



Estratégias numéricas para simulação de escoamento em meios porosos isotrópicos delgados: *benchmark* entre Ansys Fluent e OpenFOAM
Numerical strategies for simulating flow through thin isotropic porous media: benchmark between Ansys Fluent and OpenFOAM

Edson de Jesus Segantine¹, Daniel da Cunha Ribeiro^{2,*}

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: daniel.ribeiro@ufes.br

Resumo: O presente trabalho realiza um *benchmark* entre os softwares Ansys Fluent e OpenFOAM para a simulação de escoamento em meios porosos isotrópicos delgados. As simulações monofásicas, turbulentas e em regime permanente foram conduzidas com base em dados experimentais da literatura, de queda de pressão por velocidade de filtração, os quais permitiram ajustar os parâmetros de perdas viscosa e inercial para a modelagem em macroescala do escoamento em um filtro. Os resultados mostraram concordância entre a queda de pressão ajustada e simulada obtidas pelas médias das pressões na entrada e saída do meio poroso. A análise dos contornos de velocidade e pressão estática mostrou-se coerente à dinâmica do escoamento em ambos os softwares com desvios variando de 1,43% a 12,37% para a pressão máxima e de 0,97% a 4,18% para a velocidade máxima. O estudo revelou questões críticas para modelagem de escoamento em meios porosos pelo ajuste dos dados de queda de pressão por velocidade de filtração: os coeficientes de resistência viscosa e inercial calibrados pela regressão dos dados experimentais induziram erros de queda de pressão de 10%, 4,6% e 1%, para as velocidades de filtração de 5, 10 e 15 cm/s, respectivamente; a abordagem utilizada para a validação dos dados baseada nas pressões médias na entrada e saída do meio poroso mostrou-se robusta devido à captura da distribuição da pressão em toda a superfície do filtro; a modelagem da velocidade de entrada, baseado no balanço de massa entre o meio poroso e entrada, resultou em velocidades de filtração numericamente superiores às teóricas, indicando a necessidade de um ajuste iterativo nesta condição para garantir que a velocidade de filtração requerida seja devidamente reproduzida no meio poroso; os altos gradientes de pressão, descolamento da camada limite e zonas de recirculação evidenciaram a necessidade de utilização de modelos de turbulência mais robustos para a captura dos fenômenos envolvidos; e por fim, a abordagem de condição de contorno utilizando o *porouBafflePressure* apresentou desafios não solucionados de convergência para os cenários testados, impedindo sua viabilidade.

Palavras-chave: CFD; Filtro; Darcy-Forchheimer; Ansys Fluent; OpenFOAM

Abstract: The present work performs a *benchmark* between the softwares Ansys Fluent and OpenFOAM for the simulation of flow in thin isotropic porous media. The single-phase, turbulent, and steady-state simulations were conducted based on experimental data from the literature, namely, pressure drop data by filtration velocity resulting from flow in a filtration box, which allowed adjusting the parameters of viscous and inertial losses for the macroscale modeling of the flow in a filter. The results showed agreement between the adjusted and simulated pressure drop obtained by the pressure averages at the porous medium inlet and outlet. The analysis of velocity and static pressure contours proved to be coherent with the flow

dynamics in both softwares with deviations ranging between 1.43% and 12.37% for maximum pressure and between 0.97% and 4.18% for maximum velocity. The study revealed critical issues for modeling flow in porous media through the adjustment of pressure drop data by filtration velocity: the viscous and inertial resistance coefficients calibrated by the regression of experimental data induced pressure drop errors of 10%, 4.6%, and 1%, for filtration velocities of 5, 10, and 15 cm/s, respectively; the approach used for data validation based on the average pressures at the porous medium inlet and outlet proved to be robust due to the capture of the pressure distribution over the entire filter surface; the modeling of the inlet velocity based on the mass balance between the porous medium and inlet, resulted in numerically higher filtration velocities than the theoretical ones, indicating the need for an iterative adjustment in this condition to ensure that the required filtration velocity is properly reproduced in the porous medium; the high-pressure gradients, boundary layer detachment, and recirculation zones evidenced the need for using more robust turbulence models for the capture of the involved phenomena; and finally, the boundary condition approach using porousBafflePressure presented unsolved convergence challenges for the tested scenarios, preventing its viability.

Keywords: CFD; Filter; Darcy-Forchheimer; Ansys Fluent; OpenFOAM

1 Introdução

O estudo de escoamentos em meios porosos constitui uma área de pesquisa de fundamental importância na engenharia e ciências aplicadas, com relevância crescente em diversos setores industriais tais como recuperação de óleo e gás (Duan et al., 2024), recolha de material particulado oriundos de processos industriais para reutilização (Bächler et al., 2024) ou atendimento de normas de emissão de particulado (Brasil, 2018).

Aliado aos estudos de casos reais e experimentais, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) tem se consolidado como ferramenta essencial para investigação de escoamentos neste tipo de ambiente. As abordagens computacionais dividem-se principalmente entre modelos de microescala, que resolvem explicitamente a geometria dos poros, e modelos de macroescala, que tratam o meio poroso como um contínuo com propriedades médias.

