

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA ALTURA DO LEITO FIXO DE PARTÍCULAS NO ESCOAMENTO EM POÇOS HORIZONTAIS

AUTORES:

Sarah Nunes Argentin
Prof. Dr. Admilson T. Franco

INSTITUIÇÃO:

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA ALTURA DO LEITO FIXO DE PARTÍCULAS NO ESCOAMENTO EM POÇOS HORIZONTAIS

Resumo

A produção de petróleo e gás apresenta desafios que vão desde a exploração até o abandono dos poços. O abandono, especialmente de poços antigos não lucrativos, é motivado por exigências ambientais e de segurança. Tradicionalmente, o cimento Portland é utilizado, apesar de suas deficiências como vulnerabilidade a eventos sísmicos e problemas de adesão. Alternativas como pellets de bentonita são considerados, mas também enfrentam desafios de adesão e sedimentação. Este trabalho investiga, por meio de simulações numéricas, a influência da altura do leito de partículas no escoamento durante o abandono de poços horizontais *offshore* com variações na geometria dos tubos. Durante a análise, notou-se que os campos de velocidades máximas exibem valores bastante similares, 0.0041 m/s, 0.0039 m/s e 0.0038 m/s para o mesmo valor do índice de potência ($n = 0.1$) nas três geometrias. Os valores da velocidade máxima também foram semelhantes para as diferentes geometrias nos casos de $n = 0.5$ e $n = 1$. Entretanto, é essencial destacar que o estudo atualmente está em fase de desenvolvimento e, portanto, requer análise mais aprofundada para conclusões mais robustas. Em particular, investigação extra será realizada para compreender melhor os padrões de escoamento e a queda de pressão em função da seção transversal do tubo. O objetivo é encontrar a expressão que relacione o comportamento do fator de atrito com a geometria, com o número de Reynolds e os parâmetros do modelo Power-Law. Essas análises adicionais serão fundamentais para fornecer perspectivas sobre a dinâmica do fluido e a sua interação com o leito de partículas, contribuindo para a melhoria da compreensão geral do processo de abandono de poços petrolíferos. Os resultados obtidos serão úteis para comparações futuras e validações experimentais.

Palavras-chave: simulação numérica, poços horizontais, abandono de poços.

Abstract

Oil and gas production presents challenges ranging from exploration to well abandonment. The abandonment, especially of old non-profitable wells, is driven by environmental and safety requirements. Traditionally, Portland cement is used despite its deficiencies such as vulnerability to seismic events and adhesion problems. Alternatives like bentonite pellets are considered but also face adhesion and sedimentation challenges. This work investigates, through numerical simulations, the influence of particle bed height on flow during the abandonment of offshore horizontal wells with variations in tube geometry. During the analysis, it was noted that the maximum velocity fields exhibited very similar values of 0.0041 m/s, 0.0039 m/s, and 0.0038 m/s for the same power-law index ($n = 0.1$) in the three geometries. The maximum velocity values were also similar for the different geometries in the cases of $n = 0.5$ and $n = 1$. However, it is essential to note that the study is currently in development and requires further in-depth analysis for more robust conclusions. Additional investigation will be conducted to better understand flow patterns and pressure drop as a function of tube cross-section. The purpose is to find an expression that relates the behavior of the friction factor to the geometry, the Reynolds number and the parameters of the Power-Law model. These additional analyses will be essential to provide insights into the fluid dynamics and its interaction with the particle bed, contributing to an improved overall understanding of the well abandonment process. The results obtained will be helpful for future comparisons and experimental validations.

Keywords: numerical simulation, horizontal wells, well abandonment.

