



ESTRATÉGIA DE SIMULAÇÃO CFD ESTACIONÁRIA PARA PREVISÃO DE DESEMPENHO SEPARATIVO DE HIDROCICLONES OPERANDO COM AIR-CORE

JOÃO P. S. OLIVEIRA^{1*}, TANIA S. KLEIN¹, FABIO P. SANTOS¹, RICARDO A. MEDRONHO¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química
*e-mail: joaopedro@ufrj.br

RESUMO – O presente artigo se propõe a definir uma estratégia estacionária de simulação CFD multifásica de hidrociclones operando com *air-core* na classificação de particulados, diferenciando-se de contribuições prévias que se valem de um tratamento completamente transiente tipicamente. Os cálculos relativos ao campo multifásico e à turbulência ocorreram por meio da abordagem Euler-Euler completa e do modelo de Gibson e Launder (1978), respectivamente. A partir dos dados experimentais do hidrociclone de Hsieh (1988), um *benchmark* na validação de modelagens numéricas aplicadas aos separadores em questão, analisou-se qualitativa e quantitativamente o potencial preditivo da estratégia definida. Os primeiros casos se referiram ao escoamento bifásico água+ar, nos quais se analisaram a viabilidade da metodologia estacionária quanto à captura dos aspectos fluidodinâmicos e multifásicos relevantes do campo hidrociclônico: perfis de velocidade, diâmetro do *air-core* e razão de corte; obtiveram-se amplas acurácias nos comparativos com experimentos. Estendendo a modelagem multifásica pela inclusão de uma segunda fase dispersa, estimou-se a curva de partição do equipamento mediante uma sequência de simulações monodispersas (tamanho fixado); na varredura de tamanhos sucedida, os retornos indicaram a previsão acurada do diâmetro de corte, de cerca de 17 μm , e um desvio máximo de 7% para o tamanho de 25 μm .

INTRODUÇÃO

Hidrociclones respondem por uma classe de separadores ciclônicos, tratando-se de dispositivos voltados para processos de separação em fases heterogêneas com fase contínua líquida. Tratam-se de equipamentos empregados em uma ampla gama de processos industriais, atendendo a serviços de separação os mais diversos. Podem-se citar os segmentos de mineração, farmacêutico, químico e de óleo e gás.

Faz-se a alimentação da suspensão a ser tratada tangencialmente em uma seção cilíndrica acompanhada tipicamente por uma porção cônica. Em função da geometria apresentada, tem-se o desenvolvimento de um escoamento altamente rotacional. Forma-se um vórtice externo descendente que se dirige à

saída de fundo (*underflow*) e um vórtice interno ascendente que se encaminha à saída de topo (*overflow*). O campo centrífugo então estabelecido se responsabiliza por promover a segregação das fases introduzidas pela exploração da diferença de densidades, sucedendo-se a chamada sedimentação centrífuga (Svarovsky, 2000).

Apesar de sua simplicidade em termos de funcionamento e fabricação, a descrição do campo de escoamento desenvolvido nos hidrociclones representa um desafio de significativa complexidade. A alternativa de solução numérica do escoamento ocorre, usualmente, mediante o uso da ferramenta de Fluidodinâmica Computacional (CFD). O seguimento de tal estratégia para a previsão de características operacionais de separadores ciclônicos (Schuetz *et al.*, 2004; Delgadillo e

Rajamani, 2005; 2007; 2009; Brennan 2006; Kuang *et al.*, 2012; Narasimha *et al.*, 2012; Gohdrat *et al.*, 2012; Ji *et al.*, 2018; Durango-Cogollo, 2020; Raesi e Maddahian, 2022) e distribuições das componentes do campo de velocidade desenvolvido em seu interior (Brennan, 2006; Bhaskar *et al.*, 2007; Davailles *et al.*, 2012) aconteceu em numerosos estudos, refletindo o potencial de aplicação da técnica na análise do problema em questão.

O presente trabalho se propôs a simular numericamente o campo de escoamento desenvolvido em um hidrociclone *benchmark* na separação sólido-líquido, o de Hsieh (1988). Endereçou-se o campo multifásico por meio de uma abordagem Euler-Euler, identificando-se as fases de água contínua, *air-core* e particulado com a introdução de uma estratégia estacionária de simulação, que se diferencia do tradicional tratamento totalmente transiente comumente seguido na literatura correlata.

REVISÃO DA LITERATURA

Hsieh (1988) desempenhou avaliações experimentais de um hidrociclone em cenários de operação dados pelo processamento de suspensões de calcário em água. As medições então realizadas com relação ao desempenho separativo e comportamento hidrodinâmico fundamentaram o desenvolvimento de uma modelagem matemática descritiva do funcionamento do separador.

Tal qual apontado em variadas ocasiões na literatura correlata (Delgadillo e Rajamani, 2005; 2007 2009; Wang *et al.*, 2007; Kuang *et al.*, 2012; Durango-Cogollo *et al.*, 2020), simulações CFD tendo como base o hidrociclone de Hsieh (1988) permitiram proceder validações de modelagens de aspectos diversos do campo de escoamento e da operação macroscópica de separadores hidrociclônicos em serviços sólido-líquido. Os dados experimentais disponíveis viabilizaram verificações quanto à captura de aspectos fundamentais da física endereçada, subsidiando numerosas contribuições na literatura de modelagens analíticas, semi-empíricas e numéricas.

