

https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2017/index

# Simulação numérica do escoamento em meio poroso heterogêneo anisotrópico concebido como um arranjo alternado de cilindros

## **RESUMO**

Daniel Mazur Parisotto
danielparisotto18@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Curitiba. Paraná. Brasil

Silvio Luiz de Mello Junqueira silvio@utfpr.edu.br Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil A modelagem e a simulação numérica do escoamento em meios poros na escala do poro é relevante nas indústrias farmacêutica e o petrolífera. No presente trabalho, é simulado o escoamento laminar em regime permanente de fluido newtoniano em um canal bidimensional com um plugue poroso. O meio poroso é concebido como um arranjo de cilindros dispostos alternadamente incutindo tortuosidade à percolação do fluido. O arranjo é dividido em duas regiões, uma anisotrópica para a fração volumétrica e outra isotrópica. À medida que o fluido percola entre os cilindros, a fração volumétrica é reduzida linearmente (na região anisotrópica) e na região isotrópica é mantida constante. Nesse trabalho é estudado o efeito da variação da configuração do meio poroso (número de cilindros, gradiente de fração volumétrica e dimensão das gargantas de poro) sobre a perda de carga Δp para Re=1 (escoamento Darcyano). Contata-se que a influência da configuração sobre Δp é mais significativa mediante a variação da garganta de poro na região isotrópica.

PALAVRAS-CHAVE: Meio poroso heterogêneo, escala do poro, simulação numérica.



# 1. INTRODUÇÃO

A motivação do presente trabalho é o estudo fenômeno de invasão de fluido de perfuração durante a perfuração de poços de petróleo caracterizado pelo influxo do anular para a formação rochosa (Lavrov, 2016). O tema é de importância para a indústria petrolífera devido aos custos associados com a reposição do fluido perdido e os danos ocasionados à rocha reservatório em decorrência da redução da permeabilidade e, consequentemente, da capacidade produtiva (Civan, 2007).

A formação sendo perfurada é um meio poroso, sendo este composto por duas fases: uma sólida (matriz sólida) e uma de fluido que preenche os vazios existentes na matriz que são denominados poros (Nield e Bejan, 1998). A modelagem do meio poroso dependente da escala de resolução, conforme exemplificado na Figura 1 pelo sistema poço-reservatório. No meio poroso homogêneo os constituintes sólido e fluido situam-se em um mesmo domínio denominado meio poro-contínuo o qual possui propriedades características como a porosidade e a permeabilidade. No meio poroso heterogêneo por sua vez, é possível observar interface sólido-fluido (Merrikh e Lage, 2005). Assim, pode-se aplicar equações de conservação de quantidade de movimento, massa e energia separadamente em cada constituinte e acoplá-las através de condições de contorno na interface fluido-sólido (Sahimi, 2011). O uso de um modelo para conceber a morfologia do meio poroso heterogêneo que simule a formação geológica é necessário porque a disposição, formas e dimensão dos poros em substratos naturais são aleatórios, fato que dificulta, senão impossibilita, o mapeamento da interface fluido-sólida. No presente trabalho, o meio poroso heterogêneo é concebido como um arranjo de cilindros alternados assim como realizado por Kuwahara et al. (1996) e Yang et al. (2010).

Neste trabalho, é avaliada a influência da configuração do arranjo de cilindros sobre as propriedades do escoamento. É analisado o efeito da variação do número de cilindros, da fração volumétrica (porosidade) e da dimensão das gargantas de poro.

Sistema poço-reservatório

Meio poroso heterogêneo

Meio poroso heterogêneo

Meio poroso homogêneo

Figura 1 – Abordagens para a modelagem de fenômenos de transporte em meios porosos.

