



## INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE COMPORTAMENTO NO COEFICIENTE DE FRICÇÃO EM ESCOAMENTOS LAMINARES DE FLUIDOS DO TIPO POWER-LAW EM CURVA DE 90°

### INFLUENCE OF BEHAVIOR INDEX ON FRICTION COEFFICIENT IN LAMINAR FLOW OF POWER-LAW FLUIDS IN 90° BEND

Daniel Zancanella de Camargo (1); Jordan Deambrosio Cussuol (1); Michel de Oliveira dos Santos (2); Renato do Nascimento Siqueira (3, P)

(1) Graduando em Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, Brasil.

(2) Me. Prof., Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, Brasil.

(3) Dr. Prof., Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, Brasil.

Email para Correspondência: danielzancanella@hotmail.com

**Resumo:** Muitos fluidos comumente utilizados em processos industriais apresentam comportamento pseudoplástico. Na indústria do petróleo, por exemplo, eles são encontrados em vários estágios, como perfuração, completação e transporte; e na indústria alimentícia, eles são geralmente encontrados em sopas, sucos e pastas. Apesar de serem amplamente utilizados, o comportamento destes fluidos sob determinadas condições de escoamento ainda carece de ser melhor elucidado, principalmente para melhorar a estimativa da perda de carga em elementos de tubulações. Sabendo-se que o coeficiente de fricção é um parâmetro de suma importância para prever a perda de carga em um sistema de tubulação, o presente trabalho analisa este fator sobre influência do número de Reynolds e do índice de comportamento em escoamento laminar numa curva de 90°. Utilizou-se o modelo Power-Law para representação do comportamento dos fluidos pseudoplásticos analisados. Os fluidos avaliados tiveram índices de comportamento variados de 0,1 a 0,9, com massa específica de 998 kg/m<sup>3</sup> e índice de consistência de 0,678 Pa.s<sup>n</sup>. As simulações foram realizadas com o *software* Ansys® CFX 16.0. Os resultados mostram que o coeficiente de fricção é inversamente proporcional ao número de Reynolds e diretamente proporcional ao índice de comportamento. Para quantificar essas correlações utilizou-se de um ajuste de curva através do método 2k. Assim, pode-se prever o coeficiente de fricção e conseqüentemente a perda de carga associada. Estes resultados podem contribuir para melhor estimativa da perda de carga, resultando em maior qualidade no projeto de sistemas de bombeamento.

*Palavras chaves:* fluidos pseudoplásticos; perda de carga; sistemas de bombeamento; coeficiente de fricção.

**Abstract:** Many fluids commonly used in industrial processes exhibit pseudoplastic behavior. In the oil industry, for instance, they are found in several stages, such as drilling, completion and transportation; and in the food industry, they are usually seen in soups, juices and pastes. Even though they are widely used, their behavior when submitted to certain flow conditions is not



known, which is very important in order to design pipelines to their transportation. Since the friction coefficient is an important parameter to predict the head loss in the systems, the present work analyzes the influence of the Reynolds number and the behavior index on this coefficient for laminar flow in a curve of  $90^\circ$ . The Power-Law model was used to represent the behavior of the analyzed pseudoplastic fluids. Thus, the evaluated fluids had behavioral indexes varying from 0.1 to 0.9, with a specific mass of  $998 \text{ kg/m}^3$  and a consistency index of  $0.678 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ . The simulations have been performed with the Ansys® CFX 16.0 software. The results show that the friction coefficient is inversely proportional to Reynolds number and directly proportional to the behavior index. To quantify these correlations, a curve fit was using the  $2k$  method. Thus, one can predict the friction coefficient and consequently the associated head loss. These results may contribute to the understanding of localized pressure drop in pumping system designs.

**Keywords:** *pseudoplastic fluids; head loss; pipelines; friction coefficient.*

## 1 INTRODUÇÃO

Fluidos pseudoplásticos são aqueles cuja viscosidade diminui com o aumento da taxa de deformação, como exemplo tem-se, iogurte, ketchup, maionese, sangue, creme dental, filtro solar, fluidos de perfuração usados na indústria de petróleo e polímeros fundidos como polipropileno e poliestireno (Chhabra e Richardson, 2008). A Equação (1) demonstra a relação da viscosidade efetiva ( $\mu_E$ ) em função da taxa de deformação e das propriedades reológicas dos fluidos.

$$\mu_E = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

Gotschlich (2011) destaca que o conhecimento do comportamento reológico de um fluido é indispensável nas operações unitárias da indústria do processamento de alimentos. Esses processos geralmente envolvem o transporte de fluidos, que é realizado mediante bombas. O comportamento reológico, o qual influencia fortemente nas perdas por atrito, define a potência e o tipo de bomba requerida pelo sistema.

