



UMA NOVA CORRELAÇÃO PARA CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ARRASTE EM AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS

RICARDO A.F. DE OLIVEIRA^{1*}, GABRIELA C. LOPES^{1,2}

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química

*e-mail: ricardo.arbach@gmail.com

RESUMO – Simulações numéricas do escoamento ao redor de aglomerados de partículas foram realizadas utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional para se estimar o coeficiente de arraste. As simulações foram realizadas em estado estacionário em uma faixa de Reynolds entre 1 e 1500. Neste estudo, foi proposto o aprimoramento de correlações de estimativa de coeficiente de arraste para partículas aglomeradas a baixos valores de Reynolds, visando extrapolar sua aplicabilidade para faixas de Reynolds superiores a 300. A implementação da função logarítmica na correlação aprimora a capacidade de estimar o coeficiente de arraste nas faixas mais elevadas de Reynolds. Os resultados mostraram que há a necessidade do uso de um parâmetro geométrico para aprimorar a acurácia na estimativa do coeficiente de arraste em aglomerados de partículas. Dos parâmetros testados, o achatamento mostrou-se capaz de apresentar uma melhoria significativa ao longo de toda a faixa de Reynolds testada. Ao utilizá-lo na nova correlação, os desvios relativos reduziram e variaram entre -4,37% e 3,90%.

INTRODUÇÃO

No projeto de equipamentos envolvendo escoamentos carregados de partículas, como leitos fluidizados, separadores ciclônicos, lavadores Venturi, filtros de mangas e biorreatores de tratamento de efluentes, é fundamental a modelagem da interação entre as fases para se obter resultados coerentes. As forças relacionadas a tal interação são diretamente dependentes de características das partículas, tais como o tamanho, forma e elasticidade, que são determinantes no desempenho dos equipamentos (Nikolopoulos et al., 2010; Wang et al., 2017). Entretanto, dependendo das características físicas, superficiais e mecânicas das partículas, as mesmas podem se aderir e gerar aglomerados, causando flutuações nos perfis de velocidade e pressão do escoamento (Senior e Brereton, 1992; Kuwagi et al., 2000).

Aglomerados de partículas podem ser encontradas nos mais diversos processos, como

sedimentação e floculação de partículas finas em rios e lagos, agitação química, processamento mineral, tanques agitados e sinterização de poeiras (Tran-Cong et al., 2004; Delacroix et al. 2021). Por ocorrer em diversas condições, tanto natural quanto artificialmente, a aglomeração de partículas em diferentes arranjos merece atenção.

Visto que a complexidade geométrica e a velocidade do escoamento inviabilizam uma solução analítica, a literatura apresenta, em sua grande maioria, correlações empíricas para estimar o coeficiente de arraste, tanto para partículas esféricas quanto para não esféricas (Clift et al., 1978; Leith, 1987; Haider e Levenspiel, 1989; Hölzer e Sommerfeld, 2008; Bagheri e Bonadonna, 2016).

Para obter predições que melhor representam as observações empíricas, os estudos recentes utilizam-se de fatores geométricos para descrever a partícula, como a circularidade, esfericidade, rugosidade, fator de forma, achatamento, entre outros. Entretanto, as correlações apresentam certas desvantagens,

como o fato de diversos estudos se basearem em experimentos com partículas de geometrias regulares, como cubos, cilindros e discos, que reduzem o nível de detalhamento dos fenômenos de escala local (Beetstra et al., 2006; Deen et al., 2012).

Para avaliar o coeficiente de arraste em aglomerados de partículas escoando em fluidos Newtonianos, Tran-Cong et al. (2004) conduziram ensaios laboratoriais, chegando a uma correlação de ajuste para uma faixa limitada a valores de Reynolds entre 0,1 e 1500. Porém, o estudo foi capaz de cobrir uma grande quantidade de formas irregulares de partículas observadas em problemas de engenharia.

Utilizando o método lattice Boltzmann, Beetstra et al. (2006) comparou tais dados experimentais, visando avaliar a influência da geometria do aglomerado nas perturbações em leitos fluidizados. O estudo mostrou a necessidade de calcular corretamente o coeficiente de arraste em aglomerados, uma vez que foi demonstrando que a força de arraste nas partículas é altamente dependente das variações de distância entre partículas e que a omissão dos efeitos de aglomeração acarreta em desvios significativos entre o comportamento observado experimental e o simulado.

