

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

Projeto de aparato de teste de velocidade de queda de sedimento fino de mineração

*Edna Maria de Faria Viana¹; Nicolas Matheus Geara Gomes², Aloysio Portugal Maia Saliba³,
Rian Francisco Guedes Couto⁴, Athos de Melo Pimentel⁵, Keila Cristina Fernandes de Oliveira
Dourado⁶, Francisco Antunes Guimarães Rodrigues⁷ & Jorge Luis Zegarra Tarqui⁸*

Abstract: A sump is a reservoir used as a retention mechanism for sediments resulting from waste piles and existing mining accesses. The sizing depends on the fall velocity of the particles to be retained during the passage of the flow. Considering the limited dimensions of sumps, fine particles are often not retained due to the sedimentation time involved, and it is essential to study their fall velocity. The small size of these particles makes it difficult to determine the speed of fall using decanters and analyzing the fall image. Therefore, the use of beakers with different concentrations is more appropriate, as the concentrations in different beakers are evaluated. Equipment capable of rotating all samples simultaneously was designed to test samples with varying concentrations under the same mixing and stirring conditions. After this step, the protocol for analyzing the clarification time of the mixture is followed, and thus correlates with the speed of particle fall. The tests carried out on the equipment demonstrated that the operation met expectations, maintaining the mixtures in the same agitation condition at the beginning of the test, and thus allowing for an analysis with less uncertainty in the process of surveying the clarification speed of the mixture.

Resumo: Um *sump* é um reservatório utilizado como mecanismo de retenção dos sedimentos decorrentes das pilhas de estéril e dos acessos existentes na mineração. O dimensionamento depende da velocidade de queda das partículas a serem retidas durante a passagem do fluxo. Considerando as dimensões limitadas dos sumps, muitas vezes partículas finas não são retidas devido ao tempo de sedimentação envolvido, sendo fundamental estudar a sua velocidade de queda. O tamanho reduzido dessas partículas dificulta a determinação da velocidade de queda de partículas finas com a utilização de decantadores e análise da imagem da queda, tornando o uso de provetas com diferentes concentrações mais adequado, em que se avaliam as concentrações em diferentes provetas. Para que todas as amostras, com concentrações diferentes, sejam submetidas às mesmas condições de agitação de mistura, foi construído um equipamento capaz de girar todas as amostras simultaneamente. Após essa etapa é seguido o protocolo de análise do tempo de clarificação da mistura e assim correlaciona-se com a velocidade de queda das partículas. Os testes realizados no equipamento demonstraram que o funcionamento atendeu às expectativas deixando as misturas em condição de agitação iguais no início do teste, e assim, permitindo uma análise com menores incertezas no processo de levantamento da velocidade de clarificação da mistura.

Palavras-Chave – Velocidade de queda, partículas finas, sump, mineração.

1) Prof. Titular da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. ednamfv@ufmg.br

2) Graduando em Engenharia Civil da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. nicolasgeara@gmail.com

3) Diretor técnico da TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda. R. Matias Cardoso, 271 - 4º andar, BH, MG. asaliba@tec3engenharia.com.br

4) Graduando em Engenharia Ambiental da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. riancouto04@gmail.com

5) Graduando em Engenharia Ambiental da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. athos.ufmg@gmail.com

6) Edifício Concordia Corporate 34006-049 – Nova Lima – MG. Keila.oliveira@vale.com

7) PROGEN BH, Rua Mathias Cardoso 169, 5º andar, Santo Agostinho, BH-MG. Francisco.rodrigues@progen.com.br

8) Prof. Associado da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. jlztarqui@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Um dos maiores impactos da mineração é a intensificação de processos erosivos e de transporte de sedimentos, com efeitos em parâmetros físicos e químicos de qualidade de água a jusante caso não haja o correto controle ambiental.

A natureza dos solos tropicais, compostos em grande parte por frações finas (siltes e argilas), associada à pluviosidade elevada de regiões mineiras, com o agravante da não rara localização nas cabeceiras de bacias hidrográficas com relevos declivosos, tornam a tarefa de reter os materiais erodidos e transportados pelo escoamento superficial um grande desafio para a indústria extrativa mineral.

