

DIMENSIONAMENTO DE SEDIMENTADORES CONTÍNUOS COM BASE NA MODELAGEM MATEMÁTICA DA SEDIMENTAÇÃO EM PROVETA

DESIGN OF CONTINUOUS SEDIMENTATORS BASED ON MATHEMATICAL MODELING OF SEDIMENTATION IN GRADUATED CYLINDERS

Vânia Queiroz da Silva¹

Rosilanny Soares Carvalho²

Lorena Lopes Dias³

Stephanie Froes Veloso⁴

Resumo: Sedimentadores contínuos são equipamentos muito utilizados em indústrias químicas, de beneficiamento de minério e em estações de tratamento de água e efluentes. Esses promovem a separação entre sólidos e líquidos com base na diferença entre as densidades das fases presentes, sujeitas à ação do campo gravitacional. A utilização de modelos matemáticos para a simulação, projeto e o controle de sedimentadores é de fundamental importância, uma vez que são de grande interesse teórico, prático e econômico. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar um modelo matemático para o dimensionamento de sedimentadores para uma vazão pré-estabelecida com base no método de Método de Biscaia Jr. por meio de um teste de proveta para simular a sedimentação. A metodologia foi feita com base no teste de proveta, utilizando-se cinco diferentes concentrações iniciais de solução de carbonato de cálcio, (18,8; 24,8; 29,1; 47,0; 74,4 Kg/m³), com isso, calculou-se a área e a altura do sedimentador em cada condição operacional e desenvolveu-se um modelo matemático para as dimensões de um sedimentador com base no modelo proposto por Biscaia Jr. O modelo matemático obtido se mostrou eficaz na determinação das dimensões de sedimentadores que operem no intervalo de concentrações estudado no presente trabalho.

Palavras-chave: Dimensionamento. Modelagem. Sedimentação. Simulação. Sedimentador.

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). qsvania@gmail.com.

² Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). rosilannysoares@hotmail.com.

³ Discente do curso de Engenharia Química do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – campus Montes Claros. lorenalopes.contato@gmail.com.

⁴ Discente do curso de Engenharia Química do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – campus Montes Claros. stephaniefroesvel@gmail.com.

Abstract: Settlers are widely used equipment in the chemical, ore processing and water and effluent treatment plants. They promote the separation of solids and liquids based on the difference between the densities of the present phases, subject to the action of the gravitational field. The use of mathematical models for the simulation, design and control of settlers is of fundamental importance since they are of great theoretical, practical and economic interest. In this context, the present work aims to determine a mathematical model for the design of sedimentators for a pre-established flow rate based on Biscaia Jr method by means of a bench-scale test in graduated cylinders to simulate sedimentation. The methodology was based on the test cylinder, using five different initial concentrations of calcium carbonate solution (18.8, 24.8, 29.1, 47.0, 74.4 kg / m³), with this, the area and height of the settler are calculated in each operating condition and developed a mathematical model for the dimensions of a settler based on the model proposed by Biscay Jr. The obtained mathematical model was effective in determining the dimensions of settlers that operating in the range of concentrations studied.

Keywords: Sizing. Modeling. Sedimentation. Simulation. Settler.