A literatura apresenta diversos estudos experimentais que visam apresentar maneiras de calcular o coeficiente de arraste em aglomerados irregulares de partículas. No campo teórico, há uma quantidade relevante de estudos de coeficiente de arraste em partículas não esféricas, porém, há uma escassez de estudos específicos de correlações para estimar o arraste em aglomerados irregulares. Assim, utilizando a fluidodinâmica computacional, este estudo avalia o coeficiente de arraste em três conformidades de aglomerados de partículas, compostos de partículas esféricas, para escoamentos com baixos valores de Reynolds, visando propor uma nova correlação para estimar o coeficiente de arraste em aglomerados de partículas.

MÉTODOS

O estudo foi realizado no campo teórico, utilizando fluidodinâmica computacional para obter o perfil de escoamento da água em torno de aglomerados de partículas. O coeficiente de

arraste foi calculado utilizando os campos de pressão e velocidade obtidos através de simulações. Os resultados obtidos foram ajustados utilizando duas propostas de equações presentes na literatura e comparados com um ajuste feito a partir de uma nova proposta. A nova proposta foca em extrapolar a faixa aplicável dos modelos anteriores, visando adequar a uma faixa de escoamentos de leitos fluidizados líquido-sólido.

O coeficiente de arraste, no campo teórico, é calculado a partir de um balanço de forças. A partir do balanço, obtém-se a Equação (1)

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}|u_p - u_f|(u_p - u_f)\rho_f A_p} \quad (1)$$

em que F_D é a força de arraste, obtida a partir dos campos de pressão e velocidade ao redor do aglomerado. O arraste depende das propriedades do fluido e da partícula, ou seja, densidade e velocidade do fluido, ρ_f e u_f , respectivamente, e a velocidade relativa e área projetada, u_p e A_p , respectivamente.

Neste estudo, foram utilizados os pacotes de CAD e CFD disponíveis no *software* comercial ANSYS 14.5. As simulações foram realizadas em um cluster computacional do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar). Os casos foram simulados utilizando 40 núcleos de processamento de frequência 2,2 GHz.

Geometria e Domínio Computacional

As simulações foram realizadas em três domínios computacionais diferentes, variando a geometria do aglomerado de partículas testado, contendo entre três e cinco partículas esféricas de diâmetro 1cm cada. O domínio gerado trata-se de um paralelepípedo de altura e largura 0,1m e comprimento 0,2m, virando garantir que o perfil do escoamento em volta do aglomerado seja plenamente desenvolvido.

Visando gerar malhas bem estruturadas, o domínio foi dividido em dois cubos, conforme apresentado na Figura 1. O cubo à esquerda, próximo da entrada do escoamento, foi subdividido em sete corpos menores para um melhor controle da qualidade dos elementos ao redor dos aglomerados de esferas. Seis destes

corpos possuem forma piramidal, conectados a um cubo interno circundando o aglomerado, posicionado no centro do cubo maior. No segundo cubo, à direita do paralelepípedo e próximo à saída, não há necessidade de subdivisão em corpos menores. Na Figura 2 é apresentada a vista isométrica das geometrias dos três aglomerados simulados.

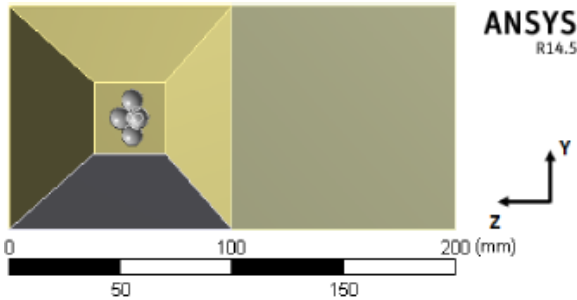


Figura 1: Exemplo de vista lateral do interior do domínio computacional simulado.

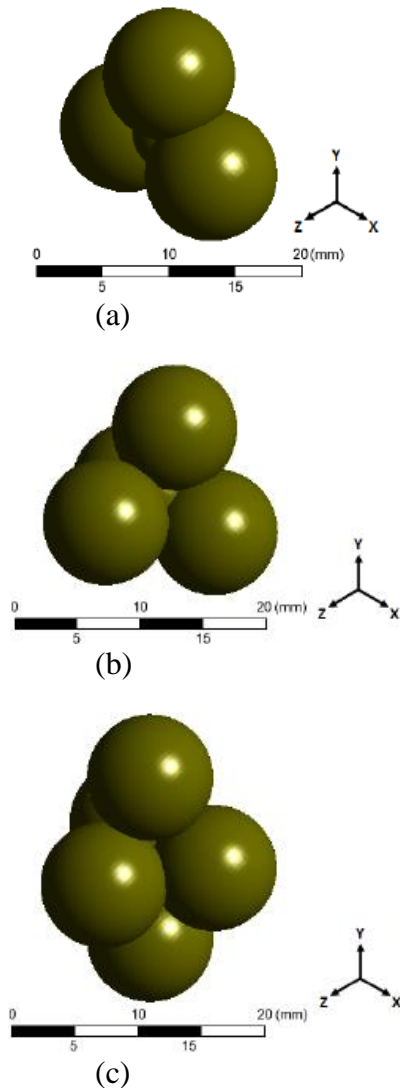


Figura 2: De cima para baixo: vista isométrica dos aglomerados de partículas de três, quatro e cinco partículas.