Na microescala, técnicas como *Dynamic Pore Network Modeling* (DPNM), CFD-DEM (*Discrete Element Method*) e *Lattice Boltzmann Method* (LBM) permitem a análise detalhada de fenômenos em nível de poro. Azarafza et al. (2021) e Chen et al. (2024) utilizam essas abordagens para investigar saturação residual, formação de torta filtrante e permeabilidade, capturando efeitos da morfologia de partículas e estrutura porosa. Embora computacionalmente intensivas, essas técnicas proporcionam subsídios fundamentais sobre os mecanismos físicos em escala microscópica. Já na macroescala, destacam-se as abordagens por meio de zonas porosas utilizando modelos de Darcy-Forchheimer ou condições de contorno como *Porous Jump*. Estudos como Liu et al. (2019) e Punyaponchai et al. (2024) demonstram a aplicação dessas técnicas em filtros de manga para prever a distribuição do escoamento e queda de pressão. Essas abordagens oferecem equilíbrio entre precisão e custo computacional, sendo amplamente adotadas em projetos industriais.

A evolução recente dos estudos em CFD inclui abordagens híbridas, como a desenvolvida por Liu et al. (2019) e Cao et al. (2021), que combinam modelos CFD-DPM com funções definidas por usuário (UDFs) para simular o crescimento dinâmico da torta de filtração em filtros de manga. Essa estratégia de macroescala tem se mostrado promissora no estudo da formação de torta de filtrado em equipamento de escala real, sendo o primeiro passo para sua implementação a compreensão do escoamento em meio poroso por meio de zonas porosas e utilizando condições de contorno em faces internas (*baffles*) como o *Porous Jump*.

Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho consiste no estudo da fluidodinâmica em uma caixa de filtração a fim de avaliar o escoamento através de um filtro considerando apenas a fluidodinâmica e a queda de pressão devido ao meio poroso. Assim, com base nos dados experimentais e de simulação disponibilizados na literatura (Rocha, 2010), será realizado o *benchmark* entre dois softwares, o OpenFOAM, como código de fonte aberta, e o ANSYS Fluent, como código comercial. Ambos os softwares fornecem uma ampla gama de modelos para simular escoamentos turbulentos bem como abordagens consolidadas para modelar escoamentos em meio poroso. Especificamente, o intuito é analisar as capacidades dos softwares, em especial o OpenFOAM, na simulação de escoamento em meios porosos em macroescala utilizando as abordagens de zona porosa por meio das equações de Darcy-Forchheimer e condições de contorno como *porousJump* ou *porousPressureBaffle*.

2 Metodologia

O estudo tomou como base o escoamento em uma caixa de filtragem desenvolvido por Rocha (2010), cujo modelo físico é apresentado na Figura 1A. Os casos simulados foram considerados como permanente, monofásico e isotérmico. Para o tratamento da turbulência o modelo k- ω SST foi empregado. Os *softwares* utilizados no desenvolvimento do trabalho foram o Salome plataforma 9.15.0, para a geração da geometria e malhas, o OpenFOAM 2412 e Ansys Fluent 2025 R2 *Student*, para a realização das simulações, e o Paraview 5.11.2 para o pós-processamento.

2.1 Equações governantes

O escoamento é descrito matematicamente pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento, além dos modelos de turbulência e formulações para queda de pressão em meios porosos.

2.1.1 Conservação de massa e quantidade de movimento

A conservação de massa, ou equação da continuidade, para um escoamento incompressível é dada pela Eq. 1. A conservação da quantidade de movimento para um escoamento permanente e incompressível de um fluido newtoniano é descrita pela equação de Navier-Stokes, Eq. 2.

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \mathbf{S}_{porous}, \quad (2)$$

sendo ρ a massa específica do fluido, \mathbf{u} é o vetor velocidade do fluido, p é a pressão estática por massa específica, \mathbf{g} o vetor aceleração gravitacional atuando na direção do escoamento, ν a viscosidade cinemática efetiva, incluindo a viscosidade turbulenta, e \mathbf{S}_{porous} o termo fonte adicionado para incluir os efeitos de queda de pressão devido à resistência ao escoamento imposta pelo meio poroso.

2.1.2 Modelagem da turbulência

Para a turbulência foi selecionado o modelo k- ω SST. As equações para a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação específica (ω) são dadas pelas Eqs. 3 e 4, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \beta^* \omega k, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \rho \gamma G - \rho \beta \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega,2}}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, \quad (4)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta, P_k é o termo de produção da energia cinética turbulenta, G é o termo de produção da taxa de dissipação específica, σ_k , σ_ω , β e β^* são constantes do modelo e F_1 é a função de mistura que garante a transição entre os modelos k- ω e k- ϵ . Para este modelo a viscosidade cinemática turbulenta é obtida pela relação:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad (5)$$

onde Ω é a magnitude da vorticidade, a_1 é uma constante, e F_2 é uma função de mistura que limita a taxa de crescimento da viscosidade turbulenta.