Parte dos estudos focam na descrição de características hidrodinâmicas, especialmente quanto à modelagem de turbulência. A utilização de modelos do tipo LES implica na necessidade de soluções transientes em consequência da natureza das flutuações turbulentas de maiores escalas objeto das previsões. Investigações com esse ímpeto vêm reunindo esforços direcionados a uma caracterização aprofundada do campo de escoamento turbulento e sua evolução temporal, centrando as predições nos campos de velocidade médio e flutuante (Brennan, 2007; Razmi, Goharrizi e Mohebbi, 2018).

Há, por outro lado, trabalhos fazendo uso de modelos RANS, especialmente da classe RSM. Diferentes acurácias foram reportadas quanto a essa abordagem. Não obstante a identificação de limitações em relação à reprodução de perfis de velocidade para alturas prescritas do equipamento, retornos de grandezas promediadas como eficiência e razão de corte atendendo a acurácias a nível de engenharia já ocorreram. Em meio a contextualização apresentada, o potencial de seu emprego em regime estacionário deve ser levado em consideração.

Um aspecto central do funcionamento de hidrociclones contemplado na base de dados experimentais de Hsieh (1988) é o *air-core*, cuja formação decorre da presença de gases dissolvidos e de operações com abertura das saídas à atmosfera (Svarovsky, 2000). Estudos CFD pioneiros (Delgadillo *et al.*, 2005; 2006; 2007; 2009) reproduzindo os referidos dados utilizaram a abordagem multifásica VOF (*Volume of Fluid*) para contabilização do fenômeno apontado. Por outro lado, trataram o processamento da fase particulada de maneira desacoplada com a abordagem Euler-Lagrange, deixando de avaliar eventuais influências de acomplamento de fases.

Brennan (2006) empregou VOF para o cômputo do *air-core* e aprimorou a determinação do campo multifásico das partículas com o uso da abordagem Euler-Euler em sua versão simplificada *mixture*. Em trabalho posterior, Brennan, Narasimha e Holtam (2007) substituíram o emprego de VOF para o *air-core*, modelando-o como uma fase secundária adicional em relação aos diâmetros

de sólidos definidos na abordagem *mixture*. Ghodrat *et al.* (2016) desempenharam suas análises de validação com o hidrociclone de Hsieh (1988) recorrendo à formulação completa da abordagem Euler-Euler, incluindo o *air-core* como uma das fases secundárias tais quais os tamanhos de partículas simulados. Em todas as contribuições relacionadas, no entanto, os autores necessitaram proceder as simulações em regime completamente transiente, o que demanda maiores custos computacionais, mesmo visando obter resultados que reflitam a operação estacionária do equipamento.

MODELAGEM MATEMÁTICA

Abordagem Euler-Euler para campos bifásicos dispersos

No tratamento Euler-Euler para a descrição de um campo de escoamento multifásico disperso, tem-se o emprego de formas promediadas das equações de balanço de propriedades, originalmente concebidas pontual e instantaneamente. Consideram-se as partículas como sendo formadoras de uma ou mais fases fluidas interpenetrantes.

A promediação acontece mediante a aplicação da operação de média para uma das coordenadas em termos das quais estão definidas as funções de campo (massa específica, velocidade, temperatura etc.) sobre o domínio tomado (intervalo de tempo, volume de controle e/ou espaço amostral). Seus efeitos incluem a introdução do conceito de fração de fase, que constitui um indicativo da probabilidade de ocorrência de uma fase no domínio da média, e a perda da caracterização do particulado por sua natureza discreta, uma vez que se abre mão do acompanhamento das interfaces separando as fases; as partículas deixam de exibir forma e tamanhos bem definidos no contexto da modelagem (Yeoh e Tu, 2019).

Na sequência, são apresentadas as equações descritivas do modelo multifásico utilizado. As equações se encontram expressas em função de variáveis médias e se referem às conservações de massa e quantidade de movimento linear para as fases individuais. Diferentemente do equacionamento para o caso monofásico, mostram-se presentes

contribuições relativas ao transporte de propriedades interfacial, demandando relações adicionais para o fechamento do sistema de equações, manifestadas como equações constitutivas para os termos de interação entre fases.

Seja a equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k U_{k,i}}{\partial x_i} = \Gamma_k \quad (1)$$

E a equação de conservação de quantidade de movimento linear:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k U_{k,i}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k U_{k,i} U_{k,j}}{\partial x_i} = \frac{\partial \alpha_k p}{\partial x_i} + \frac{\partial \alpha_k \tau'_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_k \tau''_{ij}) + \Omega_{k,i} \quad (2)$$

em que se denota por α_k a fração de fase, U_k o campo de velocidade, p o campo de pressão, τ' o tensor tensão viscosa, modelado segundo a lei de viscosidade de Newton, τ'' o tensor tensão turbulenta, modelado seguindo um modelo da abordagem RANS (média de Reynolds das equações de Navier-Stokes) de fechamento completo, Γ_k a taxa de troca mássica interfacial e Ω_k o somatório de forças interfaciais. O subscrito k indica a representação das variáveis para a k -ésima fase do sistema multifásico. Vale ressaltar o emprego de notação indicial para representar as equações.

Suas derivações passo a passo podem ser encontradas em detalhes no trabalho de Oliveira (2019).

