



Profa. Livia Jatobá

Introdução à CFD usando o OpenFOAM



Instituto Politécnico
IPRJ Universidade do Estado do Rio de Janeiro



O que é CFD?

Computational Fluid Dynamics

ou

Dinâmica dos Fluidos Computacional

É a solução numérica das equações que governam o escoamento de fluidos.

Por que CFD?

- ❖ Necessidade de predição.
- ❖ Custo (ou impossibilidade) de experimentos.
- ❖ Obter melhor entendimento do problema estudado.
- ❖ Avanço dos recursos computacionais.
- ❖ Ferramentas de simulação acessíveis e adotadas em projetos de engenharia.

Por que OpenFOAM?

Open source Field Operation And Manipulation

:-)

- ❖ Open-Source (GLP)
- ❖ Redução de custos (eliminação do custo de licenças).
- ❖ Desenvolvimento colaborativo.
- ❖ Desenvolvimento de novos métodos é acelerado pois parte de um código já existente.

:-(

- ❖ Grande esforço para aprender como usar e estender a plataforma.
- ❖ Multidisciplinar:
 - ❖ Conhecimento geral da física do escoamento de fluidos.
 - ❖ CFD / Métodos Numéricos.
 - ❖ Desenvolvimento de software e programação em C++.
 - ❖ Computação paralela.

Particularidades de uma simulação CFD

- ❖ A validade dos resultados simulados é determinada frente à resultados experimentais.
- ❖ O fenômeno termo-físico simulado precisa de uma modelagem matemática apropriada.
- ❖ O engenheiro precisa fazer as escolhas apropriadas.
- ❖ A qualidade dos resultados depende:
 - ❖ Modelos que representem o problema físico com acurácia.
 - ❖ Métodos numéricos e algoritmos que resolvam as equações com baixo erro.

Refleta sobre algumas questões antes de começar ...

Considerações gerais:

- ❖ O que espera-se da simulação CFD?
- ❖ Qual a metodologia adotada para validar os resultados?
- ❖ Qual o grau de acurácia dos resultados?
- ❖ Quanto tempo existe disponível para o projeto?

Refleta sobre algumas questões antes de começar ...

Termo-física:

- ❖ O escoamento é laminar, turbulento ou transicional?
- ❖ O escoamento é compressível ou incompressível?
- ❖ O escoamento envolve mais de uma fase ou mais de uma espécie química?
- ❖ A troca térmica é importante para o problema?
- ❖ As propriedades dos materiais são funções de variáveis dependentes?
- ❖ Existe informação suficiente em relação às condições de contorno?
- ❖ As condições de contorno são modeladas ou aproximadas de forma apropriada?

Refleta sobre algumas questões antes de começar ...

Domínio computacional (geometria e malha):

- ❖ Pode-se construir uma representação discreta do domínio de escoamento de forma acurada?
- ❖ Qual complexidade do domínio pode ser reduzida sem impactar na acurácia da solução?
- ❖ O domínio computacional irá deformar ou mover durante a simulação?

Refleta sobre algumas questões antes de começar ...

Recursos computacionais:

- ❖ Uma simulação será suficiente ou serão necessárias múltiplas simulações CFD para realizar a análise?
- ❖ Quanto tempo existe disponível para cada simulação?
- ❖ Qual tipo de recurso computacional está disponível?

Etapas de uma simulação CFD

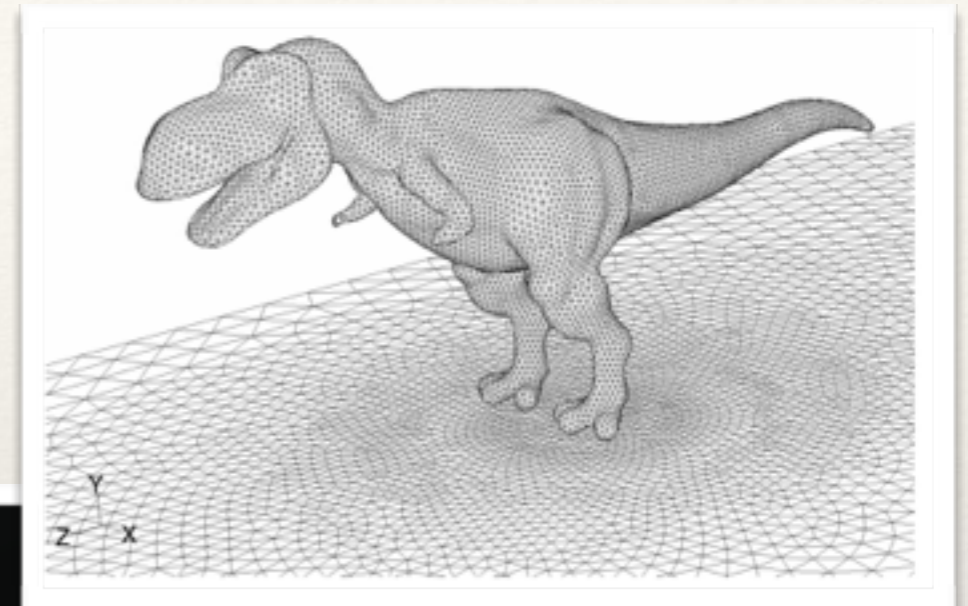
1^a. Etapa: pré-processamento

2^a. Etapa: solução

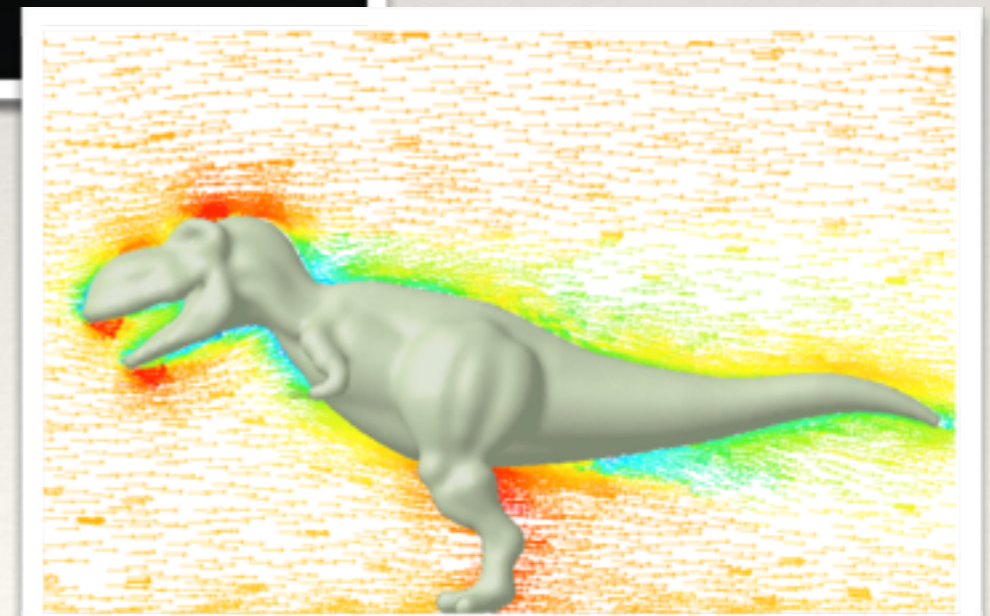
```
Time = 0.5
```

```
Courant Number mean: 0.116925 max: 0.852134 velocity magnitude: 0.852134  
DILUPBiCG: Solving for Ux, Initial residual = 1.89493e-07, Final residual = 1.89493e-07, No Iterations 0  
DILUPBiCG: Solving for Uy, Initial residual = 4.14522e-07, Final residual = 4.14522e-07, No Iterations 0  
DICPCG: Solving for p, Initial residual = 1.06665e-06, Final residual = 3.39604e-07, No Iterations 1  
time step continuity errors : sum local = 5.25344e-09, global = 5.55948e-19, cumulative = 3.27584e-18  
DICPCG: Solving for p, Initial residual = 5.36118e-07, Final residual = 5.36118e-07, No Iterations 0  
time step continuity errors : sum local = 6.86432e-09, global = -9.66312e-19, cumulative = 2.30953e-18  
ExecutionTime = 0.25 s ClockTime = 0 s
```

```
End
```



3^a. Etapa: pós-processamento



Etapas de uma simulação CFD

1^a. Etapa: pré-processamento

- ❖ Modelo matemático do problema físico:
 - ❖ Equações de conservação.
 - ❖ Equações constitutivas e propriedades do fluido.
 - ❖ Hipóteses simplificadoras.
 - ❖ Condição de inicial e de contorno.
- ❖ Modelo geométrico.
- ❖ Discretização do modelo geométrico (malha).
- ❖ Discretização das equações diferenciais (método numérico).
- ❖ Sequência de solução das equações discretizadas (algoritmo).
- ❖ Critérios de convergência.

