmetro dessas gotículas e, muitas vezes, à reduzida diferença de densidade entre o óleo e a água. Ambos os fatores implicam numa velocidade terminal, sob ação do campo gravitacional, muito reduzida; o que inviabiliza a utilização de separadores gravitacionais convencionais, uma vez que o tempo de residência necessário para promover a separação seria impraticável. A vantagem da utilização de hidrociclones está nas pequenas dimensões do equipamento, ocupando uma menor área de convés e sem o peso de um grande tanque de separação. Além disso, esse tipo de equipamento apresenta, em geral, uma maior eficiência e um baixo custo de instalação e de manutenção. O objetivo do presente trabalho foi obter uma metodologia eficiente para modelagem de escoamentos multifásicos em hidrociclones que forneça uma concordância adequada entre dados simulados e experimentais (perfis de velocidade e eficiência de separação). Realizou-se um estudo de validação da modelagem detalhada (tridimensional e transiente) de hidrociclones. Esta validação foi feita a partir da comparação de resultados obtidos via CFD com dados experimentais disponíveis na literatura. Alguns modelos de turbulência adequados à simulação numérica de escoamentos rotacionais foram testados e diferentes abordagens para modelagem do arrasto entre as fases foram comparadas. Simulações numéricas foram feitas utilizando como base o clássico hidrociclone de Thew para a separação óleo/água. A fase óleo foi tratada como uma fase discreta (lagrangeana) e simulada com um acoplamento tipo “uma-via”. A curva de eficiência de separação foi obtida e comparada com os dados experimentais publicados. Em linhas gerais os resultados se mostraram bastante satisfatórios, com um custo computacional razoável para a solução do escoamento da fase contínua e um custo bastante reduzido para o cálculo da fase dispersa.

### **Introdução**

Em qualquer situação industrial onde haja uma corrente líquida com pressão relativamente elevada, carregando gotículas ou partículas dispersas, o uso de hidrociclones tem se mostrado vantajoso. Isso é devido à sua simplicidade de fabricação, baixo custo de investimento e operação, menor tempo de residência e processo de separação mais eficiente quando comparado com decantadores gravitacionais. Estas características tornam seu uso muito atrativo na indústria de petróleo, onde o aumento da produção requer um aumento da eficiência dos equipamentos e a disponibilidade de espaço é bastante reduzida.

Hidrociclones são separadores estáticos baseados na separação centrífuga. A operação consiste em se fazer a alimentação da mistura tangencialmente à câmara cilíndrica. Cria-se então um escoamento rotativo no interior do ciclone, com fluido descendo por sua parede externa (vórtice externo) e subindo ao longo do seu eixo de simetria (vórtice interno). A força centrífuga atua nas partículas de maior tamanho/densidade, transportando-as de encontro à parede do ciclone, em um movimento em espiral descendente adentrando a seção cônica, saindo pelo orifício inferior (underflow). As partículas de menor tamanho e densidade são carregadas para o centro, num escoamento em espiral ascendente, abandonando o equipamento pelo orifício superior (overflow). O escoamento no interior dos hidrociclones apresenta ao pesquisador características bastante complexas e desafiadoras, entre as quais podemos citar: linhas de corrente com curvatura acentuada, turbulência anisotrópica e ainda presença de duas ou mais fases.

A aplicação dos modelos correntes utilizados no projeto e dimensionamento de hidrociclones é geralmente restrita à faixa de condições operacionais e geometrias para os quais foram derivados, restringindo sua aplicação a novos dispositivos. A avaliação de desempenho é conduzida de maneira empírica, protótipos são construídos e testados. Esses testes são extremamente importantes, mas também muito custosos. Em contraste, códigos de CFD podem produzir grandes volumes de resultados com praticamente nenhuma despesa extra. Além disso é muito barata a realização de estudos paramétricos de desempenho para, por exemplo, otimização da geometria de um equipamento. Este trabalho mostra um estudo de validação da modelagem detalhada (tridimensional e transiente) de hidrociclones. Esta validação é feita a partir da comparação de resultados obtidos via CFD com dados experimentais disponíveis na literatura.

