

DIMENSIONAMENTO DE SEDIMENTADORES CONTÍNUOS COM BASE EM ENSAIOS DE PROVETA

Veruska do Nascimento Simões¹;

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Sumé, Paraíba.

<http://lattes.cnpq.br/1149592827133122>

José Rosa de Souza Farias²;

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

<http://lattes.cnpq.br/9404467330103347>

Valdeci Bosco dos Santos³;

Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, Piauí.

<http://lattes.cnpq.br/0011700686113389>

Aluska do Nascimento Simões Braga⁴.

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

<http://lattes.cnpq.br/2429557575387821>

RESUMO: O estudo da sedimentação em batelada é de grande importância para o estabelecimento de parâmetros fenomenológicos do processo e para a predição de valores de parâmetros necessários aos cálculos de projeto de sedimentadores. Neste trabalho, com base em ensaios de sedimentação em proveta, considerando as regiões de sedimentação livre, de transição e de compressão, ocupadas pela suspensão durante o processo, foram coletados dados de altura da interface superior da suspensão em função do tempo. Foram utilizados nessa pesquisa diferentes suspensões de carbonato de cálcio (10, 20 e 30 g/L) e provetas de diferentes capacidades volumétricas (100, 250, 500 e 1000 mL). Utilizando-se os métodos de Kynch simplificado e o de Talmadge e Fitch foram realizados cálculos de área de um sedimentador contínuo para uma vazão de alimentação pré-estabelecida. Os resultados obtidos a partir dos métodos de Kynch simplificado e Talmadge e Fitch se mostraram bastante semelhantes para as condições operacionais estudadas. A faixa de valores dos diâmetros dos sedimentadores obtidos nessa pesquisa, situa-se na faixa entre 14 e 24 metros aproximadamente.

PALAVRAS-CHAVE: Sedimentador. Método de Kynch simplificado. Método de Talmadge e Fitch.

SIZING OF CONTINUOUS SEDIMENTERS BASED ON GRADUATED CYLINDER TESTS

ABSTRACT: The study of batch sedimentation is crucial for establishing phenomenological parameters of the process and predicting values necessary for the design calculations of sedimentation tanks. In this work, based on sedimentation tests in graduated cylinders—considering the free settling, transition, and compression zones occupied by the suspension during the process—data on the height of the upper suspension interface as a function of time were collected. Various calcium carbonate suspensions (10, 20, and 30 g/L) and graduated cylinders of different volumetric capacities (100, 250, 500, and 1000 mL) were used. The simplified Kynch method and the Talmadge and Fitch method were applied to calculate the area of a continuous sedimentation tank for a pre-established feed flow rate. The results obtained using both methods were highly similar under the studied operating conditions. The calculated sedimentation tank diameters ranged approximately between 14 and 24 meters.

KEY-WORDS: Sedimentation tank. Simplified Kynch method. Talmadge and Fitch method.

INTRODUÇÃO

A sedimentação é uma técnica de segregação orientada por densidade na qual partículas com maior densidade fluem através de um fluido menos denso e são depositadas sob a influência da gravidade (Panda *et al.*, 2022).

Com base no manuseio das partículas depositadas, a sedimentação é caracterizada como processo contínuo ou descontínuo. Em um processo contínuo, é feito um fornecimento constante de suspensão ao equipamento de sedimentação e as partículas depositadas são continuamente removidas. De outra forma, na sedimentação em batelada, a suspensão é contida em um volume finito e é deixada evoluir até que a completa separação de fases seja alcançada (Hernando *et al.*, 2014).

A sedimentação contínua tem muitas aplicações em indústrias de processo, como a produção de alumínio, a fabricação de papel e a preparação de carvão, onde há reciclagem da água do processo, minimizando o volume de lama residual lançada no meio ambiente (Galvin e Walter, 1987).

Em um ensaio batelada de sedimentação com suspensões a partir da evolução da altura da descontinuidade sobrenadante-suspensão com o tempo, é possível obter os parâmetros de projeto para espessadores contínuos por gravidade.

O projeto de espessadores contínuos para concentração intermediária e alta de sólidos tem sido considerado por muitos autores também assumindo um modelo distribuído e considerando também os efeitos inerciais e efeitos de difusão como desprezíveis:

Talmadge e Fitch, Fitch, Font, Font e Laveda, Landman *et al*, Tiller e Chen e Bueno *et al* (Font e Caballero, 2001).