Para a descrição da turbulência no campo de escoamento em questão, optou-se por seguir com a abordagem de média de Reynolds das equações de Navier-Stokes (RANS). Modela-se a totalidade das escalas de flutuação turbulenta expressando o divergente do tensor do produto diádico das parcelas flutuantes de componentes do campo de velocidades, o chamado tensor de Reynolds, que surge a partir da aplicação da média temporal no termo de advecção da equação de Navier-Stokes, em termos de variáveis do escoamento médio.

Em decorrência da significativa anisotropia da turbulência em função de efeitos de curvatura de linhas de corrente principalmente, o escoamento desenvolvido no hidrociclone foi tratado com um modelo de fechamento completo, implicando a solução de equações de transporte adicionais para as componentes independentes do tensor de Reynolds e para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta. Particularmente, emprega-se o modelo de Gibson e Launder (1978).

METODOLOGIA

Sistema simulado e condições de operação

A esquematização do equipamento segue na Figura 1, a qual inclui a discriminação das variáveis geométricas que a descrevem.

O caso experimental tomado para subsidiar as simulações do referido hidrociclone consiste no processamento de 70,6 kg/min de uma suspensão de calcário ($\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$) em água a um teor mássico de 4,89%.

Especificações das simulações numéricas

O domínio de cálculo e as malhas computacionais foram elaborados utilizando os softwares *DesingModeler* e *ICEM CFD*, que compõem o pacote comercial da Ansys (versão 2020R1). Na Figura 1, segue também uma visualização do modelo computacional construído para representar o dispositivo em análise.

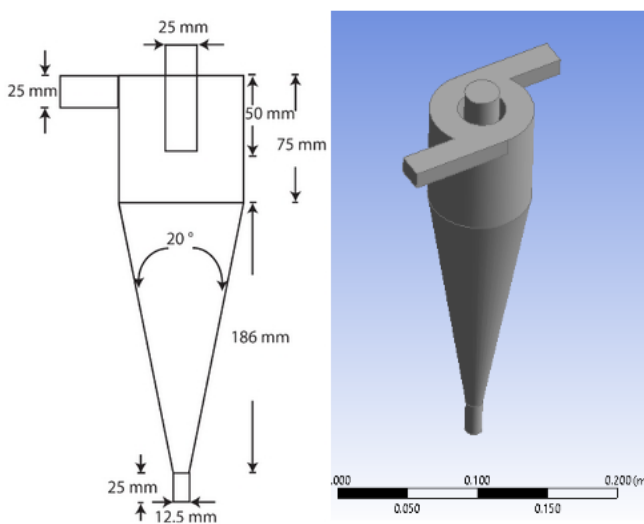


Figura 1: Representação esquemática do hidrociclone investigado experimentalmente por Hsieh (1988).

É parte relevante da estratégia de simulação estacionária explorada a definição de uma configuração geométrica de entrada dupla equivalente à alimentação por entrada simples (original) do corpo principal do hidrociclone. Vale destacar que tal modificação geométrica no hidrociclone de Hsieh (1988) é comumente adotada na literatura (Kuang *et al.*, 2012; Ghodrati *et al.*, 2016; Ji *et al.*, 2019; Durango-Cogollo *et al.*, 2020).

É fundamental que se estabeleça uma congruência entre ambas as configurações a partir da especificação de seções transversais no caso da entrada dupla com áreas tais que, recebendo cada uma metade da vazão total, se assegure velocidades superficiais iguais à que ocorre no caso de entrada simples. Em estudo recente (Oliveira *et al.*, 2022), observou-se que uma ação centrífuga similar se sucede para o processamento de uma mesma vazão total da suspensão considerada, com a distinção de haver a promoção de um vórtex central mais estabilizado, o que viabiliza a condução da simulação em regime estacionário.

As localizações e especificações das condições de contorno empregadas nas simulações seguem na Tabela 1, em que se simbolizam por U o campo de velocidade, I a intensidade de turbulência, D_h o diâmetro hidráulico, P_{static} a pressão estática e α a fração volumétrica das fases dispersas (ar ou sólidos). A execução da solução numérica se deu no software Fluent, também do pacote Ansys.

O teste de independência de malha conduzido preliminarmente indicou um nível de refino correspondendo a aproximadamente 650 mil elementos hexaédricos para as malhas avaliadas (Figura 2).

Aplicou-se a abordagem Euler-Euler para o cálculo do campo multifásico. Assinalou-se o ar como uma fase secundária com diâmetro arbitrado de $1 \times 10^{-5} \text{ m}$. O arraste estacionário definiu a única interação interfacial considerada, tendo sido modelado com a correlação de Schiller-Naumann. Foram utilizados esquemas de discretização de segunda ordem: QUICK para os termos advectivos, *Least Squares Cell-Based* para os termos difusivos. Definiu-se como critério de convergência residual o patamar de 1×10^{-5} .



Figura 2: Malha computacional elaborada para simulação do hidrociclone de Hsieh (1988).

Ainda, para consecução das simulações em regime permanente, fez-se uso do artifício de sub-relaxação pseudo-transiente presente no *solver* empregado (FLUENT, 2020), em que se impõe um termo de avanço temporal não físico responsável por conferir dominância diagonal à matriz de coeficientes do sistema de equações discretizado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização fluidodinâmica

Formação do *air-core*: Simulações do campo bifásico água + ar permitiram comparar os impactos das considerações adotadas para a

representação do domínio de cálculo e a condução da solução numérica. De início, observou-se a formação do núcleo de ar e o estabelecimento do campo de velocidade pelas fases processadas (Figura 3).

