

Introdução ao OpenFOAM

Dr. Diogo N. Siebert
Juan P. L. C. Salazar, Ph.D.

9 a 19 de maio de 2022

Objetivos do curso

- Apresentar o OpenFOAM como uma ferramenta numérica de projeto e pesquisa em engenharia;
- estimular o uso de ferramentas de código aberto;
- compreender a estrutura básica de simulações em OpenFOAM;
- utilizar a ferramenta para geração de malhas do OpenFOAM, assim como ferramentas externas (`gmsht`);

Objetivos do curso

- compreender o significado dos parâmetros dos *solvers* do OpenFOAM;
- aplicar as ferramentas de pós-processamento do OpenFOAM;
- construir novos casos de simulação.
- executar as simulações em computadores *multicores* e em cluster computacionais.

Estrutura do Curso

- Aula0 - Introdução
 - O que é o OpenFOAM?
 - Leis de Conservação;
 - Conceitos do Método dos Volumes Finitos.
- Aulas 1 e 2 - Tutorial da Cavity Quadrada
 - Refino de malha;
 - Malha não-uniforme;
 - Modelo de turbulência.
- Aulas 3 e 4 - Backward Facing Step
 - Malhas, editando o blockMeshDict;
 - Condições de contorno.
- Aulas 5 e 6 - Paralelização e *gmsH*
 - Utilizando o *gmsH* para geração das malhas;
 - Rodando a simulação em múltiplas cores e em clusters.
- Aula 7 - Estudo de Caso: Desprendimento de vórtices

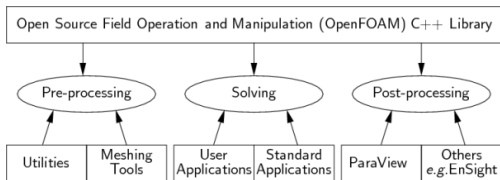
Pré-requisitos

- Conhecimento básico na utilização da linha de comando em Linux ou PowerShell;
- cálculo vetorial;
- noções de mecânica dos fluidos;
- noções de cálculo numérico;
- noções de mecânica dos fluidos computacional.

O que é o OpenFOAM?

OpenFOAM = **O**pen **S**ource **F**ield **O**peration and **M**anipulation

OpenFOAM é um conjunto de ferramentas para CFD escrito em C++ que contém geradores de malhas, solvers e utilitários de pós-processamento.



História

- Criado inicialmente em **1989** por *Henry Weller^a*, no Imperial College com o nome FOAM;
- recebeu contribuições relevantes de *Hrvoje Jasak* durante seu Phd (**1993-1996**);
- em **2000**, *Weller* e *Jasak* criam a empresa *Nabla Ltd* com o intuito de comercializar o FOAM;
- em **2004** a *Nabla Ltd* declara falência, *Weller* juntamente com Chris Greenshields e Mattijs Janssens fundam a OpenCFD Ltd liberando o agora renomeado OpenFOAM como software código aberto sobre a licença GPL.;

^aSob supervisão do Prof. David Gosman e do Dr. Radd Issa

História

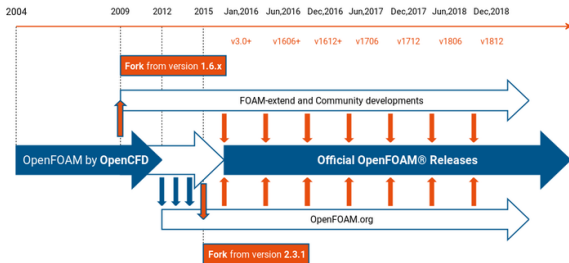
- em **2011**, a OpenCFD é adquirida pela Silicon Graphics International (SGI) e simultaneamente é criada a *OpenFOAM Foundation* sendo para esta transferida o copyright do OpenFOAM;^a
- em **2012**, o grupo ESI adquire a OpenCFD da SGI;
- em **2014**, *Weller* e *Greenshields* deixam a ESI e continuam o desenvolvimento do OpenFOAM através de uma nova empresa, CFD Direct.

^aApesar disso a marca OpenFOAM continua sendo uma propriedade da OpenCFD.