Geração das Malhas

Utilizando o *software* Meshing, foram geradas três malhas numéricas, uma para cada geometria, variando entre 5001753 e 5234907 elementos. Foram gerados elementos tetraédricos, piramidais, arestas com seis nós e, predominantemente, hexaédricos. A Figura 3 apresenta a malha do aglomerado de 5 esferas, com destaque na região ao redor do aglomerado, visando apresentar o grau de refino das malhas nesta região.

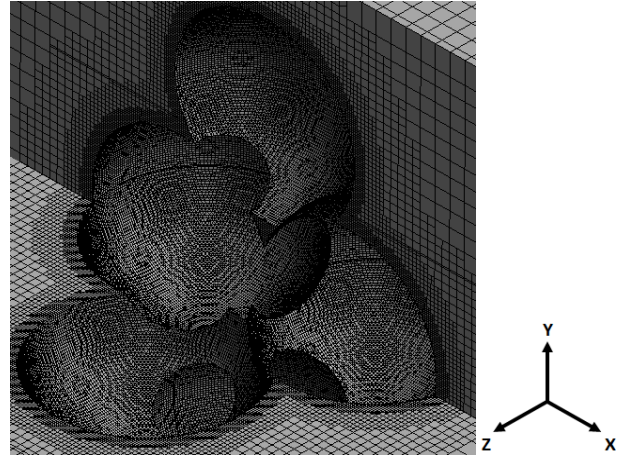


Figura 3: Vista isométrica do interior da malha de 5 esferas na região ao redor do aglomerado.

Antes de iniciar as simulações, é crucial realizar uma análise de qualidade dos elementos de malha. Para isso, foram avaliados os parâmetros fator de forma e ortogonalidade.

O menor valor possível para o fator de forma é 1, sendo considerados excelentes os elementos com fator de forma inferiores a 20 (ANSYS Meshing, 2012; Ferziger e Perić, 2002). Em todas as malhas os valores médios foram inferiores a 1,2, com desvios-padrão inferiores a 0,48%, sendo 32,12 o maior valor obtido, observado na malha para três esferas.

A ortogonalidade varia entre 0 e 1, sendo considerados excelentes os elementos com ortogonalidade superior a 0,8 (ANSYS Meshing, 2012; Ferziger e Perić, 2002). Apesar de alguns elementos terem apresentado baixa qualidade neste critério, o menor valor médio obtido foi de 0,94, com desvio padrão inferior a 0,1%, visto na malha de cinco esferas.

Configuração dos Casos

As propriedades do fluido foram configuradas como um escoamento isotérmico a 25°C, de modo que a densidade e viscosidade da água são 998,2 kg/m³ e 1,003·10⁻³ Pa·s respectivamente.

Como condições de contorno, foi configurada uma injeção de água normal à superfície de entrada com velocidade variando entre 5,9·10⁻³ e 10,501 cm/s, dependendo do aglomerado, conforme apresentado na Tabela 1, visando manter constantes os números de Reynolds entre 1 e 1500, obtidos pela Equação (2)

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d_{eq}}{\mu} \quad (2)$$

em que ρ , u e μ corresponde, respectivamente, à densidade, velocidade e viscosidade do fluido e d_{eq} é o diâmetro equivalente volumétrico do aglomerado.

Tabela 1: Velocidade de entrada do escoamento para os números de Reynolds testados.

Reynolds [-]	Velocidade [cm/s]		
	3 esferas	4 esferas	5 esferas
1	0,0070	0,0064	0,0059
5	0,0350	0,0318	0,0295
10	0,0700	0,0636	0,0590
30	0,2100	0,1907	0,1770
50	0,3500	0,3178	0,2950
80	0,5600	0,5085	0,4720
100	0,7000	0,6356	0,5900
300	2,1002	1,9069	1,7702
500	3,5003	3,1781	2,9503
800	5,6005	5,0849	4,7205
1000	7,0007	6,3562	5,9006
1300	9,1009	8,2631	7,6708
1500	10,5010	9,5343	8,8509

Apesar dos algoritmos baseados no método SIMPLE apresentarem baixo custo computacional, optou-se pelo algoritmo PISO, dada sua maior estabilidade, necessitando um menor número de iterações, gerando uma convergência mais rápida, levando a um menor tempo de processamento (Van Doormaal e Raithby, 1983).