2.1.3 Abordagens computacionais para meios porosos

Na abordagem de macroescala para meios porosos, uma região do domínio (elementos volumétricos) é modelada mediante a adição de um termo fonte à equação de conservação da quantidade de movimento. No Ansys Fluent, este termo é composto por duas partes: uma correspondente à perda viscosa (termo de Darcy) e outra relativa à perda inercial (FLUENT, 2025). No OpenFOAM, o termo implementado segue a

formulação de Darcy-Forchheimer (OPENFOAM, 2025). As formulações para um meio poroso isotrópico em cada software são dadas pelas Eqs. 6 e 7, respectivamente:

$$\mathbf{S}_{porous} = -\left(\frac{\mu}{\alpha} \mathbf{u} + C_2 \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}| \mathbf{u}\right), \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_{porous} = -\left(D\mu \mathbf{u} + \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}| F \mathbf{u}\right), \quad (7)$$

onde α é a permeabilidade do meio, C_2 o coeficiente de queda de pressão, D o coeficiente de Darcy e F é o coeficiente de Forchheimer. Comparando as Eqs. 6 e 7, verifica-se que $D = 1/\alpha$ e $F = C_2$.

Além da modelagem por zona porosa, a queda de pressão no filtro pode ser simulada utilizando a simplificação unidimensional *Porous Jump* no Ansys Fluent ou seu equivalente no OpenFOAM, o *porousBafflePressure*. Para um meio poroso delgado, a queda de pressão, ΔP , é definida pela combinação da lei de Darcy com um termo de perda inercial, conforme apresentado nas Eqs. 8 e 9:

$$\Delta P = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u + C_2 \frac{1}{2} \rho u^2\right) \Delta m, \quad (8)$$

$$\Delta P = -\left(D\mu u + \frac{1}{2} I^* \rho u^2\right) \Delta m, \quad (9)$$

sendo Δm a espessura do meio poroso na direção do escoamento. Nota-se a similaridade entre a Eq. 8 e Eq. 9, sendo I^* o coeficiente de resistência inercial no OpenFOAM equivalente a C_2 no Ansys Fluent.

2.2 Abordagem numérica

2.2.1 Geometria e malha

A geometria do domínio computacional foi construída utilizando o módulo *Geometry* do Salome Platform. A geometria gerada, os contornos e a direção do escoamento são mostrados na Figura 1A. As dimensões são especificadas no corte transversal ilustrado na Figura 1B, nota-se que a região porosa é representada por um cilindro circular de 2,5 mm de espessura na região central do domínio. Para a discretização do domínio foi utilizado o módulo *Smesh* do Salome Platform. Neste sentido, foram geradas malhas totalmente hexaédricas, a malha selecionada possui 909.440 elementos, a representação visual é apresentada na Figura 1C. Para a devida captura dos fenômenos próximos ao meio poroso, foi realizado o refinamento em direção à região central de acordo com a Figura 1C e detalhado na Figura 1D. Na Figura 1E é apresentada a distribuição dos elementos na seção transversal do meio poroso e na Figura 1F são destacados a linha de coleta de dados na região central longitudinal do domínio, bem como, a orientação cartesiana para o eixo z utilizada no pós-processamento.

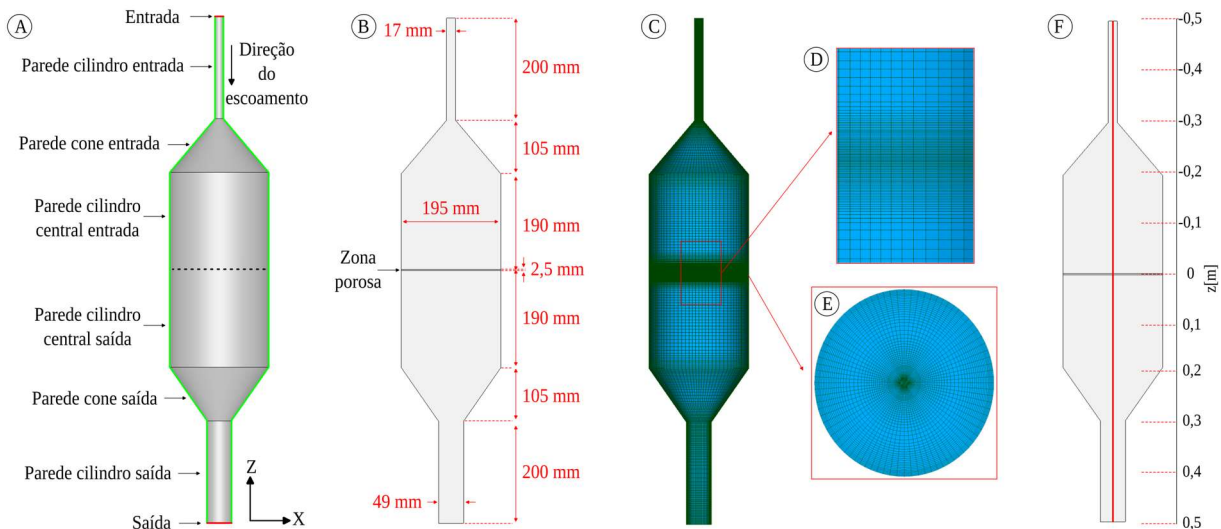


Figura 1. Volume de controle utilizado nas simulações (A), vista em seção com dimensões (B), malha hexaédrica com a distribuição superficial dos elementos (C) com destaque do refinamento na direção do meio poroso (D) e corte transversal na região central do volume de controle (E) e linha de coleta de dados para o pós-processamento (F).