Kynch (1952) apresentou uma análise do teste em batelada de sólidos não compressivos, considerando que em qualquer camada os sólidos descem de acordo com a concentração de sólidos desta camada, ignorando os efeitos inerciais de aceleração ou desaceleração dos sólidos devido ao momento saldo aplicado a qualquer momento. Em seu modelo distribuído assumido, os efeitos inerciais e de difusão são considerados desprezíveis.

A publicação de Kynch motivou a indústria mineral a explorar essa teoria para o projeto de sedimentadores. Este método, apresentado inicialmente por Talmadge e Fitch (1955) e que recebeu o nome de método de Kynch, consiste em realizar apenas um ensaio de sedimentação em batelada e, utilizando a teoria de Kynch, deduzir a área mínima necessária de um sedimentador para processar uma suspensão. A partir do trabalho de Kynch houve um avanço significativo no entendimento do processo de sedimentação e apesar de existirem teorias mais elaboradas, o método de Kynch é utilizado até hoje pela simplicidade de execução (NUNES, 2008). Uma simplificação matemática da metodologia de Kynch foi introduzida por Biscaia Jr. (1988), tornando mais fácil a determinação gráfica das variáveis de projeto.

Sendo assim esse trabalho tem como objetivo o dimensionamento de um sedimentador contínuo a partir de testes em batelada considerando dois parâmetros: a altura do sedimento e a concentração de sólidos, utilizando o método de Kynch simplificado e de Talmadge e Fitch.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram preparadas três suspensões analíticas de carbonato de cálcio (PA, VETEC) com concentrações de 10, 20 e 30 g/L. Os experimentos de sedimentação foram realizados em provetas com capacidades volumétricas de 100, 250, 500 e 1000 mL.

Escolhida a capacidade volumétrica e a concentração a ser utilizada agitou-se o balão objetivando a homogeneização, em seguida, despejou-se a suspensão na proveta e o experimento foi iniciado. Com o auxílio de uma régua mediu-se a altura inicial da suspensão na proveta.

Durante a sedimentação mediu-se as alturas em intervalos de tempo pré-determinado de 2 minutos. Ao observar que as alturas das interfaces sólido-líquido não apresentavam variação considerável, adotou-se que a sedimentação havia atingido o equilíbrio e o experimento foi finalizado.

Todos os ensaios foram realizados em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos dados. Os valores médios foram usados para avaliar o projeto do sedimentador. O método de Kynch simplificado consiste no traçado de uma única reta tangente ao ponto de inflexão

da curva de sedimentação.

O processo descrito por Talmadge e Fitch sugere que seja traçada uma tangente a essas duas partes da curva de sedimentação, uma partindo do início do ensaio e a outra do final do ensaio. As duas tangentes são prolongadas até que se interceptem originando um ponto, a partir deste ponto, traça-se então a bissetriz do ângulo formado entre as duas retas tangentes indo em direção à curva de sedimentação.

A interseção dessa bissetriz com a curva de sedimentação fornece uma estimativa do ponto crítico. Em seguida, traça-se uma reta tangente a esse ponto, prolongando-a até a linha de 'underflow', onde o tempo (T_u) é determinado pela abscissa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

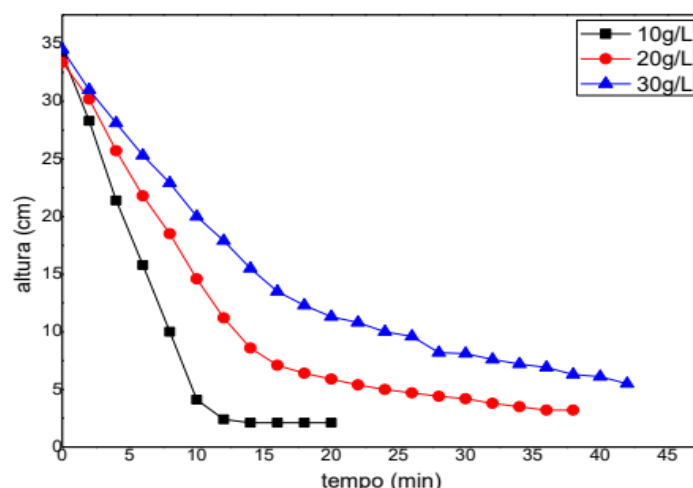
Influência da concentração

Para analisar a influência que a população de partículas exerce sobre o comportamento da taxa de sedimentação e a área do sedimentador foram realizados ensaios de proveta para suspensões de CaCO_3 nas concentrações de 10, 20 e 30 g/L.