Para a discretização espacial optou-se pelo método dos mínimos quadrados para a

solução dos gradientes, o esquema *PRESTO!* para a pressão e Upwind de Segunda Ordem para as equações de energia, quantidade de movimento e turbulência, visando evitar o problema de subestimação da energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação (Deglon e Meyer, 2006; Lane, 2017).

Equações Governantes

O problema utiliza-se das equações médias temporais de conservação em um escoamento estacionário de um fluido incompressível e isotérmico, dadas pelas Equações (3) e (4).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

Por sua capacidade de representar bem os efeitos próximos à parede e um baixo custo computacional, optou-se pelo modelo SST k- ω de turbulência (Equações 5 e 6).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* k \omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (6)$$

em que k é a energia cinética turbulenta, ν_t é a viscosidade cinemática turbulenta, ω é a taxa dissipativa, F_1 trata-se de uma função de fechamento que modela a transição entre as regiões próximas e afastadas das paredes, α , β e σ são coeficientes de fechamento do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após obter-se o coeficiente de arraste para cada um dos 39 casos simulados, os resultados foram utilizados para ajustar as correlações de cálculo do coeficiente de arraste a partir de duas correlações presentes na literatura. Os ajustes obtidos foram comparados com o ajuste obtido a partir da nova correlação de proposta neste trabalho.

Nova Correlação de Arraste

A literatura apresenta diversas equações de ajuste que são utilizadas como base para a formulação de novas correlações. Dada a sua baixa complexidade e boa acurácia, além de uma vasta validação em escoamentos laminares e homogêneos para esferas com esfericidade variando entre 0,6 e 1,0, é frequentemente utilizada como uma proposta inicial a fórmula genérica proposta por Yow et al. (2005), dada pela Equação (7).

$$C_D = \frac{\Lambda_1}{Re} + \frac{\Lambda_2}{\sqrt{Re}} + \Lambda_3 \quad (7)$$

em que os termos Λ_1 , Λ_2 e Λ_3 são coeficientes de ajuste da regressão.

Richter e Nikrityuk (2012) propuseram que os termos Λ_1 , Λ_2 e Λ_3 são, na verdade, dependentes de um parâmetro geométrico característico da partícula estudada. Após avaliarem seis parâmetros, observaram que o fator de forma apresentava o melhor ajuste, chegando na Equação (8).

$$C_D = \frac{A}{Re} AR^B + \frac{C}{\sqrt{Re}} AR^D + E AR^F \quad (8)$$

As regressões propostas anteriormente se ajustam bem para valores de Reynolds inferiores a 300, em que o coeficiente de arraste é superior a 1. Entretanto, tais modelos apresentam dificuldades em estimar os valores para números de Reynolds mais elevados.

Visando aprimorar a acurácia para a predição do coeficiente de arraste na faixa de Reynolds entre 300 e 1500, em que o coeficiente varia pouco, tendendo a um valor constante, neste trabalho propomos adicionar uma função logarítmica de fechamento na regressão proposta por Richter e Nikrityuk (2012), conforme a Equação (9)

$$C_D = \frac{A}{Re} \Psi^B + \frac{C}{\sqrt{Re}} \Psi^D + E \Psi^F + G \Psi^H \ln Re \quad (9)$$

em que A, B, C, D, E e F são constantes do ajuste e Ψ trata-se um parâmetro geométrico. A proposta do presente estudo foca em avaliar a Equação (9) utilizando como parâmetros geométricos o fator de forma, a circularidade, o achatamento e a esfericidade, calculados pelas Equações (10) a (13), respectivamente, e compará-los com as Equações (7) e (8).

$$AR = \frac{d_{\parallel}}{d_{\perp}} \quad (10)$$

$$c = \pi d_A / P_P \quad (11)$$

$$d_A / d_{eq} = \frac{\sqrt{4A_P / \pi}}{\sqrt[3]{6V / \pi}} \quad (12)$$

$$\phi = \pi d_{eq} / A \quad (13)$$

Os parâmetros geométricos variaram de acordo com a conformidade do aglomerado conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos parâmetros geométricos para as três conformidades de aglomerados testadas.