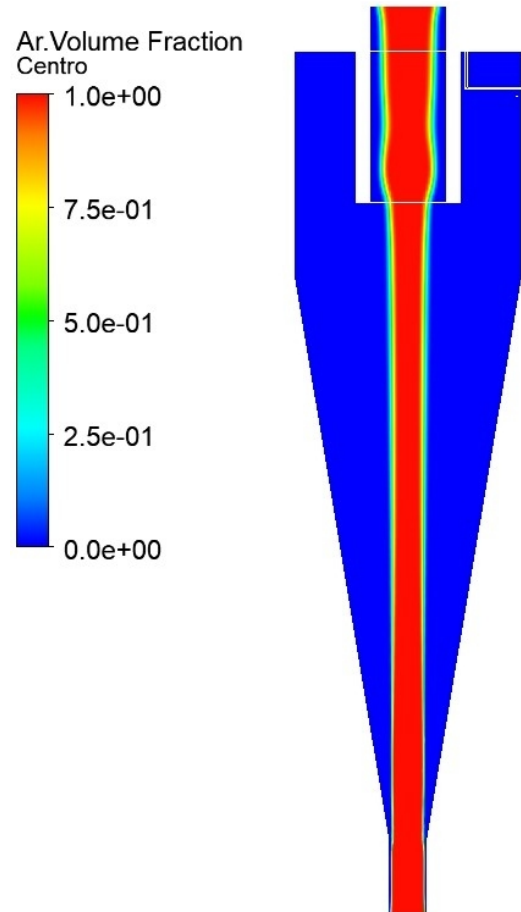


Figura 3: Distribuições de fração de ar sobre o plano central do equipamento.

A abordagem multifásica se mostrou capaz de gerar uma previsão qualitativamente consistente. Para tanto, arbitrou-se à fase ar,

Tabela 1: Condições de contorno para as simulações do hidrociclone de Hsieh (1988).

Fronteira	Condição	Especificação
Entradas	Dirichlet para U , α , k e ε Gradiente nulo para P	$ U = 2,28 \text{ m/s}$ $I = 4,10\%$ $D_h = 0,025 \text{ m}$ $\alpha = 0.0186$
Overflow	Dirichlet para P e backflow α Gradiente nulo para U e tensor de Reynolds	$P_{static} = 0 \text{ Pa}$ $\alpha_{backflow} = 1$
Underflow	Dirichlet para P e backflow α Gradiente nulo para U e tensor de Reynolds	$P_{static} = 0 \text{ Pa}$ $\alpha_{backflow} = 1$
Parede	Sem deslizamento	

definida como secundária no escopo da modelagem Euler-Euler, o tamanho fixo de 1×10^{-5} m. Tanto a expectativa teórica quanto a com base nos dados experimentais existentes apontam o alcance de um estado plenamente segregado das fases água e ar, com esta preenchendo a porção central com pressões inferiores à atmosférica. Apesar de sua contabilização como fase dispersa, foram retornados campos estratificados atendendo a tal expectativa, o que respaldou o andamento com os testes de cenários envolvendo o particulado posteriores mantendo essa modelagem para a fase ar.

Velocidade tangencial: Em complementação à análise, exploraram-se aspectos da previsão do campo ciclônico a partir da visualização de suas linhas de corrente. A Figura 4 as ilustra distinguindo as associadas à fase primária dada pela água na alimentação das representativas da fase dada pelo ar admitido através das saídas.

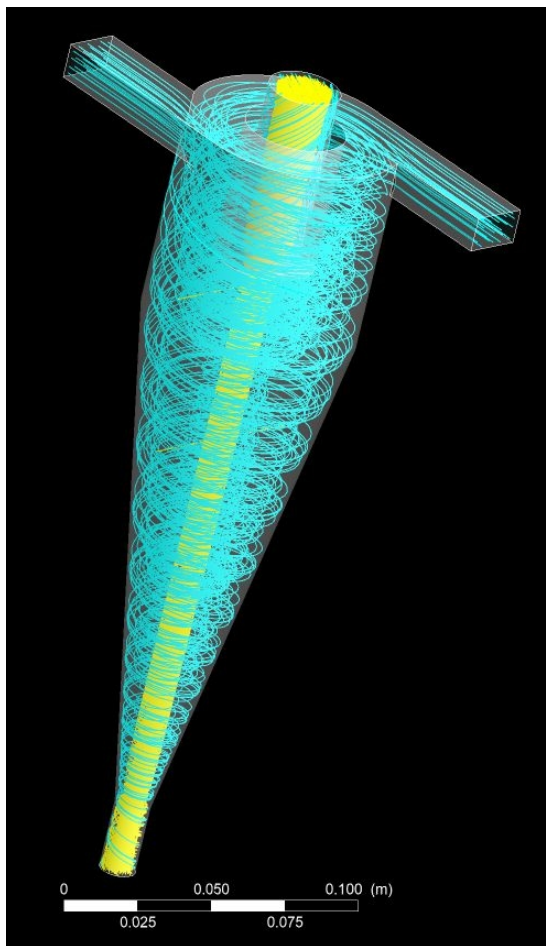


Figura 4: Linhas de corrente através do interior do hidrociclone de Hsieh (1988).

simulado retratando os campos das fases água (azul) e ar (amarelo).