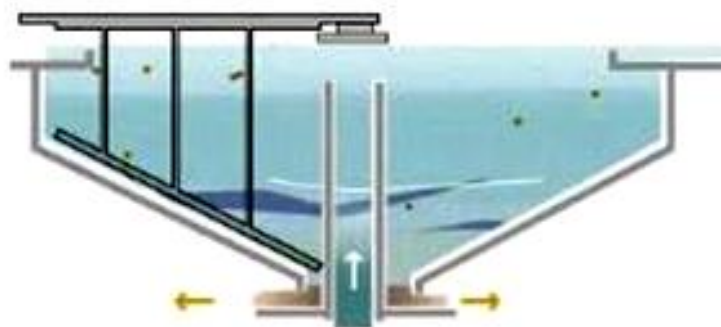
1 INTRODUÇÃO

A sedimentação por gravidade é definida como a remoção por deposição gravitacional de partículas sólidas em suspensão em um fluido. Sedimentadores são tanques de seção cilíndrica ou retangular, com operação contínua ou descontínua, nos quais a deposição das partículas é realizada. Para o projeto de um sedimentador gravitacional, é necessário o conhecimento do diâmetro das partículas, da viscosidade do líquido, da densidade do sólido e do líquido, da interação da partícula com a lama e das condições e variáveis do processo (MORAES JR, 1998).

Tais equipamentos são amplamente utilizados, por exemplo, na indústria de mineração, para a obtenção de polpas com concentrações adequadas a um determinado processo posterior, recuperação de água para reuso industrial, recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, etc. (FRANÇA E MASSARANI, 2004).

Comumente, o sedimentador contínuo é constituído de uma parte cilíndrica e outra cônica, cuja função é facilitar a retirada da corrente de fundo do equipamento. A parte superior do equipamento possui um vertedouro por onde transborda a corrente de líquido clarificado, normalmente a alimentação é posicionada na região central do equipamento. A Figura 1 representa um sedimentador contínuo.

Figura 1 - Sedimentador Contínuo.



Fonte: Moraes JR (1998).

De acordo com a função, os sedimentadores podem ser classificados em espessadores e clarificadores (AROUCA, 2007). Os espessadores caracterizam-se pela produção de espessados com alta concentração de partículas, cujo produto de interesse é a fase particulada. Os clarificadores caracterizam-se pela baixa concentração de partículas e o produto de interesse é a fase líquida. Além dessa classificação, os sedimentadores podem ser classificados de acordo com a geometria, podendo ser um sedimentador Clássico ou Lamelado. O primeiro retira tanto o clarificado quanto o espessado, enquanto que, no sedimentador lamelado, as partículas sedimentam-se sobre as lamelas e deslizam-se até o fundo do equipamento formando uma espécie de lama (FRANÇA E MASSARANI, 2004).

A determinação experimental da área da seção transversal do sedimentador, baseia-se em testes de proveta, através de uma curva de sedimentação. Vários métodos foram desenvolvidos para o projeto de sedimentadores, tal como os modelos propostos por COE e Clevenger, Kynch, Talmadge e Fitch, e o Método de Biscaia Jr.

Modelos matemáticos são de grande interesse teórico, prático e econômico para a simulação, projeto e controle de sedimentadores. Diante disto, baseando-se no modelo proposto por Biscaia Jr., o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo matemático que forneça as dimensões necessárias para um sedimentador que opere dentro do intervalo de concentrações estudado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Método de Kynch

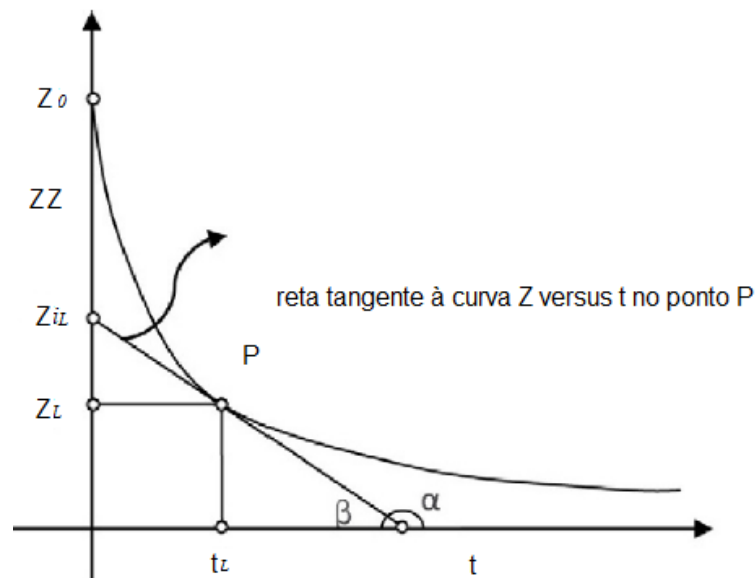
O método de Kynch, aplicado normalmente aos sedimentadores contínuos de suspensões sólido-líquido, considera uma sedimentação unidimensional, cuja concentração aumenta com o tempo no sentido do fundo do recipiente, a velocidade de sedimentação tende ao valor zero quando a concentração tende ao seu valor mínimo e depende somente da concentração local de partículas, desconsiderando o efeito de parede. Considerando Z como