Etapas de uma simulação CFD

1ª. Etapa: pré-processamento

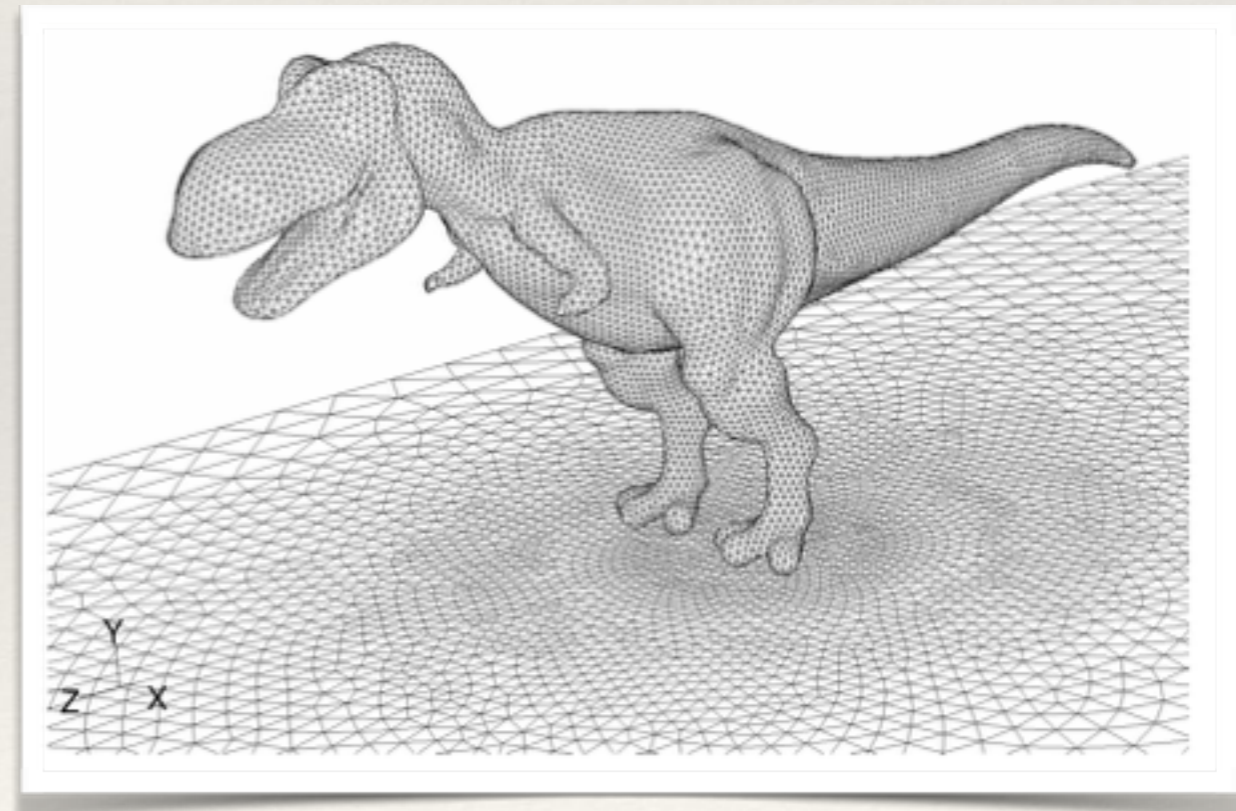
- ❖ Modelo matemático do problema físico:
 - ❖ **Equações de conservação.**
 - ❖ Equações constitutivas e propriedades do fluido.
 - ❖ Hipóteses simplificadoras.
 - ❖ Condição de inicial e de contorno.
- ❖ Modelo geométrico.
- ❖ Discretização do modelo geométrico (malha).
- ❖ Discretização das equações diferenciais (método numérico).
- ❖ Sequência de solução das equações discretizadas (algoritmo).
- ❖ Critérios de convergência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$
$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' + \rho \mathbf{f}_m$$
$$\frac{\partial (\rho e_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_{tot} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \dot{q}_v$$

Etapas de uma simulação CFD

1ª. Etapa: pré-processamento

- ❖ Modelo matemático do problema físico:
 - ❖ Equações de conservação.
 - ❖ Equações constitutivas e propriedades do fluido.
 - ❖ Hipóteses simplificadoras.
 - ❖ Condição de inicial e de contorno.
- ❖ **Modelo geométrico.**
- ❖ **Discretização do modelo geométrico (malha).**
- ❖ Discretização das equações diferenciais (método numérico).
- ❖ Sequência de solução das equações discretizadas (algoritmo).
- ❖ Critérios de convergência.



Etapas de uma simulação CFD

2^a. Etapa: solução

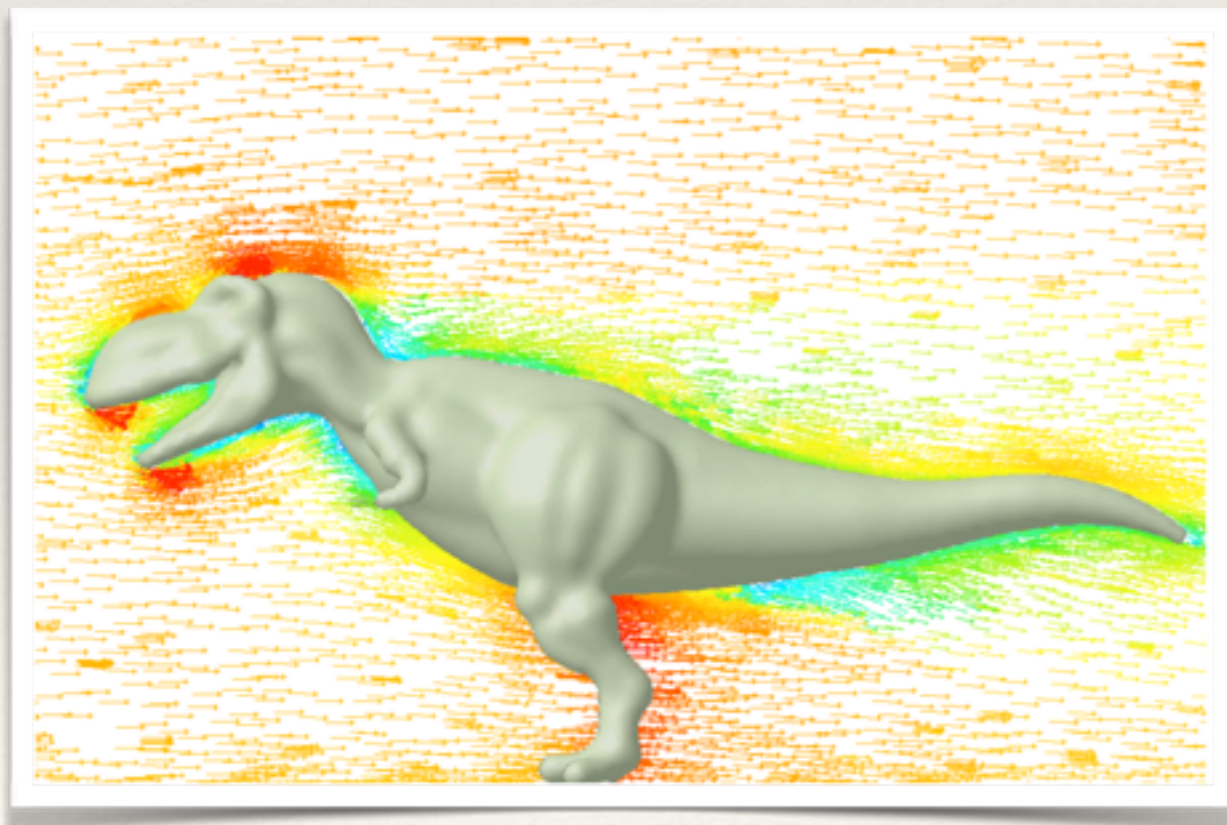
- ❖ Solução do sistema algébrico formado.

```
Time = 0.5  
  
Courant Number mean: 0.116925 max: 0.852134 velocity magnitude: 0.852134  
DILUPBiCG: Solving for Ux, Initial residual = 1.89493e-07, Final residual = 1.89493e-07, No Iterations 0  
DILUPBiCG: Solving for Uy, Initial residual = 4.14522e-07, Final residual = 4.14522e-07, No Iterations 0  
DICPCG: Solving for p, Initial residual = 1.06665e-06, Final residual = 3.39604e-07, No Iterations 1  
time step continuity errors : sum local = 5.25344e-09, global = 5.55948e-19, cumulative = 3.27584e-18  
DICPCG: Solving for p, Initial residual = 5.36118e-07, Final residual = 5.36118e-07, No Iterations 0  
time step continuity errors : sum local = 6.86432e-09, global = -9.66312e-19, cumulative = 2.30953e-18  
ExecutionTime = 0.25 s  ClockTime = 0 s  
  
End
```

