

III Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	Artigo: 14
	Páginas: 100-107

Aplicação de modelos de sedimentação em batelada para sistema de floculação-sedimentação de microalgas *Acutodesmus obliquus*

Raí H. R. Hanashiro¹, Caroline B. Stoco¹, Marcelo K. Lenzi¹, André B. Mariano², José V. C. Vargas³, Rafael B. Vieira¹

1 - Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ), Universidade Federal do Paraná, CEP 81531-980 Curitiba, PR, Brasil.

2 - Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PIPE), Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento Autossustentável (NPDEAS), UFPR - Universidade Federal do Paraná, CP 19011, 81531-980 Curitiba, PR, Brasil

3 - Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PIPE), Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento Autossustentável (NPDEAS), UFPR - Universidade Federal do Paraná, CP 19011, 81531-980 Curitiba, PR, Brasil

Resumo: Os biocombustíveis são importantes alternativas para substituição de combustíveis fósseis e a busca por matérias-primas para sua produção é de relevante importância no cenário atual. Dentre elas estão as microalgas, que são espécies de fácil adaptação a diversas condições e que ocupam menor área quando comparada ao cultivo das oleaginosas. O principal fator limitante para a produção de microalgas em larga escala é o custo envolvido no processo. Os métodos de separação das microalgas do meio de cultivo representam 20 a 30% do custo total, e a determinação das técnicas de menor custo de separação é fator determinante no processo. A separação de microalgas por floculação-sedimentação é vantajosa devido ao baixo custo envolvido. Este trabalho avaliou a floculação-sedimentação das microalgas *A. obliquus* em regime batelada e ajustou-se os dados experimentais através de quatro modelos encontrados na literatura. Os modelos, os quais relacionam velocidade de sedimentação e concentração ($v_{sed} = f(C)$), são: Vesilind, Takács, Cole e Diehl. Os modelos exponenciais, de Vesilind e Takács ajustaram os dados satisfatoriamente, com valores de R^2 equivalentes a 0,961 e 0,980, respectivamente. O modelo de Cole apresentou o pior ajuste, com o menor valor de R^2 (0,796) e maior variância estimada (1,804). O modelo de Diehl foi aquele que atingiu o melhor ajuste, com R^2 igual a 0,992 e menor variância estimada (0,077), além de menores incertezas dos parâmetros ajustados. Por ser um modelo de lei de potência, Diehl ajustou satisfatoriamente desde suspensões de baixa concentração (sedimentação discreta) a suspensões de concentração elevada (sedimentação com compressão). O conhecimento do comportamento da função velocidade é essencial para o projeto de sedimentadores e estimativa das operações contínuas dos mesmos.

Palavras-chave: Microalgas. Sedimentação. Floculação. Batelada. Modelos.

Introdução

O cenário atual de produção industrial indica a busca de substituintes dos combustíveis fósseis por fontes energéticas alternativas, com grande ênfase em pesquisas que encontrem matérias-primas para produção de biomassa para posterior conversão em biocombustíveis. Estima-se que estes emitam quantidade de gás carbônico 40% menor que os combustíveis fósseis [1].

Muitas fontes de biocombustíveis são fontes de produtos alimentares e apresentam algumas limitações como o uso ineficiente da terra para o cultivo, o baixo teor de lipídio, o alto consumo de água para irrigação e a competição com a produção alimentícia. Desta maneira, a busca por novas fontes é necessária, e a biomassa de microalgas figura entre uma delas [2].

A biomassa de microalgas é uma das fontes promissoras de biodiesel visto que possuem quantidade de óleo que pode atingir 80% da massa. Elas são microrganismos fotossintetizantes capazes de crescer rapidamente sob condições extremas devido a sua

estrutura celular. São cultivadas com utilização de CO₂, nutrientes, luz solar e agentes fotossintetizantes [1].

Estudos recentes indicam maneiras eficazes e econômicas de recuperá-la e os principais métodos são filtração, centrifugação, flotação, eletroforese e floculação-sedimentação [3].