Uma das estratégias adotadas é a retenção dos sedimentos transportados por sedimentação em bacias escavadas no terreno natural (*sumps*) ou reservatórios, estes últimos associados à construção de um dique de contenção de sedimentos. Dificuldades de licenciamento ambiental dos diques, acrescida ao risco de ruptura associado, tem levado os mineradores a utilizarem amplamente os *sumps* como alternativa.

Tanto nos reservatórios dos diques quanto nos *sumps*, a eficiência de retenção das estruturas dependerá da velocidade de escoamento, uma vez que os sedimentos são transportados por arraste e suspensão, e da velocidade de queda das partículas. Tal qual numa caixa de areia de uma estação de tratamento de água, conceitualmente, a partícula será retida caso o deslocamento vertical ocorrido durante o percurso entre a entrada e saída do fluxo pela estrutura atinja níveis inferiores à elevação da soleira da saída.

Desta forma, determinar a velocidade de queda das partículas de sedimentos envolvidas é um passo fundamental na determinação da eficiência de retenção dos *sumps*, e consequentemente, da quantidade de estruturas necessárias para garantir um certo nível de retenção total.

Partículas finas (siltes e argilas) têm baixas velocidades de queda, o que dificulta a determinação em ensaios de sedimentação tradicionais. O próprio tamanho das partículas inviabiliza a filmagem da queda de partículas individuais para determinação da velocidade de queda. Segundo Rubey (1933) a velocidade de queda, das partículas finas, pode ser estimada pela equação de Stokes (1851). No entanto, segundo levantamento realizado por Costa (2024) a equação com maior aderência é a de Hwang (1989).

Este trabalho apresenta a proposição de um aparato de teste que se baseia na determinação da concentração de sedimentos para avaliar a velocidade de queda, utilizando provetas contendo sedimentos em diferentes concentrações. Após a agitação simultânea, partindo de diferentes concentrações iniciais e decorrido um intervalo de tempo conhecido, é possível determinar a granulometria dos sedimentos

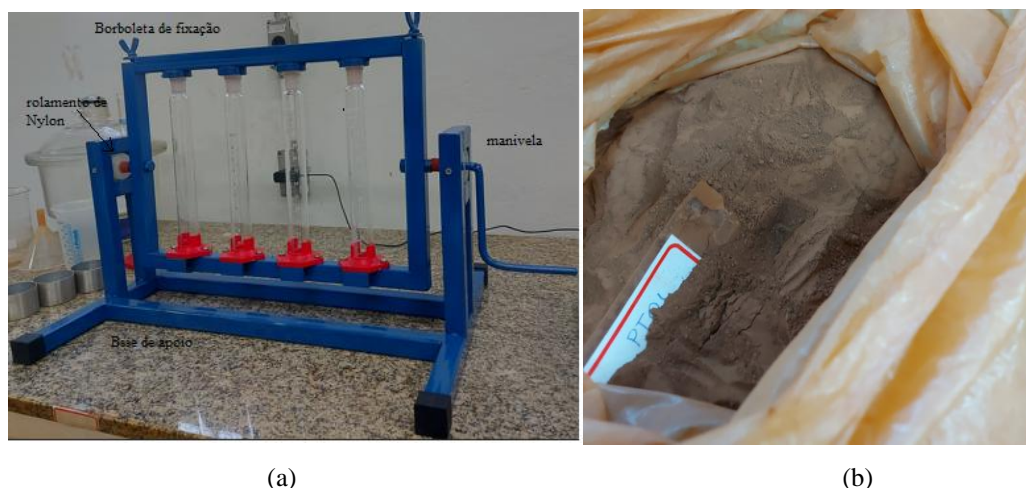
MATERIAIS E MÉTODOS

Para sedimentos finos de rejeito, o teste tradicional de velocidade de queda se torna inviável devido a pequena dimensão das partículas. Assim, o teste utilizado para determinação de velocidade de queda nesse tipo de material é o teste das provetas, onde se verifica a clarificação da mistura com o passar do tempo conforme trabalho de Zang *et al.* (2020).