Etapas de uma simulação CFD

3ª. Etapa: pós-processamento

- ❖ Análise dos resultados.
- ❖ Revisão do modelo matemático e hipóteses simplificadoras.



Equações Básicas

Modelo matemático do problema físico:

- ❖ Podemos identificar termos semelhantes nas diferentes equações de conservação:
 - ❖ Acúmulo
 - ❖ Transporte Advectivo
 - ❖ Transporte Difusivo
 - ❖ Termos volumétricos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$
$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' + \rho \mathbf{f}_m$$
$$\frac{\partial (\rho e_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_{tot} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \dot{q}_v$$

Forma Geral da Equação de Conservação

$$\underbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{Acúmulo}} + \underbrace{\nabla \cdot (\mathbf{U} \phi)}_{\text{Advectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot \mathbf{t}_\phi}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Fonte}}$$

ϕ é uma propriedade volumétrica qualquer, \mathbf{t}_ϕ depende do modelo de transporte molecular e S_ϕ é o termo volumétrico.

Solução Numérica

- ❖ Consiste na substituição das equações diferenciais por um sistema de equações algébricas.
- ❖ A construção dessa solução é feita em duas etapas:
 - ❖ Discretização do domínio (malha).
 - ❖ Discretização das equações (Método dos Volumes Finitos).

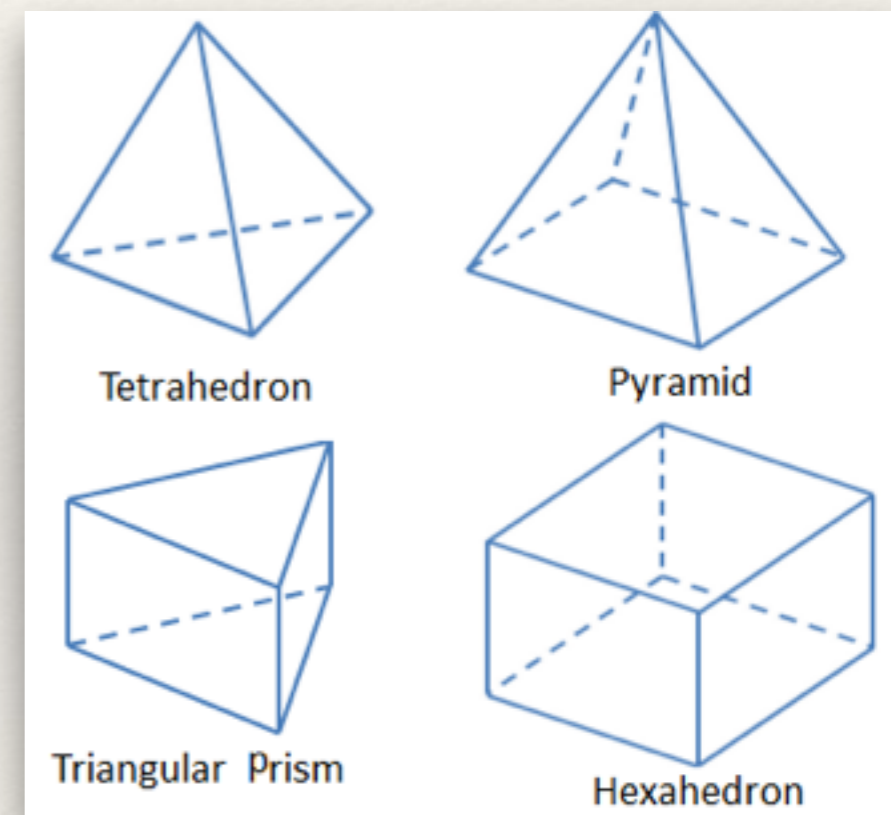
$$\underbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{Acúmulo}} + \underbrace{\nabla \cdot (\mathbf{U}\phi)}_{\text{Advectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot \mathbf{t}_\phi}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Fonte}} \quad \longrightarrow \quad \underline{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

ϕ é uma propriedade volumétrica qualquer, \mathbf{t}_ϕ depende do modelo de transporte molecular e S_ϕ é o termo volumétrico.

Malha

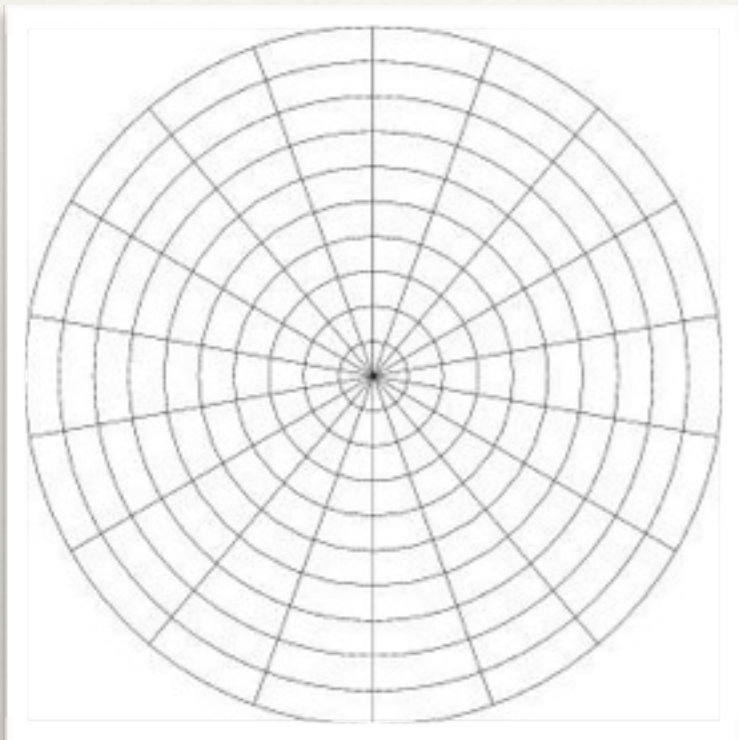
É a discretização do modelo geométrico.

- ❖ Geometria é a representação 3D da região de escoamento.
- ❖ Malha é a divisão da geometria em vários volumes.
- ❖ Quanto maior o número de volumes, menor será o erro.
- ❖ A forma do volume afeta o erro da solução numérica.
- ❖ De modo geral, a malha precisa ser refinada nas regiões do escoamento onde o gradiente da propriedade é alto.
- ❖ A construção da malha é uma etapa crítica para garantir a convergência da simulação.