Introdução

Quando o poço de petróleo atinge o fim de sua vida útil, ele deve ser tamponado e abandonado permanentemente para garantir a segurança ambiental e estrutural. Este processo envolve a inserção de tampões de cimento, método comum, mas oneroso, especialmente em áreas *offshore* como o Mar do Norte, onde cerca de dois mil poços serão abandonados na próxima década. O uso de cimento, embora eficaz, apresenta limitações devido a rachaduras e degradação. Como alternativa, a argila bentonítica, com alta capacidade de inchamento e baixa permeabilidade, mostra-se promissora, oferecendo vantagens econômicas e ambientais. No entanto, são necessários mais estudos para garantir sua aplicação segura em poços profundos *offshore* (Holl e Scheuermann, 2018). Este trabalho investiga a influência da altura do leito de bentonita no escoamento durante o abandono de poços *offshore*, utilizando simulações numéricas. Serão simulados escoamentos com fluidos não newtonianos em tubos circulares com diferentes variações geométricas. O software Star-CCM+® é utilizado nas simulações. Esses resultados estarão disponíveis para futuras comparações e validações com dados experimentais.

Metodologia

Modelagem matemática

O capítulo aborda as leis da conservação aplicadas ao contínuo utilizando a abordagem Euleriana, focando no balanço de massa e momento linear. A Equação da Continuidade (Eq. 1) expressa o balanço de massa para o volume de controle, onde ρ é a densidade e $\mathbf{v}$ é a velocidade do contínuo (CD-ADAPCO, 2017). A Equação do Momento Linear (Eq. 2) relaciona a taxa de variação do momento linear com a força resultante e o tensor de tensões, $\boldsymbol{\sigma}$, além das forças de corpo, $\mathbf{f}_b$. No caso de fluidos, $\boldsymbol{\sigma}$ é a soma das tensões normais e viscosas, resultando na Eq. 3. Para fluidos newtonianos, o tensor de tensões viscosas $\mathbf{T}$ é obtido com base no campo de velocidade e na viscosidade constante, conforme a Equação do Tensor de Tensões Viscosas (Eq. 5). O tensor de taxa de deformação $\mathbf{D}$ é dado pela Eq. 4. Para escoamentos incompressíveis, o termo relacionado ao divergente da velocidade é zero.

No modelo da Lei de Potência (Eq. 7), onde η é a viscosidade aparente e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento. O comportamento dos fluidos é descrito pelo modelo da lei de potência de Ostwald e De Waele, que prevê diferentes comportamentos para fluidos pseudoplásticos e dilatantes (Ostwald, 1925; De Waele, 1923; Bird et al., 1987). Para fluidos newtonianos, a viscosidade aparente é recuperada com $n = 1$ e $k = \mu$.

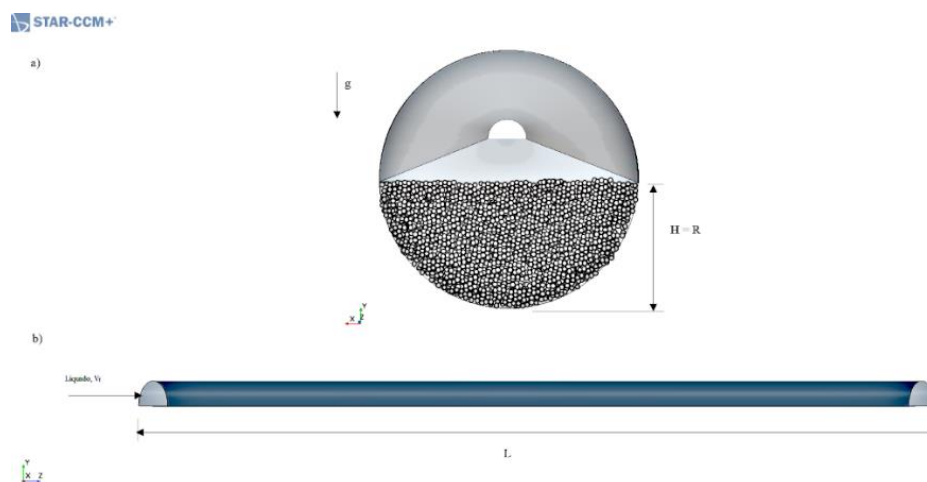
$$\begin{aligned} \partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0 & (1) & \quad \partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_b & (2) \\ \partial (\rho \mathbf{v}) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) &= -\nabla \cdot (p \mathbf{I}) + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f}_b & (3) & \quad \mathbf{D} = 1/2 (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) & (4) \\ \mathbf{T} &= 2\mu \mathbf{D} - 2/3 \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} & (5) & \quad \tau_{xy} = -\eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}_{yx} & (6) \\ \eta &= k\dot{\gamma}^{n-1} & (7) & \end{aligned}$$