Após sua construção, a malha foi exportada para os softwares OpenFOAM e Ansys Fluent®. O OpenFOAM foi utilizado na conversão da malha do formato unv para msh.

2.2.2 Configuração das simulações

As configurações numéricas adotadas para o Ansys Fluent e OpenFOAM são apresentadas na Tabela 1. Em ambos os casos, utilizou-se uma formulação baseada na pressão para simulações em regime permanente.

Tabela 1. Configurações dos esquemas numéricos para os solucionadores Ansys Fluent e OpenFOAM.

Solucionador	Ansys Fluent	OpenFOAM
Formulação	Baseado na pressão	Baseado na pressão
Regime	Permanente	Permanente
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE	SIMPLE
Discretização espacial: Gradientes	Least Squares Cell Based	Gauss linear
Discretização espacial: Pressão	Second order	Gauss linear
Discretização espacial: Velocidade	First order upwind / Second order upwind	Gauss upwind / Gauss linearUpwindV grad(U)
Discretização espacial: Energia cinética turbulenta e taxa de dissipação específica	First order upwind / First order upwind	Gauss upwind / Gauss linear

A utilização do solucionador baseado em pressão e em regime permanente no OpenFOAM foi o *simpleFoam*. Destaca-se que, visando acelerar a estabilização inicial dos campos de escoamento, adotou-se uma estratégia de dois passos para as equações de velocidade e turbulência. Inicialmente, utilizou-se o esquema de primeira ordem até a estabilização do escoamento e, logo após, foi alterado para esquemas de segunda ordem visando maior precisão até a convergência final. Para todos os casos, realizou-se o monitoramento e ajuste dos fatores de relaxação até que os resíduos tornassem inferiores a 10^{-4} .

2.3 Configuração das simulações e cenários avaliados

Os parâmetros para a configuração das condições de contorno, propriedades físicas do fluido e meio poroso foram definidos com base no estudo desenvolvido por Rocha (2010) e detalhado na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para configuração das simulações.

Parâmetros para a determinação das condições de contorno	Velocidade de filtração	5, 10 e 15 cm/s
	Pressão na saída	Pressão atmosférica
	Viscosidade dinâmica	$1.849 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Propriedades do fluido (ar a 25°C)	Massa específica	1.184 kg/m^3

Tomando como base a Tabela 2, os valores da velocidade na entrada foram determinados pela conservação da massa para cada velocidade de filtração. Os parâmetros iniciais para k e ω são estimados pelas Eqs. 10 e 11, respectivamente, onde I representa a intensidade da turbulência, estimada pela Eq. 12.

$$k = \frac{3}{2}(I|\mathbf{u}_{ref}|)^2, \quad (10)$$

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.75}L}, \quad (11)$$

$$I = 0,16Re^{-1/8}, \quad (12)$$

sendo \mathbf{u}_{ref} a velocidade de referência do escoamento, tomada como a velocidade na entrada, Re representa o número de Reynolds, C_μ é uma constante definida como 0,09 e L é o comprimento de escala turbulento tomado com 7% do diâmetro hidráulico da entrada.

Para a determinação dos coeficientes de resistência viscosa e inercial, foi realizado o ajuste a partir de dados experimentais do estudo de Rocha (2010), como apresentado na Figura 2. Nota-se que, pela ausência do termo independente na equação, o gráfico foi forçado a cruzar a origem do sistema.

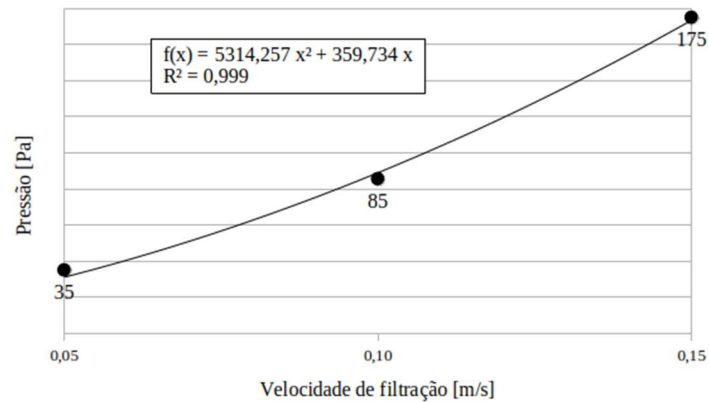


Figura 2. Curva de ajuste da queda de pressão em função da velocidade de filtração.

Com base nos coeficientes de ajuste da curva foram determinados os coeficientes de perda viscosa e inercial aproximadamente iguais a $7.782 \times 10^9 \text{ m}^{-2}$ e $3.591 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$, respectivamente. A Figura 3 detalha as condições internas e de contornos configuradas em ambos os softwares.

