

Montagem e validação de bancada para estudo de sedimentação em fluido Newtoniano

Assembly and validation of a teste bench for sedimentation evaluation in Newtonian fluid

RESUMO

O estudo da sedimentação é muito importante tanto para avaliação de processos industriais, quanto para o estudo de fenômenos naturais. Exemplo do primeiro caso é o processo de perfuração de poços de petróleo, onde deve-se garantir que o fluido utilizado consiga transportar os cascalhos gerados, para o segundo caso tem-se como exemplo o estudo de sedimentação de poluentes. O presente trabalho tem como objetivo a montagem e validação de uma bancada para estudos de sedimentação em fluidos newtonianos e não newtonianos. Tal aparato experimental deve possibilitar o registro da posição e tempo de partículas esféricas sedimentando em fluido newtoniano e não newtoniano. Para validação foram feitos lançamentos isolados de esferas de tungstênio com 4 diâmetros diferentes em água. Os lançamentos foram realizados utilizando uma pinça, e o recolhimento foi feito por uma válvula fixada no fundo do tanque. A coleta de dados foi realizada através de gravações do experimento. Após a realização dos testes, foram obtidos resultados com um erro até 4% na velocidade terminal, porém devido ao baixo número de testes considerados, ainda serão necessárias algumas melhorias no método proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Velocidade Terminal. Fluido Newtoniano. Partícula esférica.

ABSTRACT

The study of sedimentation is very important as well to the evaluation of the industrial process, as to study of natural phenomena. An example of the first case is the process of oil well drilling, where should guarantee the transportation of generated cuttings, for the second case we have an example of the study of pollutant sedimentation. The present work has as objective the assembly and validation of a teste bench for sedimentation evaluation in a Newtonian and non-Newtonian fluid. For the evaluation was made isolated releases of tungsten spheres with 4 different diameters in water. The releases were made with tweezers, and the recoil was made with a valve fixed in the bottom of the tank. The recording of the experiment collected the data. After the realization of the tests, results were obtained with an error until 4% in terminal velocity, but due to the small number of tests considered still are needed a few improvements in the proposed method.

KEYWORDS: Terminal velocity. Newtonian fluid. Spherical particle.

Victor Emanuel Santana
victors.1999@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Eduardo Matos Germer
eduardomg@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O processo de sedimentação pode ser descrito como o acúmulo de partículas sólidas em um meio fluido, seja ele líquido ou gasoso. Segundo Benvindo *et al.* (2010), a sedimentação pode ocorrer em queda livre, ou seja, quando a partícula imersa em um fluido tem seu movimento como resultado da força gravitacional. Nesse tipo de sedimentação as forças atuantes na partícula são a da gravidade, a de empuxo e a força de arrasto. É possível verificar a sedimentação em queda livre, caso a porcentagem em peso de sólido seja até 15% (Benvindo *et al.*, 2010). A velocidade terminal, ou seja, a velocidade máxima e constante, que a partícula atinge ao sedimentar em um fluido, é obtida pelo levantamento das forças motrizes e de resistência ao movimento, que neste momento são equivalentes, ou seja, o somatório das forças atuando sobre a partícula é nulo.

O fenômeno de sedimentação pode ser observado em muitos processos industriais, tais como na perfuração de poços, em processos de homogeneização na indústria alimentícia, no transporte de grãos, assim como em fenômenos naturais, como o fluxo de lava, a sedimentação de poluentes no ar, a polinização de plantas, entre outros. Portanto, o estudo e a compreensão desse fenômeno são bastante importantes para a indústria e para a ciência.

Estudos nesta área têm como objetivo identificar padrões, que possibilitem a previsão de fenômenos. Com isto, a partir do conhecimento do tipo de fluido, das condições do escoamento, do particulado envolvido, torna-se possível prever o processo de sedimentação e conseqüentemente avaliar qual a altura de leitos de cascalho em escoamentos de fluidos de perfuração, por exemplo.

A literatura é vasta em estudos relacionados à sedimentação, como por exemplo Song *et al.* (2017), que tinham como objetivo propor um novo modelo para prever o coeficiente de arrasto e a velocidade de sedimentação de partículas em um fluido newtoniano, os autores aplicaram um procedimento similar ao que foi utilizado no presente artigo. Assim como Song *et al.* (2017), Reynolds *et al.* (1989) também realizaram experimentos em condições similares, porém com o objetivo de analisar a velocidade de sedimentação de partículas em diversos fluidos. Elgaddaf *et al.* (2012) também realizaram estudos experimentais de forma similares para observar o comportamento de sedimentação em fluidos de perfuração.