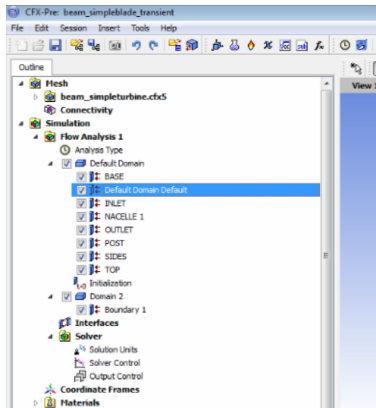
História

Observações

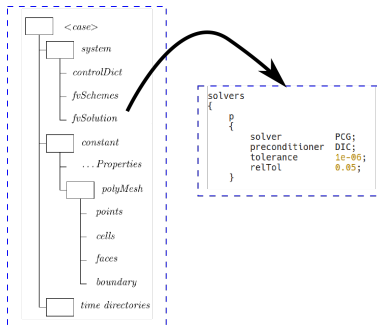
- www.openfoam.com é a página oficial da empresa OpenCFD;
- www.openfoam.org é a página oficial da Fundação OpenFOAM;



Como é a interface do OpenFOAM?



Ansyes CFX



OpenFOAM

Instalação

`https://develop.openfoam.com/Development/openfoam/-/
wikis/precompiled`

Vantagens e Desvantagens

Desvantagens

- Não possui uma interface gráfica;
- paralelização exclusivamente em MPI (memória segmentada);
- não possui um suporte centralizado.

Vantagens e Desvantagens

Vantagens

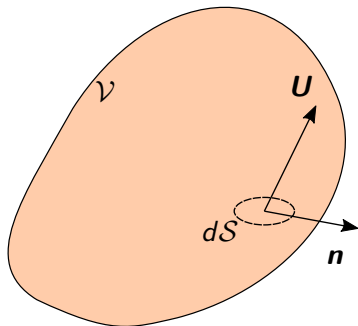
- É uma ferramenta gratuita;
- é código aberto (não é uma caixa preta);
- formato de I/O simples e abertos;
- permite aos usuários criar solvers (modelos) com relativa facilidade;
- auxílio da comunidade de usuários e desenvolvedores.

Características

- Multiplataforma mais adequado ao Linux;
- configuração com base em arquivos.

Conservação da massa (volume de controle fixo)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \rho d\mathcal{V} = - \int_{\mathcal{S}} \rho \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} dS$$



Conservação da quantidade de movimento (volume de controle fixo)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \rho \mathbf{U} d\mathcal{V} + \int_S \rho \mathbf{U} \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} dS + \int_{\mathcal{V}} \rho \mathbf{f} d\mathcal{V}$$

Para fluidos newtonianos (ar, água) a equação constitutiva é dada por:

$$\boldsymbol{\tau} = - \left(p + \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \mathbf{I} + \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right)$$

Conservação da energia (volume de controle fixo)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{U} \cdot \mathbf{U} \right) dV + \int_S \rho \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{U} \cdot \mathbf{U} \right) \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} dS \\ = \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U} dS - \int_S \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{U} dV \end{aligned}$$

Em geral,

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Conservação da massa

Ao aplicar o teorema da divergência,

$$\int_S [\quad] \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \nabla \cdot [\quad] dV$$

temos que,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \int_V \nabla \cdot \rho \mathbf{U} dV$$

ou

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \nabla \cdot \rho \mathbf{U}$$

Conservação da quantidade de movimento

De forma análoga,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \rho \mathbf{U} d\mathcal{V} = - \int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot \rho \mathbf{U} \mathbf{U} d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{V}} \rho \mathbf{f} d\mathcal{V}$$

ou,

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{U} = - \nabla \cdot \rho \mathbf{U} \mathbf{U} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{f}$$

Conservação da energia

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \rho \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{U} \cdot \mathbf{U} \right) d\mathcal{V} = - \int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{U} \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{U} \cdot \mathbf{U} \right) \right] d\mathcal{V} \\ + \int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U}) d\mathcal{V} - \int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot \mathbf{q} d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{V}} \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{U} d\mathcal{V}$$

ou,

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{U} \cdot \mathbf{U} \right) = - \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{U} \left(e + \frac{1}{2} \mathbf{U} \cdot \mathbf{U} \right) \right] \\ + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{U}$$

MFV com a equação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \phi \mathbf{U} - \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{U} = -\nabla p$$

Em código fonte do OpenFoam,

```

solve (
    fvm::ddt(rho, U)
    + fvm::div(phi, U)
    - fvm::laplacian(mu, U)
    ==
    - fvc::grad(p)
);

```

Aqui $\phi = \rho \mathbf{U}$

Uma breve introdução ao MVF

O método dos volumes finitos (MVF) consiste na aproximação da solução de uma equação diferencial parcial, por meio da solução numérica da forma integral dessa equação.