# 2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A geometria simulada é um canal bidimensional preenchido com um plugue poroso heterogêneo como apresentado na Figura 2. O meio poroso é concebido replicando-se o volume elementar representativo (REV), mostrado em detalhe na Figura 2. O REV apresenta dimensões  $h_{\text{REV}}$  e  $I_{\text{REV}}$  nas direções horizontal e vertical,

Página | 2



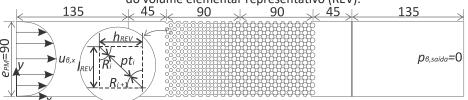
respectivamente. O constituinte sólido é idealizado como dois quartos de cilindros de raios  $R_i$  e  $R_{i+1}$  dispostos em vértices diagonais opostos. O meio poroso é dividido em duas seções, sendo uma com comprimento de 90 mm anisotrópica para a fração volumétrica e outra de 90 mm isotrópica. A fração volumétrica  $\varphi_i$  do i-ésimo REV pode ser obtida em função de  $R_i$  e  $R_{i+1}$ .

$$\varphi_{i} = 1 - \frac{\pi \left( R_{i+1}^{2} + R_{i}^{2} \right)}{4 h_{REV} I_{REV}} \tag{1}$$

O comprimento da garganta de poro do i-ésimo termo,  $pt_{iso}$ , representa a menor distância entre superfícies do cilindros adjacentes.

$$pt_{iso} = \sqrt{I_{REV}^2 + h_{REV}^2} - (R_{i+1} + R_i)$$
 (2)

Figura 2 – Geometria do cana preenchido com um plugue poroso heterogêneo. Detalhe do volume elementar representativo (REV).



O escoamento é supostamente laminar, bidimensional, em regime permanente, de propriedades constantes (fluido Newtoniano) e isotérmico. As equações, apresentadas a seguir, compreendem o balanço de massa e de quantidade de movimento, respectivamente.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u}_{\scriptscriptstyle B} = 0 \tag{3}$$

$$\rho_{\beta} \nabla \cdot (\mathbf{u}_{\beta} \mathbf{u}_{\beta}) = -\nabla p_{\beta} + \mu_{\beta} \nabla^{2} \mathbf{u}_{\beta}$$
(4)

Sendo  $\rho_{\beta} \Big[ kg/m^3 \Big]$  a massa específica do fluido,  $\mu_{\beta} \Big[ Pa.s \Big]$  a viscosidade dinâmica,  $p_{\beta} \Big[ Pa \Big]$  a pressão e o vetor velocidade do fluido  $\boldsymbol{u}_{\beta} \Big[ m/s \Big]$  a velocidade do fluido,  $\boldsymbol{u}_{\beta} = u_{\beta,x} \boldsymbol{e}_x + u_{\beta,y} \boldsymbol{e}_y$ .

Na superfície de controle de entrada da Figura 2 é prescrito um perfil de velocidades parabólico a fim de mimetizar um escoamento plenamente desenvolvido. Na superfície de controle de saída do canal a pressão é nula,  $p_{\beta,soida}=0$ . Nas demais superfícies (paredes horizontais e superfícies dos cilindros) é imposta a condição de não deslizamento,  $u_{\beta,x}=u_{\beta,y}=0$ .

A escolha de tais condições de contorno é conveniente para a avaliação da permeabilidade do arranjo de cilindros, uma vez que a pressão nas superfícies de controle de entrada,  $p_{\beta,entrada}$ , e de saída,  $p_{\beta,saida}$ , é uniforme. Com isso, pode-se calcular a permeabilidade k diretamente através da lei de Darcy.

$$k = \frac{1}{v} \left( \frac{p_{\beta, \text{entrada}} - p_{\beta, \text{saida}}}{L_{MP}} \right)$$
 (5)

Sendo a velocidade média do escoamento no canal  $\overline{v}$  [m/s] associada com o respectivo número de Reynolds  $Re = \rho_{\scriptscriptstyle\beta} \overline{v} e_{\scriptscriptstyle PM} / \mu_{\scriptscriptstyle\beta}$ .



## 2.1. MODELAGEM NUMÉRICA

Para solucionar as Equações (3) e (4) é empregado o Método dos Volumes Finitos. O acoplamento pressão velocidade SIMPLE (Patankar e Spalding, 1972) é utilizando juntamente com o método de interpolação QUICK (Leonard, 1979) para o tratamento dos termos advectivos.