A centrifugação e a eletroforese são processos de alta eficiência, porém de grande consumo energético. A filtração demanda troca e limpeza de filtros consumindo boa parte do tempo. Além disso, o pequeno tamanho das células e as reduzidas concentrações fazem com que procedimentos como filtração e centrifugação sejam desfavoráveis energeticamente. O processo de floculação-sedimentação representa baixo custo energético desde que se utilize floculante de baixo custo [3].

O Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS) trabalha com o cultivo da espécie *Acutodesmus obliquus*, cultivadas em meio contendo dejetos suínos, o que caracteriza meio de cultivo com efluente real que, diferentemente do sintético, pode trazer algumas variações. Esta espécie foi obtida por seleção natural, aclimatada em Curitiba-PR, e é cultivada em fotobiorreatores nas condições ambientes de temperatura e luz solar.

Grande parte dos estudos que envolvem recuperação de biomassa de microalgas através de floculação-sedimentação visam à determinação do melhor floculante a ser empregado no processo. Este trabalho investiga o sistema de floculação-sedimentação em batelada para recuperação da *A. obliquus* e propõe modelo que melhor ajusta os dados experimentais de velocidade de sedimentação em função da concentração.

2. Materiais e Metodologia

Microalgas

A. obliquus foi isolada pelo NPDEAS e a biomassa foi produzida em fotobiorreatores através de rota autotrófica utilizando dejetos suínos biodigeridos (2,5%) e água como meio de cultivo. Novas culturas utilizadas nos experimentos foram obtidas a cada 15 dias de cultivo nos fotobiorreatores, mantidos em condições ambientais de temperatura e radiação, e alimentados com ar comprimido com CO₂ (0,04%).

A espécie cultivada foi obtida por seleção natural aclimatada no local a ser cultivado, Curitiba-PR, e se caracteriza por ser uma espécie selvagem de microalgas. O meio de cultivo (dejetos suínos biodigeridos) é caracterizado por ser efluente real.

Preparação da solução de floculantes

Tanfloc SG (Tanac, Brasil) foi utilizado como floculante. Tal floculante foi fornecido pelo fabricante em forma de pó e precisou-se solubilizá-los para sua utilização. O Tanfloc é um produto à base de tanino, obtido da *Acacia maearnsii*, modificado por processos físico-químicos e que possui elevado poder floculante. Para solubilização foi utilizada água destilada como solvente a uma concentração de 10 g L⁻¹.

Ensaio em batelada

Os ensaios em batelada foram realizados antes dos ensaios contínuos, através de Jar-Test, que é um equipamento composto por seis recipientes, contendo dois litros

cada, e agitador mecânico. O equipamento foi programado para uma agitação inicial maior durante 10 segundos seguida de uma agitação branda por 10 minutos. A agitação inicial mais alta efetua a mistura da microalga com o floculante e deve ser rápida, enquanto a agitação branda ocorreu por um tempo maior para formação dos flocos.

A etapa inicial consistiu na determinação da melhor dose de floculante para, de acordo com a condição específica de pH (6,0), como mostra a Fig 1. Na etapa posterior, os ensaios foram feitos para verificar a curva de sedimentação em diferentes concentrações iniciais de microalga. Esta etapa é importante para a seleção do modelo em batelada, o qual é utilizado na aplicação do modelo contínuo de sedimentação.

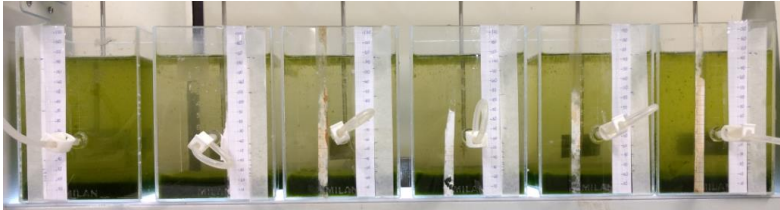


Figura 1. Ensaios em batelada: Jar-test.