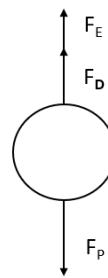
As metodologias experimentais dos trabalhos citados fazem o uso de uma bancada vertical com comprimento suficiente para que as esferas atingissem a velocidade terminal, além disto, usou diferentes esferas para analisar os efeitos de diâmetro e/ou densidade da partícula no experimento. Também é possível observar que as esferas sempre são lançadas a partir do repouso no eixo central do tanque para evitar o efeito de parede. Outro aspecto experimental importante é que esses e outros estudos prévios, tiveram como metodologia a liberação das esferas abaixo da superfície livre do fluido.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar uma metodologia de determinação experimental da velocidade terminal na sedimentação de uma esfera em fluido newtoniano. Tal metodologia foi desenvolvida com base na literatura, e validada através de comparação com soluções analíticas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Quando uma partícula sedimenta em um fluido homogêneo, ela é submetida a diversas forças, sendo as principais o peso, F_p , a força de arrasto, F_D , e a força de empuxo, F_E (Elgaddafi *et al.*, 2012). Segundo Nunes *et al.* (2004), quando uma esfera de diâmetro d , e densidade ρ_e , é submetida a sedimentação em um fluido viscoso, ou seja, onde o atrito entre fluido e partícula tem importância considerável na força de resistência ao movimento, e ao considerar o meio infinito, ou seja, desprezando os efeitos de parede, sob o efeito gravitacional g , ela acelera até que o equilíbrio entre as forças de peso, F_p , de arrasto, F_D , e de empuxo, F_E , seja atingido:

Figura 1 – Forças atuantes na esfera.



Fonte: Autoria própria (2019).

No momento em que a partícula atinge a velocidade terminal, aplicando a 2ª lei de Newton à partícula (Fig.1), tem-se o seguinte balanço de forças:

$$F_E + F_D - F_p = 0 \quad (1)$$

Isso significa que a partícula não acelera mais, atingindo assim uma velocidade máxima constante, denominada velocidade terminal. É possível calcular a velocidade terminal para escoamentos viscosos com $Re \geq 1000$ através da equação empírica proposta por Zanker (1980):

$$v_T = 1,74 \left[dg \left(\frac{\rho_e}{\rho_f} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

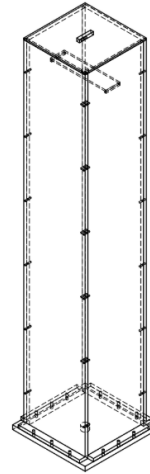
Onde v_T é a velocidade terminal, ρ_f é a massa específica, ρ_e é a densidade da esfera, d é o diâmetro da esfera e g é a aceleração gravitacional. É importante notar, que a equação (2) não considera um fator de parede, assim tal efeito é desprezado. Segundo Atappatu *et al.* (1990), o efeito de parede pode ser desprezado quando $0 \leq d/D \leq 0,95$ e o $Re \geq 20000$. Onde D é o diâmetro do tanque.

METODOLOGIA

Para a obtenção experimental da velocidade terminal foi construído um tanque de acrílico (Fig.2) de seção quadrada de 20x20 cm e uma altura de 1,2m. Nele foi instalado uma válvula de esfera de 3/4" de aço inox no fundo do tanque e um gabarito posicionado a 1m do fundo, para garantir que a esfera seja solta do centro do tanque. A fixação das paredes com a base foi feita através de cola e parafusos. Também foi utilizado silicone em alguns lugares para garantir a

vedação. Após a construção, o tanque foi preenchido com água para validar o método em fluido newtoniano.

Figura 2 – Ilustração do tanque.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para o teste foram utilizadas 4 esferas de tungstênio de diferentes tamanhos para serem soltas dentro do fluido, tendo elas diâmetros 2 mm, 3 mm, 4,76 mm (3/16”) e 5,56 mm (7/32”).

Após encher o tanque com água, foram aguardadas 12 horas para que as bolhas de ar subissem e assim dar início aos testes. Antes de iniciar a coleta de dados, foram feitos alguns lançamentos para definir como as esferas seriam lançadas; como seriam coletadas após o lançamento; além de ajustar o posicionamento da câmera para gravar as imagens.

Baseado em outros experimentos como Song *et al.* (2017) e Reynolds *et al.* (1989), as esferas foram lançadas dentro da água, e o mais próximo da superfície possível. Todas as esferas foram lançadas, de forma isolada, começando com a de maior diâmetro e indo até a de menor. Assim como Atapattu *et al.* (1995), foram realizadas 4 repetições com a mesma esfera e os valores utilizados foram as médias dos valores obtidos pelos experimentos. Também foram calculados os desvios-padrões amostrais dos valores obtidos experimentalmente, e foi observado que a dispersão em relação ao valor médio da velocidade é pequena.

A obtenção de dados do experimento foi realizada através de vídeo, onde foi analisada a posição da esfera em relação ao tempo através de uma fita métrica colada dentro do tanque, além disso foi utilizado o software *Tracker* para o cálculo das velocidades. O *Tracker* é um software livre de análise de vídeo que fornece a posição da partícula em cada instante de tempo, por meio da análise dos *frames* da gravação. Nele é possível definir uma referência de tamanho real em uma escala no vídeo, além disso, o mesmo plota gráficos e monta tabelas com os dados obtidos na execução.