Segundo Pereira (2006), para descrever as características não newtonianas de um fluido pseudoplástico, o modelo Power-Law é amplamente utilizado, devido à sua simplicidade e capacidade de descrever o comportamento do fluxo. Podendo-se estender também para fluidos dilatantes. Baseado nos trabalhos de Chhabra e Ricardson (2008) e Steffe e Daubert (2006), este modelo é representado pela Eq. (1). Ainda a Equação (2) expressa a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) gerada por esse tipo de fluido, e os parâmetros  $K$  e  $n$  são os índices de consistência e de comportamento, respectivamente.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Desta forma, se  $n$  é igual a 1, o fluido é newtoniano e é a mudança nesse parâmetro que representa o comportamento não newtoniano, valores abaixo de 1 são caracterizados para fluidos pseudoplásticos.

Esses modelos empíricos que descrevem como é o comportamento do tensor de tensões em função da taxa de deformação do fluido, são necessários para o cálculo do fator de atrito ( $f$ ) e do número de Reynolds ( $R_e$ ), tendo assim grande importância para o cálculo da perda de carga e caracterização dos regimes de escoamento (Braga, 2009). Tais parâmetros podem ser avaliados para o modelo Power-Law segundo as Eq. (3) e (4) referenciadas no trabalho de Bicalho (2015).

$$R_e = \frac{D^n v^{(2-n)} \rho}{K \left( \frac{1+3n}{4n} \right)^n 8^{(n-1)}} \quad (3)$$

$$f = \frac{16}{R_e} \quad (4)$$

Onde  $v$  é a velocidade média e  $D$  o diâmetro do tubo. Outro parâmetro de suma importância para se avaliar a perda de carga é o número de Reynolds crítico que possibilita a investigação do regime de fluxo. Darby (2001) propõe uma expressão dada pela Eq. (5) para cálculo desse parâmetro, nota-se que o mesmo é dependente do índice de comportamento do fluido, e com isso delimita-se as condições de fluxo laminar. Observam-se valores variantes de 2888 a 2100 para  $n$  igual 0,1 e 0,9, respectivamente.

$$(Re)_{\text{crítico}} = 2100 + 875(1 - n) \quad (5)$$

Segundo Rigatto e Siqueira (2015), devido à escassez de dados na literatura, é de extrema importância avaliar o comportamento e a perda de carga de fluidos pseudoplásticos que escoam em oleodutos. Os autores utilizam a dinâmica de fluidos computacional (CFD) para avaliar a perda de carga das soluções de goma xantana fluindo através de uma curva de 90° no regime de fluxo laminar. Os resultados demonstram que a perda de carga é proporcional ao número de Dean.

Já Gabriel e Siqueira (2015) avaliaram a influência do índice de comportamento do modelo Power-Law na eficiência do processo de limpeza de poços. Observou-se que o uso de um fluido com  $n$  de 0,1 levou a uma diminuição de 89% no valor de perda de carga, quando comparado aos resultados obtidos para o índice de 0,9.

Kfuri *et al.* (2016) analisaram os coeficientes de fricção para o fluxo laminar de fluidos Bingham e Power-Law em contrações e expansões abruptas e observaram a diminuição dos coeficientes com o aumento do número de Reynolds, até valores próximos a 1000, onde a constância dos valores foi obtida em ambos os casos. As perdas por fricção foram determinadas e os valores dos coeficientes de perda foram calculados em função do número de Reynolds generalizado pelo método  $2k$  e foi observado um bom ajuste do modelo.