Fonte: O autor (2018)

Modelos de sistema em batelada

Os processos de sedimentação são caracterizados de três regimes distintos ao longo da altura de sedimentação: sedimentação discreta, sedimentação zonal e sedimentação com compressão. Na sedimentação livre, o fenômeno é governado pelas propriedades individuais de cada partícula; na sedimentação perturbada, todas as partículas assentam como uma zona com velocidade constante; a sedimentação com compressão ocorre na região de formação do lodo onde as partículas comprimem-se devido ao peso e sedimentam de forma bem mais lenta [4].

Os modelos de sedimentação encontrados na literatura são predominantemente modelos exponenciais e de lei de potência, sendo os modelos exponenciais os mais consolidados para descrever este regime de sedimentação. De Clercq et al. e Diehl [5,6] observaram que a função exponencial para velocidade de sedimentação perturbada em combinação com expressão de sedimentação com compressão não foi capaz de descrever dados de sedimentação em batelada enquanto que as funções de lei de potência melhoraram a captação destes dados pelo modelo.

Torfs et al. [4] estudaram quatro diferentes modelos de batelada: Vesilind [7], Takács [8], Cole [9] e Diehl [10], de acordo com as Eqs. 1 a 4. Os modelos de Vesilind e Takács são funções exponenciais, e os modelos de Cole e Diehl são leis de potência. De maneira geral, modelos exponenciais ajustam bem dados experimentais de sedimentação em batelada, embora em alguns casos as funções de lei de potência faça também bons ajustes. Os termos V_0 , r_v , r_h , r_p , k , n , M e q são os parâmetros a serem estimados dos modelos.

$$\text{Vesilind} \quad v_{\text{sed}}(C) = V_0 e^{-r_v C} \quad (1)$$

$$\text{Takács} \quad v_{\text{sed}}(C) = V_0 (e^{-r_h C} - e^{-r_p C}) \quad (2)$$

Cole $v_{\text{sed}}(C) = k C^{-n}$ (3)

Diehl $v_{\text{sed}}(C) = \frac{V_0}{1 + \left(\frac{C}{M}\right)^q}$ (4)

A variância estimada dos modelos foi determinada pela Eq. 5.

$$s^2_{\text{est}} = \frac{F_0}{N_{\text{exp}} - N_{\text{par}}} \quad (5)$$

Onde F_0 é a função objetivo, N_{exp} é o número de experimentos e N_{par} é o número de parâmetros.

3. Resultados e Discussão

Os testes realizados no Jar-test forneceram as curvas de sedimentação para cada condição, como mostrado pela Fig 2. A velocidade de sedimentação, caracterizada pela inclinação inicial das curvas, diminui com o aumento da concentração inicial de microalgas.