a cota vertical da interface clarificado-sedimento no instante t , a velocidade de sedimentação (v) pode ser dada por (NUNES, 2008):

$$v = \frac{dz}{dt} \quad (1)$$

Onde, a Figura 2 demonstra a curva típica obtida no teste de proveta para uma dada suspensão sólido-líquido, admitindo-se uma concentração inicial de sólidos C_0 e altura inicial da suspensão Z_0 . A partir do cálculo da derivada no ponto P, de coordenadas (t_L, Z_L) , pode-se obter a velocidade de sedimentação V_L , através da reta tangente à curva no referido ponto.

Figura 2 - Curva de Sedimentação



Fonte: Peçanha (2014).

Partindo-se do triângulo retângulo cujos catetos são Z_{iL} e Z_L , é possível afirmar que:

$$V_L = \frac{Z_{iL} - Z_L}{t_L} \quad (2)$$

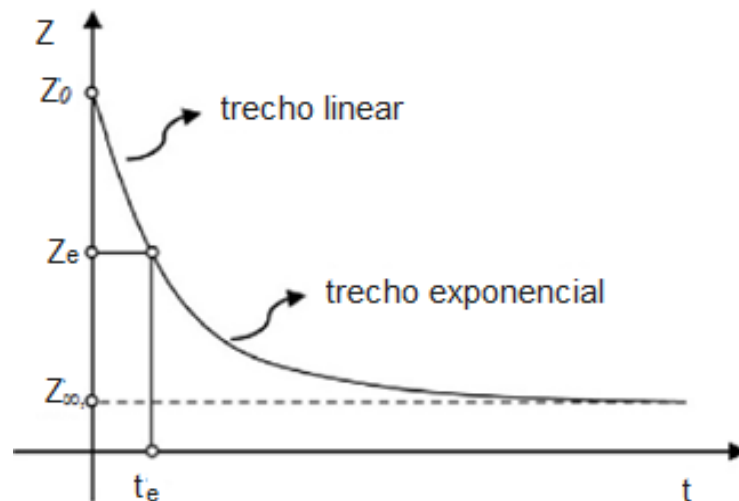
Como a proveta é um sistema isolado, torna-se possível por um balanço material de sólidos calcular o valor da concentração de sólidos homogênea C_L , levando-se a Equação 3.

$$C_L = \frac{C_0 - Z_0}{Z_{iL}} \quad (3)$$

2.2 Método de Biscaia Jr.

O método de Biscaia Jr. é uma simplificação do método de Kynch. Biscaia verificou que o trecho curvo que segue o trecho linear inicial podia ser bem ajustado por uma função exponencial, conforme pode ser evidenciado na Figura 3.

Figura 3 - Trechos linear e exponencial da curva z versus t do teste de proveta.



Fonte: Adaptado de Peçanha (2014).

Impondo apenas a continuidade das funções linear e exponencial no ponto de coordenadas (t_e, Z_e) , chega-se a (PEÇANHA, 2014):

$$\left(\frac{Q_A}{S} \right)_{proj} = \frac{Z_0}{t_{min}} \quad (4)$$

Onde S é a área transversal do sedimentador e Q_A é a vazão volumétrica de alimentação e t_{\min} é o instante durante o teste de proveta associado à altura Z_{\min} dada por:

$$Z_{\min} = \frac{C_A Z_0}{C_R} \quad (5)$$

Em que C_A é a concentrações de sólidos na alimentação e C_R é a concentração de sólidos retidos, expressos em massa de sólido/volume de suspensão.