Características do domínio e condições de contorno

A Figura 1 mostra a geometria onde o leito obstrui o tubo. A Figura 1.a exibe a geometria com o leito obstrutor, enquanto a Figura 1.b mostra apenas a região onde ocorre o escoamento. Essa configuração é essencial para estudar os efeitos da obstrução no comportamento do escoamento de fluidos. No presente estudo, as partículas não serão consideradas; apenas a região do tubo onde ocorre o escoamento. A partir da geometria ilustrada na Figura 1, são especificadas as condições de contorno utilizadas no problema. O fluido entra pela face esquerda, com condição de contorno de velocidade definida ($Re = \rho \bar{U}^{2-n} \sqrt{A}/k$), saindo pela face direita, com condição de contorno de pressão definida.

Todas as paredes têm condições de contorno de não deslizamento. Foram utilizados parâmetros específicos para as simulações, incluindo o número de Reynolds (Re) de 10, fator de consistência (k) de $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, densidade (ρ) de 1000 kg/m^3 e viscosidade dinâmica (μ) de $0.187 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. os valores do índice de potência (n) de 0.1, 0.5 e 1.0.

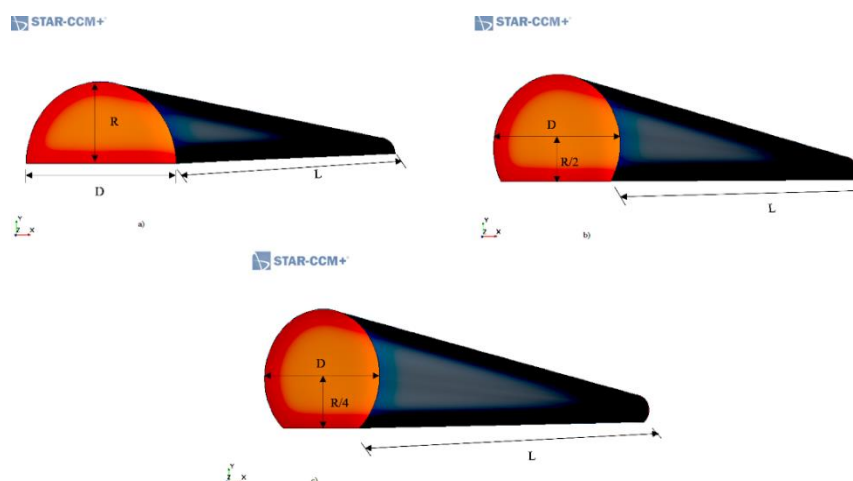
Figura 1 - Representação de umas das geometrias simuladas. a) Geometria com o leito obstruindo metade do tubo ($H = R$). b) Região onde ocorre o escoamento sem o leito.



Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 2 apresenta as três geometrias utilizadas neste estudo. A Figura 2.a representa a geometria com altura de leito de bentonita igual ao raio do tubo ($H = R$), significando que o tubo é obstruído pela bentonita até seu ponto médio. A Figura 2.b representa o tubo com altura de leito igual à metade do raio do tubo ($H = R/2$), e a Figura 2.c representa o tubo com altura de leito igual a um quarto do raio do tubo ($H = R/4$).