### Modelagem físico-matemática

Quando a fração volumétrica da fase dispersa é baixa o suficiente para desprezar sua influência no movimento da fase contínua, a fase discreta pode ser resolvida após a solução da fase contínua de uma forma serial. Esta abordagem é conhecida como acoplamento “uma-via”, que torna a simulação numérica de escoamentos multifásicos muito mais barata computacionalmente. A descrição física e a modelagem matemática das fases contínua e discreta é dada nas seções seguintes.

#### MODELAGEM DA FASE CONTÍNUA

A fase contínua é resolvida como um escoamento não-estacionário, monofásico, incompressível e isotérmico de um fluido newtoniano. As equações a serem resolvida para o fluido são:

Equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

Equação de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

Onde  $\mathbf{u}$  é a velocidade do fluido,  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a densidade da fase fluida contínua,  $\mathbf{g}$  é o vetor da aceleração da gravidade,  $p$  é a pressão estática e  $\mu$  é a viscosidade cinemática da fase contínua.

Essas equações são resolvidas no ANSYS Fluent usando o método dos volumes finitos. Discussões completas sobre este método pode ser encontrada no livro de Patankar (1980). Não será apresentada aqui nenhuma discussão adicional.

As características previamente citadas do escoamento em hidrociclones tornam a simulação desses escoamentos um desafio. É necessário o uso de um modelo de turbulência seja capaz de lidar com forte curvatura das linhas de corrente, forte intensidade de giro e anisotropia. A maioria dos modelos de turbulência baseados na hipótese de viscosidade turbulenta (por exemplo, modelo  $k-\varepsilon$  e suas variações) não são adequados para capturar todas as características significativas do escoamento. Um modelo baseado nos tensores de Reynolds (RSM) é necessário para capturar a anisotropia e conseguir uma simulação realista do escoamento em um hidrociclone. O modelo SSG foi utilizado nesse trabalho.

#### MODELAGEM DA FASE DISCRETA

Em uma abordagem lagrangeana, o movimento das gotas é resolvido acompanhando-se muitos *parcelas* (partículas representando um pequeno grupo de partículas/gotas/bolhas com as mesmas características)

pelo domínio (Fluent, Inc., 2006). A Eq.(3) é usada para calcular a velocidade das gotas em cada posição:

$$m_p \frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{2} \rho C_D A |u_i - v_i| (u_i - v_i) + F_i \quad (3)$$

Onde  $m_p$  é a massa da gota,  $v_i$  é a velocidade da fase fluida discreta (Lagrangeana),  $F_i$  é a soma das forças na direção  $i$  (além da força de arraste),  $C_D$  é o coeficiente de arraste e  $A$  é a área projetada das gotas na direção principal do escoamento. Para uma gota esférica, Eq. (3) pode ser escrita como na Eq.(4).

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} |u_i - v_i| (u_i - v_i) + \frac{F_i}{m_p} \quad (4)$$

Onde  $\rho_p$  é a densidade da fase fluida discreta,  $d_p$  é o diâmetro de gota e  $Re$  é o número de Reynolds relativo entre as fases contínua e dispersa, dado por:

$$Re = \frac{\rho d_p |v_i - u_i|}{\mu} \quad (5)$$

A solução do movimento da fase fluida discreta é obtida calculando-se a velocidade local de um *parcel* na posição atual usando a Eq. (4) e, usando a velocidade calculada e um passo de tempo de referência, definir sua nova posição. Essas etapas são repetidas até que o *parcel* deixe o domínio ou atinja o número limite de cálculos. Para o coeficiente de arraste, existe um grande número de correlações disponíveis, por exemplo, nos livros de Crowe (1998) e Crowe, Sommerfeld e Tsuji (2006). Analisando o caso atual, devido ao tamanho bastante reduzido do tamanho de gotas, é improvável que essas gotas sofram qualquer tipo de deformação. Com isso, um modelo de arraste padrão simples para uma partícula esférica pode ser aplicado. O modelo escolhido é o de Morsi e Alexander (1972), disponível na interface do ANSYS Fluent. Esse modelo define um coeficiente de arraste usando a Eq.(6).

