

## Otimização da Dinâmica de Fluidos em Meios Porosos através de Simulações Numéricas utilizando OpenFOAM.

Cláudio S. Vivas (Doutorando - MCTI), [caduvivas@gmail.com](mailto:caduvivas@gmail.com);

Ivan Costa da Cunha Lima (Orientador - UERJ), [ivandacunhalima@gmail.com](mailto:ivandacunhalima@gmail.com);

André Telles da Cunha Lima (Coorientador - UFBA), [atcl@ymail.com](mailto:atcl@ymail.com);

Murilo Pereira de Almeida (Coorientador - UFC), [murilo@fisica.ufc.br](mailto:murilo@fisica.ufc.br);

Faculdade SENAI CIMATEC

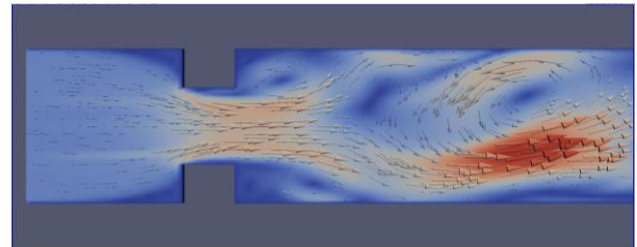
Palavras Chave: *OpenFOAM, Navier-Stokes, Lei de Darcy, Meio Poroso*

### Introdução

A Dinâmica dos Fluidos é a parte Física que estuda o comportamento de um fluido em movimento, ou seja, sob a ação de forças externas responsáveis pelo transporte de massa. Atualmente o estudo, análise e compreensão da maior parte dos problemas em dinâmica dos fluidos são desenvolvidos através de Simulação Computacional.

Na exploração de um fluido (petróleo, por exemplo), cujos custos são muitas vezes bastante elevados, o entendimento sobre sua dinâmica e a interação deste fluido com o seu meio (meio poroso; rocha), gera a necessidade do controle sobre variáveis como: porosidade e permeabilidade do meio, velocidade, viscosidade, temperatura e pressão do fluido. Nesse contexto, simular esta dinâmica através da obtenção de soluções numéricas das Equações de Navier-Stokes ou da Lei de Darcy significa encontrar parâmetros com os quais a exploração torna-se mais segura, econômica e eficiente. De um modo geral, essas soluções numéricas têm proporcionado, graças à vasta variedade de softwares em CFD (*Computational Fluid Dynamics*), diversas situações relevantes para a ciência e tecnologia, importância esta tanto acadêmica quanto aplicada à exploração de petróleo.

Particularmente para esta proposta de trabalho utilizamos o OpenFOAM, um *software* de código aberto para solução numérica de equações diferenciais através do Método dos Volumes Finitos em linguagem C++. A exploração das ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento do pacote OpenFOAM nos possibilita criar modelos de dinâmicas diversas em situações variadas: fluxos turbulentos, meios porosos, dentre outros.

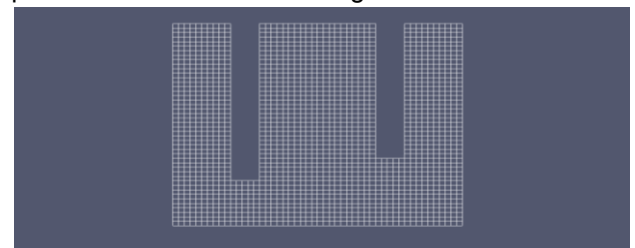


**Figura 1:** Presença de vórtice em simulação de fluxo em duto parcialmente obstruído. Simulação usada como base para o domínio da técnica.

### Resultados e Discussão

Nosso trabalho teve início com um curso *hands on* sobre o uso do *software* OpenFOAM, onde passamos pelas diversas fases da simulação: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Foi estudado um *case*, o do escoamento interno turbulento em um duto, regido pelas equações de Navier-Stokes, cujos resultados são parcialmente mostrados na Figura 1. Com isso cobrimos todas as fases da simulação, desde a definição do domínio até a interpretação dos resultados.

