

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **Proposta de coluna de decantação para ensaios de sedimentos**

*Jorge Luis Zegarra Tarqui<sup>1</sup>; Edna Maria de Faria Viana<sup>2</sup>; Aloisyo Portugal Maia Saliba<sup>3</sup>; Keila Cristina Fernandes de Oliveira Dourado<sup>4</sup>, Francisco Antunes Guimarães Rodrigues<sup>5</sup> Carlos Barreira Martinez<sup>6</sup> e Dieimys Santos Ribeiro<sup>7</sup>*

**Abstract:** Determining the velocity of fall (VF) or sedimentation is an important parameter for understanding sediment dynamics, as it allows us to understand how sediment concentration is distributed and how sediments are deposited on the bed. However, the variety of sediments, grain shapes and their granulometric distribution are a complicating factor, since it is difficult to identify a single device that, given these variations, allows VF measurements to be performed with results. Several authors are dedicated to this and have produced devices that can be used in this type of investigation. This has resulted in a set of solutions that, within restrictions on particle size and grain shape produced, produce results with errors of less than 5%. This article presents the proposal for a decantation column designed to determine the VF of particles originating from mining processes. For this purpose, a survey was carried out on devices developed around the world and available in literature. The result was an apparatus with a square cross-section of 400mm, a height of 2.400mm and outlets spaced 200mm apart, with a system that allows the collection of material simultaneously and that can be produced in a simple way and at a cost compatible with the limitations or existing ones.

**Keywords:** Settling column; falling velocity; sediments.

**Resumo:** A determinação da velocidade de queda (VQ) ou de sedimentação é um parâmetro importante para o entendimento da dinâmica dos sedimentos pois permite entender como se distribui a concentração de sedimentos e como se dá a deposição deles no leito. Entretanto a variedade de sedimentos oriundos de processos de mineração, produz uma grande diversidade de formatos de grãos e de distribuição granulométrica. Esse fato é um complicador uma vez que é difícil se identificar um único aparato que, diante dessas variáveis, permita fazer as medidas de VQ com precisão. Diversos autores têm-se dedicado a isso e tem produzido dispositivos que podem ser usados nesse tipo de investigação. Isso resultou em um conjunto de soluções que, dentro de restrições de tamanho de partícula e de formato de grãos produzem resultados com erros menores do que 5%. Esse artigo apresenta a proposta de uma coluna de decantação destinada a determinar a VQ de partículas oriundas de processos de mineração. Para isso fez-se uma pesquisa sobre aparelhos desenvolvidos ao redor do mundo e disponíveis na literatura. O resultado foi um aparelho com seção quadrada de 400 mm com altura de 2400mm e com saídas espaçadas de 200mm com um sistema que permite a coleta de material simultaneamente e que pode ser produzido de forma simples e com custo compatível com as limitações ora existentes.

**Palavras-Chave** – Coluna de decantação; velocidade de queda; sedimentos.

<sup>1</sup> Prof. Associado da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH-MG, jlztarqui@yahoo.com.br;

<sup>2</sup> Profa. Titular da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH-MG, ednamfv@ufmg.br;

<sup>3</sup> Diretor técnico da TEC3 Geotecnica e Recursos Hídricos Ltda. R. Matias Cardoso, 271 - 4º andar, BH, MG. asaliba@tec3engenharia.com.br;

<sup>4</sup> Engenheira Sênior Recursos Hídricos da VALE, Edifício Concórdia Corporate 34006-049 - Nova Lima – MG, keila.oliveira@vale.com;

<sup>5</sup> Engenheiro da PROGEN da VALE, Rua Matias Cardoso, nº 169 - 5º andar, Santo Agostinho, BH- MG, francisco.rodrigues@progen.com.br.

<sup>6</sup> PPGEM /MPEH / UNIFEI &. PPGMEC / UFMG. Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: [cmartinez@unifei.edu.br](mailto:cmartinez@unifei.edu.br).