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (6)$$

Com as constantes  $a_1, a_2, a_3$  definidas de acordo com o trabalho citado.

Para confirmar a escolha deste modelo, foi implementado o modelo de arraste de Ishii-Zuber. De acordo com (Fluent, Inc., 2006) esta correlação é aplicável a partículas fluidas em geral (bolhas e gotas), para qualquer par de fases. Com este modelo diferentes regimes de arrasto podem ser representados dependendo da distorção da bolha ou da gota. A dependência do coeficiente de arraste na forma da partícula é contabilizada através do grupo adimensional conhecido como número de Eotvos, que relaciona as forças gravitacionais e tensão superficial, de acordo com a Eq.(7).

$$Eo = \frac{g \Delta \rho d_p^2}{\sigma} \quad (7)$$

Onde  $\Delta \rho$  é a diferença de massa específica entre as fases,  $g$  é o módulo da aceleração gravitacional e  $\sigma$  é o coeficiente de tensão superficial. A correlação define os coeficientes de arrasto para as formas distorcidas através da Eq.(8).

$$\begin{aligned} C_D(ellipse) &= \frac{2}{3} Eo^{1/2} \\ C_D(cap) &= \frac{8}{3} \end{aligned} \quad (8)$$

Dessa forma, a correlação define em qual regime a partícula se encontra: no regime viscoso, no qual se comportavam como partículas sólidas ou; no regime inercial, ou de partículas distorcidas, no qual as formas elipsoidal e de capacete esférico aparecem. Baseada nessa definição o coeficiente de arrasto é calculado de acordo com o regime. A escolha se baseia nas seguintes comparações.

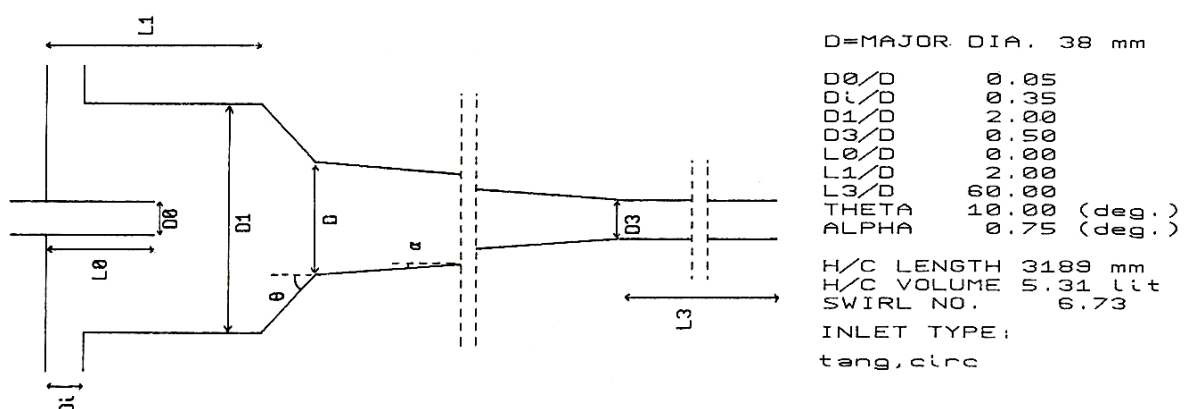
$$\begin{aligned} C_D &= C_D(\text{esférico}) \quad \text{se } C_D(\text{esférico}) \geq C_D(\text{elipse}) \\ C_D &= \min(C_D(\text{elipse}), C_D(\text{cap})) \quad \text{se } C_D(\text{esférico}) < C_D(\text{elipse}) \end{aligned} \quad (9)$$

O termo de forças adicionais,  $F_i$ , pode incluir diversos fenômenos físicos diferentes, como forças de sustentação, massa virtual e termoforética. Crowe (1998) dá uma descrição física dessas forças e algumas alternativas para a modelagem matemática. Dada a configuração do problema, as únicas forças adicionais consideradas foram a força de dispersão turbulenta e a força de massa virtual. Informações adicionais da definição de força de dispersão turbulenta podem ser encontradas em Dehbi (2008). Maiores detalhes sobre a força de massa virtual podem ser encontrados em Drew e Lahey (1993).