O método  $2k$  é frequentemente encontrado na literatura para ajustar as curvas do coeficiente de atrito, devido à sua simplicidade, pois possui apenas dois parâmetros. Foi proposto por Hooper (1981) e é representado na Eq. (6) em que  $K_l$  está relacionado ao regime de fluxo laminar e  $K_\infty$  é dominante no regime turbulento e  $K_b$  é o coeficiente de fricção da curva.

$$K_b = \frac{K_l}{Re} + K_\infty \quad (6)$$

Csizmadia e Hős (2014) definem as quedas de pressões geradas através de um escoamento em um elemento ou conexão hidráulica qualquer e a partir disso estudam a perda de carga gerada no escoamento de fluidos do tipo Power-Law em difusores e joelhos. A Figura 1 ilustra essas quedas de pressões, assim, define-se a perda de carga localizada em um elemento como a perda de carga total ( $\Delta p_{\text{all}}$ ) subtraída da perda de carga distribuída a montante ( $\Delta p_{\text{in}}$ ) e a jusante ( $\Delta p_{\text{out}}$ ) do mesmo. Essa análise é utilizada também no trabalho de Kfuri *et al.* (2016).

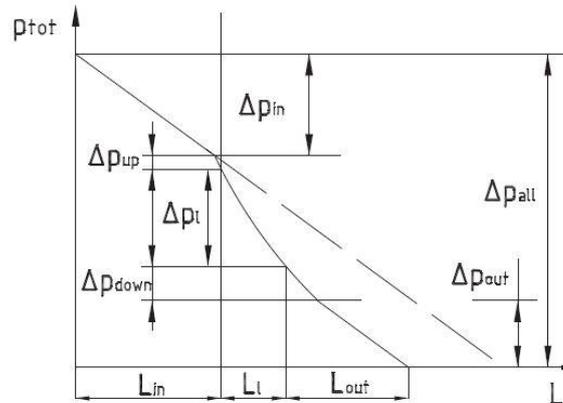


Figura 1. Distribuição de pressão ao longo da linha central de elementos de tubulação.

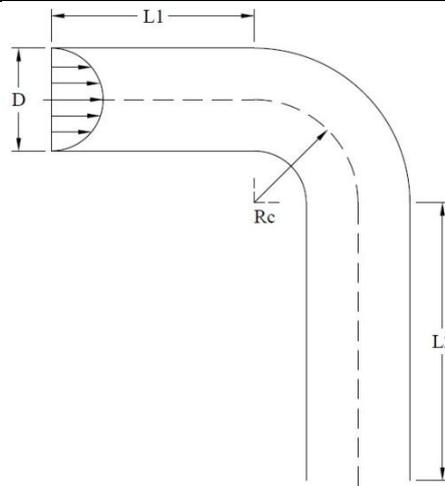
Fonte: (Csizmadia e Hós, 2014).

Observa-se que a queda de pressão no elemento é composta por três elementos: distúrbios de pressão na entrada ( $\Delta p_{up}$ ) e na saída ( $\Delta p_{down}$ ), que alteram a distribuição de pressão linear dos tubos de ligação em sua proximidade, e a queda de pressão gerada no próprio elemento ( $\Delta p_t$ ). A Figura 1 também evidencia os comprimentos das tubulações de entrada ( $L_{in}$ ) e de saída ( $L_{out}$ ) bem como o comprimento do acessório ( $L_l$ ) em função dessas perdas de carga.

Notando-se a ampla utilização de fluidos pseudoplásticos na indústria, a perda de carga em acessórios se torna um parâmetro de suma importância para dimensionamento de sistemas de bombeamento, assim, deve-se buscar melhor compreensão desse fenômeno. Decorrente disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do índice de comportamento de fluidos pseudoplásticos, representados pelo modelo Power-Law, no coeficiente de fricção de uma curva de  $90^\circ$  para escoamento laminar utilizando o método  $2k$ .

## 2 METODOLOGIA

A geometria avaliada foi baseada no trabalho de Rigatto e Siqueira (2015). Consistiu de uma curva de  $90^\circ$  com diâmetro ( $D$ ) de 0,0127 m ( $1/2''$ ), com tubos de comprimentos de entrada ( $L_1$ ) e saída ( $L_2$ ) de 0,5 m e 1 m, respectivamente, e raio de curvatura ( $R_c$ ) igual ao diâmetro. A Figura 2 mostra o esboço da geometria.