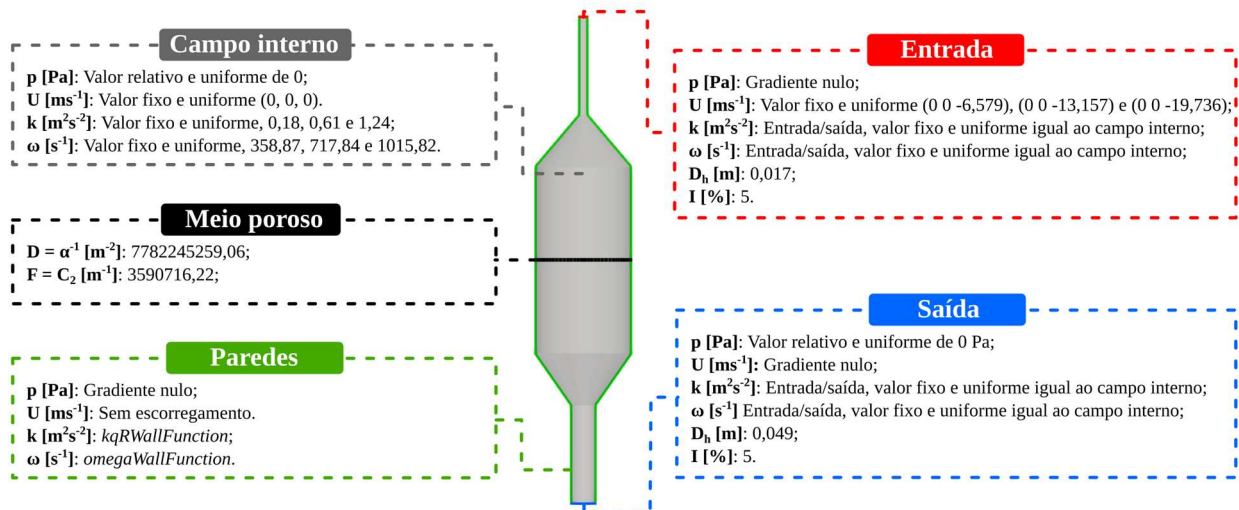


Figura 3. Condições internas e de contorno aplicadas como configuração das simulações no OpenFOAM e Ansys Fluent.

Os valores de pressão, velocidade, energia cinética turbulenta e a taxa específica de dissipação apresentados na Figura 3 foram configurados como condições de contorno para as simulações no OpenFOAM, respeitando a ordem crescente dos valores de acordo com as velocidades de filtração de 5, 10 e 15 cm/s. No Ansys Fluent foram configurados os valores de pressão e velocidade, sendo que para o tratamento da turbulência foram configurados a intensidade de turbulência e o diâmetro hidráulico.

Neste sentido, um total de seis simulações foram realizadas considerando as três velocidades de filtração e os dois softwares solucionadores, Ansys Fluent e OpenFOAM.

Para a comparação dos resultados utilizou-se perfis de pressão na linha central da caixa de filtração obtidas por meio de 100 pontos igualmente espaçados ao longo de todo o domínio, contornos de velocidade e pressão na seção longitudinal do domínio, velocidade média de filtração na entrada do meio poroso e quedas de pressão medidas pela média da pressão estática na entrada e saída do meio poroso. Para o cálculo das médias utilizou-se o *facet Average Static Pressure/Velocity Magnitude*, via *Surface reports*, no Ansys Fluent e o *pressure/velocity average* por meio do recurso *functions/surfaceFieldValue* no OpenFOAM.

3 Resultados e discussões

Nesta seção, serão comparados o desempenho das estratégias de modelagem de filtros em meios porosos no Ansys Fluent e OpenFOAM. A análise foca na precisão da previsão da queda de pressão no meio poroso, neste sentido, a queda de pressão obtida analiticamente com base no ajuste proposto, foi disponibilizada para comparação.

3.1 Benchmark Ansys Fluent e OpenFOAM

A Figura 4 apresenta os contornos de pressão em uma seção longitudinal para as três velocidades de filtração investigadas. Observa-se que o padrão de distribuição de pressão é similar em todos os casos, caracterizado por um gradiente de pressão abrupto na região do meio poroso, onde os valores decrescem no sentido do escoamento. Os contornos também evidenciam um aumento de pressão local na região central de entrada do meio poroso, causado pela estagnação formada pelo impacto do jato de entrada. A comparação entre os softwares mostrou contornos de pressão qualitativamente similares com desvio entre os valores máximos variando de 1,43% a 12,37%.