Figura 2- Geometrias utilizadas nas simulações: a) Geometria com altura de leito igual ao raio do tubo ($H = R$). b) Geometria com altura de leito igual a metade do raio ($H = R/2$). c) Geometria com altura do leito igual a um quarto do raio do tubo ($H = R/4$).



Fonte: elaborado pela autora.

Método numérico

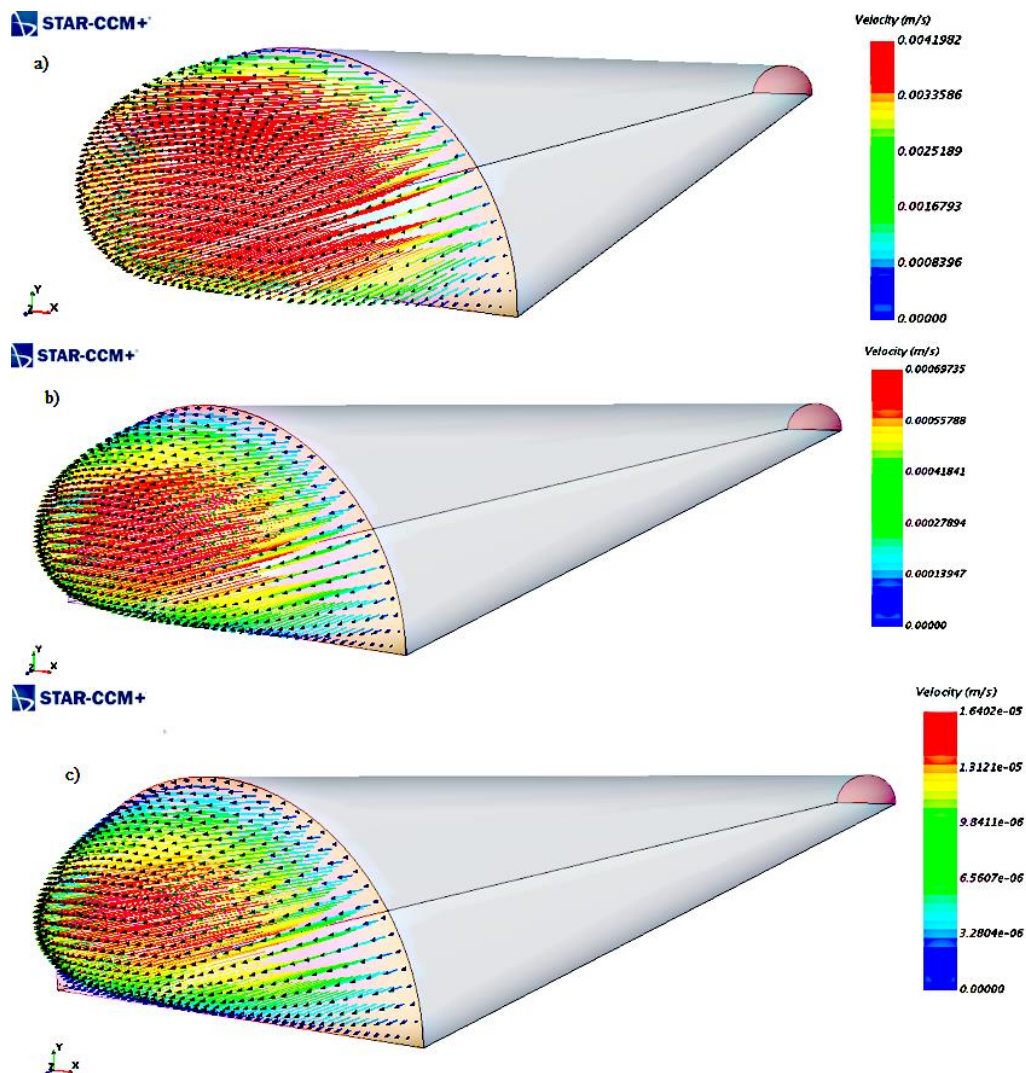
No presente estudo, o programa STAR-CCM+® foi utilizado para resolver as equações de balanço de massa e momento através do método de volumes finitos com o algoritmo *segregated* e acoplamento é feito com o método SIMPLE. As equações governantes foram discretizadas no espaço e no tempo, convertendo o modelo matemático em um sistema de equações algébricas. A equação genérica de transporte semi-discreta $d/dt(\rho\phi V)_0 + \sum_f[\rho\phi(\mathbf{v} \cdot \mathbf{a})]_f = \sum_f(\Gamma\nabla\phi \cdot \mathbf{a})_f + (S_\phi V)_0$. Essas metodologias permitem simulações detalhadas e precisas do comportamento do escoamento de fluidos, essenciais para análises em diversas aplicações práticas. O regime considerado é estacionário, e o critério de convergência utilizado é a discretização de segunda ordem. A malha empregada possui maior refino na parede e menor refino na região central. A verificação do modelo numérico foi realizada para fluidos newtonianos, modelo Power-law e Bingham em regime estacionário em tubos horizontais e circulares, embora esses resultados não sejam apresentados no presente trabalho.