A partir da constatação quanto à viabilidade qualitativa do tratamento multifásico para o *air-core* com condução em regime estacionário, seguiram testes para comparativo entre previsões e os respectivos dados empíricos em relação aos perfis de velocidade e aspectos multifásicos do campo água-ar considerado.

Na Figura 5, tem-se exibido o perfil da componente tangencial do campo de velocidade da fase água em dada altura do equipamento frente à respectiva observação experimental.

É possível observar uma concordância qualitativa entre os perfis no gráfico apresentado acima. A simulação numérica previu o estabelecimento das duas regiões compondo o escoamento ciclônico desenvolvido. Identificam-se dois vórtices que se distinguem quanto ao sentido de avanço axial e a rotacionalidade possuída. A componente tangencial do campo de velocidade é capaz de indicar a presença das regiões mencionadas.

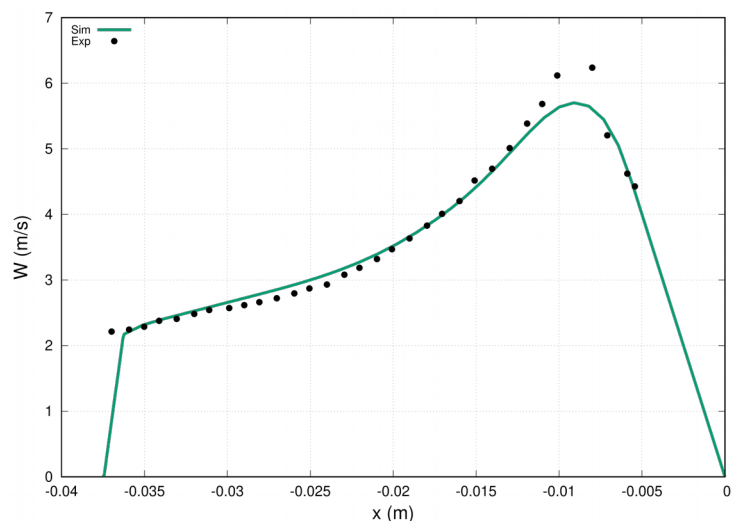


Figura 5: Comparativo entre perfis de velocidade tangencial da fase água previsto numericamente e experimental no hidrociclone de Hsieh (1988) a 60 mm a partir do topo da seção cilíndrica do equipamento.

O perfil simulado, em consonância à medição base, compreende zonas com dependências opostas da componente tangencial da velocidade em relação à

coordenada radial. Pode-se atribuí-las aos vórtices primário e secundário formados no campo hidrociclônico. A distinção entre ambos retratada na Figura 5 se associa à predominância de comportamento irrotacional no primeiro e rotacional no último.

A irrotacionalidade caracteriza a condição na qual a vorticidade se anula em todos os pontos da região analisada, definindo os vórtices livres. Dentre as suas implicações, há a relação inversamente proporcional entre a velocidade tangencial e o raio. Por sua vez, a rotacionalidade, que predomina a porção do perfil analisado encerrada nos menores raios, se manifesta como um campo de vorticidade uniforme de magnitude proporcional à velocidade angular no eixo de rotação. A intensificação do caráter rotacional aproxima a porção fluida considerada ao comportamento de corpo rígido em relação à rotação.

A distribuição da componente tangencial do campo de velocidade desenvolvido em um separador ciclônico exhibe tendências aos dois padrões descritos para maiores e menores distâncias radiais. Entretanto, efeitos difusivos atrelados à viscosidade molecular e à turbulência afastam o comportamento real/simulado da idealidade, sucedendo-se suavizações e abaulamentos (Mulligan, 2015).

Quantitativamente, o perfil retornado pela solução numérica acompanha em ampla extensão da referência experimental externamente à zona de transição entre as regiões dominadas por vórtice livre e por vórtice forçado. As discrepâncias se restringem à transição, notando-se que a simulação subestima a predição da velocidade tangencial máxima alcançada em cerca de 8%.

Velocidade axial: A Figura 6 fornece o comparativo entre perfis simulado e observado empiricamente da componente axial do campo de velocidade na mesma altura tomada na avaliação da componente tangencial antecedente.

Apesar de uma concordância majoritária ao longo do perfil radial no tocante à sua reprodução qualitativa, há discrepâncias não desprezíveis. Não obstante, os desvios quanto ao formato da distribuição prevista se mostram diminutos o bastante, não afetando a

identificação dos aspectos indicativos dos vórtices primário e secundário.

As magnitudes da velocidade axial tendem a variar entre patamares inferiores às da velocidade tangencial, o que se dá mais pronunciadamente onde há separação em maiores extensões. A principal característica inferida com tal quantidade é a delimitação da fronteira entre as regiões de escoamento descendente e ascendente. O resultado previsto captura essa característica, compreendendo valores negativos para o perfil a partir da parede e valores positivos nas vizinhanças do eixo central. Tal aspecto se atrela à delimitação da LZVV (*Locus of Zero Vertical Velocity*) e, por conseguinte, à determinação da partição das fases envolvidas entre as saídas.

Quantitativamente, é possível apontar um acompanhamento em grande extensão do perfil experimentalmente obtido pela solução numérica. Apesar de desvios minoritários locais, a reprodução de maior relevância consistiu no ponto de anulação da velocidade axial, por onde a LZVV passa na altura tomada.