RESULTADOS

Através da equação (2) foi possível chegar de forma analítica às velocidades terminais para cada esfera como mostrado na tabela:

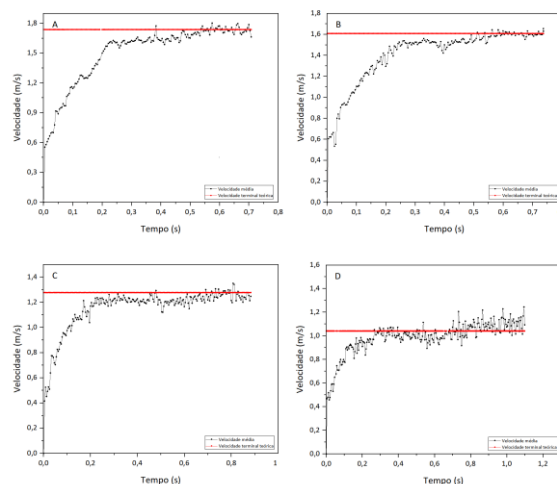
Tabela 1 – Velocidade terminal teórica

	Diâmetro (mm)	Velocidade terminal (m/s)
A	5,556	1,737
B	4,763	1,608
C	3	1,277
D	2	1,042

Fonte: Autoria própria (2019).

Apesar de terem sido feitas pelo menos 4 repetições com cada esfera, foi possível retirar dados relevantes de apenas 2 testes de cada partícula:

Figura 3 – Gráficos de evolução da velocidade de sedimentação com o tempo e da velocidade terminal teórica, para os diâmetros de 5,56 mm (A), 4,76 mm (B), 3 mm (C), 2 mm (D).



Fonte: Autoria própria (2019).

Nos gráficos da Fig.3 é possível observar que as velocidades das esferas tendem a estabilizar em, aproximadamente, 0,2s e que o tempo de queda aumenta conforme o diâmetro da esfera diminui. Observando a velocidade média a partir desse tempo até o final da queda da partícula, é possível analisar um erro em relação a velocidade terminal calculada anteriormente (Tabela 1):

Tabela 2 – Velocidade terminal experimental

Diâmetro (mm)	Velocidade média (m/s)	Desvio padrão	Erro (%)
5,556	1,669	0,06885	3,91
4,763	1,546	0,06610	3,85
3	1,226	0,04633	3,99
2	1,036	0,06907	0,58

Fonte: Autoria própria (2019).

CONCLUSÃO

Apesar dos erros calculados serem relativamente baixos, o método experimental ainda necessita de melhorias, tais como: Avaliação de incerteza experimental da bancada, avaliação do erro de paralaxe no cálculo da velocidade, avaliação do erro de leitura devido à refração da luz no tanque, implementação de dispositivo automático para liberação da partícula, avaliação do efeito da parede no experimento e definição da profundidade a partir da superfície livre para liberação da partícula. Além disto, ainda é necessário validar a bancada/metodologia para fluidos não newtonianos (viscoplástico e tixotrópico). De qualquer forma os resultados obtidos até o momento indicam que a metodologia utilizada é promissora.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC/UTFPR, ao Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos – CERNN.

REFERÊNCIAS

BENVINDO, A. L.; et al. **Tratamento de Minérios**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

SONG, X; XU, Z.; LI, G.; PANG, Z.; ZHU, Z. A new model for predicting drag coefficient and settling velocity of spherical and non-spherical particle in Newtonian fluid. **Powder Technology**. n. 321, p. 242-250, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591017306617?via%3Dihub>>. Acesso em: 12 ago. 2019.

REYNOLDS, P.A; JONES, T.E.R. An Experimental Study of the Settling Velocities of Single Particles in Non-Newtonian Fluids. **International Journal of Mineral Processing**. n. 25, p. 47-77, 1989.

ELGADDAFI, R; AHMED, R.; GEORGE, M.; GROWCOCK, F. Settling behavior of spherical particles in fiber-containing drilling fluids. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 84-85, p. 20-28, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410512000381?via%3Dihub>>. Acesso em: 12 ago. 2019.

NUNES, J.F.; ATAÍDE, C.H.; MELO, F.R.G. Velocidade terminal de esferas em líquidos não newtonianos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5, 2004, Curitiba.

ATAPATTU, D.D.; CHHABRA, R.P.; UHLHERR, P.H.T. Creeping sphere motion in Herschel-Bulkley fluids: flow field and drag. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. n. 59, p. 245-265, 1995.

ATAPATTU, D.D.; CHHABRA, R.P.; UHLHERR, P.H.T. Wall effect for spheres falling at small reynolds number in a viscoplastic medium. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. n. 38, p. 31-42, 1990.