<sup>7</sup> Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEEL) - UNIFEI. dieimys@unifei.edu.br

## INTRODUÇÃO

A determinação da velocidade de queda em colunas de decantação é uma tarefa que envolve uma série de incertezas uma vez que a origem do material influencia a massa específica do material e o formato das partículas. Quando se observa esse fenômeno dentro de um ambiente de mineração, vê-se que o sedimento apresenta maior massa específica, pode ter forma distinta dos sedimentos naturais, apresentar desagregação em contato com o escoamento, e pode ter um comportamento de fluido não-newtoniano dependendo da concentração de sólidos na mistura água e sedimento (Taqui, 2023). Os aparelhos de medição apresentados na literatura têm formato tubular, com dimensões variadas e têm sido descritos de forma sucinta e sem apresentar detalhes construtivos e de operação. Além disso os aparelhos de teste têm diversas limitações que vão desde as dimensões da seção de escoamento, a altura de queda e, portanto, a dimensão longitudinal do equipamento e a forma de medição da concentração do sedimento. As interferências causadas por esses elementos podem induzir erros de leitura que impactam severamente os resultados. Para isso, tem-se procurado desenvolver dispositivos que minimizem esses fenômenos e que permitam medições precisas e confiáveis. Este artigo apresenta uma proposta de aparelho detalhada no intuito de oferecer ao meio técnico uma orientação de sistema que possa evoluir para um dispositivo padrão que possa ser utilizado no cenário de mineração no Brasil.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de transporte de sedimentos é um assunto de interesse da engenharia há séculos. Diversos autores propuseram modelos de aparelhos destinados a dar suporte a esse tipo de investigação. Pode-se considerar que o tubo de Owen projetado em HR Wallingford (Owen, 1982), com as modificações que sofreu ao longo de décadas, é o principal aparelho para a determinação da velocidade de sedimentação. Esse aparelho apresentado na pg. 38 dessa referência é uma coluna de 2.250mm de comprimento com diâmetro de 50mm (~ 2 polegadas) e conta com um sistema coleta inferior que permite coletar amostras de sedimentos. Na mesma linha de ação Dearnaley (Dearnaley, 1996) propôs um sistema muito parecido em seu estudo sobre velocidades de decantação. O sistema de medição contava com um tubo de Owen com comprimento de 1.000 mm e diâmetro de 50 mm que era baixado na água, alinhando-se com o fluxo aprisionando e uma amostra da água é coletada. O tubo era recuperado e, à medida que é trazido acima da superfície, as amostras são então retiradas e analisadas. Em seu trabalho intitulado “The accuracy of particle size analyses utilizing settling tubes” Gibbs (Gibbs, 1972) apresenta um estudo sobre a influência das dimensões do tubo utilizado nos experimentos. Nesse trabalho o autor utilizou tubos com diâmetros de 5, 7,6, 12,8 e 30,5 cm, comprimentos de 80 e 140 cm. Para poder fazer uma aferição da precisão dos testes o autor utilizou microesferas de vidro de 0,02 a 0,03, 0,295 a 0,35 e 0,83 a 0,99 mm de diâmetro, e tamanhos de amostra de 0,05 a 4 g. Os resultados mostraram que tubos de 7,6 cm (3 in.) de diâmetro produziram imprecisões de até 34%, tubos de 12,8 cm (5 in.) de diâmetro produziram imprecisões inferiores a 8%, e tubos de 30,5 cm (12 in.) de diâmetro produziram imprecisões inferiores a 3%. Outro resultado apresentado foi o tamanho das amostras que variou de 1 a 2 gramas para sedimento grosso (0,3 a 2 mm) e de 0,6 gramas para sedimento fino (0,02 a 0,5 mm). No artigo “Instruments for particle size

and settling velocity observations in sediment transport" (Agrawal, 2000) os autores descrevem dois sensores para medição da distribuição granulométrica e da velocidade de sedimentação de partículas. O texto apresenta um aparato de teste com 50 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento posicionado verticalmente e equipado com uma hélice propulsora na parte inferior e com janelas de posicionamento do um emissor laser. Os autores citam que as amostras são aspiradas por meio de orifícios de 12,7 mm (1/2 polegada). O diâmetro do sistema de aspiração das amostras também foi objeto de estudos conduzidos por Gibbs (Gibbs, 1982) onde o autor concluiu que sistema de aspiração de sedimentos de diâmetros de 125 a 400  $\mu\text{m}$  rompiam os flocos de caulinita e de material natural em suspensão não tratado. Esses autores recomendaram que os diâmetros mínimos fosse de no mínimo 3.000  $\mu\text{m}$  (3mm). Devido à quebra de flocos de materiais provocados pelo tubo de Owen foram desenvolvidos sistema óticos que permitem a determinação do diâmetro da partícula e a velocidade de queda, tal como descrito nas págs. 98 e 99 por Maning *et al.* (2010). Um aparato para estudo experimental sobre a velocidade de queda de sedimentos finos foi apresentado por Wan *et al* (2015) que descreveu uma coluna de sedimentação de 2.500 mm de comprimento com 400 mm de diâmetro equipada com oito pontos de tomada de água distanciados de 200 mm. A figura 1 apresenta o modelo dessa coluna de decantação onde se pode ver (destaque) o sistema de acionamento simultâneo da coluna de decantação de forma a garantir que amostras sejam tomadas ao mesmo tempo.