Parâmetro	3 esferas	4 esferas	5 esferas
AR	0,6282	0,6086	0,5398
c	0,8224	0,8224	0,8052
d_A / d_{eq}	1,1841	1,0751	1,1477
ϕ	0,7628	0,7400	0,6704

A Tabela 3 apresenta os desvios relativos mínimos, máximos e médios das correlações testadas em relação aos resultados obtidos pelas simulações, sendo estes calculados pela Equação (14).

$$\delta = 100 \cdot \frac{C_D^{corr} - C_D^{sim}}{C_D^{sim}} \quad (14)$$

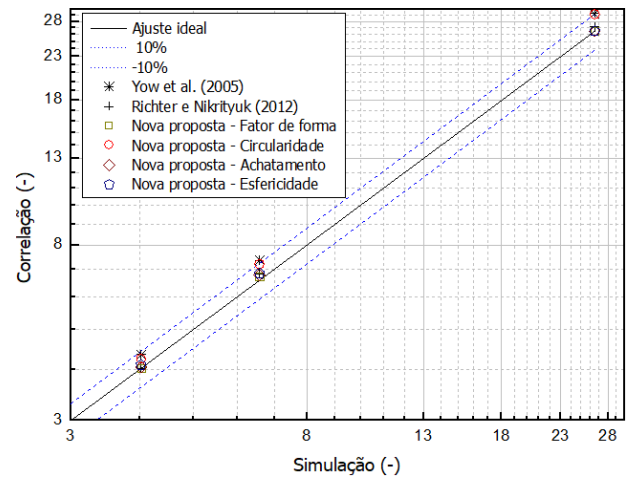
Em uma análise inicial, é possível observar que a nova correlação, em geral, apresenta um ajuste mais preciso dos valores obtidos pelas simulações. É possível observar que, comparando os ajustes que utilizam o fator de forma, há uma melhoria ao utilizar a nova correlação, apesar de apresentar um desvio mínimo e máximo maiores.

Tabela 3: Desvios relativos das correlações testadas em relação aos resultados obtidos por simulação.

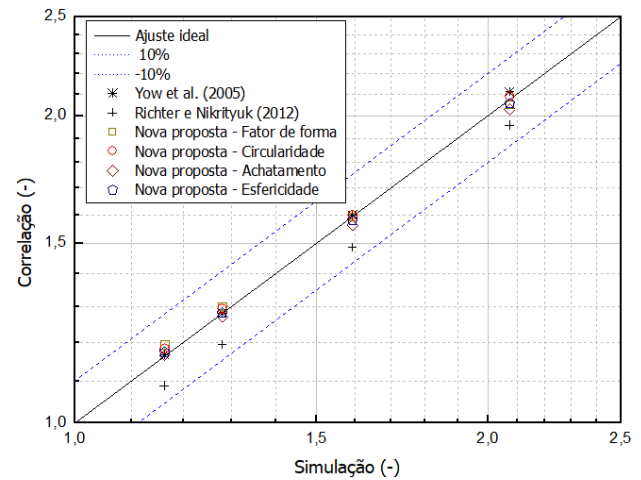
Eq.	Parâmetro	δ_{\min} (%)	δ_{\max} (%)	$\delta_{\text{médio}}$ (%)
(7)	-	-6,49	11,88	0,60
(8)	AR	-11,77	6,10	-2,31
	AR	-13,49	9,83	-1,05
(9)	c	-7,69	9,95	0,33
	d_A/d_{eq}	-4,37	3,90	0,01
	ϕ	-13,24	10,64	0,41

Para melhor visualizar se a nova proposta, de fato, apresenta melhores resultados, foram apresentados os ajustes mais detalhadamente nas Figuras (3) a (5), em que estes são comparados com os resultados numéricos. Os gráficos confirmam que, para as equações utilizando o fator de forma como parâmetro, o ajuste obtido pela nova proposta apresentou menores desvios, se comparado ao ajuste proposto pela Equação (8) – com exceção de dois pontos da Figura (3c) – correspondente à faixa em que $1000 \leq Re \leq 1500$.

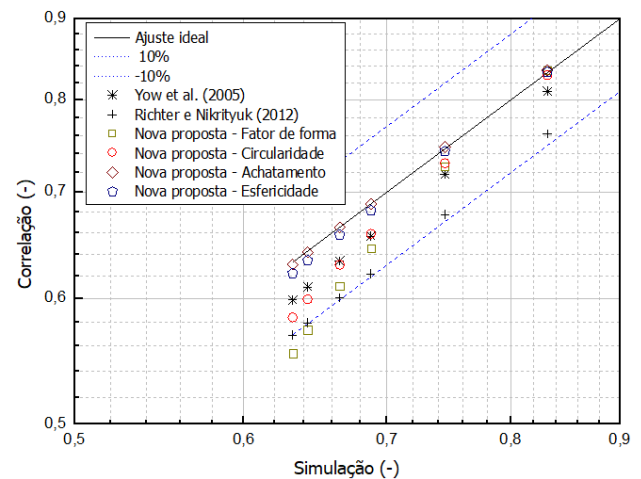
Ainda comparando tais regressões, é possível observar que a função logarítmica proposta é eficiente para aprimorar a acurácia, mostrando interferir na capacidade de estimar o coeficiente de arraste conforme se aumenta o número de Reynolds. Também é possível observar que a nova correlação, ao utilizar o achatamento, apresenta resultados ligeiramente melhores que a circularidade, entretanto, ambos apresentam melhorias significativas em relação aos outros ajustes.