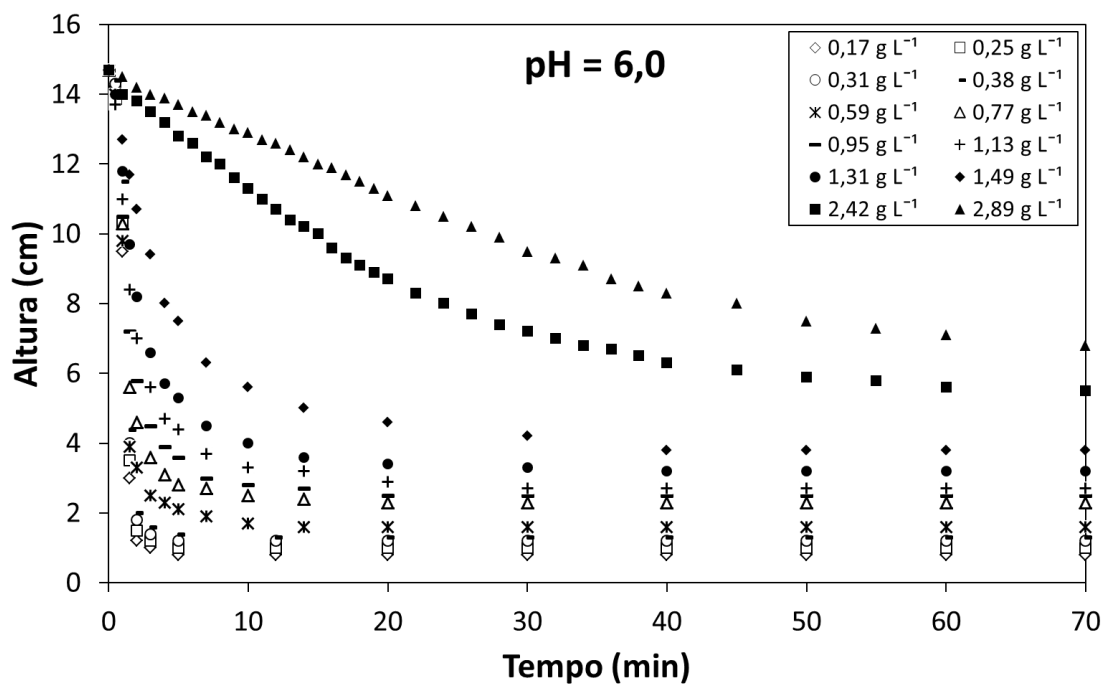


Figura 2. Curvas de sedimentação para diferentes concentrações iniciais de microalgas para pH de 6,0.

Fonte: O autor (2018)

A partir das curvas apresentadas se nota os três regimes de sedimentação (discreta, zonal e com compressão). Em baixas concentrações a velocidade de sedimentação é maior e nestas condições a sedimentação se caracteriza por ser discreta,

pois as partículas sedimentaram com maior liberdade, e a velocidade de queda é rápida como mostram as curvas de altura em função do tempo. Em concentrações intermediárias a sedimentação é predominantemente zonal, pois se observou os sólidos sedimentando como uma zona única de velocidade constante de valores um pouco mais baixos. Para concentrações elevadas, a partir de 2 g L^{-1} , já se observa uma região maior de compressão de lodo e velocidade de sedimentação muito baixas. Este comportamento é observado através do gráfico da Fig 3, quando em elevadas concentrações a velocidade é muito próxima de zero.