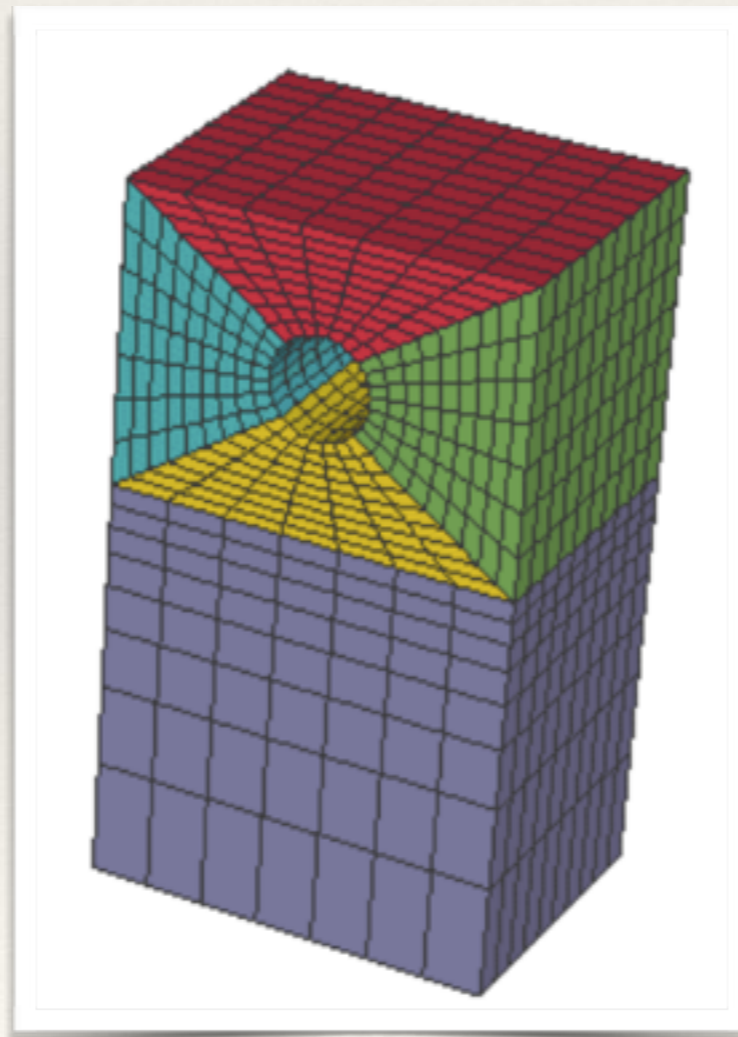


Tipos de malha

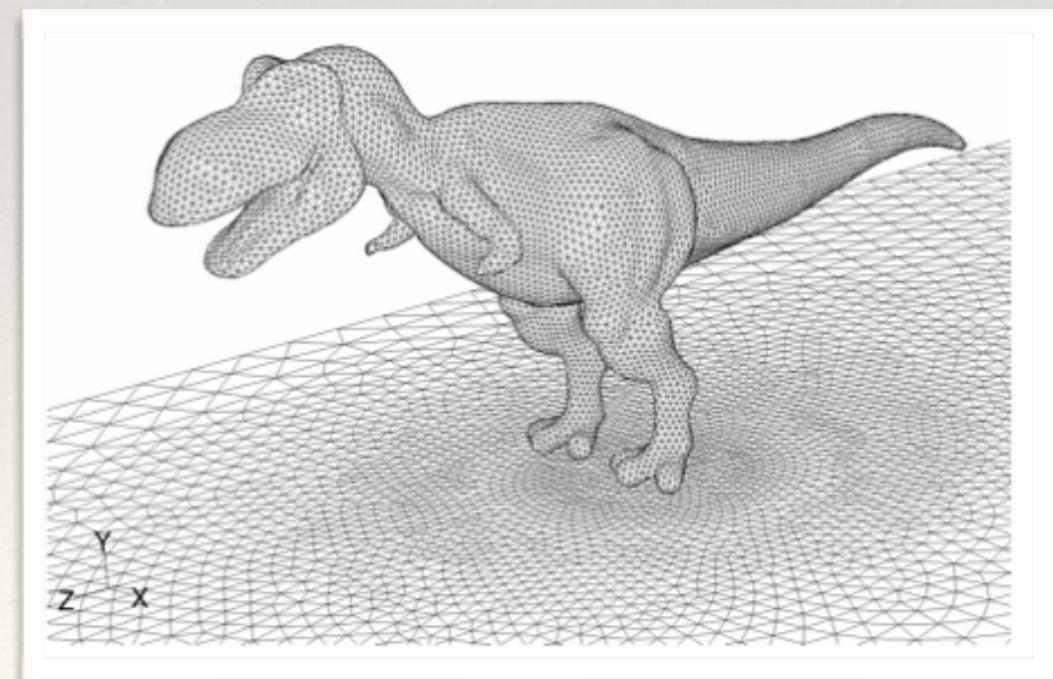
Estruturada



Estruturada por blocos



Não estruturada



Fronteiras da malha

- ❖ As fronteiras (ou contorno) da malha precisam receber propriedades topológicas.
- ❖ No OpenFoam, essas propriedades são atribuídas através de um tipo de **patch**.
 - ❖ Os principais tipos são:
 - ❖ **patch**: descrição mais geral, podendo receber qualquer tipo de condição de contorno.
 - ❖ **wall**: permite o uso funções de parede em modelos de turbulência.
 - ❖ **symmetryPlane**: plano de simetria.
 - ❖ **empty**: usados em casos 2D ou 1D.

Parâmetros de qualidade da malha

Estão associados ao formato geométrico do volume e a conectividade com seus vizinhos:

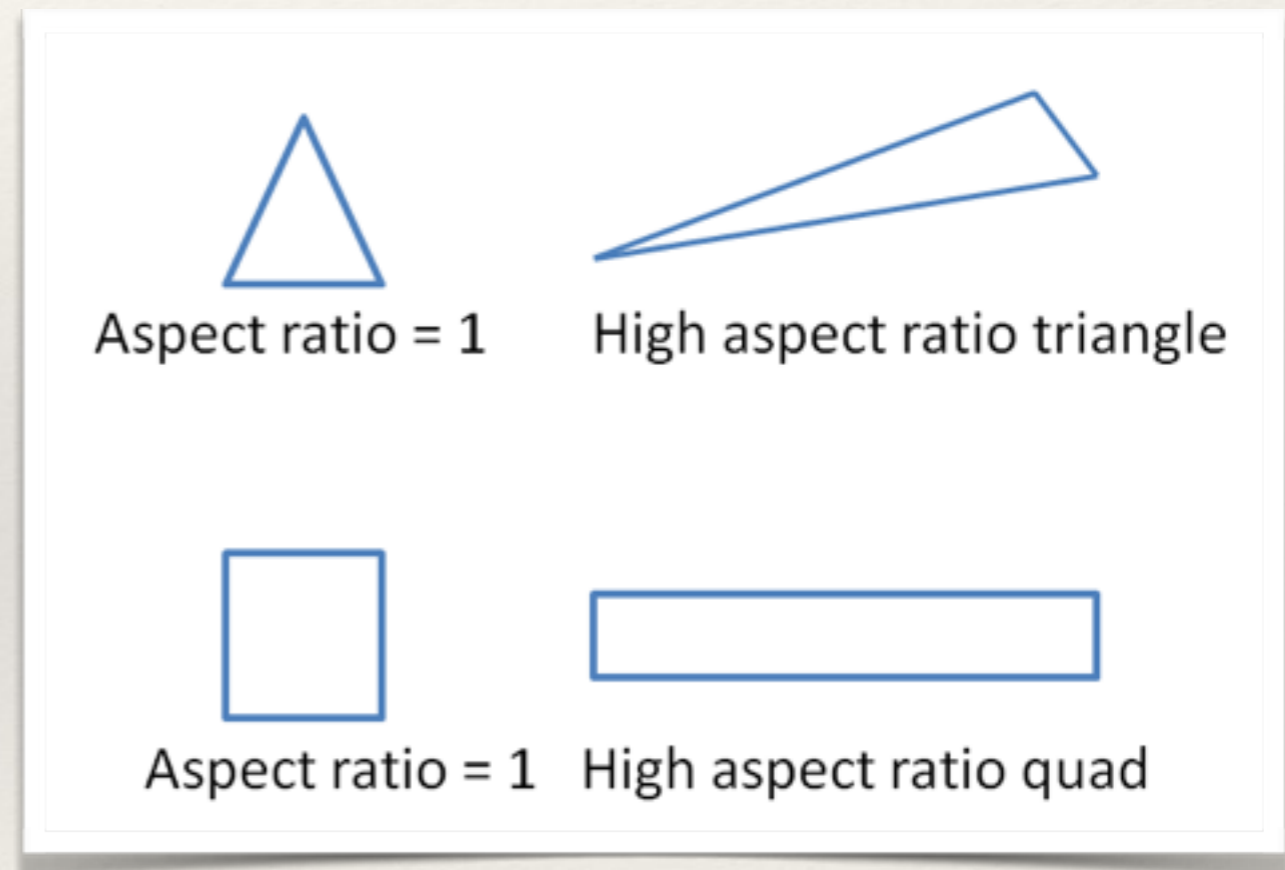
- ❖ Razão de aspecto (*aspect ratio*)
- ❖ Assimetria (distorção ou *skewness*)
- ❖ Ortogonalidade (*orthogonality*)

O checkMesh é um utilitário do OpenFOAM que fornece as métricas da malha.