Como esperado, a concentração de sólido disperso foi aumentada junto com a altura do sedimentador em batelada (Figura 1). Em concentrações mais altas, o arrasto oferecido entre a fase sólida de sedimentação (denominado como interação partícula-partícula) e entre as fases sólido-líquido é aumentado (Dodds e Naser, 2004). Portanto, devido ao aumento das interações de fase (arrasto), a taxa de sedimentação da fase sólida é reduzida e leva mais tempo para sedimentar. (Panda *et al.*, 2022).

Vale ressaltar ainda que, quando se utiliza uma suspensão mais concentrada, a obtenção dos dados de sedimentação em batelada são mais fácil de serem obtidos, uma vez que as regiões formadas durante o ensaio são mais facilmente visualizadas em função do tempo, conforme afirmado por Biscaia Jr. (1988). Suspensões mais diluídas apresentam maiores taxas de sedimentação, e em consequência, tempos mínimos de formação da região de compactação inferiores.

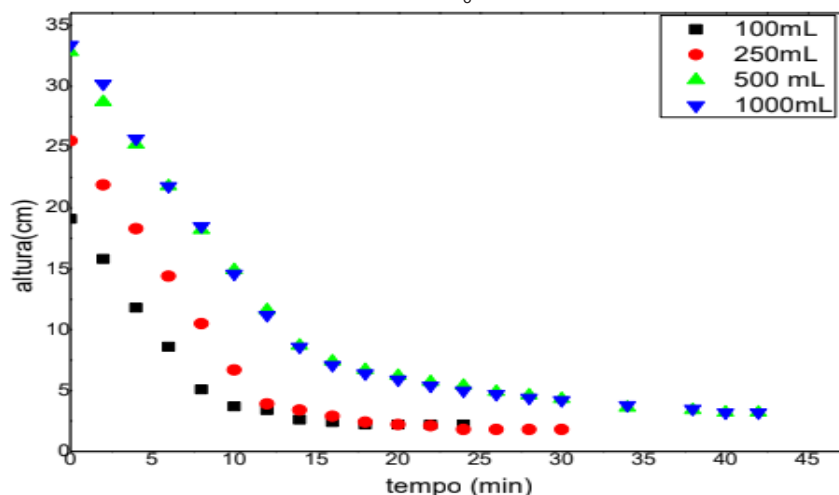
Figura 1. Curvas de sedimentação de suspensão de CaCO_3 utilizando proveta de 1000 mL e suspensões de 10, 20 e 30 g/L.



Influência da área da proveta

Com o objetivo de avaliar a influência da área da proveta sobre a taxa de sedimentação e os cálculos do projeto do sedimentador, fixou-se a concentração da suspensão em 20 g/L de CaCO_3 e provetas com capacidades 100, 250, 500, 1000mL. (Figura 2).

Figura 2. Curvas de sedimentação da suspensão de CaCO_3 , 20 g/L, em provetas de 100, 250, 500 e 1000 mL.



Observa-se que o comportamento das curvas de sedimentação é análogo para as suspensões da Figura 1. Pode-se perceber que a área da proveta exerce influência sobre a formação da região de compactação quando se compara as curvas para as diversas provetas, influenciando diretamente a taxa de sedimentação. Para o tempo de 10 minutos as taxas de sedimentação para as provetas de 100 mL e 1000 mL são 0,83 e 1,40 cm/min respectivamente. Uma provável justificativa para esse fato é que provetas com maiores diâmetros oferecem uma maior área disponível para a sedimentação dos sólidos e tendem

a eliminar ou diminuir o fenômeno da sedimentação obstada, relacionada à competição das partículas nas suas velocidades terminais que interferem diretamente na formação da zona de compactação.