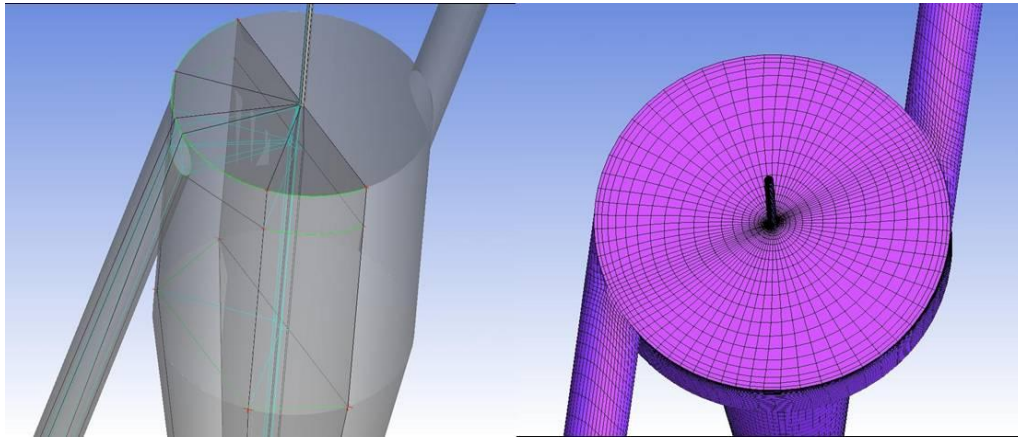
## Descrição do caso

A geometria simulada foi um típico modelo de hidrociclone para separação de dispersões menos densas, desenvolvida por K. Nezhati e M. T. Thew, 1987. As dimensões do equipamento simulado estão descritas na Fig. (1), conforme o descrito no artigo citado.

Essa geometria é inserida em um pacote de CAE e sobre ela é gerada uma malha de elementos hexaédricos, usada na solução do escoamento pelo método dos volumes finitos. Optou-se por uma malha hexaédrica por esta apresentar, no caso, as faces dos elementos alinhadas com as direções do escoamento, o que diminui os erros numéricos. O uso de malhas hexaédricas também diminui o número total de elementos para um mesmo tamanho característico de malha, em comparação à malha tetraédrica. A malha gerada, mostrada na Fig.(2), apresentou aproximadamente 300000 elementos.



**Figura 1. Dimensões gerais do hidrociclone estudado.**



**Figura 2. Bloqueio e malha utilizada nas simulações.**

As densidades e viscosidades de ambas as fases foram consideradas constantes, o que corresponde a uma abordagem isotérmica. As densidades eram  $840 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  para o óleo e  $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  para a água. As viscosidades foram definidas como  $0,01 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$  para o óleo e  $0,001 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$  para a água.

Para inicialização do campo de velocidades foi utilizada a velocidade tangencial dada pela solução das equações de Navier-Stokes para vórtices de Burgers, dada pela Eq. (10). As constantes  $\alpha$  e  $\phi$  são ajustadas de modo a se obter um perfil de velocidades coerente para um hidrociclone. A aplicação dessa condição inicial reduz o tempo de simulação.

$$u_{\theta} = \frac{\phi}{2\pi r} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\alpha r^2}{4\nu}\right) \right] \quad (10)$$