Parâmetros de qualidade da malha

Estão associados ao formato geométrico do volume e a conectividade com seus vizinhos:

- ❖ Razão de aspecto (*aspect ratio*)
- ❖ Assimetria (distorção ou *skewness*)
- ❖ Ortogonalidade (*orthogonality*)

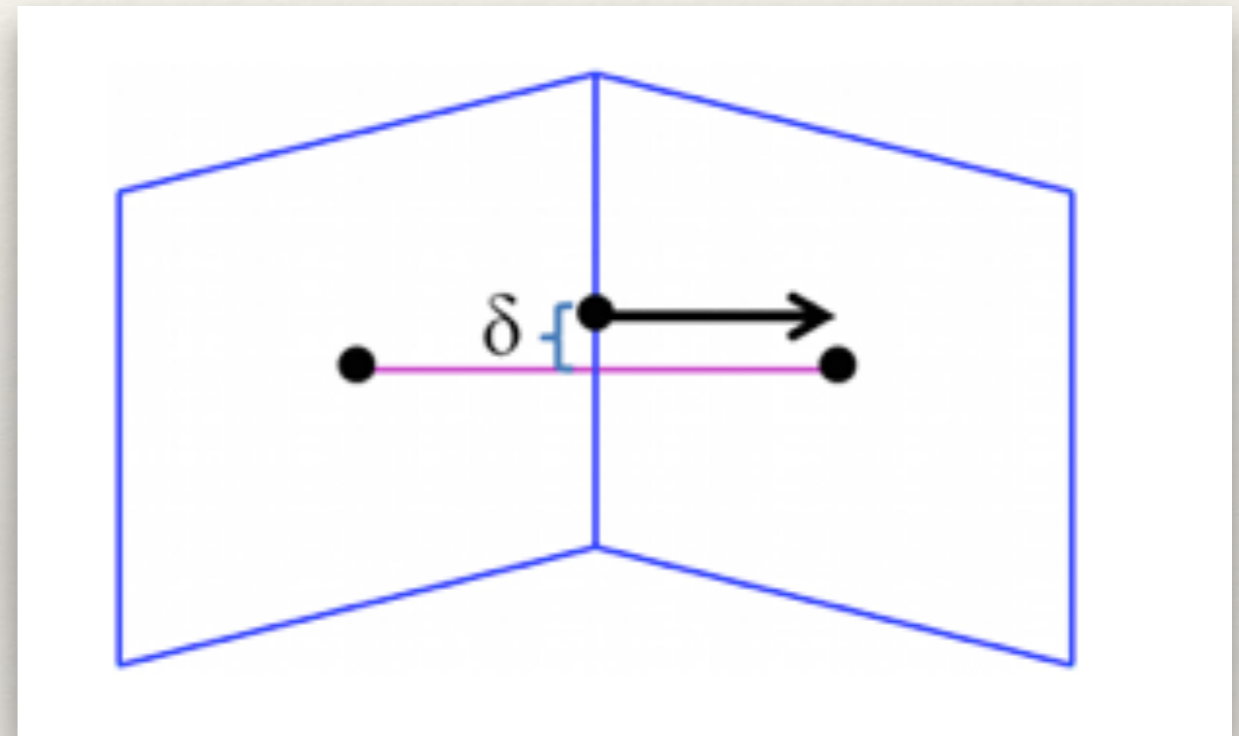


É a razão entre a maior e a menor aresta do elemento.

Parâmetros de qualidade da malha

Estão associados ao formato geométrico do volume e a conectividade com seus vizinhos:

- ❖ Razão de aspecto (*aspect ratio*)
- ❖ **Assimetria (distorção ou *skewness*)**
- ❖ Ortogonalidade (*orthogonality*)

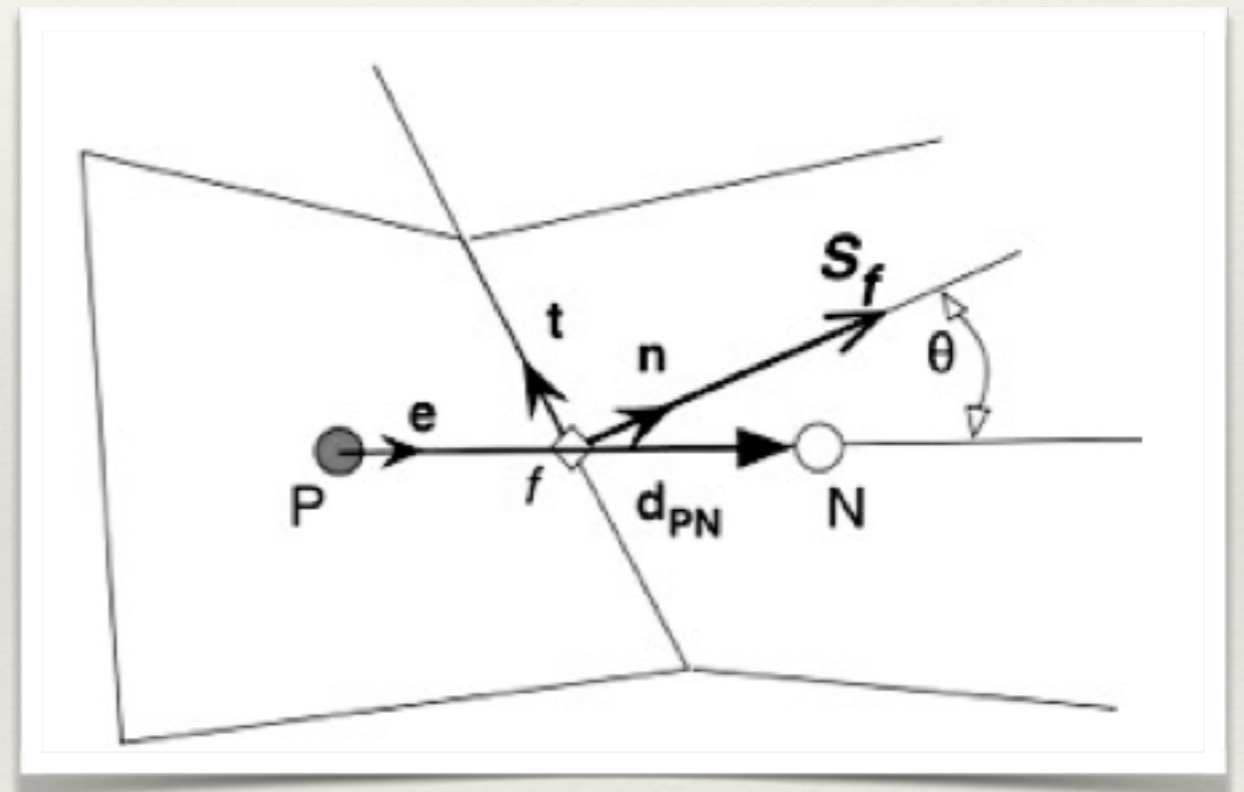


É a distância (δ) entre o vetor que conecta o centro dos volumes vizinhos e o centro da face.