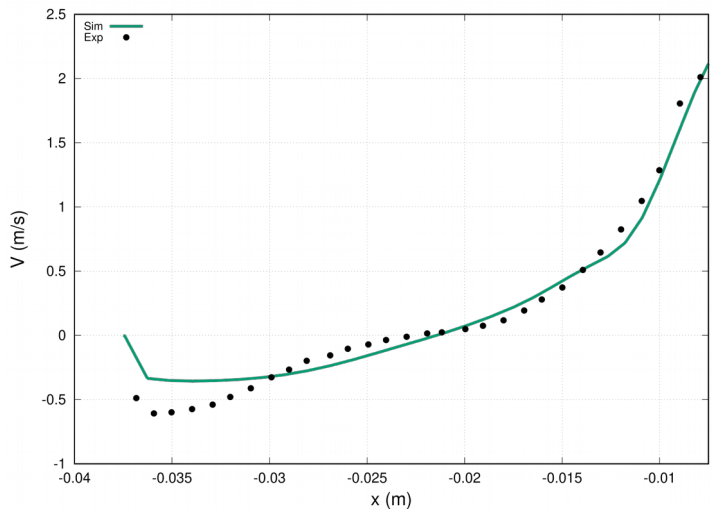


Figura 6: Comparativo entre perfis de velocidade axial da fase água previsto numericamente e experimental no hidrociclone de Hsieh (1988) a 60 mm a partir do topo da seção cilíndrica do equipamento.

Razão de corte e diâmetro do *air-core*: Tem-se uma conexão entre a acurácia referente à predição do perfil e ao parâmetro macroscópico mais fortemente influenciado: a razão de corte (fração da vazão alimentada

que segue para uma das saídas; no caso, para o *overflow*).

Tabela 2: Comparativo entre os valores de razão de corte relativa ao *overflow* correspondentes à previsão numérica e experimental (Hsieh, 1988; Monredon, Hsieh e Rajamani, 1992).

Simulação Água + Ar	Simulado	Experimental
Razão de Corte (S)	95,15%	95,05%

Na Figura 7, tem-se ilustrado um perfil de fração volumétrica de ar na mesma altura em que se tomaram os perfis de velocidade discutidos. Com tal avaliação, buscou-se gerar um registro quantitativo acerca da distribuição de fases no domínio do escoamento e da própria extensão radial do núcleo de ar formado.

A distribuição radial de fração volumétrica expressa na Figura 7 reflete o desenvolvimento de um núcleo de ar no separador. Vale ressaltar que a modelagem euleriana completa empregada, em que se definiram duas fases, primária para a água e secundária para o ar, não se volta à previsão de interfaces. A estimativa da distribuição de fases se dá com base na solução da respectiva equação de transporte junta às demais, mas sem que um rastreamento da interface aconteça.

O retorno da metodologia seguida levou a uma definição razoável da transição

entre o núcleo de ar o escoamento de água. Há medição para o diâmetro do núcleo de ar a partir de ensaios experimentais com o hidrociclone em questão, sendo de 10 cm aproximadamente. Assumiu-se que o posicionamento da interface no estreito intervalo de frações volumétricas não nulas e não unitárias ocorre na coordenada radial associada à fração de 0,5. Pode-se verificar que a localização resultante é em cerca de $x = 5$ cm, levando a um diâmetro concordante com a medição.

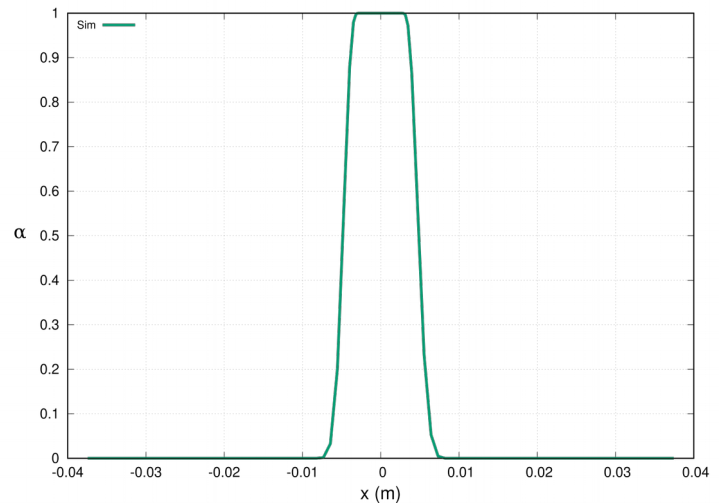


Figura 7: Perfil radial de fração volumétrica de ar a altura de 60 mm a partir do topo da seção cilíndrica do equipamento.