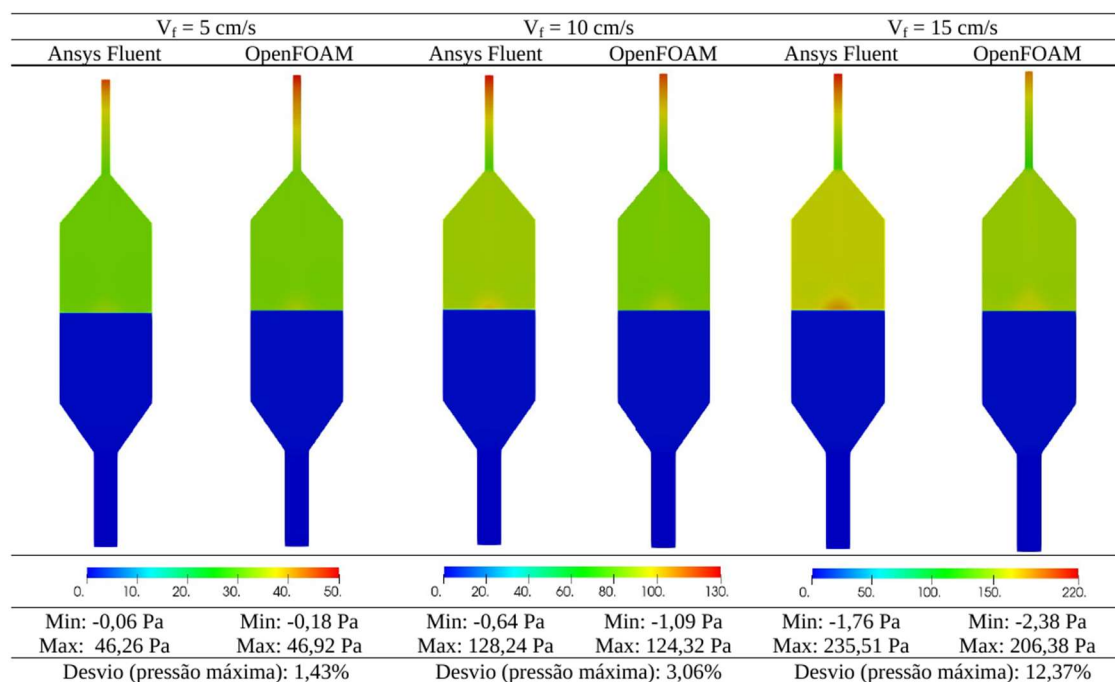


Figura 4. Contornos de pressão estática, em Pa, para as velocidades de filtração, V_f , iguais a 5, 10 e 15 cm/s simuladas no Ansys Fluent e OpenFOAM.

A determinação quantitativa da queda de pressão na caixa de filtração tomou como referência inicial a metodologia de Rocha (2010), que utiliza o perfil de pressão medido ao longo da linha central. A abordagem foi adaptada estendendo a medição por todo o domínio. A Figura 5 apresenta os perfis de pressão estática obtidos na linha central para as diferentes abordagens de simulação.

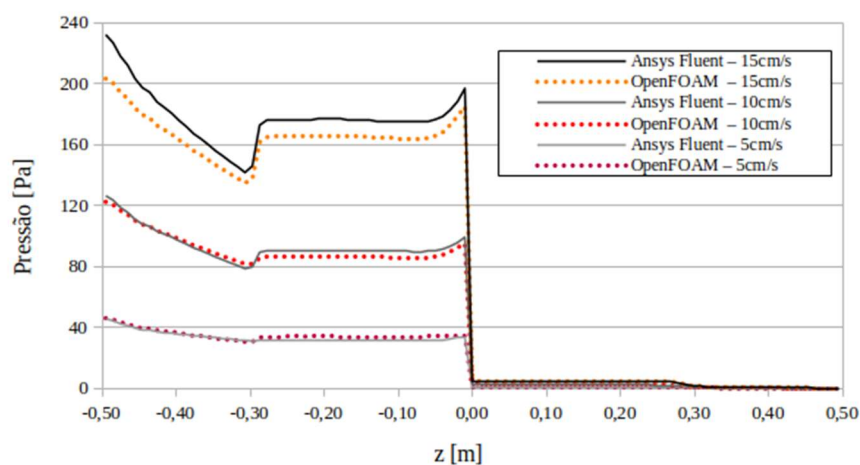


Figura 5. Perfis de pressão estática para as velocidades de filtração de 5, 10 e 15 cm/s no Ansys Fluent e OpenFOAM.

Nota-se que todos os solucionadores apresentaram excelente alinhamento dos resultados para a velocidade de filtração de 5 cm/s, divergindo ligeiramente na seção cônica e cilíndrica antes do meio poroso. Contudo, à medida em que aumenta a velocidade de filtração maiores divergências ocorrem ao

longo do domínio. Pode-se observar claramente a formação do pico de pressão devido ao ponto de estagnação na região central da entrada do meio poroso.

A Figura 6 exibe os contornos de magnitude de velocidade em uma seção longitudinal do domínio. De forma geral pode-se notar a queda abrupta de velocidade entre as regiões antes e após o filtro devido à resistência imposta pelo meio poroso. Padrões de recirculação podem ser inferidos pelo deslocamento radial do jato nas proximidades do meio poroso.