**Figura 2. Desenho da geometria analisada.**

**Fonte: (Autores, 2018).**

Os fluidos pseudoplásticos avaliados, foram baseados em Gabriel e Siqueira (2015), apresentam índices de comportamento variados de 0,1 a 0,9, massa específica ( $\rho$ ) de 998 kg/m<sup>3</sup> e índice de consistência de 0,678 Pa.s<sup>n</sup>. Já a malha utilizada nas simulações teve 3613929 elementos. Um teste de malha foi realizado para verificar a independência dos resultados obtidos em relação à quantidade de elementos da mesma. Esse teste foi realizado para o caso mais crítico ( $Re = 1$  e  $n = 0,1$ ), pois nessa condição se observou o maior valor do  $K_b$ , e o critério de convergência adotado foi o valor RMS igual a  $1.10^{-5}$ .

Neste trabalho, as simulações foram realizadas com o software Ansys® CFX 16.0. Os perfis de velocidade completamente desenvolvidos para o tubo de entrada foram obtidos utilizando um tubo de 1 m, para todos os casos avaliados. O regime de escoamento foi laminar e isotérmico e o fluido foi considerado incompressível, com a condição de não deslizamento na parede e pressão relativa na saída da geometria igual à zero.

Em virtude disso, para avaliar o coeficiente de atrito, utilizou-se as equações da energia e de perda de carga total, Eq. (7) e (8), conforme descrito por Çengel e Cimbala (2007).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (7)$$

$$h_f = \sum f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum K_b \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

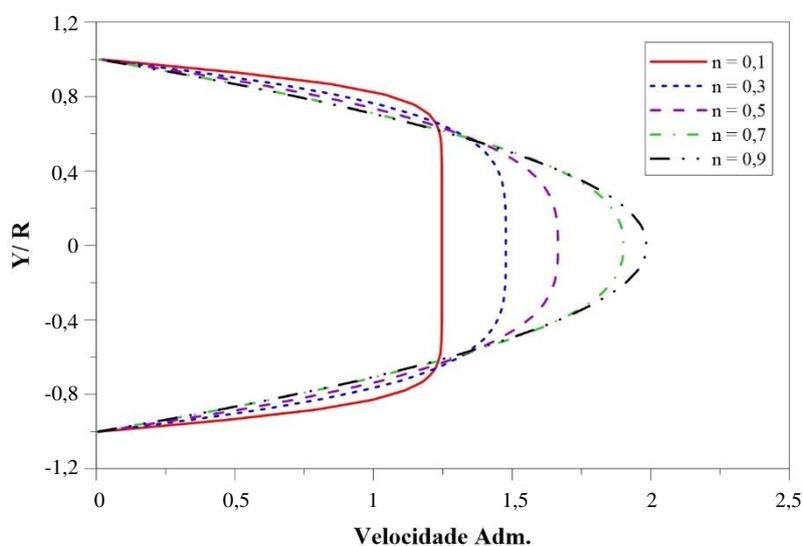
Onde  $P$  é a pressão média,  $g$  é a constante gravitacional,  $h_f$  é a perda de carga total,  $L$  é o comprimento total da tubulação e  $z$  o nível. Neste caso, o subíndice 1 refere-se à entrada e 2 à seção de saída do tubo. Negligenciando a variação de nível, e sabendo que para um fluxo totalmente desenvolvido as velocidades médias são iguais, reorganizando as equações, o coeficiente de atrito pode ser expresso pela Eq. (9) como proposto por Rigatto e Siqueira (2015).

$$K_b = \frac{(P_1 - P_2) - f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}}{\frac{\rho v^2}{2}} \quad (9)$$

Para análise da influência do índice de comportamento de acordo com a condição de fluxo no coeficiente de fricção, analisaram-se os resultados obtidos pela Eq. (9) com auxílio de ajustes de curvas baseando-se no método 2K.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

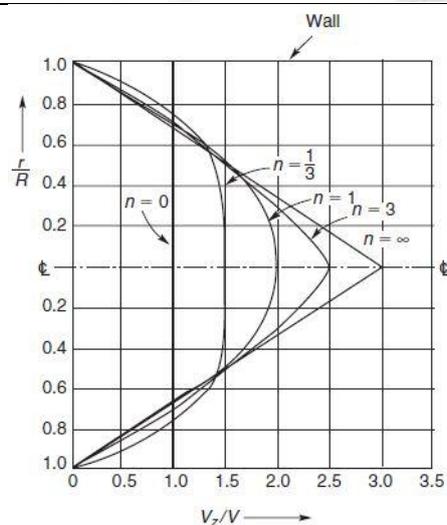
A Figura 3 mostra um gráfico com os perfis de velocidade gerados para os diferentes índices de comportamento analisados. No eixo y é representada a posição em relação ao raio e o eixo x é expresso pela razão da velocidade no sentido de escoamento pela velocidade média, desta forma pôde-se demonstrar a forma dos perfis independentemente no número de Reynolds.