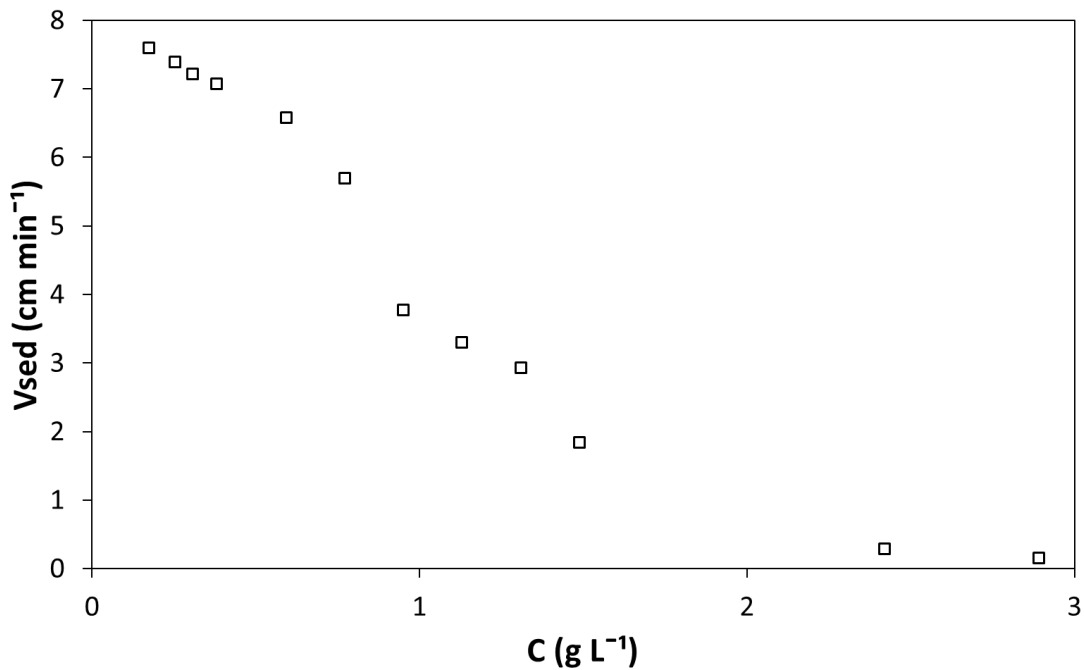


Figura 3. Velocidade de sedimentação em função da concentração inicial de microalgas para pH de 6,0.

Fonte: O autor (2018)

A partir dos pontos experimentais mostrados na Fig 3, foram feitos ajustes dos modelos de Vesilind, Takács, Cole e Diehl, conforme mostra a Fig 4. Para tanto foi utilizado o software Matlab e a sub-rotina “fminsearch”. As linhas em vermelho mostram a região de confiança dos modelos. A variância estimada foi calculada conforme a Eq. 5.

De acordo com a Fig 4, observa-se que todos os modelos ajustaram bem os dados experimentais, com exceção de Cole que apresentou uma região de confiança do modelo maior em relação aos demais, assim como o erro estimado dos pontos experimentais. Isso indica que este modelo não é indicado para representar o sistema de floculação-sedimentação estudado. A Tabela 1 mostra os valores de R^2 e variância estimada para os quatro modelos ajustados e confirma o pior ajuste para Cole, com valor de R^2 igual a 0,796, que representa o menor valor dentre eles, e variância estimada mais alta (1,804).