Parâmetros de qualidade da malha

Estão associados ao formato geométrico do volume e a conectividade com seus vizinhos:

- ❖ Razão de aspecto (*aspect ratio*)
- ❖ Assimetria (distorção ou *skewness*)
- ❖ **Ortogonalidade (*orthogonality*)**



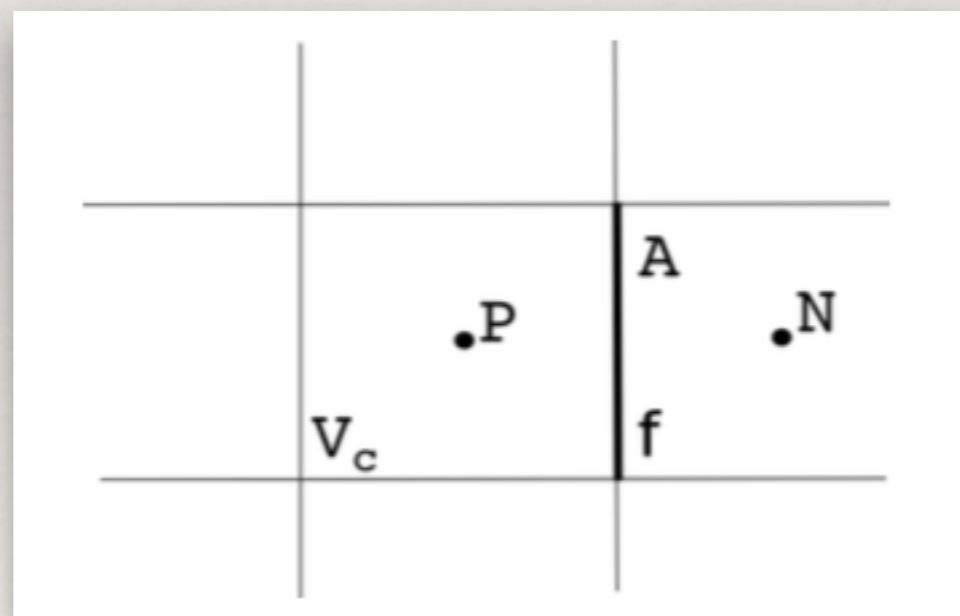
É o ângulo entre o vetor que conecta o centro dos volumes adjacentes e o vetor normal à superfície entre eles.

Método dos Volumes Finitos

Discretização das equações diferenciais.

Consiste na integração da equação de conservação em cada um dos volumes de controle da malha.

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\phi) \right) dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} (\nabla \cdot \mathbf{t}_\phi + S_\phi) dV dt$$



V_c é o volume de controle (ou célula da malha), Δt é o passo de tempo.

Método dos Volumes Finitos

Integração do termo de acúmulo:

$$\begin{aligned}\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \frac{\partial \phi}{\partial t} dV dt &\approx \int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \left(\frac{\phi^n - \phi^o}{\Delta t} \right) dV dt \\ &\approx \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\phi^n - \phi^o}{\Delta t} \right) V_c dt\end{aligned}$$

Integração do termo advectivo:

$$\begin{aligned}\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \nabla \cdot (\mathbf{U}\phi) dV dt &= \int_t^{t+\Delta t} \sum_f \int_{A_f} (\mathbf{U}\phi) \cdot \mathbf{n} dA dt \\ &\approx \int_t^{t+\Delta t} \sum_f \underbrace{\phi_f (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n})_f}_{\text{fluxo advectivo}} A_f dt\end{aligned}$$

\mathbf{n} é o vetor unitário normal externo a face.

Método dos Volumes Finitos

Integração do termo difusivo:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \nabla \cdot \mathbf{t}_\phi \, dV \, dt &= \int_t^{t+\Delta t} \sum_f \int_{A_f} \mathbf{t}_\phi \cdot \mathbf{n} \, dA \, dt \\ &\approx \int_t^{t+\Delta t} \sum_f \underbrace{(\mathbf{t}_\phi \cdot \mathbf{n})_f}_{\text{fluxo difusivo}} A_f \, dt \end{aligned}$$

Integração do termo fonte:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} S_\phi \, dV \, dt \approx \int_t^{t+\Delta t} (S_\phi)_P V_c \, dt$$

Método dos Volumes Finitos

Discretização temporal explícita:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\frac{\phi^n - \phi^o}{\Delta t} \right) V_c + \sum_f \phi_f^o (\mathbf{U}^o \cdot \mathbf{n})_f A_f - \sum_f (\mathbf{t}_\phi^o \cdot \mathbf{n})_f A_f - (S_\phi^o)_P V_c \right] dt = 0$$

Discretização temporal implícita:

$$\mathbf{t}_\phi = \Gamma \nabla \phi$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\frac{\phi^n - \phi^o}{\Delta t} \right) V_c + \sum_f \phi_f^n (\mathbf{U}^o \cdot \mathbf{n})_f A_f - \sum_f (\Gamma \nabla \phi^n \cdot \mathbf{n})_f A_f - (S_\phi^o)_P V_c \right] dt = 0$$

Método dos Volumes Finitos

A escolha dos esquemas de interpolação:

- ❖ Interpolação temporal
- ❖ Interpolação de ϕ_f
- ❖ Aproximação do fluxo advectivo na face
- ❖ Aproximação do fluxo difusivo na face

$$\left(\frac{\phi^n - \phi^o}{\Delta t} \right) V_c + \sum_f \phi_f^n (\mathbf{U}^o \cdot \mathbf{n})_f A_f - \sum_f (\Gamma \nabla \phi^n \cdot \mathbf{n})_f A_f = \left(S_\phi^o \right)_P V_c$$

O fvSchemes é o arquivo onde essas escolhas são feitas.

Método dos Volumes Finitos

Principais escolhas para o termo advectivo:

- ❖ Diferenças Centrais (CDS): **Gauss linear**
- ❖ Upwind (UDS): **Gauss upwind**
- ❖ TVD (*Total Variation Diminishing*):
 - ❖ **Gauss vanLeer**
 - ❖ **Gauss SuperBee**
 - ❖ **Gauss vanAlbada**

A escolha da função de interpolação do termo advectivo é feita no sub-dicionário `divSchemes` no arquivo `fvSchemes`.

Condições de Contorno

- ❖ Dirichlet: valor de ϕ é constante.
- ❖ Neumann: valor do gradiente normal de ϕ na face é constante.
- ❖ Mista.

A escolha da condição de contorno depende do problema. Veremos mais detalhes nos tutoriais.

Solução do Sistema Algébrico

- ❖ Método Direto: Eliminação Gaussiana.
- ❖ Método Iterativo:
 - ❖ Especificação de um critério de convergência (**tolerance**).
 - ❖ Pode-se adotar um fator de relaxação (**relaxationFactors**) para acelerar a convergência.
 - ❖ Exemplos:
 - ❖ Gradiente Conjugado Pré-condicionado (**PCG**)
 - ❖ Gradiente Biconjugado Pré-condicionado (**PBiCG**)
 - ❖ *Generalized Geometric Algebraic Multigrid* (**GAMG**)

O fvSolutions é o arquivo onde essas escolhas são feitas.

Convergência, erros e incertezas

Tipos de convergência:

- ❖ Convergência de malha.
- ❖ Convergência da solução numérica.

O **foamLog** é um utilitário que permite extrair dados para análise de convergência.

Convergência, erros e incertezas

Tipos de convergência:

- ❖ **Convergência de malha.**
- ❖ **Convergência da solução numérica.**

A convergência de malha é garantida quando a solução não muda a medida que a malha é refinada.

Convergência, erros e incertezas

Tipos de convergência:

- ❖ Convergência de malha.
- ❖ **Convergência da solução numérica.**

Monitore os seguintes parâmetros:

- ❖ resíduos da solução do sistema algébrico;
- ❖ uma variável de interesse em uma dada região do domínio;
- ❖ propriedades integradas (força, fluxos, temperatura média);
- ❖ a conservação das propriedades.