Resultados e Discussão

Os resultados das simulações numéricas analisaram o escoamento de fluidos não newtonianos em um tubo horizontal com obstrução de leito de partículas, utilizando o modelo de lei de potência. As figuras mostram como a velocidade e o padrão de escoamento variam com diferentes índices de potência (n). Na Figura 3.a, com $n = 0.1$, a vazão volumétrica se concentra no centro do tubo, típico de fluidos pseudoplásticos, onde a viscosidade diminui com a taxa de cisalhamento. Para $n = 0.5$ (Figura 3.b), a distribuição de velocidade se torna mais uniforme, aproximando-se do comportamento Newtoniano, mas ainda com concentração central de vazão. Com $n = 1$ (Figura 3.c), a velocidade é uniforme ao longo do tubo, caracterizando fluidos Newtonianos com viscosidade constante. O número de Reynolds de 10 indica um escoamento laminar, destacando as diferenças na distribuição de velocidade conforme o índice de potência. A Figura 4.a, $n = 0.1$, a concentração de vazão volumétrica no centro confirma o comportamento pseudoplástico. Com $n = 0.5$ (Figura 4.b), a velocidade é mais uniforme e próxima ao Newtoniano, embora ainda haja concentração central. Com $n = 1$ (Figura 4.c), a velocidade é uniformemente distribuída, apresentando o comportamento Newtoniano.