(a) Comparação do arraste para $1 \leq Re \leq 10$.



(b) Comparação do arraste para $30 \leq Re \leq 100$.



(c) Comparação do arraste para $300 \leq Re \leq 1500$.

Figura 4: Comparação entre os resultados obtidos por simulação e os modelos das Equações (7), (8) e (9) para o aglomerado de três partículas.

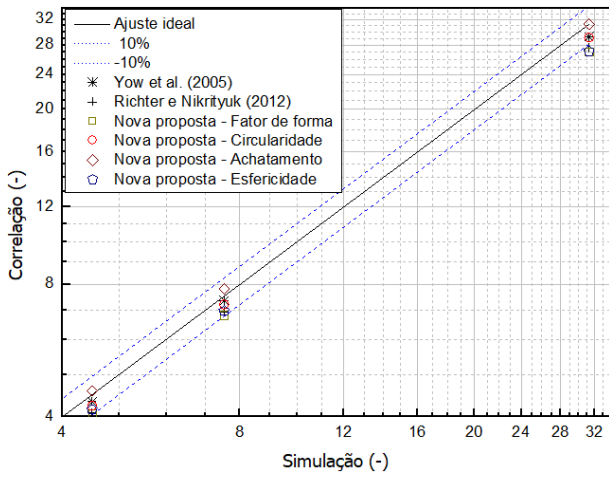
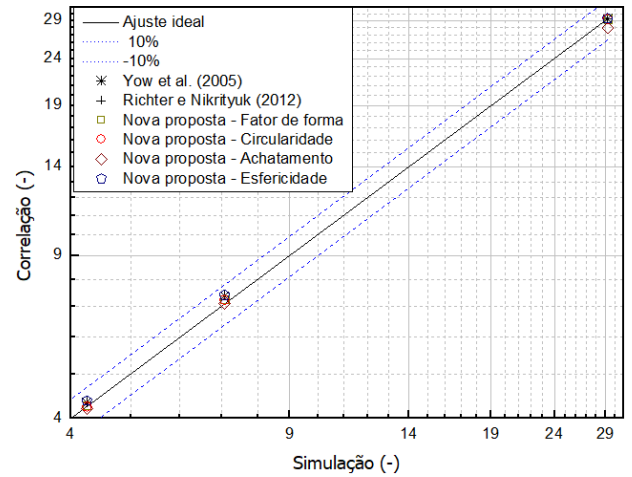
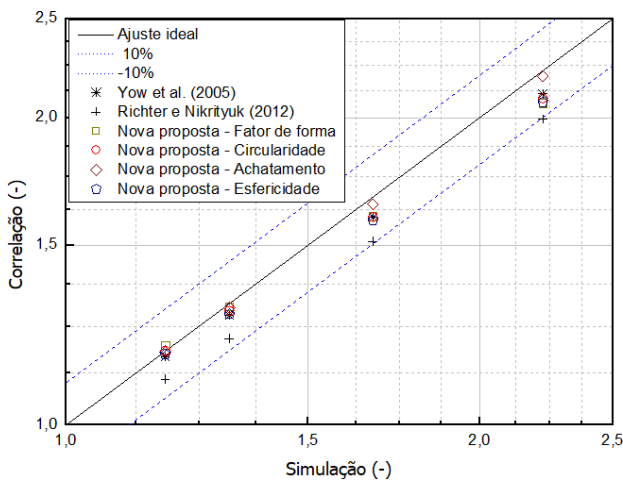
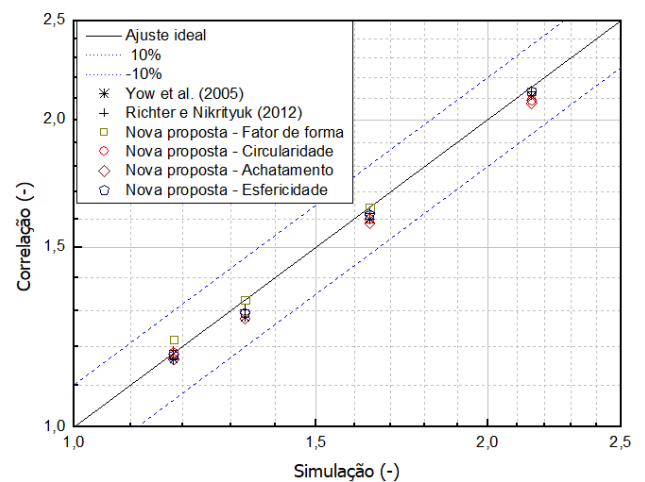
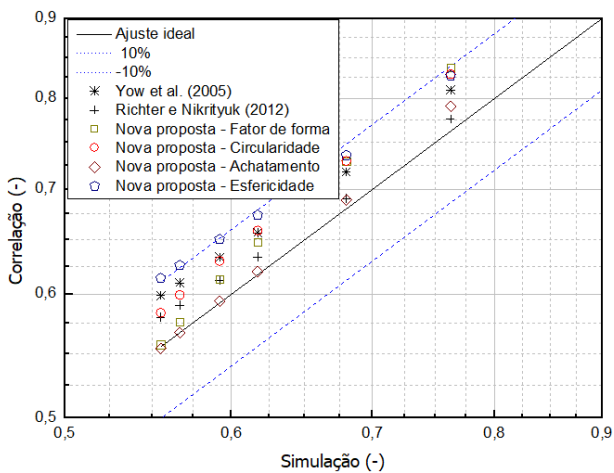
(a) Comparação do arraste para $1 \leq Re \leq 10$.(a) Comparação do arraste para $1 \leq Re \leq 10$.(b) Comparação do arraste para $30 \leq Re \leq 100$.(b) Comparação do arraste para $30 \leq Re \leq 100$.(c) Comparação do arraste para $300 \leq Re \leq 1500$.