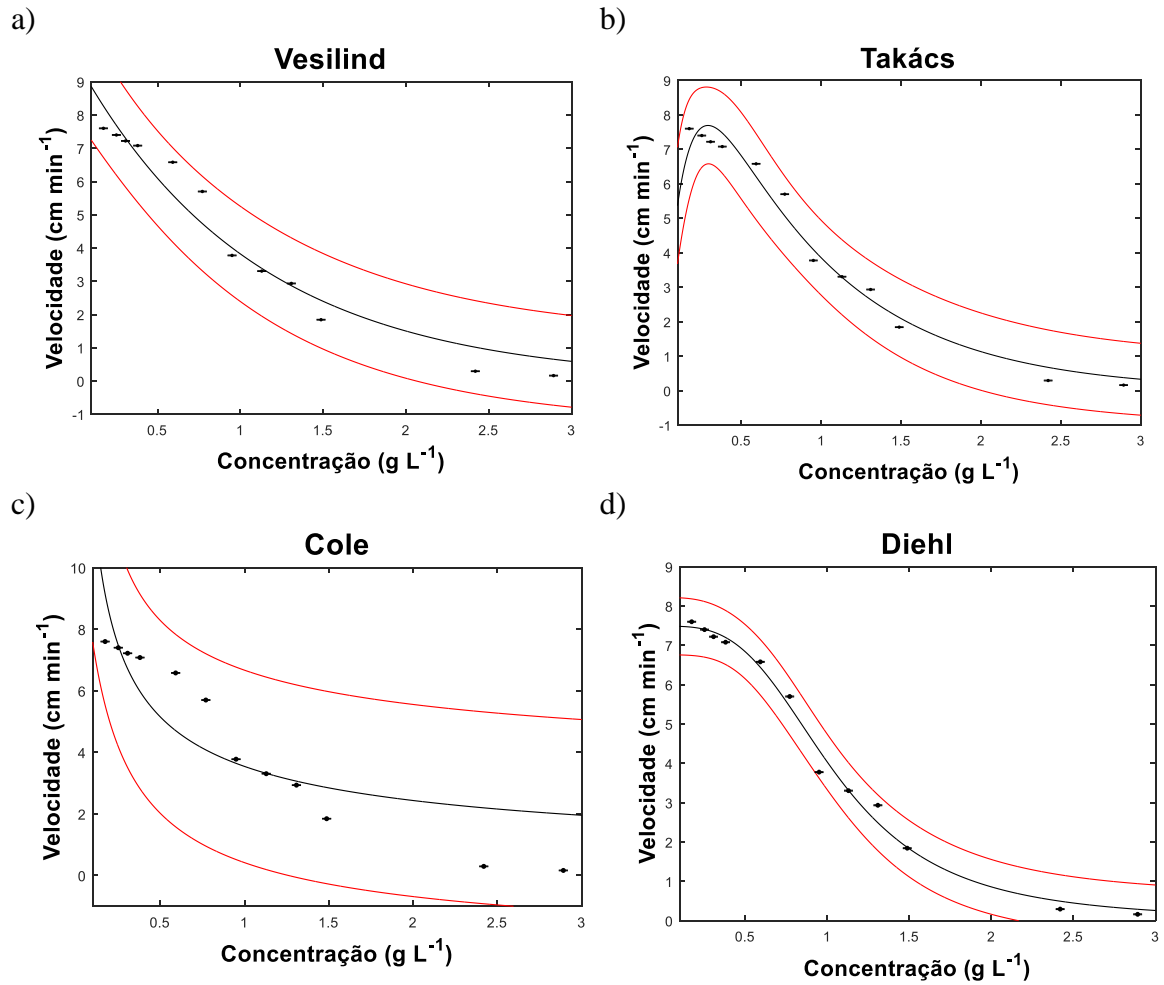


Figura 4. Modelos ajustados aos dados experimentais: a) Vesilind, b) Takács, c) Cole e d) Diehl.

Fonte: O autor (2018)

Tabela 1. Resultados para os parâmetros estimados, r^2 e variância estimada para pH igual a 6,0.

Modelo	Vesilind	Takács	Cole	Diehl
Parâmetros	V_0 $9,7 \pm 1,1 \text{ cm min}^{-1}$ r_v $0,9 \pm 0,2 \text{ L g}^{-1}$	V_0 $13,2 \pm 5,6 \text{ cm min}^{-1}$ r_h $1,2 \pm 0,4 \text{ L g}^{-1}$ r_p $7,4 \pm 4,9 \text{ L g}^{-1}$	k $3,6 \pm 0,9 \text{ cm min}^{-1}$ n $0,6 \pm 0,2$	V_0 $7,5 \pm 0,4 \text{ cm min}^{-1}$ M $1,05 \pm 0,07 \text{ L g}^{-1}$ q $3,2 \pm 0,6$
R^2	0,961	0,980	0,796	0,992
s^2_{EST}	0,367	0,197	1,804	0,077

FONTE: O autor (2018)

Dentre os outros três o modelo de Vesilind apresentou o menor valor de R^2 (0,961). Os demais modelos, Takács e Diehl, apresentaram R^2 superior a 0,98, o que indica bom ajuste dos dados. No entanto, o modelo de Takács resultou em maior variância estimada (0,197) e no menor valor de R^2 (0,980) comparado ao modelo de Diehl. No ajuste de Diehl, o valor de R^2 atingiu 0,992 e foi o modelo que apresentou a menor variância estimada (0,077) e é o modelo que melhor ajusta os dados experimentais nestas condições. Assim, o modelo é representado através da Equação 18.

$$v_{\text{sed}}(C) = \frac{7,5}{1 + \left(\frac{C}{1,05}\right)^{3,2}} \quad (18)$$

Conforme mostrado pela Tabela 1 o modelo de Diehl apresenta parâmetros com incertezas pequenas, o que também é indicativo que o este modelo é bom e apropriado ao sistema estudado. Já em Takács, que também apresentou bom ajuste, os valores das incertezas dos parâmetros foram maiores.

De Clercq et al. [5] e Diehl [6] mostraram que os modelos de lei de potência, como é o de Diehl, descrevem melhor os dados que envolvem os três regimes de sedimentação (discreta, zonal e com compressão), sendo de fato o modelo que se esperava melhor ajuste dentre os quatro estudados.