Embora o método experimental represente a sedimentação somente a nível de bancada, esta aplicação pode ser explorada em larga escala como nos processos de efluentes, na sedimentação de partículas na indústria de bebidas, para a remoção de areia a fim de evitar erosão e entupimento em bombas e instalações mecânicas.

3 METODOLOGIA

Os experimentos de sedimentação foram realizados no Laboratório de Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química do IFNMG *campus* Montes Claros.

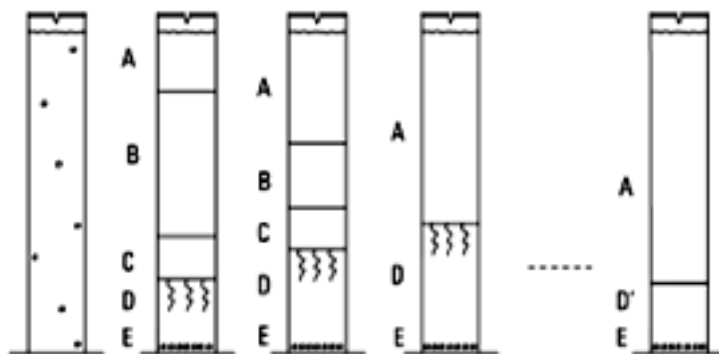
O dimensionamento do sedimentador contínuo foi realizado considerando cinco diferentes concentrações iniciais de solução de carbonato de cálcio, 18,8; 24,8; 29,1; 47,0; 74,4 Kg/m³, a partir das quais foram calculados a área e a altura do sedimentador em cada condição operacional.

As suspensões foram preparadas com a adição do carbonato de cálcio e posterior agitação com bastão de vidro. Após a agitação, acionou-se o cronômetro e a altura da interface clarificado – sedimento foi monitorada em intervalos de tempo específicos. A partir dos dados obtidos foi traçada uma curva de sedimentação Z_L versus t_L .

Com base no método de Kynch calculou-se os valores das vazões de alimentação (Q_A) e de saída do concentrado (Q_r), considerando a concentração no líquido clarificado igual a zero.

Observou-se regiões de estratificação como mostra a Figura 4:

Figura 4 - Teste de proveta.



Fonte: Peçanha (2014).

Onde “A” representa a zona de clarificado, as zonas “B” e “C” são denominadas “zonas de transição”, “D” é a zona de lama compacta final e “E” representa os sólidos grosseiros. Observa-se que em dado momento, durante o teste de proveta, desaparecem as estratificações “B” e “C” (quarto desenho da esquerda para a direita). O tempo correspondente a esse instante denomina-se “tempo crítico” (t_c), que é usado no cálculo da altura do sedimentador.

Designou-se por Z_0 a altura inicial da suspensão no teste de proveta, e por Z_∞ a altura final do sedimento. Na prática, a duração de um teste de proveta depende de vários fatores, Peçanha (2014) destaca “principalmente da diferença de densidade entre sólido e líquido, do tamanho das partículas e da viscosidade do líquido”.

Para o cálculo de altura, utilizou-se a Equação 6:

$$H = H_1 + H_c + H_2 \quad (6)$$

Em que: H_1 é a região clarificada somada à região de concentração constante; H_c é a região de compactação; H_2 é a região de fundo.