Buscando minimizar a interferência do observador, foi construído uma bancada em que a agitação das provetas é realizada através de uma manivela para que tenham o mesmo tempo de agitação. A bancada foi construída com perfil metálico quadrado com aresta de 23 mm, onde foi instalado aros para fixação das provetas, o sistema que gira as provetas foi feito com disco de nylon conectado ao quadro e uma manivela foi instalada para rotacionar o sistema. Para teste demonstrativo

de funcionamento do equipamento foi utilizado uma amostra de sedimento retirada do sump de um área de mineração. A Figura 1 mostra (a) o aparato de testes de velocidade de queda de partículas finas utilizando provetas e (b) o sedimento do sump da área de mineração utilizado no experimento.

Figura 1 – (a) Aparato de teste de velocidade de queda de partículas finas com detalhamento e (b) Sedimentos do *sump* da área de mineração.

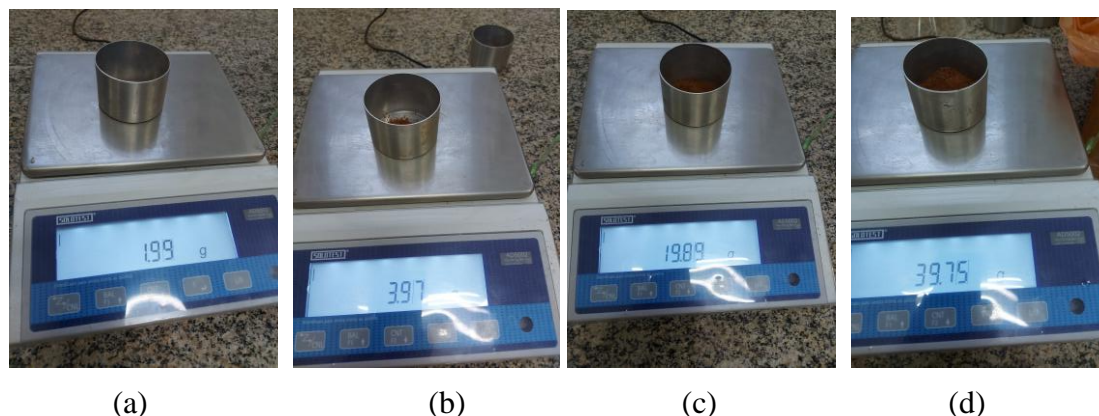


Os testes foram realizados com amostra nas concentrações volumétrica de 0,5%, 1%, 5% e 11% seguindo valores definidos de concentração volumétrica por Costa (2024). As quantidades de sedimento e volume de água destilada são descritas na Tabela 1 e a Figura 2 mostra as massas utilizadas no experimento 0,5%, 1%, 5% e 11%.

Tabela 1 – Valores das concentrações volumétricas

Concentração Volumétrica (%)	Massa de sedimento (g)	Volume de água (l)
0,5	1,99	0,0995
1	3,97	0,0990
5	19,89	0,0950
11	39,75	0,0900

Figura 2 – Balança com as amostras de sedimento (a) 0,5%, (b) 1%, (c) 5% e (d) 11%.



As amostras de 0,5%, 1% e 5% foram inseridas diretamente na proveta e o volume de água foi adicionado, como mostrado na Figura 3. Para a amostra de 11% de concentração de sedimentos foi utilizado um dispersor devido à essa concentração mais elevada.

Figura 3 – Preparação da amostra para o experimento



As provetas com as amostras são inseridas no aparato de teste e, depois de fixadas, a manivela é acionada girando 10 vezes para que ocorra toda a mistura. A Figura 4 mostra o aparato de teste de velocidade de queda de partículas finas sendo acionado.