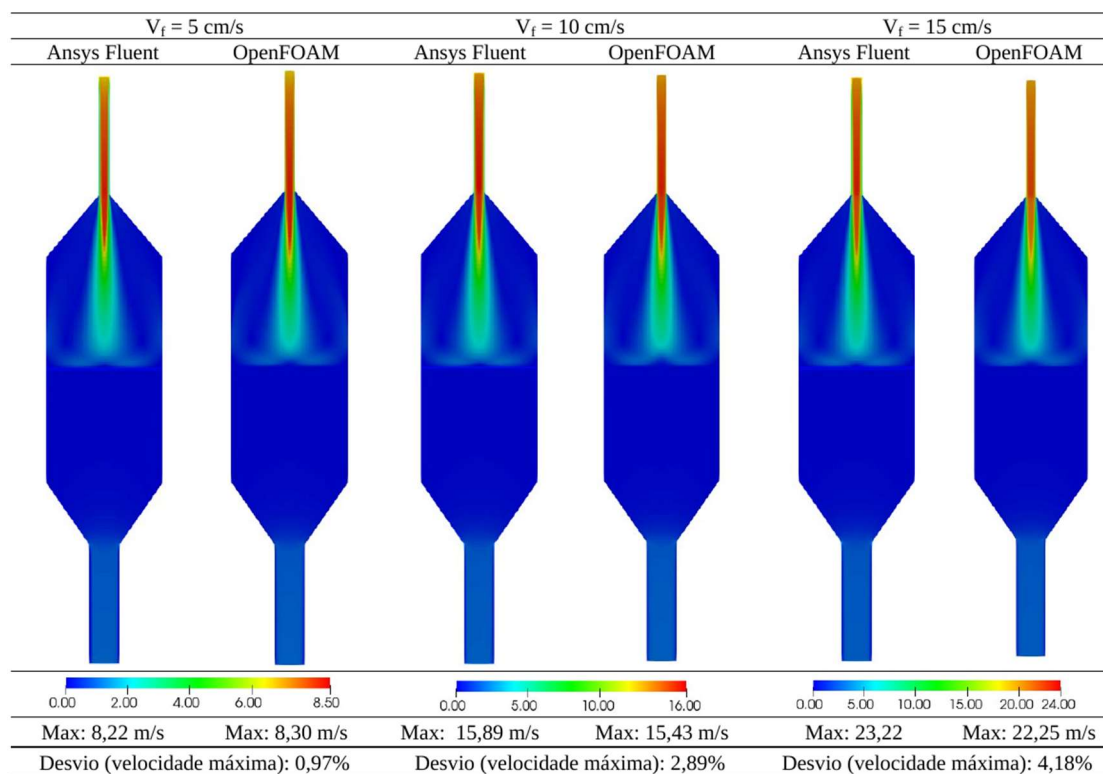


Figura 6. Contornos de magnitude de velocidade para as velocidades de filtração, V_f , iguais a 5, 10 e 15 cm/s simuladas no Ansys Fluent e OpenFOAM.

Em todos os casos, pode-se observar que o perfil de velocidade no domínio foram muito próximos qualitativamente entre os solucionadores. O erro percentual na comparação quantitativa dos valores máximos de magnitude de velocidade entre softwares variou de 0,97% a 4,18%.

3.2 Concordância e verificação da metodologia numérica

A fim de superar as dificuldades de comparação da queda de pressão no meio poroso por meio da Figura 5 com os dados experimentais, propôs-se como validação numérica a comparação entre os dados de queda de pressão experimentais e ajustados com as quedas de pressão obtidas pelas médias das pressões na entrada e saída do meio poroso. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Queda de pressão através do meio poroso: comparação entre resultados numéricos, dados experimentais e solução analítica para as velocidades de filtração V_f , de 5, 10 e 15 cm/s.

V_f [cm/s] (desvio)			Queda de pressão [Pa] (desvio)			
Teórico	Ansys Fluent	OpenFOAM	Experimental	Ajustado	Ansys Fluent	OpenFOAM
5	5,10 (2,00%)	5,06 (1,20%)	35	31,27 (10,66%)	32,01 (2,37%)	31,12 (0,48%)
10	10,32 (3,20%)	10,22 (2,20%)	85	89,12 (4,85%)	92,16 (3,41%)	89,97 (0,95%)
15	15,61 (4,01%)	15,36 (2,04%)	175	173,53 (0,84%)	180,67 (4,11%)	176,15 (1,51%)

De acordo com a Tabela 3, pode-se observar que ambos os softwares demonstraram capacidade de previsão da queda de pressão para os dados ajustados com valores ligeiramente superiores para o Ansys Fluent, seguindo a tendência da velocidade de filtração. Os desvios são apresentados entre parenteses onde: para a velocidade, relacionou-se os resultados simulados com o teórico; para a pressão, relacionou-se os resultados simulados com os ajustados, sendo o desvio para a queda de pressão ajustada obtida pela relação com os dados experimentais.

Nota-se que o ajuste da pressão pelos coeficientes de resistência viscosa e inercial calibrados pela regressão dos dados experimentais induziram erros de queda de pressão de 10,66%, 4,85% e 0,84%, para as velocidades de filtração de 5, 10 e 15 cm/s, respectivamente, dificultando a validação diretamente pelos dados experimentais. Pode-se notar, também, que o balanço de massa, utilizado para configurar a velocidade de entrada do domínio, resultou em velocidades de filtração ligeiramente superiores às teóricas em ambos os softwares para todos os casos testados. O desvio, não superior a 4,01%, indica que a velocidade de entrada baseada apenas neste balanço pode não ser totalmente precisa, possivelmente, devido a efeitos secundários do escoamento como recirculação.

4 Conclusões

A comparação entre o solver comercial Ansys Fluent e o solver de código aberto OpenFOAM demonstrou concordância, validando a metodologia numérica utilizada.