Figura 1 – Coluna de decantação de Wan *et al* (2015).

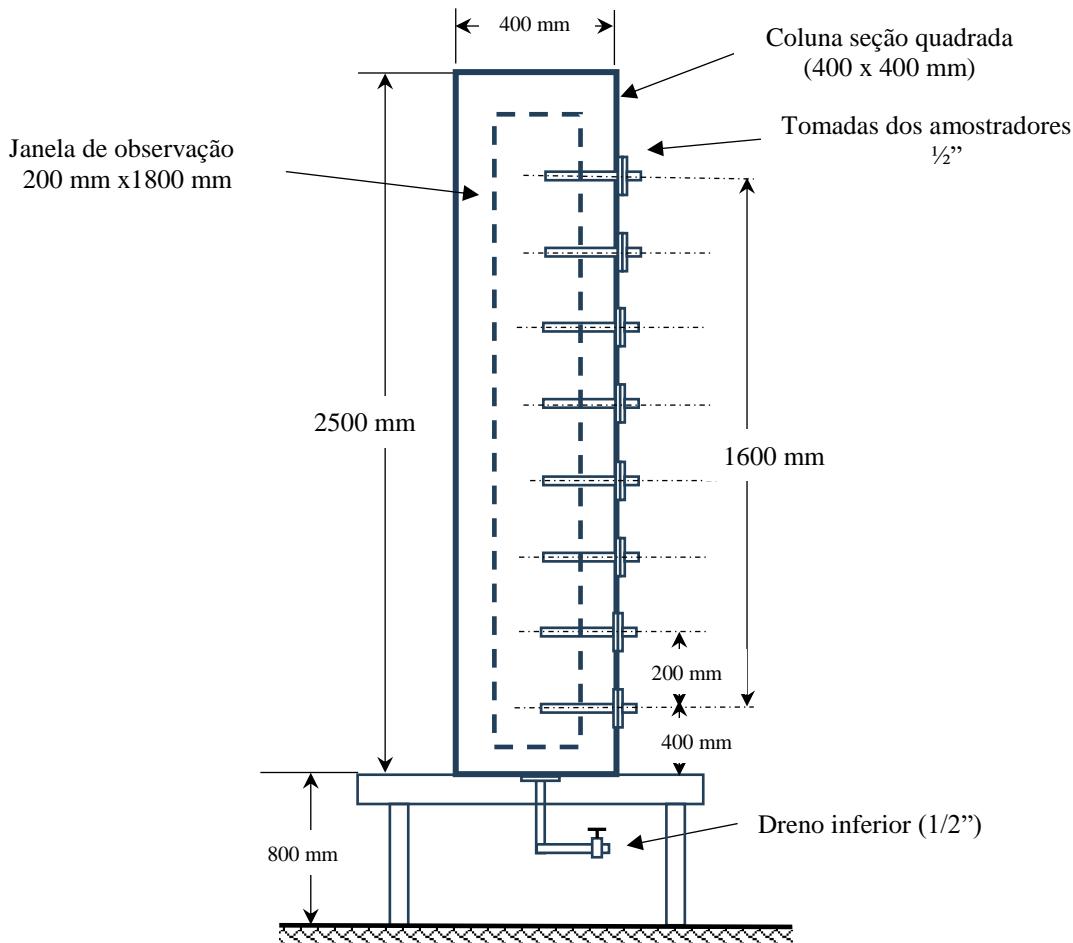


Entretanto, o texto não dá detalhes das dimensões dos amostradores e nem do posicionamento deles dentro da coluna. Com base nos aparelhos acima propomos um aparelho de medição que permita coletar amostras em uma coluna de sedimentação de forma simultânea e com configuração simples e materiais de fácil aquisição, tal como descrito a seguir.