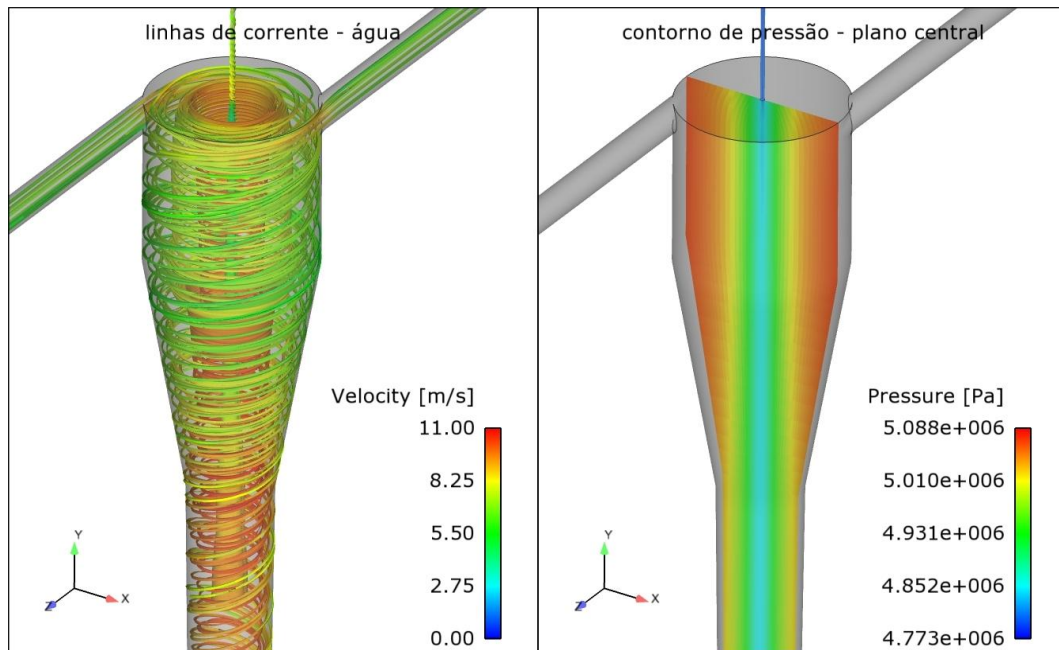
Onde  $u_{\theta}$  é a componente tangencial da velocidade da fase contínua,  $r$  é a coordenada radial,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido e  $\alpha$  e  $\phi$  são constantes.

As condições de contorno prescritas foram: vazão mássica total nas entradas de  $100 \text{ [l/min]}$ ; vazão mássica no *overflow* (1% da vazão na entrada), e pressão prescrita no *underflow*. Após alcançar um regime estabelecido (em torno de  $3,5 \text{ [s]}$  de simulação), foi adotada uma nova condição de contorno para o *underflow* com a pressão radialmente distribuída com a opção de ajuste de pressão por vazão mássica prescrita. A simulação foi rodada até  $4,6 \text{ [s]}$ , quando se verificou não haver mais mudanças significativas nos perfis de velocidade axial e tangencial.

Com os resultados da fase fluida contínua, foram rodadas as simulações da fase dispersa. O acoplamento entre as fases foi de “uma-via”, com  $0,1\%$  em volume da fase dispersa entrando com a fase contínua. Thew (1987) usou diâmetros de gotas variando entre  $17$  e  $63 \text{ [\mu m]}$ , optou-se por fazer injeções com diâmetros uniformes variando entre  $20$  e  $60 \text{ [\mu m]}$  para poder comparar os resultados de eficiência do hidrociclone. Foi acompanhado o número de partículas que entravam no hidrociclone e o número de partículas que deixavam o hidrociclone pelo *underflow* e pelo *overflow*. Dessa forma, pode-se calcular a eficiência do hidrociclone para cada tamanho de partícula. Os resultados são apresentados e discutidos na próxima seção.

## Resultados e Discussão

Dos resultados obtidos na simulação da fase contínua, diversas características típicas do escoamento em hidrociclones puderam ser observadas.



**Figura 3. Linhas de corrente e contorno de pressão.**

As linhas de corrente para o escoamento, como mostradas na Fig. (3), evidenciam o escoamento em espiral por toda a extensão do hidrociclone, com a maior parte da vazão alimentada saindo pelo underflow. Através do corte no plano central do hidrociclone, nota-se que a pressão segue o comportamento esperado para um hidrociclone, aumentando com o raio do centro para as paredes.