Em termos de tempo mínimo para a formação da região de compactação dos sólidos e tempo de residência nesta mesma região, observa-se que provetas com maiores diâmetros tendem a apresentar valores menores dos tempos mínimos e de residência, uma vez que o fenômeno da sedimentação obstada é menos evidente.

Cálculos do projeto do sedimentador

Neste tópico utilizou-se os métodos de Kynch simplificado e Talmadge e Fitch em conjunto com os dados de ensaios de proveta para suspensões de concentrações 10 e 30 g/L e provetas de 250 e 1000 mL objetivando o cálculo da área necessária de um sedimentador utilizado para suspensão de carbonato de cálcio com vazão igual a 2,63.106 cm₃/min.

Método kynch simplificado por Biscaia J_R

Uma simplificação matemática da metodologia de Kynch foi introduzida por Biscaia Jr. (1988), tornando mais fácil a determinação gráfica das variáveis de projeto, que são determinadas pelas Equações:

$$C_s = \frac{C_0 \cdot Z_0}{Z_i} \quad C_s = \frac{C_0 \cdot Z_0}{Z_i} \quad (1)$$

$$v_s = \frac{Z_i - Z}{t_{min}} \quad v_s = \frac{Z_i - Z}{t_{min}} \quad (2)$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{Z_0 \cdot Q}{t_{min} \cdot A} = \frac{Z_0}{t_{min}} \quad (3)$$

$$v_s = \frac{Q}{A} \quad v_s = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Onde Q é vazão de alimentação e A é área da seção transversal do espessador.

As Figuras 3 e 4 apresentam a aplicação do método gráfico de Kynch simplificado para o cálculo da área do sedimentador para duas condições de operações diferentes, suspensões de concentrações 10 e 30 g/L e provetas de 250 e 1000 mL. Nestas figuras observa-se o traçado na reta tangente ao ponto de inflexão da curva de sedimentação para a obtenção dos parâmetros necessários para o dimensionamento do espessador e através da Equação 3 foi possível calcular a área necessária para processar a vazão de suspensão alimentada.

Os resultados obtidos para a capacidade (área calculada) do sedimentador para as duas condições operacionais trabalhadas estão resumidos na Tabela 1. Vale ressaltar que para a área total foi aplicada um fator de segurança de 100% sobre o valor da área calculada conforme recomenda a literatura (Coelho e Massarani, 1996).

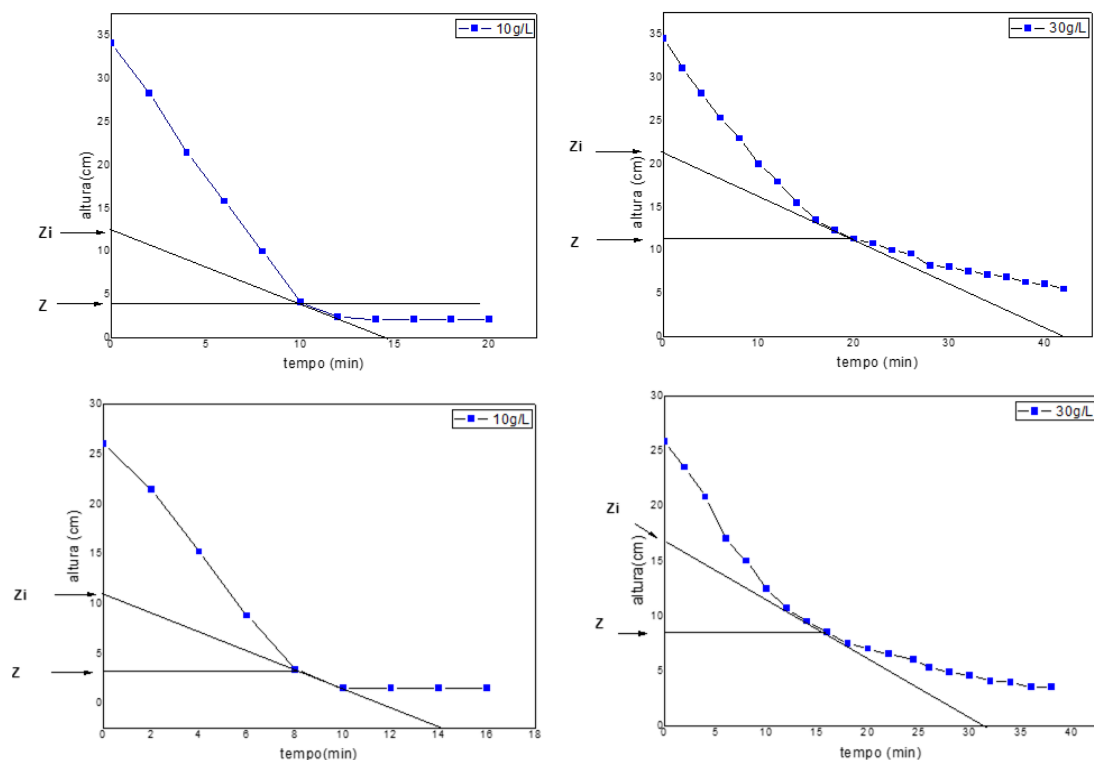
De acordo com os resultados da Tabela 1 que a concentração da suspensão exerce influência significativa sobre o dimensionamento do sedimentador (área e diâmetro). Percebe-se que a área necessária para o equipamento quando se processa uma suspensão com concentração 30 g/L é aproximadamente 1,4 vezes maior que para uma suspensão de 10 g/L para os dados com uma proveta de 1000 e 250 mL. Por outro lado, para uma mesma suspensão observa-se que a área dos sedimentadores para provetas de capacidades diferentes tem valores bem próximos.