4. Conclusão

Os sistemas de sedimentação em batelada de maneira geral são bem representados por modelos exponenciais de velocidade de sedimentação em função da concentração. Neste trabalho, os modelos exponenciais representam satisfatoriamente sistemas de sedimentação, conforme mostrados por trabalhos anteriores. No entanto, um modelo mais recente apresentado por Diehl ajustou melhor os dados experimentais e este modelo tem a capacidade de representar todos os regimes de sedimentação do sistema (discreta, zonal e compressão). A determinação do comportamento do sistema em batelada auxilia tanto no projeto de sedimentadores quanto na previsão do sistema em escala maior, tanto de sistema em batelada quanto de sistemas contínuos.

5. Agradecimentos

Agradecimentos dos autores a CAPES e Cnpq pelo auxílio econômico para a realização do trabalho e a Universidade Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS

- [1] J.F. Reyes, C. Labra, Biomass harvesting and concentration of microalgae *scenedesmus* sp. cultivated in a pilot photobioreactor, *Biomass and Bioenergy*. 87 (2016) 78–83. doi:10.1016/j.biombioe.2016.02.014.
- [2] S. Dickinson, M. Mientus, D. Frey, A. Amini-Hajibashi, S. Ozturk, F. Shaikh, D. Sengupta, M.M. El-Halwagi, A review of biodiesel production from microalgae, *Clean Technologies and Environmental Policy*. 19 (2016) 637–668. doi:10.1007/s10098-016-1309-6.
- [3] S. Salim, L. Gilissen, A. Rinzema, M.H. Vermuë, R.H. Wijffels, Modeling microalgal flocculation and sedimentation, *Bioresource Technology*. 144 (2013) 602–607. doi:10.1016/j.biortech.2013.07.026.

- [4] E. Torfs, S. Balemans, F. Locatelli, S. Diehl, R. Bürger, J. Laurent, P. François, I. Nopens, On constitutive functions for hindered settling velocity in 1-D settler models : Selection of appropriate model structure, *Water Research*. 110 (2017) 38–47. doi:10.1016/j.watres.2016.11.067.
- [5] J. De Clercq, I. Nopens, J. Defrancq, P.A. Vanrolleghem, Extending and calibrating a mechanistic hindered and compression settling model for activated sludge using in-depth batch experiments, *Water Research*. 42 (2008) 781–791. doi:10.1016/j.watres.2007.08.040.
- [6] S. Diehl, J. Zambrano, B. Carlsson, Steady-state analysis of activated sludge processes with a settler model including sludge compression, *Water Research*. 88 (2016) 104–116. doi:10.1016/j.watres.2015.09.052.
- [7] P.A. Vesilind, Design of prototype thickeners from batch settling tests, *Water Sewage Works*. 115 (1968) 302–307.
- [8] I. Takacs, G.G. Patryioand, D. Nolasco, A DYNAMIC MODEL OF THE CLARIFICATION-THICKENING PROCESS, *Wat. Res.* 25 (1991) 1263–1271. https://ac.els-cdn.com/004313549190066Y/1-s2.0-004313549190066Y-main.pdf?_tid=1fe89388-adc7-11e7-9016-00000aab0f27&acdnat=1507645822_47c4e193796dd664916213ad3300d3b3 (accessed October 10, 2017).
- [9] R.F. Cole, Experimental Evaluation of the Kynch Theory, University of North Carolina, 1968. [http://www.sciencedirect.com/science/refhub/S0043-1354\(16\)30929-0/sref12](http://www.sciencedirect.com/science/refhub/S0043-1354(16)30929-0/sref12).
- [10] S. Diehl, Numerical identification of constitutive functions in scalar nonlinear convection–diffusion equations with application to batch sedimentation, *Applied Numerical Mathematics*. 95 (2015) 154–172. doi:10.1016/j.apnum.2014.04.002.