Os perfis de velocidade axial e tangencial obtidos, conforme a Fig.(4), também são típicos de hidrociclones, com picos bem pronunciados na região mais próxima ao eixo do hidrociclone. Essa é uma característica do efeito ciclone que impõe um perfil de velocidade tangencial diferente do que é apresentado na rotação de um corpo rígido.

A eficiência do hidrociclone na remoção de óleo para cada diâmetro de gota pode ser analisada na Fig.(5), sendo ligeiramente superiores aos valores obtidos experimentalmente por Thew. Comparando os resultados de eficiência para as simulações utilizando a correlação de arraste padrão do ANSYS Fluent (modelo de Morsi e Alexander) e para a rotina implementada (modelo de Ishii-Zuber), praticamente não existem diferenças nas eficiências alcançadas em toda a faixa de diâmetros estudada, sendo o  $d_{75}$  (diâmetro da partícula com 75% de chance de ser capturada) igual a 26,2  $\mu\text{m}$  e 27  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

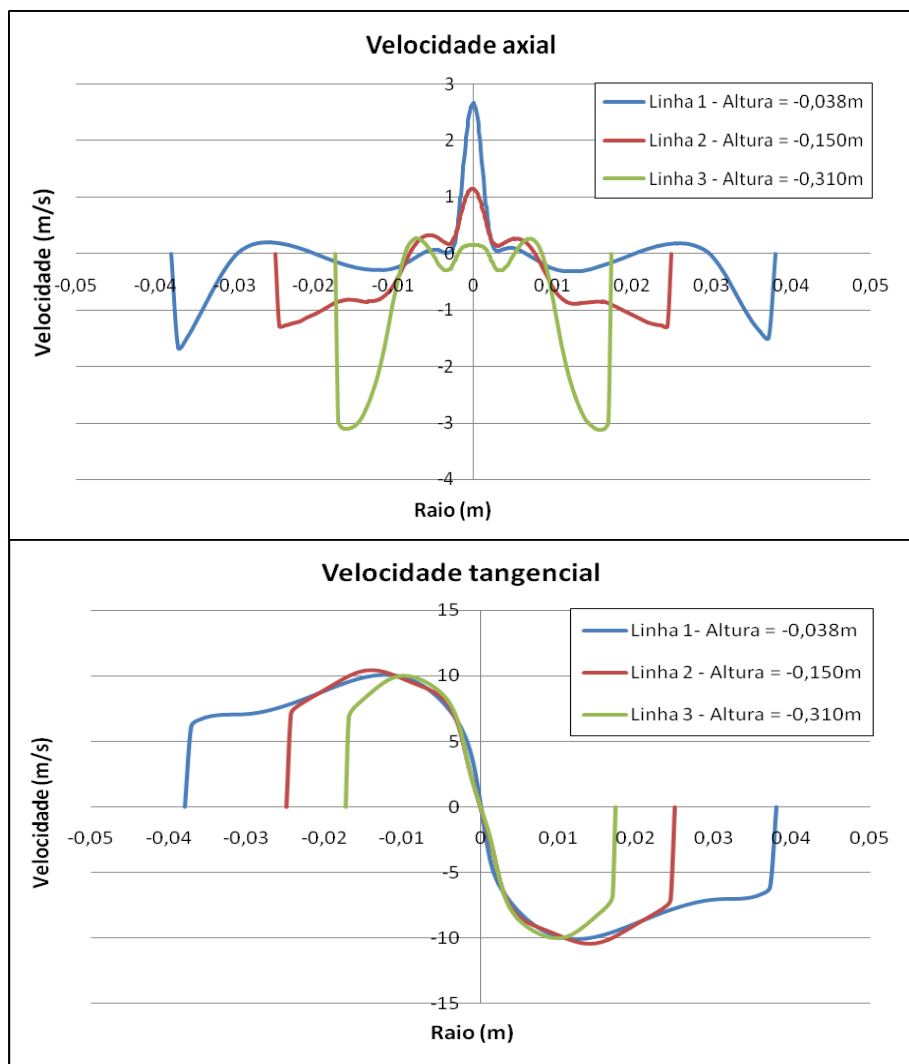


Figura 4. Velocidade tangencial e axial em diversas linhas medidas a partir do overflow.