Estimou-se um valor médio de 0,6m para H_1 e de 0,146R para H_2 . Para o cálculo de H_c , utilizou-se a Equação 7:

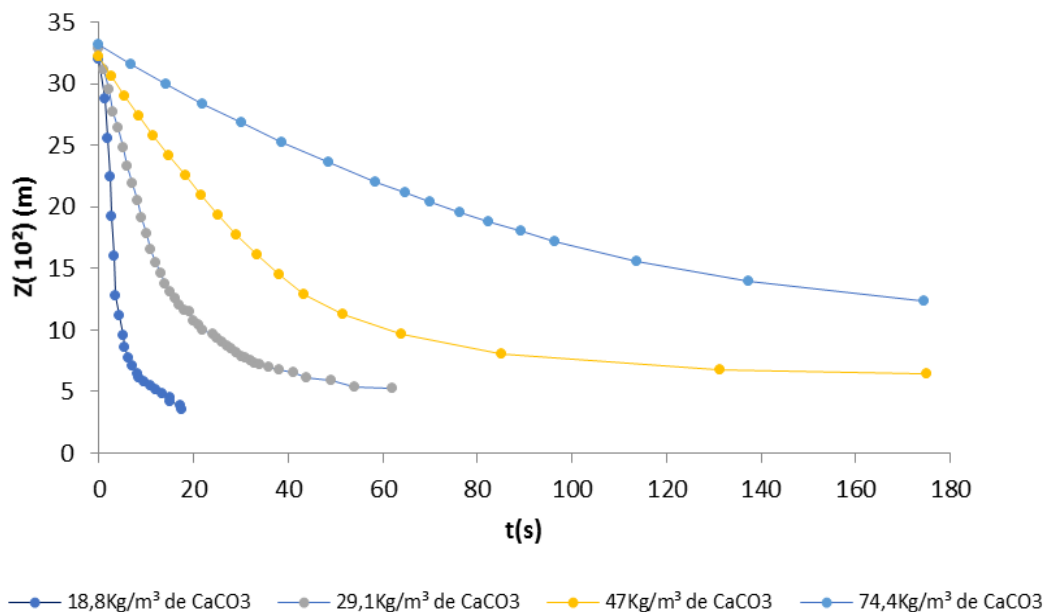
$$H_c = \frac{4}{3} \frac{Q_A C_A t}{S \rho_S} \left(\frac{\rho_S - \rho}{\rho_R - \rho} \right) \quad (7)$$

Em que: t é o tempo de sedimentação; ρ_S é a densidade do sólido, ρ a densidade do líquido e ρ_R a densidade da lama.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos pelos testes de proveta para as diferentes concentrações da solução de carbonato de cálcio estão dispostos na Figura 5 através das curvas de sedimentação do sólido nas diferentes concentrações estudadas.

Figura 5 - Curvas de sedimentação do carbonato de cálcio nas concentrações iniciais de 18,8 Kg/m³; 24,8 Kg/ m³; 29,1 Kg/ m³; 47,0 Kg/ m³ e 74,4 Kg/ m³ a 28°C e P=1 atm.



Fonte: Autores (2018).

A correlação de Richardson e Zaki para “efeito de população” indica que o coeficiente de arraste sobre as partículas aumenta quando a porosidade da suspensão diminui, aumentando assim o tempo de sedimentação para

soluções de alimentação mais concentradas e, dessa forma, ocorre um abaixamento mais devagar da interface clarificado-sedimento. Assim, para um valor de tempo qualquer durante o experimento, teoricamente, a altura da interface clarificado-sedimento será maior, quanto maior for a concentração de alimentação conforme pode-se ser comprovado pelo gráfico da Figura 5.

Pode-se observar, com base na Figura 5, que se mantém uma predominância da tendência linear durante um maior período de tempo pelas maiores concentrações da solução. O tempo para atingir a compactação também foi mais longo para tais concentrações, devido a quantidade de partículas nas soluções concentradas, causando uma altura de compactação maior. A menor variação da altura característica da curva de maior concentração se deve à interferência da concentração em relação à velocidade de sedimentação, ou seja, quanto mais concentrada a solução estiver, menor será sua velocidade de sedimentação e, por consequência, menor será a variação da altura percorrida pelo sólido durante a sedimentação.