A partir daí nosso objetivo voltou-se para o tema específico da tese, que é usar os recursos computacionais do OpenFOAM para simular o escoamento de um fluido em um meio poroso que, nesta fase preliminar dos trabalhos, é representado pelo domínio mostrado na Figura 2.



**Figura 2.** Mostra o domínio da simulação construído através do OpenFOAM.

Trata-se de um volume de material poroso no qual é injetado um fluido num determinado poço (*inlet*), e recolhido em outro poço (*outlet*). Ainda nesta fase, preliminar, estamos tratando de um escoamento monofásico em meio homogêneo. Esse escoamento é bem descrito pela equação de continuidade e pela equação de Darcy:

$$q = -\frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

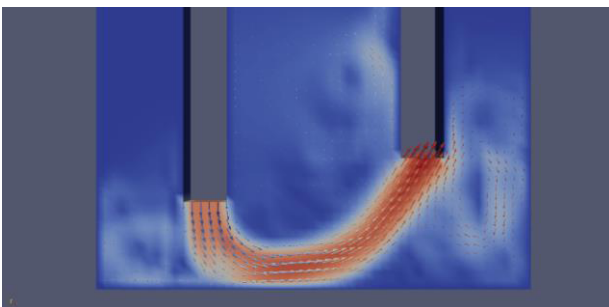
Onde  $q$  representa a vazão volumétrica que depende do gradiente de pressão, da permeabilidade do meio  $k$ , da área da seção transversal  $A$  e da viscosidade do fluido  $\mu$ . Já o sinal negativo deve-se ao fato do gradiente de pressão ser decrescente no sentido do fluxo.

A equação acima pode ser escrita também como:

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

onde  $u = \frac{q}{A}$  é a velocidade de Darcy.

A *toolbox* para CFD OpenFOAM fornece, entre suas diversas aplicações, a ferramenta *ParaView*, que trata do pós-processamento das simulações. Através deste aplicativo visualizamos a simulação propriamente dita, fazemos cortes, destacamos vetores e escalares, e desta maneira podemos compreender os efeitos das posições dos poços de entrada e saída na dinâmica no interior do reservatório. Uma imagem obtida através do *Paraview* do modelo analisado é mostrada na Figura 3. A análise, ainda que preliminar, das componentes físicas e do desenvolvimento da simulação podem revelar dados e características decisivas do modelo, como por exemplo, a formação de *fingers* (caminhos preferenciais do fluxo), que são formações indesejáveis num processo de extração de petróleo.



**Figura 3.** Imagem do *ParaView* do escoamento monofásico em meio homogêneo.

## Conclusões

A Teoria da Dinâmica dos Fluidos e a aplicação do modelo matemático descrito pelas equações de Navier-Stokes resolvidas numericamente em um domínio (*Mesh*) discretizado através do Método de Volumes Finitos e sendo aplicado o *software* de código aberto OpenFOAM, nos deu segurança para iniciarmos nossos cálculos do escoamento em meios porosos usando os *solvers* adequados à equação de Darcy no OpenFOAM.

Os resultados obtidos até aqui nos permitiram vislumbrar uma expansão da aplicação da plataforma OpenFOAM em simulações a serem realizadas em sistemas bifásicos, tentando otimizar a disposição geométrica e as características físicas de um fluido a ser injetado no meio poroso com o fim de extrair dele outro fluido no qual o meio poroso esteja embebido. Essa é uma questão relevante em situações como: recuperação da produção em campos petrolíferos maduros, contaminação de aquíferos, e problemas relacionados a reatores.

O prosseguimento desses trabalhos segue por impor um domínio tridimensional ao meio poroso, além de associar características físicas a este meio poroso e aos fluidos, o que implica no uso de computação de alto desempenho à qual temos acesso através do HPC Yemoja do SENAI-Cimatec.

## Referências

- <sup>1</sup> Greenshields, C. J. OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide. 2015.
- <sup>2</sup> Chen, Z. Reservoir Simulation, Mathematical Techniques in Oil Recovery 2007, SIAM
- <sup>3</sup> Schlichting, H. e Gersten, K. Boundary-Layer Theory 2003, 8<sup>th</sup> ed. Springer