- Velocidade: Os contornos se mostraram qualitativamente coerentes. O erro percentual quantitativo nos valores máximos de magnitude de velocidade variou entre 0,97% e 4,18% para as três velocidades de filtração testadas.
- Queda de Pressão: A validação quantitativa da queda de pressão, confrontada com a solução analítica ajustada, demonstrou que ambos os solucionadores capturaram adequadamente a perda de carga através do filtro com uma ligeira divergência observada na seção cônica e cilíndrica antes do meio poroso.

Em relação à validação dos dados, a queda de pressão no meio poroso foi quantificada usando contornos, perfil na linha central e a pressão média nas faces do meio poroso. Embora o perfil da linha central seja útil para visualizar o gradiente de pressão e o comportamento nas interfaces, não se mostrou a métrica mais acurada, uma vez que, não integra a variação radial do escoamento. Para validação numérica e comparação com o valor analítico, que é um valor médio, a diferença entre os valores de pressão média de área na entrada e na saída do meio poroso mostrou-se a abordagem mais adequada.

Os resultados numéricos para a velocidade de filtração excederam os valores teóricos demonstrando que o balanço de massa simples não foi suficiente para garantir a velocidade de filtração desejada dentro do meio poroso. O escoamento é afetado por regiões de expansão, contração, e recirculações, exigindo uma abordagem de ajuste via simulação da configuração de entrada. Isso justifica os altos valores de pressão observados nos perfis e quedas de pressão, em especial no Ansys Fluent.

4.1 Recomendações para trabalhos futuros

O desenvolvimento deste trabalho encontrou limitações metodológicas e de software que merecem destaque para orientar pesquisas futuras.

- As tentativas de utilizar a condição de contorno *porousBafflePressure* para modelar o meio poroso resultou em dificuldade significativa de convergência, mesmo após ajustes de fatores de relaxamento e modelos de discretização, o que sugere a necessidade de um entendimento aprofundado da implementação do *porousBafflePressure* em escoamentos de alto gradiente para garantir a estabilidade numérica. Neste sentido, a análise comparativa com o software Ansys Fluent, usando o modelo *porous Jump*, não pôde ser concluída.
- Problemas surgiram durante a conversão da malha do OpenFOAM para o Fluent. As zonas volumétricas (*cellZones*), que delimitavam a região porosa, não foram representadas após a conversão. Para contornar o problema, a malha foi exportada em três regiões (entrada, meio poroso e saída) e juntadas utilizando os recursos de interfaces de malha do Ansys Fluent.
- Os modelos de turbulência k- ϵ padrão e k- ϵ realizável não se mostraram robustos para velocidades de filtração de 10 e 15 cm/s, dadas as condições do escoamento como possível descolamento da camada limite na saída do jato e zonas de recirculação.

Agradecimentos

Agradecimento. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Os autores agradecem também ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Referências bibliográficas

- Azarafza, M, Bonakdari, H and Shamshirband, S (2021) ‘Prediction of residual saturation and pressure drop during coalescence filtration using dynamic pore network model’, *Separation and Purification Technology*, [online] v.254. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117588>.
- Bächler, P, Meyer, J and Dittler, A (2024) ‘Operating Behavior of Pulse Jet-Cleaned Filters Regarding Energy Demand and Particle Emissions – Part 2: Modeling’, *Chemical Engineering & Technology*, [online] v.47, p. 1-11. <https://doi.org/10.1002/ceat.202300409>.
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (2024) *Resolução CONAMA Nº 506, de 05 de julho de 2024. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar*, [online]. Available at: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=450000> (accessed 23 September 2024).
- Cao, B, Qian, F, Ye, M, Guo, Y, Wang, S, Lu, J and Han, Y (2021) ‘Pressure drop model for fibrous media in depth filtration: Coupling simulation of microstructure and CFD porous media during dust loading’, *Building and Environment*, [online] v. 202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108015>.
- Chen, R, Dong, X, Feng, Z, Fan, Y and Ma, X (2024) ‘Investigation on permeability of filter cake with different particle sizes: Experimental and simulation study’, *Powder Technology*, [online] v.433. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119191>.
- Duan, Y, Dong, X, Yang, H, Fan, Y, Ma, X and Lin, W (2024) ‘Study of solid-liquid two-phase flow model of drilling fluids for analyzing mud cake formation’, *Geoenergy Science and Engineering*, [online] v.236. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212761>.
- Fluent, Ansys Inc. (2025) *Ansys Fluent User's Guide*, [online] (Release 23.2). Available at: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html (accessed 28 September 2025).
- Liu, K, Zhao, Y, Jia, L, Hao, R and Fu, D (2019) ‘A novel CFD-based method for predicting pressure drop and dust cake distribution of ceramic filter during filtration process at macro-scale’, *Powder Technology*, [online] v. 353, p. 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.014>.
- Openfoam Foundation (2025) *OpenFOAM User Guide*, [online] (v11). Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide> (accessed 23 September 2025).
- Punyaponchai, A, Priyadumkol, J, Loksupapaiboon, K, Thongkom, S and Suvanjumrat, C (2024) ‘Development of a Baghouse Filter CFD Model for Efficient Particulate Removal in Air Filtration Systems’, *International Journal of GEOMATE*, [online] v. 26, n. 133, p. 128-135. <https://doi.org/10.21660/2024.113.g13288>.
- Rocha, S.M.S. (2010) *Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta de limpeza de gases em filtro de mangas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.