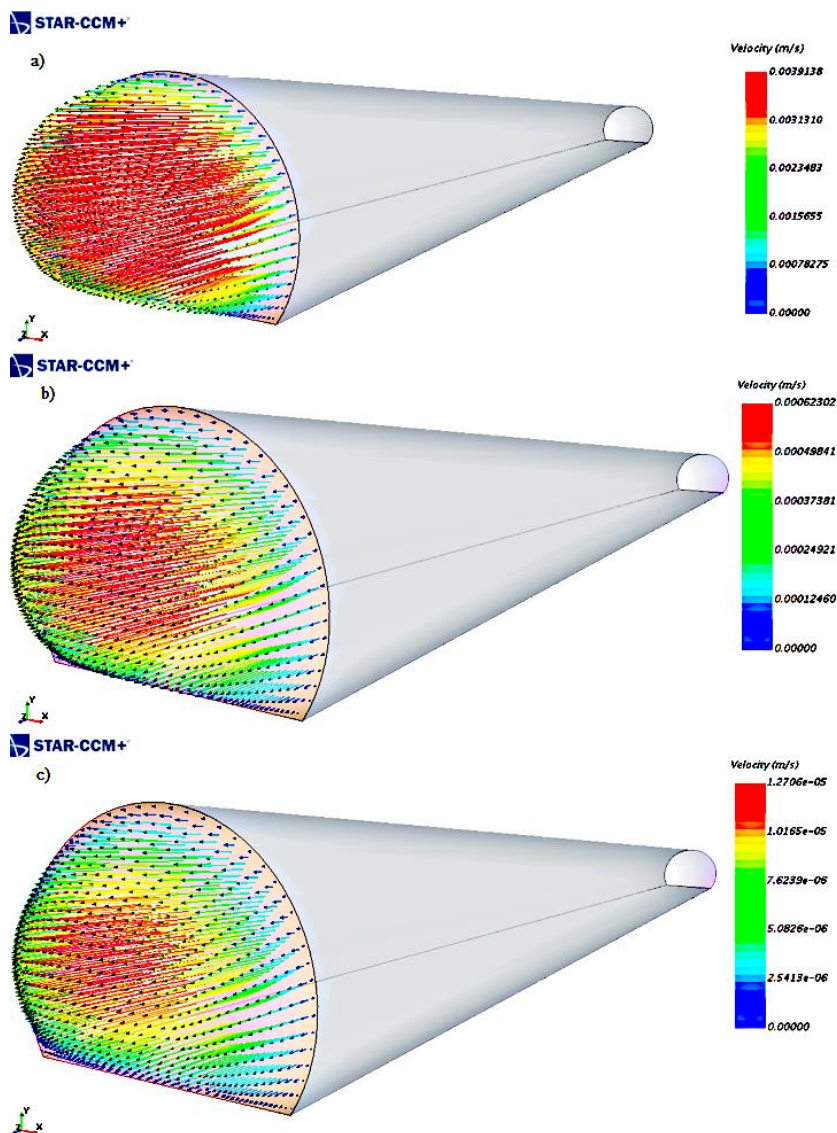
Na Figura 5.a, com $n = 0.1$, a concentração de vazão no centro do tubo e o gradiente acentuado em direção às paredes são típicos de fluidos pseudoplásticos. Com $n = 0.5$ (5.b), a velocidade é mais uniforme, mas ainda com concentração central de altas velocidades, indicando uma viscosidade que diminui mais suavemente. Com $n = 1$ (5.c), a velocidade é uniforme ao longo do tubo, evidenciando o comportamento Newtoniano.

Figura 3 - Campo de velocidade com altura de leito igual ao raio do tubo ($H = R$) e $Re = 10$. a) $n = 0.1$. b) $n = 0.5$. c) $n = 1$.