Cenário com particulado: previsão de desempenho separativo

A Figura 8 ilustra comparativamente as eficiências retornadas pelas simulações

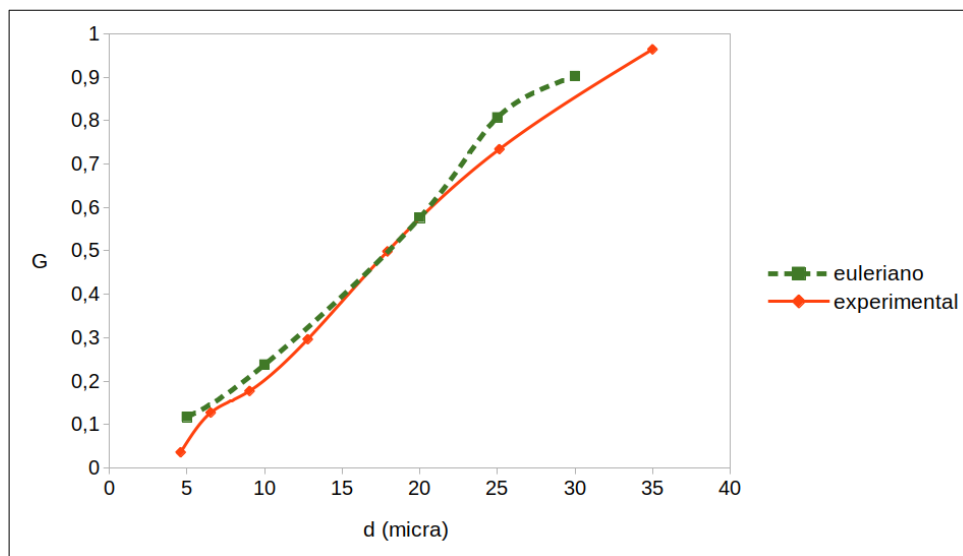


Figura 8: Comparativo entre eficiências granulométricas prevista numericamente e experimental no hidrociclone de Hsieh (1988).

monodispersas e as respectivas referências experimentais.

A extensão da análise para o endereçamento dos cenários de classificação do particulado se deu pela execução de simulações dois-fluidos correspondendo a sistemas hipotéticos monodispersos. Prescreveram-se diâmetros arbitrados para as fase secundária representativa dos sólidos suspensos de maneira a cobrir, em dada medida, a variabilidade de eficiências do equipamento.

Pode-se inferir que a estratégia multifásica em consideração conduziu a uma previsão satisfatória no âmbito da condição operacional tomada para o teste, mesmo frente às limitações da aproximação de um sistema multifásico polidisperso em um escoamento com segregação de fases por uma série de simulações monodispersas. Destaca-se a acurácia na previsão do diâmetro de corte d_{50} , igual a aproximadamente $17 \mu\text{m}$ e a obtenção de um desvio máximo de 7% para o tamanho de partícula de $25 \mu\text{m}$, o que, por mais que seja significativo, não indica um comprometimento expressivo da acurácia metodológica. Desconsiderando incertezas nos dados empíricos devido aos erros experimentais, é possível atribuir os desvios reportados a eventuais inadequações das formulações empregadas na modelagem física ou numérica do problema.

É importante notar que a avaliação prévia do campo bifásico água + ar retornou um indício robusto de que o tratamento para turbulência se mostra apropriado para captura de aspectos do escoamento ciclônico suficientemente para que, promediadamente, a operação seja reproduzida. A partir desses apontamentos, é razoável atribuir a discrepância (ou uma parcela significativa dela) a não contabilização da polidispersão, que, no âmbito da abordagem multifásica Euler-Euler completa, constitui uma das defasagens mais proeminentes. No entanto, para condições suficientemente diluídas, a estratégia multifásica da qual se lançou mão se mostrou uma alternativa com expressivo potencial preditivo.

A fase carreadora aquosa respondeu limitadamente à presença do particulado para a

faixa de tamanhos considerada, conforme segue na Tabela 3.

Tabela 3: Relação entre diâmetros fixados e eficiências de separação e razões de fluido para o estudo de validação com o hidrociclone de Hsieh (1988).

$d (\mu\text{m})$	Eficiência – recuperação no <i>underflow</i> (%)	Razão de fluido (%)
5	11,73	7,62
10	23,78	8,84
20	57,64	6,76
25	80,71	6,90
30	90,22	6,82

Relacionaram-se os tamanhos simulados às respectivas razões de fluido (percentuais de recuperação da fase contínua na saída concentrada em sólidos) em relação ao *underflow*. A razão de fluido pode ser avaliada como um parâmetro que reflete promediada e indiretamente a condição do escoamento do fluido primário em meio à influência dos elementos dispersos. Sua variação pouco expressiva sugere um nível de influência relativamente baixo. Dessa forma, infere-se que as interações interfásicas não atingiram extensões tais que a simulação de diâmetros representativos do meio disperso individualmente comprometa a captura da curva de predição em larga medida.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se propôs a avaliar o potencial preditivo da estratégia de simulação CFD multifásica de hidrociclones por meio de uma condução estacionária. Especificamente, a correta previsão do *air-core* que se estabelece constituiu uma camada de complexidade a ser endereçada, tal qual a previsão de performance de hidrociclones empregado em operações de classificação.

O caso de referência tomado provém do trabalho *benchmark* de Hsieh (1988), vastamente disseminado para fins de validação

de simulações numéricas. Inicialmente, seguiu-se com a avaliação da reprodução do campo bifásico água+ar no equipamento. Alcançaram-se concordâncias extensas entre previsões numéricas e referencial empírico para perfis de velocidade e diâmetro do *air-core*, fornecendo indícios às seleções dos modelos de Gibson e Launder (1978) para turbulência e Euler-Euler completo com correlação de arraste de Schiller-Naumann (1935) para o campo multifásico.

Quanto à reprodução numérica do processo de classificação, a curva de eficiência granulométrica computada a partir de uma série de simulações monodispersas se apresentou com desvios pouco expressivos, o que se refletiu, para as condições multifásicas reproduzidas (sistema diluídos, com 1,86% de teor volumétrico), em indicativos favoráveis à modelagem numérico-fenomenológica do escoamento trifásico água+ar+partícula. Atribuíram-se tais desvios à negligência dos efeitos polidispersos conjuntamente a eventuais imprecisões experimentais, motivando a consecução do desenvolvimento metodológico que contemple essa característica, mais acentuada em sistemas densos.