Figura 4 – Acionamento do aparato de teste de velocidade de queda de partícula

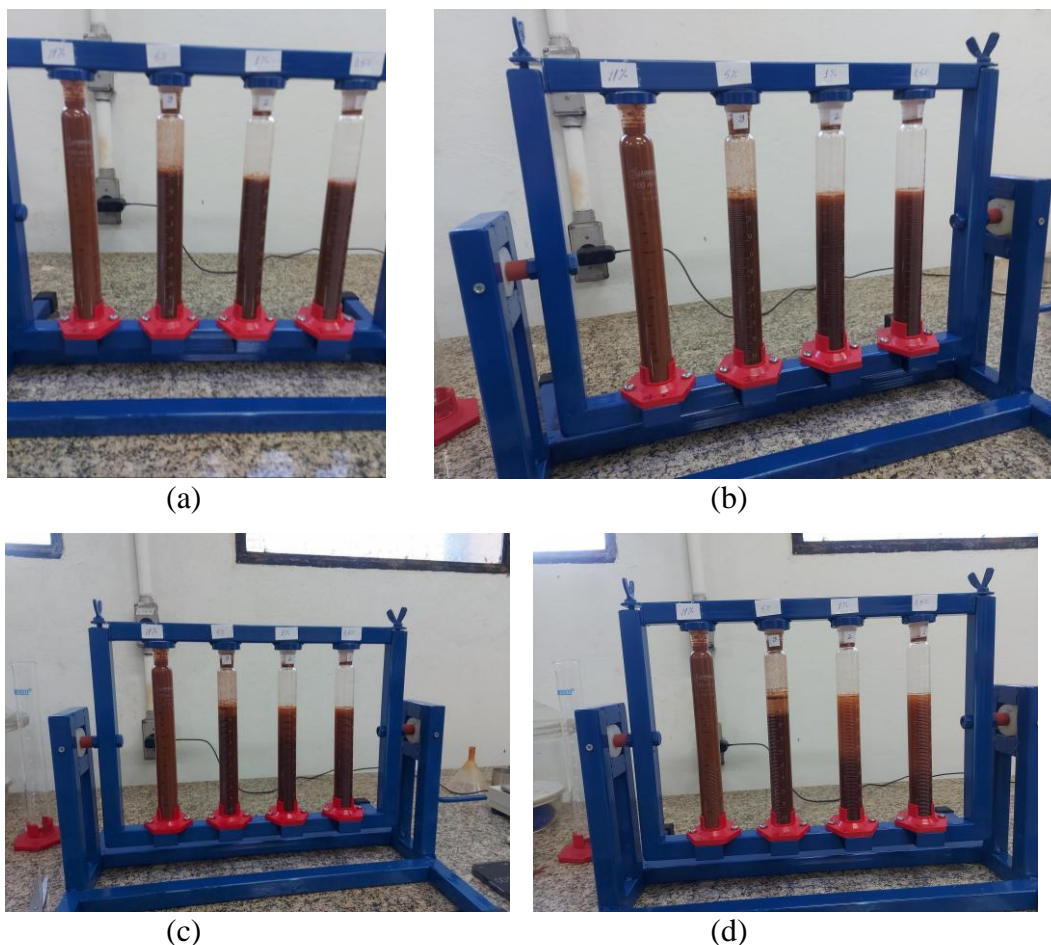


Após essa etapa, são fotografadas as provetas no tempo de inicial, e após o repouso em 30s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 60 min, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas, utilizando a câmera de um telefone Samsung A71. Em seguida é feito a avaliação da faixa de clarificação da mistura a cada tempo.

RESULTADOS

Com a finalização das misturas foram as fotografias nos tempos pré-definidos na metodologia para que as alturas de clarificação sejam definidas nos tempos. Para melhor visualização os resultados foram divididos nas Figuras 5 a 8. A Figura 5 mostra os resultados nos referidos tempos 0s, 30s, 1 min e 2 min. A Figura 6 mostra os resultados nos tempos de 4 min, 8 min, 15 min e 30 min. A Figura 7 mostra os resultados nos tempos de 60 min, 2 h, 4h, e detalhe da clarificação da amostra de 11% em 4 h. A Figura 8 apresenta os detalhes da clarificação para 8h e 24h, com detalhamento da amostra de 11 %.

Figura 5 – Resultado da clarificação nos tempos (a) 0, (b) 30s, (c) 1 min, (d) 2 min



Pelas imagens, da figura 5, pode se observar que as amostras com 0,5% e 1% já estão com uma altura de clarificação com 2 min de repouso. A amostra com 5 % já possui um início de clarificação, porém, na amostra com 11% ainda não pode ser observada clarificação da mistura.