É realizada a simulação de um meio poroso isotrópico (MP10, como será discutido na Tabela 1) para Re=1 a fim de determinar a influência da dimensão dos volumes de controle da malha sobre o perfil de pressão ao longo do arranjo de cilindros. A perda de carga é uma propriedades conveniente para ser avaliada pelo fato de ser utilizada para caracterizar o meio poroso. A maior influência recai sobre o número de volumes de controle na garganta de poro, uma vez que para #2, #5 e #8 volumes a queda de pressão é, respectivamente, 8635,421 Pa; 10233,84 Pa e 10898,24 Pa. A diferença entre #5 e #8 volumes é de aproximadamente 6%, sendo a malha com #5 volumes de controle empregada para as simulações.

## 3. RESULTADOS

Para avaliar os efeitos de diferentes arranjos de cilindros sobre a permeabilidade e a queda de pressão são concebidos dez meios porosos conforme apresentado na Tabela 1. São variados quatro parâmetros: número de cilindros na coluna, n, fração volumétrica na região entrada da região anisotrópica,  $\varphi_{i=0}$ , e na região isotrópica,  $\varphi_{iso}$ , e o comprimento da garganta de poro na região isotrópica,  $pt_{iso}$ . O arranjo MP1 é tido como referência sendo as demais configurações geradas variando-se n,  $\varphi_{i=0}$  e  $\varphi_{iso}$  ou prescrevendo  $pt_{iso}$  e calculando-se, na sequência,  $\varphi_{iso}$ .

Tabela 1 – Parâmetros geométricos do meio poroso heterogêneo.

	n	$\varphi_{i=0}$	$arphi_{iso}$	pt <sub>iso</sub> [mm]	<i>k</i> [md]
MP1	10 5 20	0,7	0,356	0,6	1,65. 10-2
MP2				1,2	7,67; 10-2
MP3				0.3	4,74. 10-3
MP4	10 5 20		0,287		4,04. 10-3
MP5			0,421	0,9	6,09. 10-2
MP6			0,287	0,6	1,47. 10-2
MP7			0,483		3,16. 10-2
MP8	10	0,5	0,356		1,73. 10-2
MP9		0,9			1,98. 10-2
MP10		0,356			1,26. 10-2

A inclusão da região anisotropia não demonstra ter um efeito significativo sobre a permeabilidade k, uma vez que os valores em mili Darcy, md, apresentados Tabela 1 para MP1 e MP10 (isotrópico) são aproximadamente iguais. Fato este que sugere que a permeabilidade é mais influenciada pelas propriedades da região isotrópica. Mantendo-se  $\varphi_{i=0}$  e  $\varphi_{iso}$  constantes, o número



de cilindros é variado e consta-se que MP2 e MP3 apresentam permeabilidade com ordens de grandezas diferentes. O arranjo MP3 é menos permeável por apresentar garganta de poro de menor dimensão, fato corroborado pela permeabilidade do MP4 que encontra-se na mesma ordem de grandeza para o mesmo valor de  $pt_{iso}$ . No caso, a permeabilidade desta configuração é ainda menor por apresentar fração volumétrica menor. Curiosamente, a variação de  $\varphi_{iso}$  por si só não é capaz de incutir variações significativas em k, já que para o mesmo valor de  $pt_{iso}$  a permeabilidade de MP6 e MP7 são aproximadamente iguais. Por outro lado, as configuração mais permeáveis são aquelas que apresentam os maiores valores de garganta de poro. Por fim, a variação da fração volumétrica na região anisotrópica indicada por MP8 e MP9 não é capaz de alterar efetivamente os valores de k.

Na Figura 3 para Reynolds na entrada do canal igual a 1, o MP10 apresenta queda de pressão linear por ser isotrópico. Tal comportamento também é observado para os demais arranjos na região isotrópica. O efeito da região anisotrópica na perda de carga não é pronunciado nos demais arranjos. Para os MP3 e o MP4, os meios menos permeáveis, a queda de pressão na região isotrópica é mais acentuada e na região anisotrópica o perfil de pressão é aproximadamente constante.

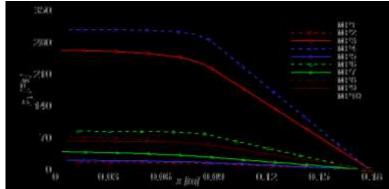


Figura 3 – Perfil de pressão no arranjo de cilindros.