**Figura 3. Distribuição de velocidade em função do índice de comportamento para escoamento laminar.**

**Fonte: (Autores, 2018).**

Observa-se similaridade com a distribuição proposta nos trabalhos de (Chhabra e Richardson, 2008) de modo que para um fluido newtoniano ( $n = 1$ ) a relação de velocidades é igual a 2, e, aproximando-se o índice de comportamento para zero, essa relação tende a números menores até se tornar 1. Como ilustrado na Fig. 4



**Figura 4. Distribuição de velocidade para fluidos do tipo Power-Law em escoamento laminar em tubos.**

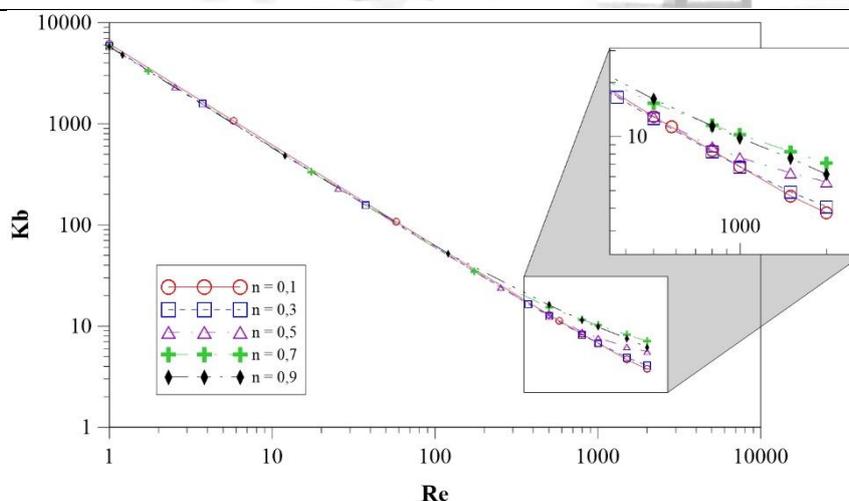
**Fonte: (Chhabra e Richardson, 2008).**

Para a perda de carga total na geometria ( $\Delta P$ ) observa-se proporcionalidade com o aumento do índice de comportamento e do número de Reynolds, como relatado também nos estudos de Gabriel e Siqueira (2015). Tal relação pode ser justificada pelo fato da perda de carga ser proporcional ao quadrado de velocidade e índices de comportamento maiores estão associados a maiores velocidades de escoamento. A Tabela 1 apresenta essa perda em relação às condições analisadas.

**Tabela 1. Resultados da perda de carga na geometria analisada.**

$n$	$\Delta P$ [Pa]				
	$Re = 1$	$Re = 500$	$Re = 1000$	$Re = 1500$	$Re = 2000$
0,1	466	670	722	756	811
0,3	721	2276	2724	3124	3562
0,5	1224	10492	15165	20543	26171
0,7	2413	85264	157336	230125	303582
0,9	6035	1269900	2628440	4145170	5628710

A Figura 5 mostra a influência do número de Reynolds e do índice de comportamento sobre o coeficiente de atrito para os casos avaliados. Vale ressaltar que, para valores baixos de Reynolds (próximos a 1), ocorre uma pequena diferença dos valores em relação ao índice de comportamento do fluido, nota-se que o valor obtido para o menor índice ( $n = 0,1$ ) é cerca de 6% maior do que o obtido para o maior índice ( $n = 0,9$ ).



**Figura 5. Influência do número de Reynolds e índice de comportamento no coeficiente de atrito.**

**Fonte: (Autores, 2018).**

No entanto, para valores de Reynolds próximos a 2000, observa-se um valor de cerca de 39% menor dos coeficientes de atrito. Nota-se também tendência de um valor constante com o aumento de  $Re$  como proposto por Gotschlich (2011). Ainda, Kfuri *et al.* (2016) notaram um comportamento semelhante em seus estudos, para valores pequenos de  $Re$ , quanto maiores os efeitos pseudoplásticos, maiores os valores de  $K_b$ , enquanto o oposto é observado para números altos de Reynolds ainda dentro do regime laminar.