Seja por exemplo a equação da condução,

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q}.$$

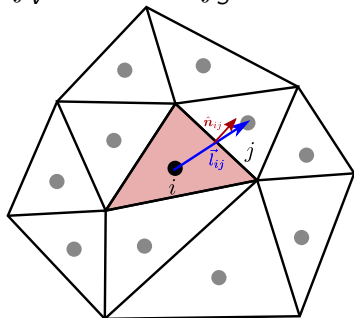
Podemos transformar esta expressão na forma integral, integrando sobre um volume de controle V e aplicando o *Teorema da Divergência*,

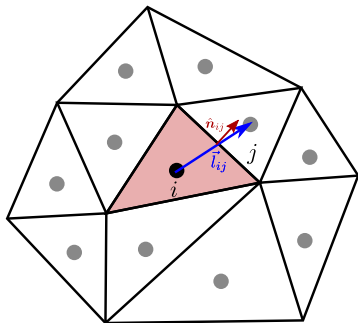
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho e) dV = - \int_S \mathbf{q} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS.$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho e) dV = - \int_S \mathbf{q} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS$$

Considerando um sólido, temos $e = cT$. Usando a lei de Fourier
 $\mathbf{q} = -k\nabla T$,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho c T) dV = \int_S k \nabla T \cdot \hat{\mathbf{n}} dS.$$





Aplicando então a equação integral ao volume de controle destacado, podemos aproximar a integral volumétrica como,

$$\int_{V_i} (\rho c T) dV \approx \rho c T_i V_i.$$

A integral de superfície pode ser aproximada como,

$$\int_S k \nabla T \cdot \hat{n} dS \approx k \sum_j \nabla T \cdot \hat{n}_{ij} A_{ij}.$$

Com tais aproximações a equação para temperatura no centro da i -ésima célula é dada por,

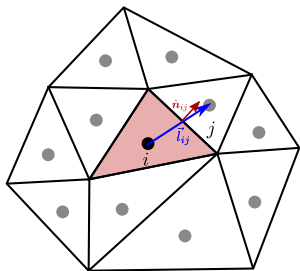
$$\rho c V_i \frac{dT_i}{dt} = k \sum_j \nabla T \cdot \hat{n}_{ij} A_{ij}.$$

Definindo $\alpha = k/(\rho c)$,

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\alpha}{V_i} \sum_j \nabla T \cdot \hat{n}_{ij} A_{ij}.$$

Para integrar esta equação de primeira ordem no tempo podemos, por exemplo, utilizar o *método de Euler*,

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \frac{\alpha}{V_i} \sum_j (\nabla T)^{n+1} \cdot \hat{n}_{ij} A_{ij}.$$



$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \frac{\alpha}{V_i} \sum_j (\nabla T)^{n+1} \cdot \hat{n}_{ij} A_{ij}$$

Podemos então aproximar o gradiente por diferenças finitas,

$$(\nabla T)^{n+1} \cdot \hat{n}_{ij} \approx \frac{(T_j^{n+1} - T_i^{n+1})}{l_{ij}} \frac{l_{ij} \cdot \hat{n}_{ij}}{l_{ij}}.$$

Com a definição $B_{ij} = \frac{\alpha \Delta t l_{ij} \cdot \hat{n}_{ij}}{V_i l_{ij}^2}$ chegamos então a,

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \sum_j (T_j^{n+1} - T_i^{n+1}) B_{ij}.$$

Por fim,

$$\left(1 + \sum_j B_{ij}\right) T_i^{n+1} - \sum_j B_{ij} T_j^{n+1} = T_i^n.$$