Figura 5: Comparação entre os resultados obtidos por simulação e os modelos das Equações (7), (8) e (9) para o aglomerado de quatro partículas.

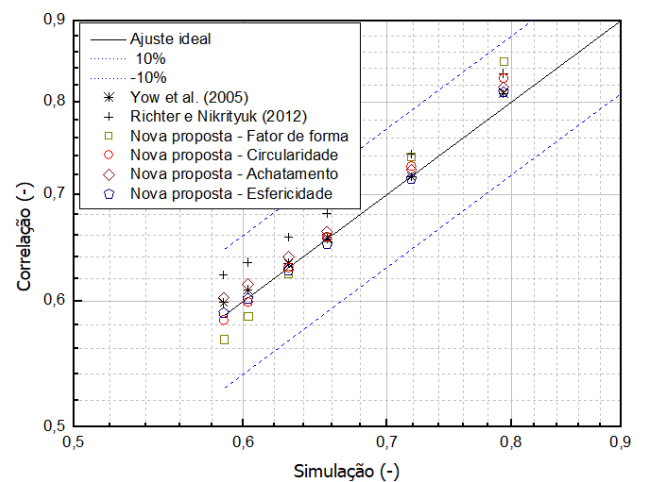
(c) Comparação do arraste para $300 \leq Re \leq 1500$.

Figura 6: Comparação entre os resultados obtidos por simulação e os modelos das Equações (7), (8) e (9) para o aglomerado de cinco partículas.

CONCLUSÕES

Neste estudo, foram realizadas simulações numéricas de escoamentos em estado estacionário em torno de três conformações de aglomerados de partículas compostos de partículas esféricas. A velocidade do fluido variou de forma a estimar o coeficiente de arraste para uma faixa de Reynolds entre 1 e 1500. Os resultados obtidos foram utilizados para ajustar duas correlações da literatura e propor uma nova correlação. Para a nova correlação, foram testados quatro parâmetros geométricos diferentes, visando avaliar qual melhor se ajusta aos dados simulados.

A implementação da função logarítmica na correlação de Richter e Nikrityuk (2012) mostrou-se fundamental para aprimorar a acurácia em relação aos ajustes obtidos pelas correlações da literatura, para toda a faixa de Reynolds testada. O uso do fator de forma mostrou-se ligeiramente mais eficaz na nova correlação, porém, o uso do achatamento apresentou um aprimoramento significativo na capacidade de representar os resultados, apresentando desvios relativos entre -4,37% e 3,90% com um desvio relativo médio de 0,0098% e desvio padrão de 1,98%.

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A, B, C,	Coefficientes de ajuste das
D, E, F,	correlações de Richter e
G, H	Nikrityuk e da nova proposta
A_P	Área projetada
A_r	Fator de forma da partícula
c	Circularidade da partícula
C_D	Coefficiente de arraste
d_A	Diâmetro equivalente superficial
d_{eq}	Diâmetro equivalente volumétrico
$d_{ }$	Diâmetro paralelo
d_{\perp}	Diâmetro perpendicular
F_D	Força de arraste
F_1	Função de transição
k	Energia cinética turbulenta

P	Pressão
P_P	Perímetro projetado
P_k	Produção de energia cinética turbulenta
Re	Número de Reynolds
t	Tempo
u	Velocidade do fluido
x	Posição do fluido no eixo cartesiano

Letras Gregas

α, β, σ	Coefficientes de fechamento das equações de turbulência
δ	Desvio relativo
ρ_f	Densidade do fluido
$\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$	Coefficientes de ajuste da correlação de Yow
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ϕ	Esfericidade da partícula
Ψ	Parâmetro geométrico genérico
ω	Taxa dissipativa turbulenta

Sobrescrito

corr	Resultado obtido pela correlação
sim	Resultado obtido por simulação

Subscritos

i, j, k	Eixos cartesianos
f	Fluido
p	Partícula
t	Turbulento

Siglas e Acrônimos

CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
<i>PRESTO!</i>	Pressure Staggering Option
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Número de Processo 140412/2020-4.