## A COLUNA DE DECANTAÇÃO PROPOSTA

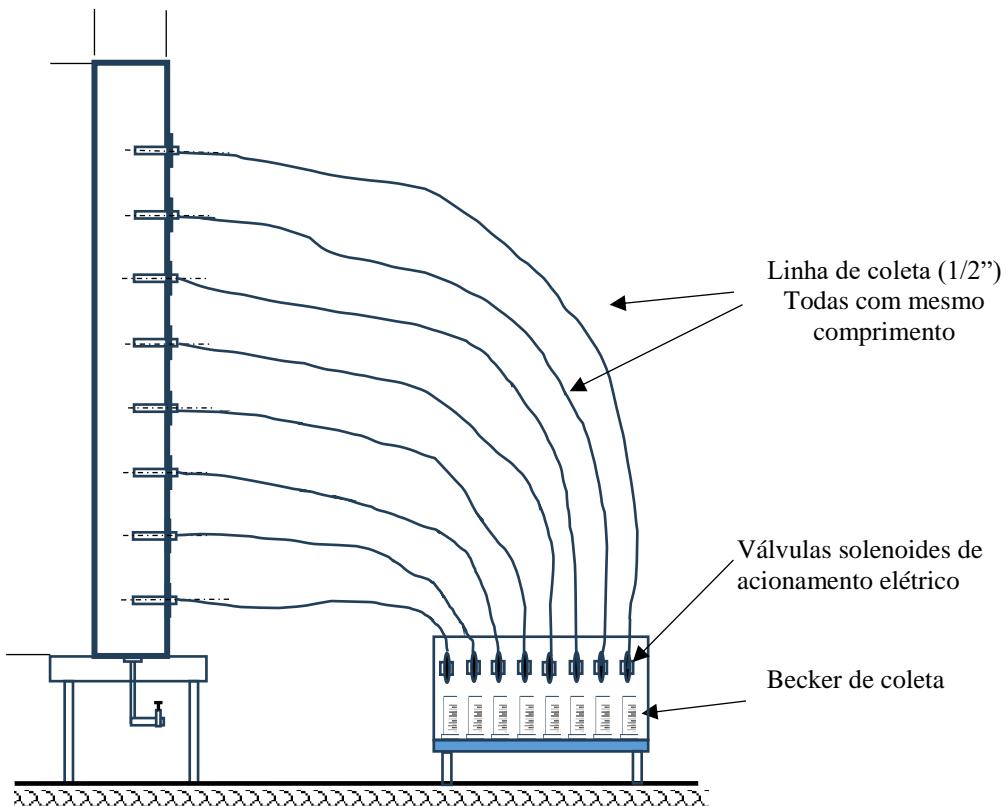
A proposta da coluna de decantação tal como citado por Tarqui *et al.* (2023) adotou uma seção transversal de coluna de 400 mm que é ligeiramente superior àquela recomendada por Gibbs (1972). Isso se deveu ao fato de a coluna proposta possuir seção quadrada em contraste com as experimentações anteriormente citadas que foram feitos em dutos de seção circular. A altura da coluna partiu das conclusões apresentadas por Gibbs (1972). Isso, a princípio permite calcular os diâmetros de partículas com imprecisões inferiores a 3%. O sistema de tomada de amostras foi posicionado a 200 mm de distância vertical seguindo as recomendações de Wan *et al.* (2015). Esse autor, entretanto, não deixa claro qual o diâmetro do duto amostrador. Dessa forma optou-se por seguir as recomendações de Agrawal (2000) que indicou um diâmetro de 12,7 mm (1/2 polegada) para esse tipo de amostrador. O sistema tem como condição operacional o fato de fazer todas as amostragens no mesmo horário. Para isso foi adotado um sistema de amostragem onde todos os pontos tenham as mesmas dimensões e desniveis permitindo que, a partir da abertura de válvulas simultaneamente se consiga uma mesma vazão. A figura 2 apresenta as dimensões principais dessa coluna de decantação.

Figura 2 – Coluna de decantação proposta.