Com base nos dados da Fig. 5, realizou-se o ajuste de curva baseado no método  $2k$ . A Tabela 2 mostra os valores dos parâmetros  $K_I$  e  $K_\infty$  encontrados pelo ajuste, observa-se que o parâmetro  $K_I$  tem mais influência sobre  $K_b$  que o parâmetro  $K_\infty$  para valores baixos de Reynolds, adquirindo menor influência com o aumento de Reynolds como proposto por Hooper (1981).

**Tabela 2. Resultados do primeiro ajuste de curva.**

$n$	$K_I$	$K_\infty$
0,1	6179,672	0,567
0,3	5884,615	0,852
0,5	5817,308	1,587
0,7	5785,176	3,417
0,9	5766,307	3,583

Devido à variação dos parâmetros apresentados pelo método, outros ajustes de curva foram necessários para gerar uma expressão final com a correlação do coeficiente de fricção com o índice de comportamento e as condições de fluxo. Observaram-se coeficientes de



determinação acima de 0,90, garantindo bons ajustes. Assim, com base nos resultados expressos na Tab. 2 e o método de Hooper (1981), esta expressão é apresentada na Eq. (10).

$$K_b = \frac{5771,85 + 752,63e^{-6,15n}}{R_e} - 0,15 + 4,30n \quad (10)$$

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados aqui apresentados mostram a importância de prever com precisão os coeficientes de atrito de acordo com as condições de fluxo (número de Reynolds) e o comportamento dos fluidos ( $n$ ). O método  $2k$  dá um bom ajuste aos dados simulados e pode ser usado para representar a dependência do coeficiente de atrito no número Reynolds ( $R_e$ ) e no índice de comportamento de fluidos do tipo Power-Law. Nota-se também que em baixos valores de Reynolds os fluidos com características mais newtonianas possuem o menor valor do coeficiente  $K_b$ . O aumento em  $R_e$  ocasiona a inversão das curvas e os fluidos mais pseudoplásticos passam a possuir o menor valor do coeficiente de fricção.

## 5 PERMISSÃO

Os autores são responsáveis por todo o conteúdo publicado no artigo.

### *AGRADECIMENTOS*

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo pelo apoio durante a pesquisa.



## REFERÊNCIAS

- Bicalho, I. C., 2015. *Estudo experimental de simulação por CFD de escoamento em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Braga, E. R., 2009. *Estudo do escoamento de fluidos de perfuração em dutos e em regiões anulares*. Dissertação de mestrado, Universidade Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M., 2007. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações*. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill.
- Chhabra, R. P. & Richardson, J. F., 2008. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann.
- Csizmadia P. & Hós C., 2014. CFD-based estimation and experiments on the loss coefficient for Bingham and Power-Law fluids through diffusers and elbows. *Computers & Fluids*, v. 99, pp. 116-123.
- Darby, R., 2001. Take the mystery out of non-Newtonian fluid. *Chemical Engineering*, v. 108, pp. 66-73.
- Gabriel, A. C. & Siqueira, R. N., 2015. Influência do índice de comportamento do modelo Power-Law da eficiência do processo de perfuração. *Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás*, Rio Quente.
- Gotschlich, M. F. L., 2011. *Escoamento de fluidos não newtonianos: revisão da literatura e análise de correlações para o fator de atrito e coeficientes de perda localizada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Hooper, W., 1981. The two-k method predicts head losses in pipe fittings. *Chemical Engineering*, v. 81, pp. 96-100.
- Kfuri, S. L. D., Soares, E. J., Thompson, R. L. & Siqueira, R. N., 2016. Friction coefficients for Bingham and Power-Law fluids in abrupt contractions and expansions. *Journal of Fluids Engineering*, v. 139, n. 2, pp. 021203.
- Pereira, F. A. R., 2006. *Escoamento laminar de líquidos não-newtonianos em seções anulares: estudos CFD e abordagem experimental*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Rigatto, S. F. & Siqueira, R. N., 2015. Perda de carga em escoamentos laminares de fluidos pseudoplásticos através de uma curva de 90°. *Latin American Journal of Energy Research (Lajer)*, v. 2, n. 2, pp. 1 - 7.
- Steffe, J. F. & Daubert, C. R., 2006. *Bioprocessing pipelines: rheology and analysis*. Michigan: Freeman Press.