REFERÊNCIAS

- ANSYS Inc. (2012), ANSYS Meshing User's Guide.
- BAGHERI, G.; BONADONNA, C. (2016), On the Drag of Freely Falling Non-Spherical Particles, *Powder Technology*, Vol 301, p.526-544.
- BEESTRA, R.; VAN DER HOEF, M.; KUIPERS, J. (2006), A Lattice-Boltzmann Simulation Study of the Drag Coefficient of Clusters of Spheres, *Computers and Fluids*, Vol 35, p.966-970.
- CLIFT, R.; GRACE, J.R.; WEBER, M.E. (1978), *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press, Inc., New York.
- DEEN, N.G.; KRIEBITZSCH, S.H.L.; VAN DER HOEF, M.A.; KUIPERS, J.A.M. (2012), Direct Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in Dense Fluid-Particle Systems, *Chemical Engineering Science*, Vol 81, p.329-344.
- DEGLON, D.; MEYER, C. (2006), CFD Modelling of Stirred Tanks: Numerical Considerations, *Minerals Engineering*, Vol 19, p.1059-1068.
- DELACROIX, B.; RASTOUEIX, J.; FRADETTE, L.; BERTRAND, F.; BLAIS, B. (2021), CFD-DEM Simulations of Solid-Liquid Flow in Stirred Tanks Using a Non-Inertial Frame of Reference, *Chemical Engineering Science*, Vol 230, 116137.
- FERZIGER, J.H.; PERIĆ, M. (2002), *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, New York.
- HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. (1989), Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles, *Powder Technology*, Vol 58, p.63-70.
- HÖLZER, A.; SOMMERFELD, M. (2008), New Simple Correlation Formula for the Drag Coefficient of Non-Spherical Particles, *Powder Technology*, Vol 184, p.361-365.
- KUWAGI, K.; TAKANO, K.; HORIO, M. (2000), The Effect of Tangential Lubrication by Bridge Liquid on the Behavior of Agglomerating Fluidized Beds, *Powder Technology*, Vol 133, p.287-298.
- LANE, G.L. (2017), Improving the Accuracy of CFD Predictions of Turbulence in Tank Stirred by a Hydrofoil Impeller, *Chemical Engineering Science*, Vol 169, p.188-211.
- LEITH, D. (1987), Drag on Nonspherical Objects, *Aerosol Science Technology*, Vol 6, p.153-161.
- NIKOLOPOULOS, A.; PAPAFOITOU, D.; NIKOLOPOULOS, N.; GRAMMELIS, P.; KAKARAS, E. (2010), An Advanced EMMS Scheme for the Prediction of Drag Coefficient Under a 1.2 MWth CFBC Isothermal Flow – Part I: Numerical Formulation, *Chemical Engineering Science*, Vol 65, p.4080-4088.
- RICHTER, A.; NIKRITYUK, P.A. (2012), Drag Forces and Heat Transfer Coefficients for Spherical, Cuboidal and Ellipsoidal Particles in Cross Flow at Sub-Critical Reynolds Numbers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 55, p.325-337.
- SENIOR, R.C.; BRERETON, C. (1992), Modelling of Circulating Fluidized-Bed Solids Flow and Distribution, *Chemical Engineering Science*, Vol 47, p.281-296.
- TRAN-CONG, S.; GAY, M.; MICHAELIDES, E.E. (2004), Drag Coefficients of Irregularly Shaped Particles, *Powder Technology*, Vol 139, p.21-32.
- VAN DOORMAAL, J.P.; RAITHBY, G.D. (1983), Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, *Numerical Heat Transfer*, Vol 7, p.147-163.
- WANG, L.; WU, C.; GE, W. (2017), Effect of Particle Clusters on Mass Transfer Between Gas and Particles in Gas-Solid

Flows, Powder Technology, Vol 319,
p.221-227.

YOW, H.N.; PITT, M.J.; SALMAN, A.D.
(2005), Drag Correlations for Particles of
Regular Shape, Advanced Powder
Technology, Vol 16, p.363-372.