Pode ser observado, pela figura 6, que para o tempo de 4 min a clarificação das amostras com 0,5% e 1% se torna mais evidente, mas com ainda partículas suspensas que tornam a mistura ainda em tom marrom.

Na figura 7 a amostra de 5% tem um aumento da parcela de clarificação e a de 11% ainda continua bem densa. Com o passar dos minutos observa-se uma maior clarificação das amostras de menores concentração e um aumento na camada de clarificação da amostra de 5%, tendo uma grande parcela de clarificação. Porém, para a amostra de 11% tem-se uma mistura ainda densa sem observância de clarificação.

Na Figura 7 nota-se o aumento do processo de clarificação e com 4 horas a clarificação total das amostras de 0,5%, 1% e 5%. No entanto, a amostra de 11 % tem o início da clarificação em apenas 2 h de análise. Após 4 h esse percentual tem um aumento conforme indicado em detalhe na Figura 7 (d). Nota-se uma faixa de clarificação, pois como a concentração é bem maior, parte do sedimento adere à parede acima dessa faixa e se acumula.

Figura 6 – Resultado da clarificação nos tempos (a) 4 min, (b) 8 min, (c) 15 min, (d) 30 min

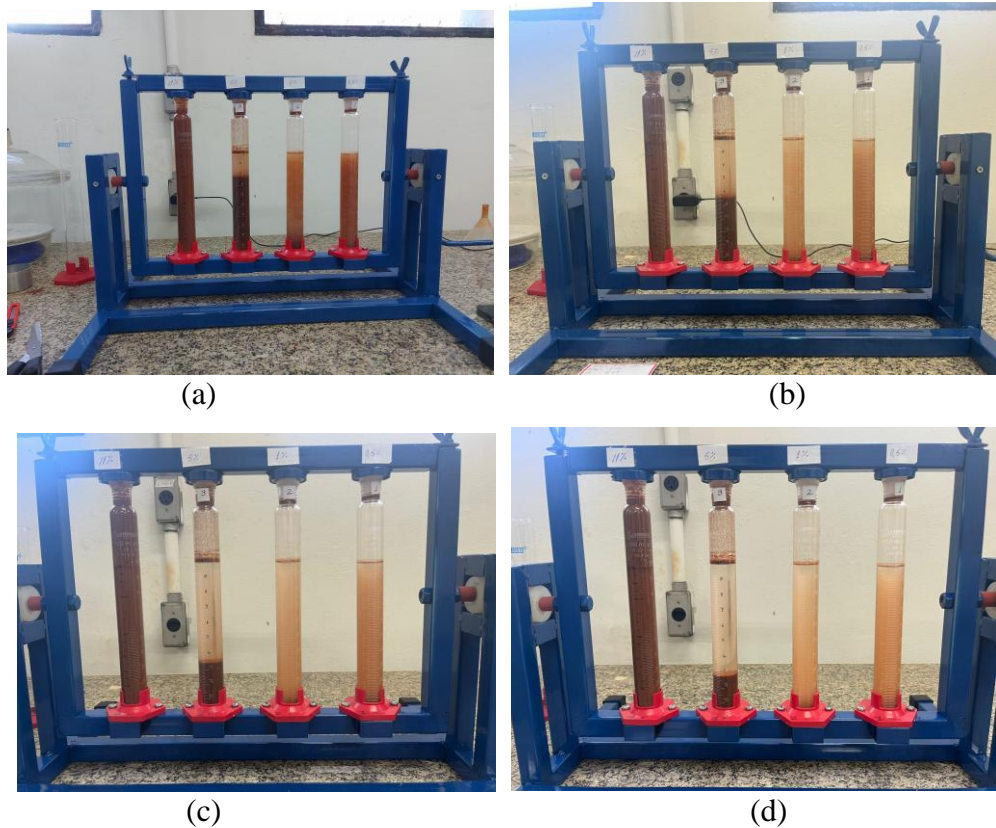
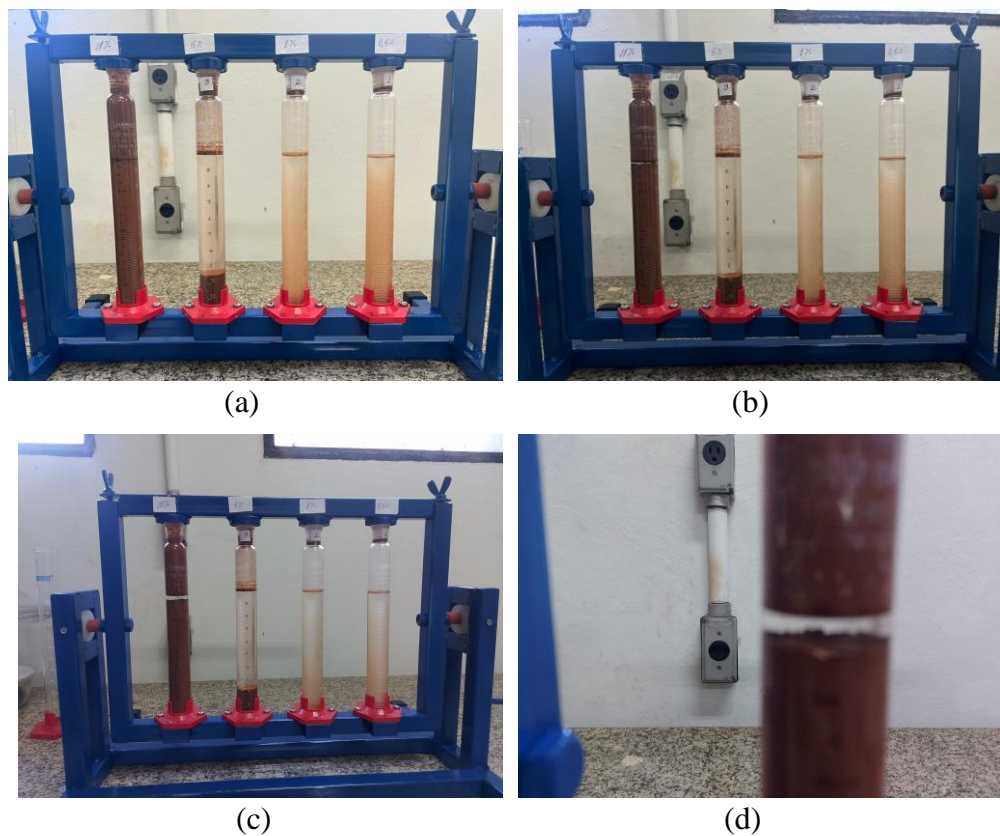
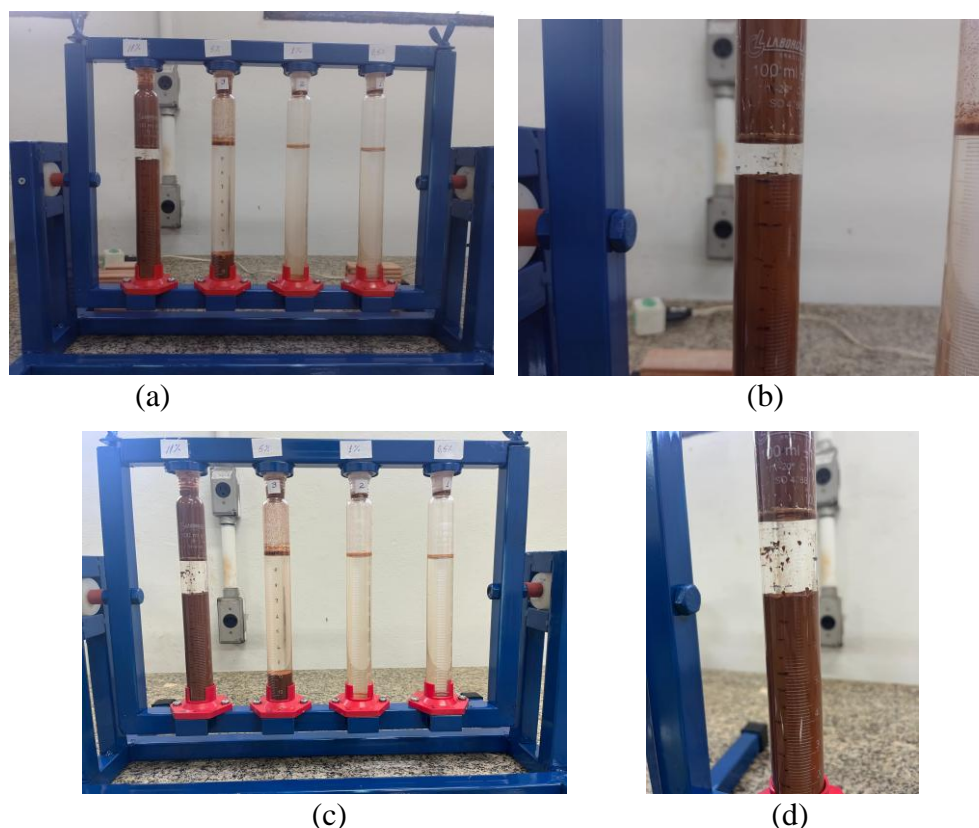