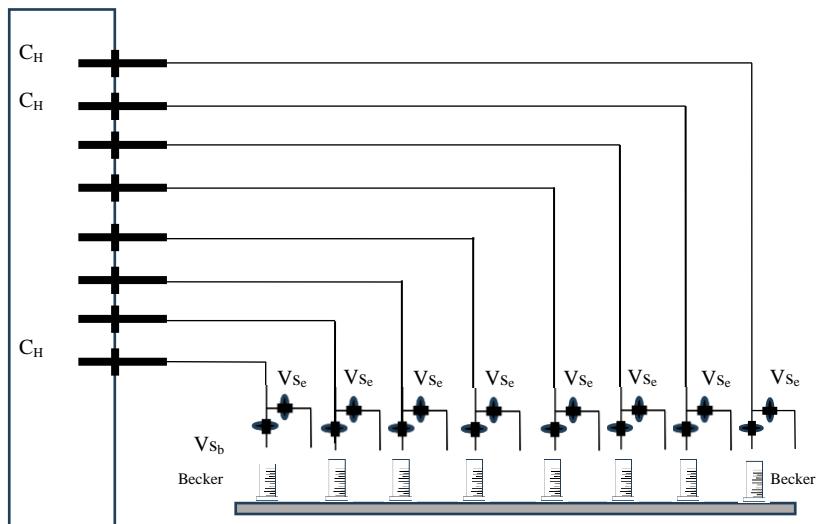
Para que as vazões sejam as mesmas em todos os pontos de amostragem adotou-se o esquema apresentado na figura 3, onde todos os comprimentos dos dutos são iguais. Para facilitar essa montagem optou-se por usar mangueiras de borracha com  $\frac{1}{2}$ " de diâmetro interno

Figura 3 – Esquema de tomada de amostras do aparato



A Figura 4 apresenta um esquema unifilar do sistema de coleta de amostras com ênfase no arranjo das válvulas. Nesse esquema pode-se observar as válvulas solenoides de expurgo ( $V_{Se}$ ) que são acionadas com o intuito de esvaziar a linha coletora de amostras. Após um tempo suficiente para a limpeza do sistema essas válvulas são desligadas, fechando o expurgo e imediatamente aciona-se as válvulas solenoides de saída para o Becker ( $V_{Sb}$ ) que alimentam um conjunto de Becker coletores de amostras. Após, os Beckers estarem cheios, fecham-se as válvulas e se recolhem as amostras. As válvulas solenoides devem ter um diâmetro de  $\frac{1}{2}$ " e estão ligadas aos coletores horizontais ( $C_H$ ) que devem ter diâmetro interno de  $\frac{1}{2}$ ". Para testar o conceito apresentado fez-se a opção por produzir um modelo na escala 1:4 onde se pode testar diversas opções de montagem da coluna e da janela de observação. Também foi possível testar o arranjo do sistema de coleta de amostras e do posicionamento das válvulas solenoides. A figura 5 apresenta uma foto do modelo em escala onde se pode observar as válvulas solenoides de expurgo ( $V_{Se}$ ) em vermelho e as válvulas solenoides  $V_{Sb}$  em preto. As saídas se encontram todas sob a mesma carga hidráulica e as vazões devem ser aproximadamente iguais permitindo que o tempo de amostragem seja igual em todas as alturas de coleta.

Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema de coleta de amostras



## RESULTADOS

Para testar o conceito apresentado se fez a opção por produzir um modelo na escala 1:4, onde se pode testar diversas opções de montagem da coluna e da janela de observação. Também, foi possível testar o arranjo do sistema de coleta de amostras e do posicionamento das válvulas solenoides. A figura 5 apresenta uma foto do modelo em escala onde se pode observar as válvulas solenoides de expurgo (VS<sub>e</sub>) em vermelho e as válvulas solenoides VS<sub>b</sub> em preto. As saídas se encontram todas sob a mesma carga hidráulica e as vazões devem ser aproximadamente iguais permitindo que o tempo de amostragem seja igual em todas as alturas de coleta. A vazão de saída dos coletores e consequentemente a velocidade e tempo dessa ação podem ser reguladas por meio de aumento da extensão dos tubos que ligam os coletores C<sub>H</sub> às válvulas de saída VS<sub>e</sub> e VS<sub>b</sub>. Uma alternativa é a instalação de um registro de controle de vazão a montante das válvulas de saída para os Beckers, entretanto essa alternativa pode criar um ponto de retenção de sedimentos indesejável e que, dependendo do tamanho dos sedimentos pode mascarar algumas amostragens. O ajuste da extensão dos tubos de ligação pode ser calculado por meio da equação de Darcy-Weisbach que é amplamente conhecida. Para isso deve-se tomar cuidado com os coeficientes de perda de carga e com a contabilização das perdas de carga localizadas. Recomenda-se que após o cálculo sejam feitos testes de ajuste dessas dimensões de forma a se obter resultados de tempo/vazão dentro das grandezas desejadas. Outra precaução a ser adotada é com o controle de temperatura dos ensaios. No caso de ser necessário elevar a temperatura mantendo-a em um valor pré-definido recomenda-se o uso de um sistema de aquecedores com termostato e com potência de 500 Watts que tem capacidade de estabilizar massa de água de até 400 litros (1,2 W/L) suficiente para o volume da coluna de sedimentação. Caso esse sistema não se mostre suficiente (baixas temperaturas) recomenda-se utilizar dois aquecedores de 500 W posicionados na diagonal da coluna. Para estabilizar o sistema no caso de temperaturas elevadas sugere-se posicionar a coluna de sedimentação em uma sala climatizada,

colocar a água com temperatura próxima daquela do ensaio e usar os termostatos para ajustes mais precisos de temperatura.