Analisar o efeito de diferentes concentrações é importante pois, em sedimentadores industriais, são muito comuns variações na concentração de sólidos na alimentação. Do ponto de vista da engenharia química, um projeto de um sedimentador para uma determinada concentração envolve essencialmente, o cálculo da área de sedimentação e da altura do mesmo.

A Tabela 1 apresenta as dimensões obtidas pelo método de Biscaia Jr. para cada teste de proveta feito, considerando que a concentração da lama varia para cada uma das concentrações iniciais e uma vazão de alimentação de 30 m³/h. Foi adicionado 10% do valor calculado como margem de segurança de projeto. Segundo Massarani (2001) “do ponto de vista da separação sólido-líquido, o projeto do sedimentador contínuo está basicamente relacionado ao cálculo da área da seção de sedimentação e da altura do equipamento”.

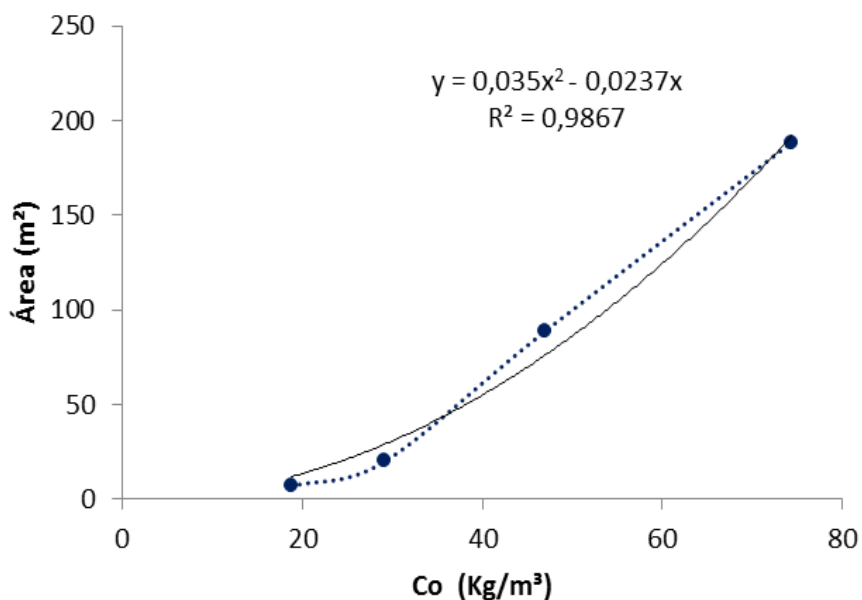
Tabela 1- Dimensões correspondentes às concentrações e parâmetros de ajuste

$C_0(\text{kg/m}^3)$	$C_L(\text{kg/m}^3)$	Área(m^2)	Altura(m)
18.8	0,053	7.3	0.94
29.1	0,081	20.13	1.22
47	0,111	88.94	1.56
74.4	0,166	188.44	1.83

Fonte: Autores (2018).

A partir dos dados obtidos do ajuste das curvas de sedimentação foi possível determinar a área do sedimentador pelo método de Biscaia Jr. Os valores da área e altura em função da concentração foram plotados e encontram-se nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Relação quadrática da concentração com a área do sedimentador.