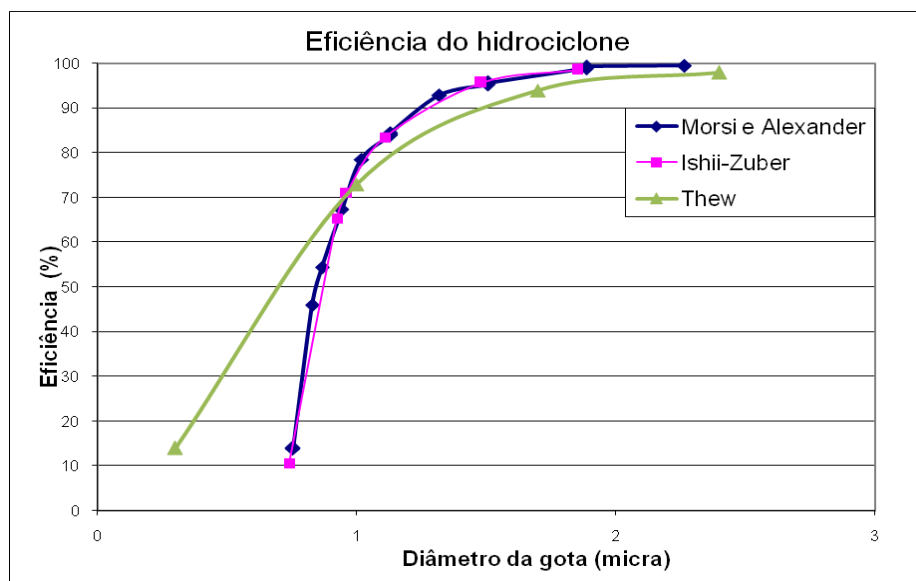


Figura 5. Comparação da eficiência de remoção de óleo por tamanho de gota para os dois modelos de coeficiente de arraste utilizados no estudo e os dados experimentais obtidos por Thew

## **Conclusões**

A metodologia mostrou-se bastante promissora para simulação de hidrociclones. Os resultados foram bastante satisfatórios e o custo computacional razoável para a solução do escoamento da fase contínua. A solução da fase dispersa, feita após o cálculo do escoamento da fase contínua, é ainda mais barata computacionalmente.

As discrepâncias encontradas entre os resultados de eficiência medida e prevista podem ser justificados por incertezas nos dados experimentais e por operações de adimensionalização realizadas pelo autor do experimento. Essas operações não constavam em detalhes nos artigos publicados. De qualquer forma os resultados são bastante coerentes e seguem as tendências físicas do escoamento.

Dado o baixo custo envolvido na simulação, em comparação com o custo de um experimento, a metodologia obtida se mostrou satisfatória e pode ser aplicada como uma ferramenta de projeto para dimensionamento de hidrociclones para separação de baixos teores de óleo.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem à ESSS Ltda., à FINEP e à Agência Nacional do Petróleo, através de seu Programa de Formação de Recursos Humanos para o Setor de Petróleo e Gás (PRH-ANP) e, em particular, ao Programa EQ-ANP (PRH 13) pelo apoio recebido.

## **Referências Bibliográficas**

Crowe, C.T., 2006, "Multiphase Flow Handbook", CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 1156 p.

Crowe, C.T., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y., 1998, "Multiphase Flows with Droplets and Particles", CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 471 p.

Dehbi, A., 2008, "Turbulent Particle Dispersion in Arbitrary Wall-Bounded Geometries: A Coupled CFD-Langevin-Equation Based Approach", International Journal of Mutiphase Flow, Vol.34, pp. 819-828.

Fluent, Inc., 2006, "Fluent 6.3 Documentation".

Fox, R.W. and McDonald, A.T., 2001, "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 5 Edition, LTC Editora, Rio de Janeiro, 504 p.

Nezhati, K and Thew, M.T., 1987, "Aspects of the Performance and Scaling of Hydrocyclones for Use with Light Dispersions", 3<sup>rd</sup> International Conference on Hydrocyclones, pp. 167-180.

Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, 214p.