Figura 7 – Resultado da clarificação nos tempos (a) 60 min, (b) 2 h, (c) 4 h, (d) Detalhe de 11% e 4h.



Pela figura 8 pode ser observado que somente a amostra com concentração volumétrica de 11% ainda sofre clarificação na mistura. E que mesmo com 24 h ainda não ocorre a finalização da clarificação. Costa (2024) observou a amostra de maiores concentrações por dias para que fosse observada a finalização da clarificação.

Figura 8 – Resultado da clarificação nos tempos (a) 8h, (b) detalhe 8h para amostra com cv de 11% (c) 24 h, (d) detalhe 24h para amostra com cv de 11%



A seguir, na Tabela 02 são apresentadas as vantagens e desvantagens deste método.

Tabela 2 Vantagens e desvantagens do método das provetas

Vantagens	Desvantagens
Permite calcular a real velocidade de queda de forma rápida	A velocidade calculada é uma média total do material (silte + argila)
A utilização de várias provetas colocadas em paralelo, permite avaliar 04 concentrações ao mesmo tempo, reduzindo o tempo de repetição dos experimentos.	Existe um problema para determinar o tempo de sedimentação, pois depende de um critério de clarificação a ser pré definido, em especial com concentrações baixas (exemplo $C_v = 0,5\%$ e 1%)
Permite visualizar o efeito da concentração na redução da velocidade de queda. Na	Provetas com concentrações maiores de argila, dificultam a visualização da clarificação.

concentração de $C_v = 11\%$, observa-se o fenômeno de suspensão das partículas.

Usa uma pequena quantidade de sedimento da amostra total para obter diferentes concentrações desejadas, permitindo repetir a experiência mais vezes.

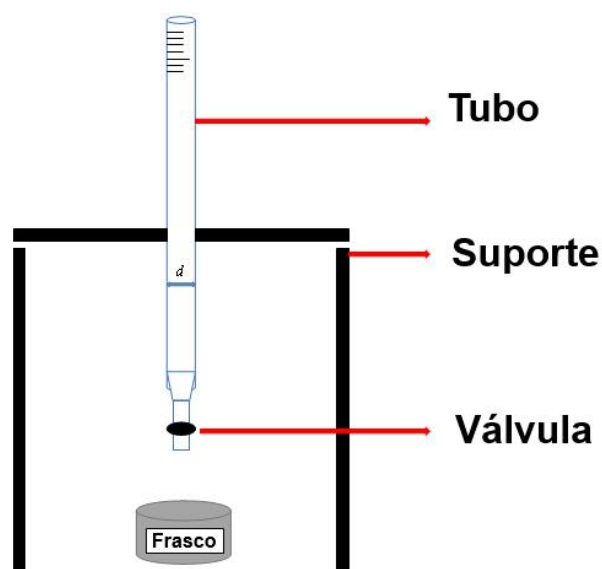
A aquisição das imagens requer um sistema fotográfico relativamente não sofisticado (celulares), dispensando o uso de equipamentos fotográficos complexos. Pode-se empregar um software de tratamento de imagens (KINOVEA ou CAD) para melhorar a qualidade dela e realizar outros tipos de medições.

Deve-se usar um ambiente sem mudanças bruscas de temperatura, pois a temperatura muda a viscosidade do fluido, afetando a velocidade de queda.