Tabela 1. Dimensionamento do sedimentador através de Kynch simplificado.

Proveta 1000 mL			
	área _{calculada} (m ²)	área _{total} (m ²)	Diâmetro (m)
10 g/L	77,1	154,2	14,01
30 g/L	152,46	304,92	19,70
Proveta de 250 mL			
	área _{calculada} (m ²)	área _{total} (m ²)	Diâmetro (m)
10 g/L	80,92	161,84	14,35
30 g/L	163,1	326,2	20,37

Observa-se ainda que, quanto maior a concentração será necessária uma maior área mínima para que a sedimentação ocorra isso porque a velocidade de sedimentação diminui com o aumento da concentração. (da Silva *et al.*, 2018).

Figura 3. Determinação das variáveis de projeto pelo método de Kynch simplificado para proveta de 1000 mL e concentração de 10, 30 g/L.



Método Talmadge e Fitch

O método de Talmadge e Fitch exibe um procedimento gráfico para a determinação dos parâmetros necessários para o dimensionamento do sedimentador

A capacidade do sedimentador pelo método de Talmadge e Fitch foi obtida pela Equação 5.

$$C_s = \frac{Q \cdot t_u}{z_0} C_s = \frac{Q \cdot t_u}{z_0} \quad (5)$$

Onde é o t_u é o tempo de *underflow*.

As Figuras 5 e 6 apresentam a aplicação do método gráfico de Talmadge e Fitch para o cálculo da área do sedimentador para duas condições de operações diferentes, suspensões de concentrações 10 e 30 g/L e provetas de 250 e 1000 mL. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Dimensionamento do sedimentador através do método de Talmadge e Fitch.

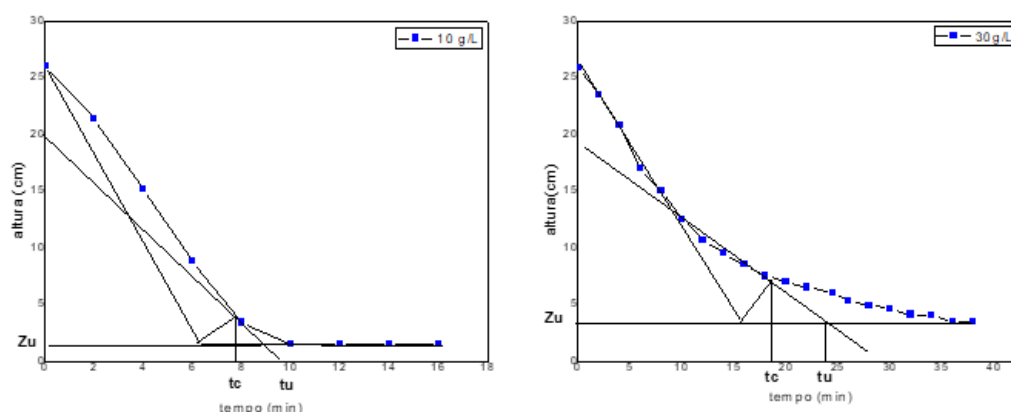
Proveta 1000 mL			
	área _{calculada} (m ²)	área _{total} (m ²)	Diâmetro (m)
10 g/L	77,00	154,0	14,0
30 g/L	152,49	304,48	19,69
Proveta de 250 mL			
	área _{calculada} (m ²)	área _{total} (m ²)	Diâmetro (m)
10 g/L	96	192	15,63
30 g/L	241,86	483,72	24,81