Figura 5 Modelo em escala da coluna de decantação

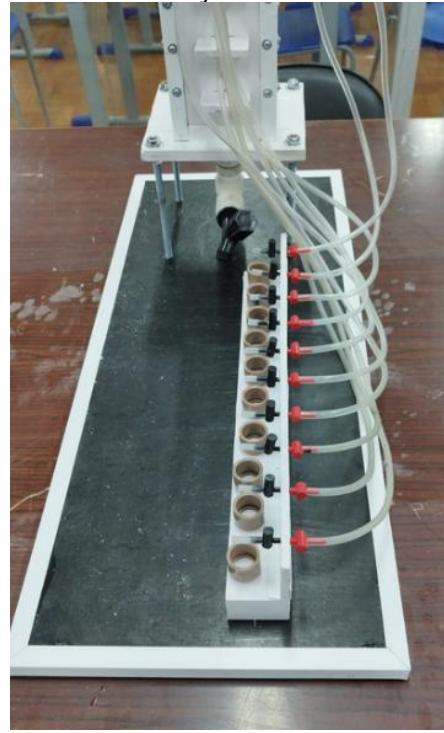


Figura 6 Modelo em escala da coluna de decantação com detalhes do coletor horizontal



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção do modelo físico 1:4 da coluna de decantação permitiu definir os seguintes aspectos construtivos do protótipo:

- a proposta apresentou um custo de construção muito menor comparado com à opção de construir o equipamento totalmente de acrílico. As peças de PVC expansivo são de custo relativamente menores comparados com as peças de acrílico.;
- definou-se um procedimento construtivo, o qual é mais simples na montagem. As peças podem ser solicitadas com cortes a laser predefinidos, o que permite obter uma montagem precisa e rápida;
- o material escolhido (PVC expandido) permite reduzir problemas de vazamentos, pois as peças de PVC podem ser coladas entre si, conseguindo uma boa hermeticidade;
- o uso de válvulas solenoides permite uma automatização do processo de coleta do material; e
- o equipamento pode ser desmontado caso seja necessário, parcialmente ou totalmente, permitindo seu traslado para outros ambientes.

Depois do envio do presente artigo, foi iniciado a construção do protótipo da coluna de decantação no laboratório da UNIFEI, logo dito equipamento será trasladado para o Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) onde serão feitos os experimentos com material proveniente de área de mineração.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à UNIFEI, VALE, ANEEL, FAPEMIG e CNPQ pelo suporte para realização desse trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- AGRAWAL, Y.C. & POTTSWICH, Y.C., "Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport," *Marine Geology*, vol. 168, p. 89±114, 20 March 2000.
- DEARNALEY, M.P., "Direct measurements of setting velocities in the Owen Tube: A comparison with gravimetric analysis," *Journal of Sea Research*, vol. 36, pp. 41 - 47, 1996.
- GIBBS R. L., "The accuracy of particle size analyses utilizing settling tubes," *Journal. of sedimentary petrology*, vol. Vol 42, nº 1, pp. 141 - 145, March 1972.
- GIBBS, R.J., KONWAR, L.N., "Effect of pipetting on mineral," *Environ. Sci. Technol*, vol. 12, pp. 119 -121, 1982.
- MANNING, A. J., BAUGH, J. V., SOULSBY, L., SPEARMAN, J. R. SPEARMAN AND WHITEHOUSE, R. J. S., Cohesive Sediment Flocculation and the Application to Settling Flux Modelling, S. S. Ginsberg, Ed., 2011.
- OWEN, M.W., "Determination of the settling velocities of," HR Wallingford, 1976.

WAN, Y., WU, H., ROELVINK, D., GU, F., "Experimental study on fall velocity of fine sediment in the Yangtze Estuary, China," *Ocean Engineering*, pp. 180-187, 27 May 2015.

TARQUI, J. L. Z, *Proposição de metodologia para estimativa de produção de sedimentos e turbidez nos diferentes cenários da mineração*, Belo Horizonte: UFMG, 2023.