# 4. CONCLUSÕES

A estrutura de cilindros é uma forma de idealizar a morfologia do constituinte sólido de meios porosos quando necessário realizar o estudo de fenômenos de transporte na escala do poro. A permeabilidade é influenciada pelas propriedades geométricas da região isotrópica, sendo principalmente pala dimensão da garganta de poro. A inclusão da região anisotrópica não exerce variações notáveis na permeabilidade.



# Numerical simulation of the flow through a heterogeneous and anisotropic porous medium conceived as an arrangement of staggered cylinders

# **ABSTRACT**

In this paper, a laminar and steady flow of a newtonian fluid in a two-dimensional channel with a porous plug is numerically simulated. The porous media is conceived in the porescale as an arrangement of staggered-cylinders with an anisotropic entrance followed by an isotropic region. As the flow percolates the cylinders, the volumetric fraction decreases linearly until reaching the isotropic region where it is kept constant. The influence of the cylindrical configuration over the pressure drop varying the number of cylinders, the isotropic region pore throat and the volume fraction at the anisotropic region inlet and the isotropic region is simulated. The Reynolds number characterizes a creeping flow, so the permeability can be calculated. The model of a Newtonian fluid flows over the heterogeneous porous medium is achieved through the Navier-Stokes equations with noslip conditions at the cylinders walls. A parabolic velocity profile is prescribed at the entrance of the channel to mimic a fully-developed flow. A numerical solution is sought by Finite Volume Method using the SIMPLE velocity pressure coupling and the QUICK interpolation scheme. The results show that the pressure drop in the anisotropic region is mild compared to the isotropic region. Furthermore, just the variation of the pore throat dimension effects significantly the permeability.

**KEYWORDS:** Heterogeneous porous media, pore-scale, numerical simulation



## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao apoio do CENPES/PETROBRAS, ao Programa de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Educação, Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico da UTFPR (FUNTEF-PR).

# **REFERÊNCIAS**

CIVAN, F. Reservoir formatoin damage - fundamentals, modeling, assessment, and mitigation. 2. ed.Gulf Professional Publishing, 2007.

KUWAHARA, F.; NAKAYAMA, A.; KOYAMA, H. A numerical study of thermal dispersion in porous media. J. Heat Transfer, v. 118, n. 3, p. 756–761, 1996.

LAVROV, A. Lost Circulation: Mechanisms and Solutions. Cambridge, UK: Gulf Professional Publishing, 2016.

LEONARD, B. P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 19, n. 1, p. 59–98, 1979.

MERRIKH, A. A.; LAGE, J. L. From continuum to porous-continuu: the visual resolution impact on modeling natural convection in heterogenerous. In: INGHAM, D. B.; POP, I. (Eds.). . Transport Phenomena in Porous Media III. Oxford, UK: Elsevier, 2005.

NIELD, D.; BEJAN, A. Convection in Porous Media. 2. ed. Springer, 1998.

PATANKAR, S. V; SPALDING, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. International Journal of Heat and Mass Transfer1, v. 5, n. 1787–1806, 1972.

SAHIMI, M. Flow and transport in porous media and fractured rock - from classical methods to modern approaches. 2. ed.Weiheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.

YANG, J.; WANG, Q.; ZENG, M.; NAKAYAMA, A. Computational study of forced convective heat transfer in structured packed beds with spherical or ellipsoidal particles. Chemical Engineering Science, v. 65, n. 2, p. 726–738, 2010.



**Recebido:** 31 ago. 2017. **Aprovado:** 02 out. 2017.

# Como citar:

PARISOTTO, D. M. JUNQUEIRA, S. L. M Simulação numérica do escoamento em meio poroso heterogêneo anisotrópico concebido como um arranjo alternado de cilindros. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <a href="https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2017/index">https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2017/index</a>. Acesso em: XXX.

# Correspondência:

Daniel Mazur Parisotto

Rua Lamenha Lins, 585, Rebouças, Curitiba, Paraná, Brasil.

## Direito autoral:

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