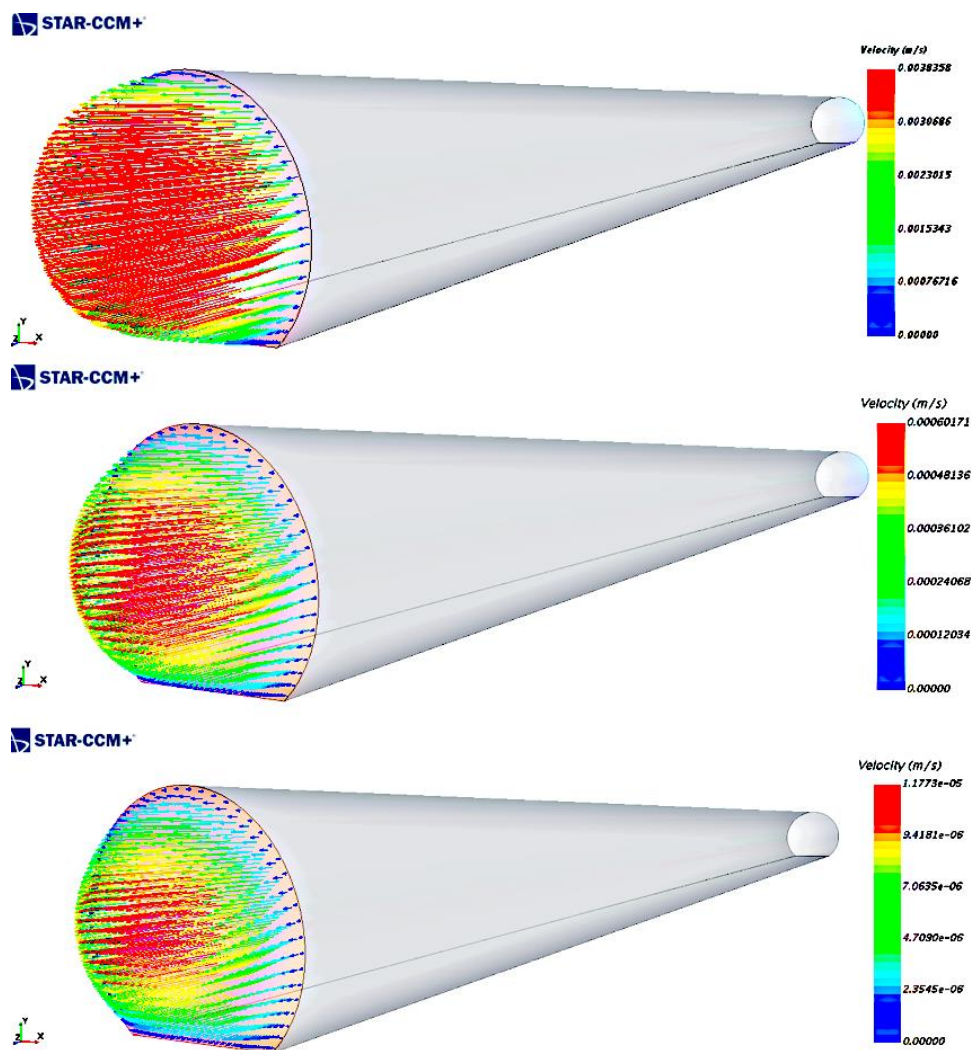
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 4 - Campo de velocidade com altura de leito igual ao raio do tubo ($H = R/2$) e $Re = 10$. a) $n = 0.1$. b) $n = 0.5$. c) $n = 1$.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 5 - Campo de velocidade com altura de leito igual ao raio do tubo ($H = R/4$) e $Re = 10$. a) $n = 0.1$. b) $n = 0.5$. c) $n = 1$.



Fonte: elaborado pela autora.

Conclusões

A análise revela que o índice de potência afeta significativamente o campo de velocidade em diferentes geometrias, onde valores menores de n resultam em velocidades mais altas e escoamento mais concentrados na região central do tubo, enquanto valores maiores de n produzem distribuições de velocidade mais uniformes e balanceadas. Estudos futuros irão explorar os campos de pressão e tensão na parede para a compreensão completa do comportamento dos fluidos não newtonianos sob diversas condições, essenciais para otimizar a dinâmica dos fluidos em diferentes configurações geométricas e índices de potência. A análise das alturas do leito mostra que as restrições de escoamento aumentam com valores menores de n , concentrando mais as vazões volumétricas na região central, informações cruciais para ajustar as propriedades dos fluidos e alcançar características de escoamento desejadas.

Agradecimentos

Este estudo recebeu o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), sob a gestão da FINEP, conforme o Convênio Nº 0.1.190240.00, Identificação 0431/19 – PRH21-UTFPR. Agradecemos ao Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) pelo suporte técnico e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio institucional.

Referências Bibliográficas

CD-ADAPCO. STAR-CCM+® Documentation Siemens PLM Software, 2017.

DE WAELE, Armand. Viscometry and plastometry. Oil Color Chem Assoc J, v. 6, p. 33- 88, 1923.

HOLL, H.; SCHEUERMANN, A. Characterisation of geomechanical properties of bentonite clay used for plug and abandonment operations of coal seam gas wells. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, v. 6, n. 2, p. 218-234, 2018.

OSTWALD, Wolfgang. Ueber die geschwindigkeitsfunktion der viskosität disperser systeme. i. Colloid & Polymer Science, v. 36, n. 2, p. 99-117, 1925.