REFERÊNCIAS

- BHASKAR, K. Udaya et al. CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 1, p. 60-71, 2007.
- BRENNAN, M. CFD simulations of hydrocyclones with an air core: Comparison between large eddy simulations and a second moment closure. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 84, n. 6, p. 495-505, 2006.
- BRENNAN, Matthew S.; NARASIMHA, Mangadoddy; HOLTHAM, Peter N. Multiphase modelling of hydrocyclones—prediction of cut-size. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 4, p. 395-406, 2007.
- DAVAILLES, Aurélien et al. Analysis of swirling flow in hydrocyclones operating under dense regime. **Minerals Engineering**, v. 31, p. 32-41, 2012.
- DELGADILLO, Jose A.; RAJAMANI, Raj K. A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem. **International journal of mineral processing**, v. 77, n. 4, p. 217-230, 2005.
- DELGADILLO, Jose A.; RAJAMANI, Raj K. Large-eddy simulation (LES) of large hydrocyclones. **Particulate Science and Technology**, v. 25, n. 3, p. 227-245, 2007.
- DELGADILLO, Jose A.; RAJAMANI, Raj K. Computational fluid dynamics prediction of the air-core in hydrocyclones. **International Journal of Computational Fluid Dynamics**, v. 23, n. 2, p. 189-197, 2009.
- DURANGO-COGOLLO, Marvin; GARCIA-BRAVO, Jose; NEWEL, Brittany; GONZALEZ-MANCERA, Andres. CFD modeling of hydrocyclones—A study of efficiency of hydrodynamic reservoirs. **Fluids**, v. 5, n. 3, p. 118, 2020.
- GHODRAT, Maryam et al. Computational investigation of the effect of particle density on the multiphase flows and performance of hydrocyclone. **Minerals Engineering**, v. 90, p. 55-69, 2016.
- GIBSON, M. M.; LAUNDER, B. E. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 86, n. 3, p. 491-511, 1978.
- HSIEH, K. T., 1988. **Phenomenological model of the hydrocyclone**. Ph.D. Thesis, University of Utah.
- HSIEH, K. T.; RAJAMANI, R. K. Mathematical model of the hydrocyclone based on physics of fluid flow. **AIChE Journal**, v. 37, n. 5, p. 735-746, 1991.
- JI, Li et al. Modeling the multiphase flow in hydrocyclones using the coarse-grained volume of fluid—discrete element method and mixture-discrete element method approaches. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 57, n. 29, p. 9641-9655, 2018.
- KUANG, S. B. et al. Numerical study of liquid–gas–solid flow in classifying hydrocyclones: Effect of feed solids concentration. **Minerals Engineering**, v. 31, p. 17-31, 2012.

- MONREDON, T. C.; HSIEH, K. T.; RAJAMANI, Raj K. Fluid flow model of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 35, n. 1-2, p. 65-83, 1992.
- MULLIGAN, Sean. Experimental and numerical analysis of three-dimensional free-surface turbulent vortex flows with strong circulation. **Ireland: Institute of Technology Sligo**, 2015.
- NARASIMHA, M.; BRENNAN, M. S.; HOLTHAM, P. N. CFD modeling of hydrocyclones: Prediction of particle size segregation. **Minerals Engineering**, v. 39, p. 173-183, 2012.
- OLIVEIRA, João Pedro Souza de. **Investigação com fluidodinâmica computacional e planejamento experimental de um hidrociclone para separação de água dispersa em óleo**. 2019. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, João Pedro Souza de *et al.* UMA ESTRATÉGIA PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA ESTACIONÁRIA DO AIR-CORE EM HIDROCICLONES. In: ANAIS DO III CONGRESSO BRASILEIRO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbcfd-2022/papers/uma-estrategia-para-simulacao-numerica-estacionaria-do-air-core-em-hidrociclones>>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- RAESI, Ramin; MADDAHIAN, Reza. Numerical investigation of air-injected deoiling hydrocyclones using population balance model. **Chemical Engineering Science**, v. 248, p. 117103, 2022.
- RAZMI, Hamid; GOHARRIZI, Ataallah Soltani; MOHEBBI, Ali. CFD simulation of an industrial hydrocyclone based on multiphase particle in cell (MPPIC) method. **Separation and Purification Technology**, v. 209, p. 851-862, 2019.
- SCHILLER, L.; NAUMANN, Z. VDI Zeitung 1935. **Drag Coeff. Correl**, v. 77, p. 318-320, 1935.
- SCHUETZ, S. et al. Investigations on the flow and separation behaviour of hydrocyclones using computational fluid dynamics. **International Journal of Mineral Processing**, v. 73, n. 2-4, p. 229-237, 2004.
- SVAROVSKY, Ladislav. **Solid-liquid separation**. Elsevier, 2000.
- WANG, B.; CHU, K. W.; YU, A. B. Numerical study of particle– fluid flow in a hydrocyclone. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 46, n. 13, p. 4695-4705, 2007.
- YEOH, Guan Heng; TU, Jiyuan. **Computational techniques for multiphase flows**. Butterworth-Heinemann, 2019.