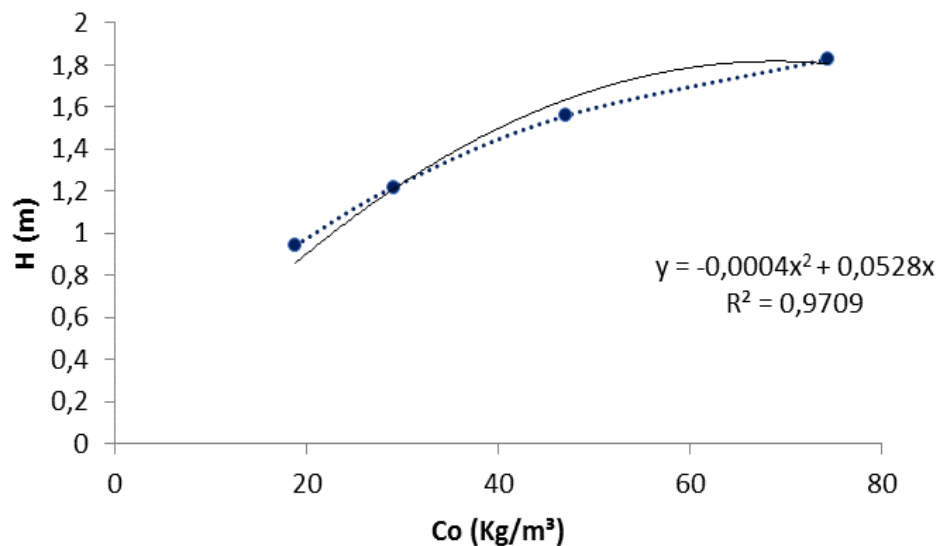
Fonte: Autores (2018).

Pode-se observar pela Figura 5, 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.

A equação do ajuste dos dados modela o processo de sedimentação para qualquer concentração de solução de CaCO_3 na faixa de 18,8 g/L e 74,4 g/L, pode-se observar que o fator de determinação é acima de 98% o que indica um bom ajuste dos dados. A partir desta equação, pode-se prever a área mínima necessária para um sedimentador, com base na sua concentração inicial de espessante. De maneira semelhante à concentração, pode-se observar na Figura 7 que a altura do sedimentador é proporcional a concentração.

Figura 7 - Relação quadrática da concentração com a altura total do sedimentador.



Fonte: Autores (2018).

Deste modo, com as duas equações dadas pelos ajustes, pode-se determinar as dimensões necessárias para o sedimentador em qualquer concentração dentro desta faixa de estudo.

3 CONCLUSÕES

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo matemático para as dimensões de um sedimentador com base no modelo proposto por Biscaia Jr. para o intervalo de concentrações entre 18,8 Kg/m³ e 74, 4 Kg/m³. Pode-se concluir de acordo com o modelo desenvolvido que este mostrou-se capaz prever as dimensões para sedimentadores que estejam no intervalo de concentrações deste estudo. Além disso pode-se verificar a importância do desenvolvimento de modelos matemáticos para a simulação, o projeto e o controle de sedimentadores, por serem, práticos e econômicos. Em trabalhos futuros, pretende-se expandir o estudo para modelos mais complexos que contemplem a vazão como variável de modificação.

REFERÊNCIAS

- Arouca, F. O. (2007). **Uma contribuição ao estudo da sedimentação gravitacional em batelada**. Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia.
- França, S. C.; Massarani, G. (2004). **Separação sólido-líquido**. Comunicação Técnica – CETEM. Rio de Janeiro.
- Massarani, G. (2001). **Fluidodinâmica em sistemas particulados**, 2^a ed. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ.
- Moraes JR., D. (1998). **Fundamentos de Operações Unitárias: Projeto Básico e Seleção de Equipamentos de Indústrias Químicas**. São Carlos: UFSCar/DEQ, p. 07 – 92.
- Nunes, J. F. (2008). **Estudo da sedimentação gravitacional de suspensões floculentas**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia.
- Peçanha, R. (2015). **Sistemas Particulados: Operações unitárias envolvendo partículas e fluídos**. Elsevier, Brasil.

Edição especial - XX ENMC (Encontro Nacional de Modelagem Computacional) e VIII ECTM (Encontro de Ciência e Tecnologia dos Materiais), realizado entre 16 e 19 de outubro de 2017 na cidade de Nova Friburgo – RJ.

Editor – Mateus das Neves Gomes