De maneira análoga ao método de Kynch simplificado de acordo com os resultados da Tabela 3.2 a concentração da suspensão influência significativa sobre o dimensionamento do sedimentador (área e diâmetro). Percebe-se ainda que a área necessária para o equipamento quando se processa uma suspensão com concentração 30 g/L foi de aproximadamente 2 vezes maior que para uma suspensão de 10 g /L para os dados obtidos com uma proveta de 1000 mL e de aproximadamente 2,5 vezes maior para proveta de 250 mL.

Considerando a análise anterior, pode-se deduzir que o maior valor de área de do espessador contínuo corresponde à característica com maior concentração de sólidos.

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2, observa-se grande semelhança entre os valores das capacidades (área e diâmetro) dos sedimentadores, produzidas pelos dois métodos utilizados, tanto em termos do efeito da concentração da suspensão, quanto ao efeito das dimensões da proveta usada no efeito de bancada.

Figura 6. Determinação das variáveis de projeto pelo método de Talmadge e Fitch para proveta de 250 mL e concentração de 10, 30 g/L.



CONCLUSÃO

Em função dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho, pode-se concluir, dentro das condições experimentais trabalhadas que suspensões menos concentradas apresentam maiores taxas de sedimentação, e por isso necessitam de sedimentadores de menores dimensões; conforme ocorre a sedimentação, a velocidade de sedimentação diminui, como consequência direta da formação da zona de compactação; a área da proveta exerce influência sobre a zona de compactação, uma vez que o tempo mínimo para sua formação em provetas de áreas maiores são maiores; os resultados apresentados demonstram que os dois métodos utilizados produzem resultados semelhantes e dentro da faixa industrial, mostrando confiabilidade nos métodos; o uso de dois os mais métodos garante a confiabilidade dos resultados produzidos na pesquisa.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Os autores do artigo declaram que não possuem conflitos de interesses de ordem financeira, comercial, política, acadêmica e pessoal.

REFERÊNCIAS

- Coelho, R. M. L.; Massarani, G. **Fluidodinâmica da partícula Sólida Isolada**. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, Brasil, p. 19-23, 1996.
- da Silva, V. Q., Carvalho, R. S., Dias, L. L., Veloso, S. F. **Dimensionamento de sedimentadores contínuos com base na modelagem matemática da sedimentação em proveta**. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, v. 3, n. 2. 2018.
- Dodds D. S., Naser, J. **The Effect of Particle Concentration on the Coefficient of Drag of a Spherical Particle**. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of

Sydney, Sydney, Australia, 2004.

Font, R.; Caballero, J. A. **Particulate character, inertial effects and diffusion effects in concentrated suspensions**. Powder technology, v. 120, n. 3, p. 264-272, 2001.

Galvin, K. P.; Waters, A. G. **The effect of sedimentation feed flux on the solids flux curve**. Powder technology, v. 53, n. 2, p.113-120, 1987.

Hernando, L; Omari, A; Reungoat, D. **Experimental study of sedimentation of concentrated mono-disperse suspensions: Determination of sedimentation modes**. Powder technology, v. 258, p. 265-271, 2014.

Kynch, George J. **A theory of sedimentation**. Transactions of the Faraday society, v. 48, p. 166- 176, 1952.

Nunes, J. F. **Estudo da sedimentação gravitacional de suspensões floculentas**. Programa de pós graduação em Engenharia Química (dissertação de mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Minas gerais, 2008.

Panda, S. K., Mishra, V. K., Anand, P. V., Rajeev, R., Venkatesan, K. A., Ananthasivan, K. **Investigating sedimentation process in the plutonium reconversion using Eulerian Two-Fluid simulations and experimental verification**. Nuclear Engineering and Design, v. 398, 2022.