Deve-se evitar o uso de um sistema de iluminação direta com a finalidade de não aumentar a temperatura das provetas. Então, requer celulares com boa resolução.

Pranoto et al. (2020) empregou o método de tubo de remoção pela base para determinar o efeito da concentração na velocidade de queda de um sedimento de estuário. O equipamento é composto por um tubo de 1m de comprimento e um diâmetro interno de 40mm. O material é colocado na tubulação e a cada certo tempo o material é coletado na parte do fundo com a abertura da válvula (Figura 9).

Figura 9. Desenho do tubo de remoção pela base, processo de colocação da amostra e retirada do fundo. (Laboratório CESP, 2009)



Colocação da amostra no tubo



Coleta da amostra no fundo com a abertura da válvula

O método é recomendado para areia fina e argila grossa (0,25mm a 0,002mm), mas parte do pressuposto de um tempo de coleta para sedimentos naturais de formas arredondadas, e a velocidade é calculada com a equação Stokes. No caso do método das provetas, a velocidade de queda é real e é

produto das interações do sedimento argiloso e siltoso. Os materiais coletados nos sumps, podem estar compostos por sedimentos provenientes de pilhas de estéril e/ou rejeito, onde o fator de forma (cfs) e a composição mineralógica afeta a velocidade de queda. Futuramente, serão realizados estudos comparativos entre os ambos métodos. Com a finalidade de estabelecer o efeito da forma da partícula e a composição mineralógica, serão realizadas análises de Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) para determinar o fator de forma (cfs) e a esfericidade (P), e uma análise de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) com a finalidade de verificar a composição mineralógica do sedimento (Costa, 2024).

CONCLUSÃO

Com a análise do funcionamento do aparato de teste de velocidade de queda de partículas finas, foi observado que a mistura com as voltas da manivela proporcionou uma agitação suficiente e igualitária para todas as amostras testadas. Pode ser observado que no início dos testes todas as amostras, com concentrações volumétricas diferentes, se encontravam bem homogêneas.

Após o ensaio, foi feita uma análise do procedimento de visualização do tempo de clarificação das amostras. A análise de velocidade de queda observada por Costa (2024) utilizou outros tempos, que serão seguidos em testes semelhantes. No experimento atual foram utilizados tempos da norma ABNT NBR 7181/2025 de análise de granulometria, visto que era um teste de verificação do funcionamento do equipamento. Futuramente, serão realizados testes para determinar a velocidade de queda com diferentes concentrações, similares ao realizados por Costa (2024) e será feito um estudo comparativo como o método de tubo de remoção pela base. Além de avaliar o efeito do fator de forma (cfs) e esfericidade (P) e a composição mineral.

REFERÊNCIA

COSTA, C. R. T., (2024), “*Avaliação da velocidade de queda e do processo de sedimentação do rejeito de minério de ferro*”, Dissertação de mestrado – Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG.

LABORATÓRIO CESP DA USP. Ensaio sedimentométrico, 2009. <https://docs.ufpr.br/~foliveira/GB101/Metodologias/roteiro%20an%C3%A1lises%20sedimentom%C3%A9tricas%20CESP.pdf>

HWANG, K. N. (1989), “*Erodibility of fine sediment in wave-dominated environments*”. Dissertação de mestrado - University of Florida, Florida.

PRANOTO, W. A.; JOHAN, J. AND VINSSENSISUS, P. Kapuas River sediment settling velocity analysis. Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. doi:10.1088/1757-899X/852/1/012038

RUBEY, W. W. (1933) “*Settling velocities of gravel, sand and silt particles*”. American Journal of Science, p. 325–338. Disponível em: <https://doi.org/10.2475/ajs.s5-25.148.325>

STOKES, G. G. (1851) “On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums”. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, v. 3, n. IX, pp. 1880–1905.

ZHANG, Z.; NONG, H.; LI, Y.; ZHAO, L.; GAO, H. (2020) “*Effects of ballasting particles on settling rate of iron ore tailings*.” Particulate Science and Technology, v. 38, n. 4, p. 427–432. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1558320>

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à VALE pelo financiamento do projeto. Agradecem ainda ao Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos hídricos (CPH-UFGM) pelo suporte técnico.