Convergência, erros e incertezas

Tipos de convergência:

- ❖ Convergência de malha.
- ❖ **Convergência da solução numérica.**

Sobre simulações que atingem o estado estacionário:

- ❖ O estado estacionário será atingido quando o valor da variável de interesse não muda mais ao longo das novas iterações.
- ❖ Se a simulação atinge o estado estacionário, o resíduo inicial do sistema algébrico diminui ao longo das iterações.

Convergência, erros e incertezas

Tipos de convergência:

- ❖ Convergência de malha.
- ❖ **Convergência da solução numérica.**

Sobre simulações transientes:

- ❖ É necessário garantir a convergência em cada passo de tempo.
- ❖ Não será observada a queda do resíduo inicial ao longo da simulação.
- ❖ Deve-se acompanhar o valor de uma dada propriedade.

Convergência, erros e incertezas

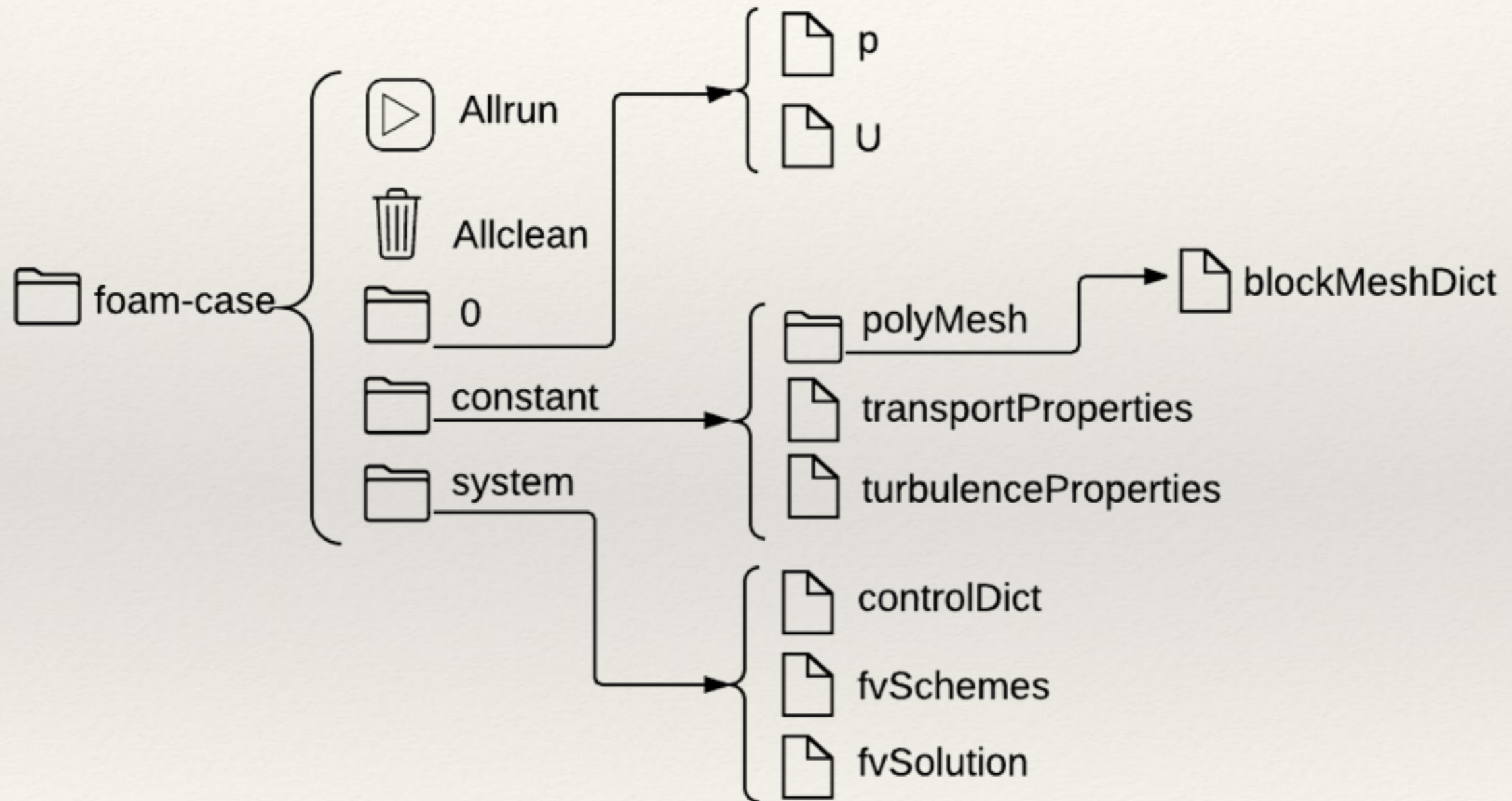
Problemas de convergência?

- ❖ Reduza os valores adotados no critério de convergência.
- ❖ Aumente o número de iterações.
- ❖ Utilize soluções simplificadas como condição inicial.
- ❖ Reduza o número de Courant.
- ❖ O fator de relaxação pode ser utilizado para estabilizar a solução em algoritmos do tipo *pressured-based*. Se a solução apresentar instabilidades, reduza os fatores de relaxação.
- ❖ Quer acelerar a convergência? Aumente o fator relaxação ou o Courant gradualmente.
- ❖ Instabilidades numéricas podem ocorrer por problemas na:
 - ❖ condição de contorno.
 - ❖ malhas de baixa qualidade.
 - ❖ configurações inapropriadas na solução.

Estrutura do OpenFOAM

- ❖ Diretório de instalação:
 - ❖ **applications**: código fonte dos solvers e utilitários.
 - ❖ **bin**: shell-scripts.
 - ❖ **doc**: manuais
 - ❖ **etc**: arquivos de configuração para compilação.
 - ❖ **platforms**: binários compilados
 - ❖ **src**: código fonte básico (classes e templates das operações de campo, modelos de transporte).
 - ❖ **tutorials**: casos pré-configurados para cada solver.
 - ❖ **wmake**: scripts de compilação.

Estrutura do OpenFOAM



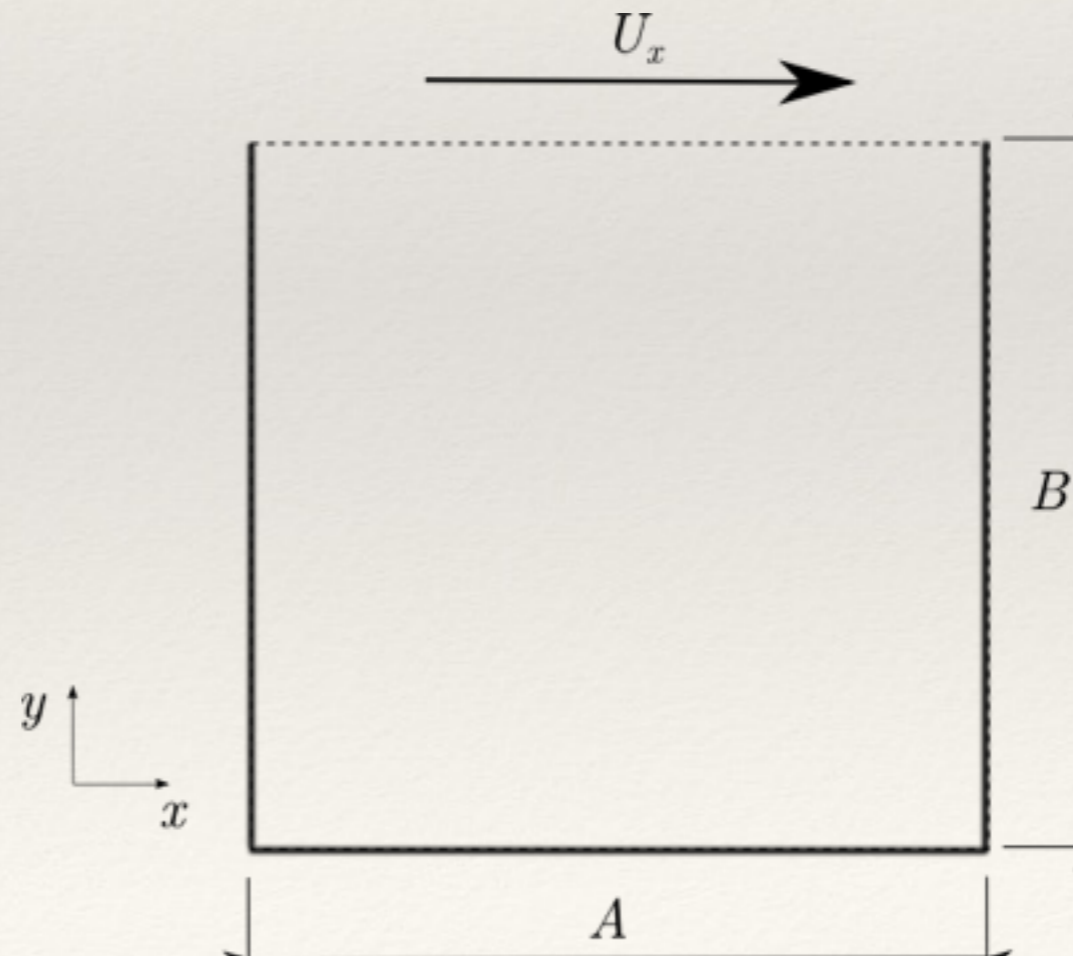
Escoamento em uma cavidade

Definição do problema:

- ❖ Escoamento de um fluido Newtoniano, isotérmico, incompressível em uma cavidade, onde a fronteira superior desloca-se com velocidade conhecida e as demais fronteiras são estacionárias.

Número de Reynolds

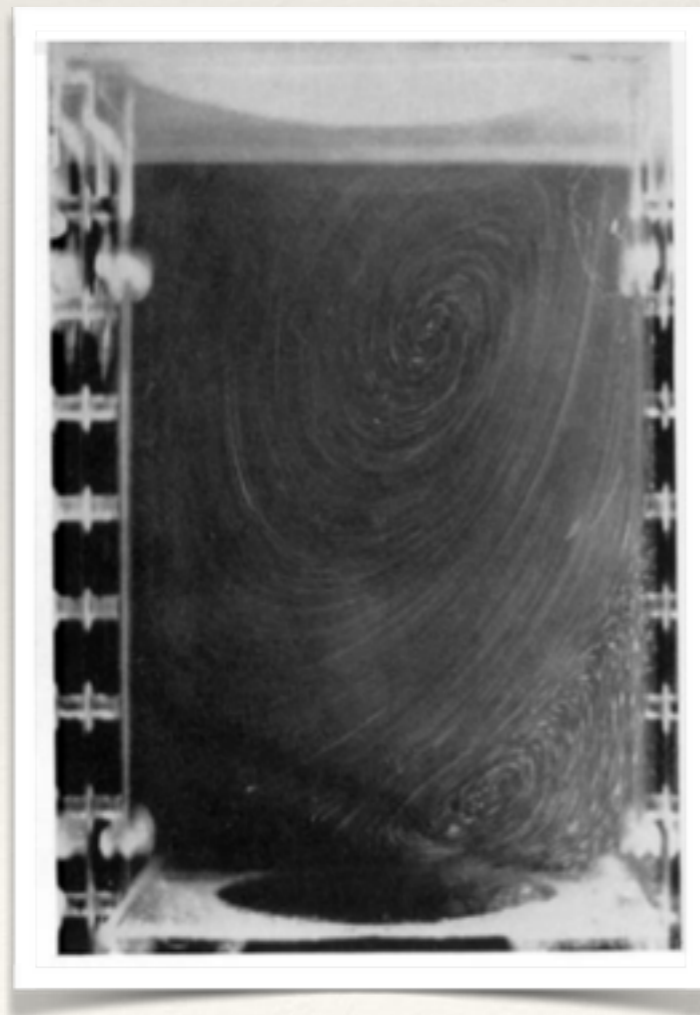
$$Re = \frac{U_x A}{\nu}$$



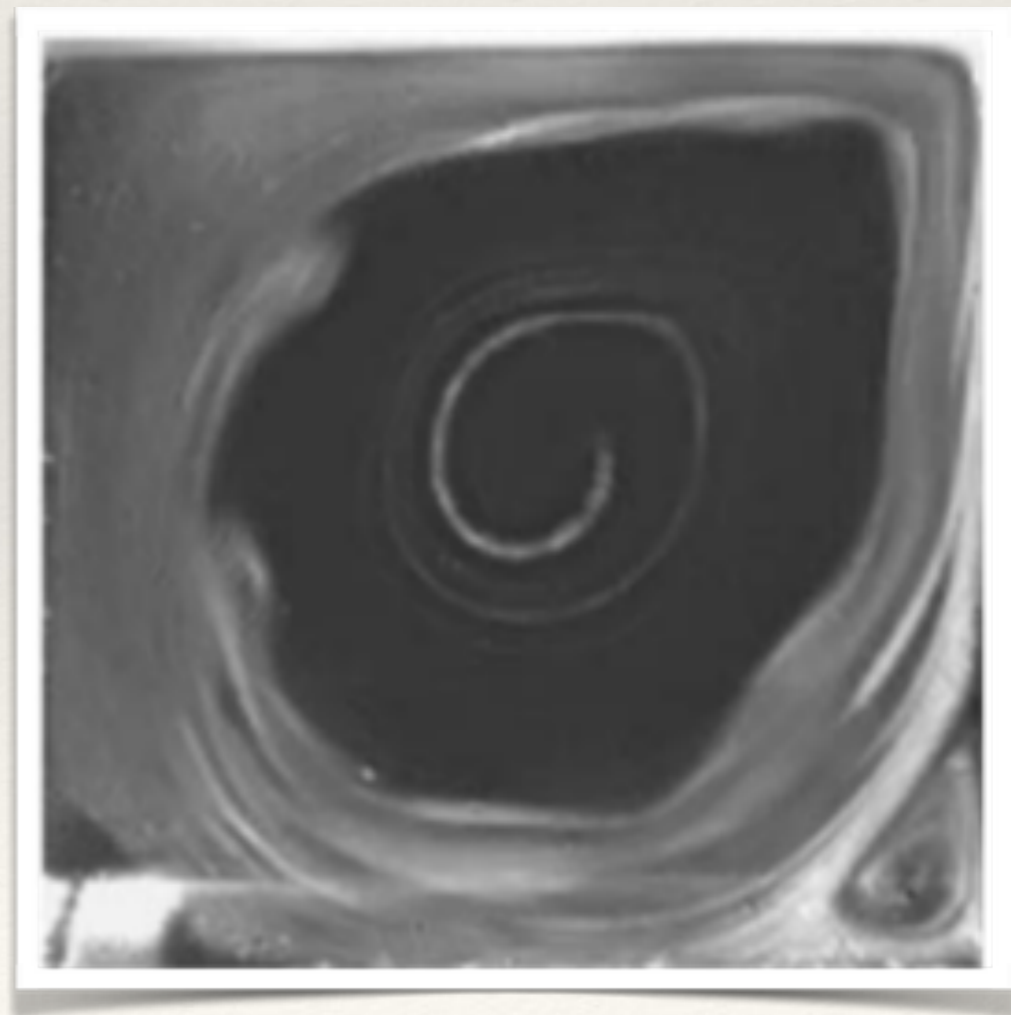
Escoamento em uma cavidade

Definição do problema:

- ❖ Gera linhas de corrente fechadas onde a natureza do vórtice depende da razão de aspecto (razão da altura pela largura) da cavidade e do número de Reynolds.



Re = 1.070



Re = 4.030

Escoamento em uma cavidade

Modelagem matemática:

Conservação de Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} - \nu \nabla^2 \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

Equação da Pressão:

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 p = -\nabla \cdot [\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}]$$

Algoritmos de acoplamento pressão-velocidade: PISO, PIMPLE ou SIMPLE

Escoamento em uma cavidade

Solvers do OpenFOAM:

- ❖ **pisoFoam:** Escoamento incompressible, transiente (PISO), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- ❖ **pimpleFoam:** Escoamento incompressible, estacionário (PIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- ❖ **simpleFoam:** Escoamento incompressible, estacionário (SIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- ❖ **icoFoam:** Escoamento incompressible, transiente, laminar e fluido Newtoniano.

Escoamento em uma cavidade

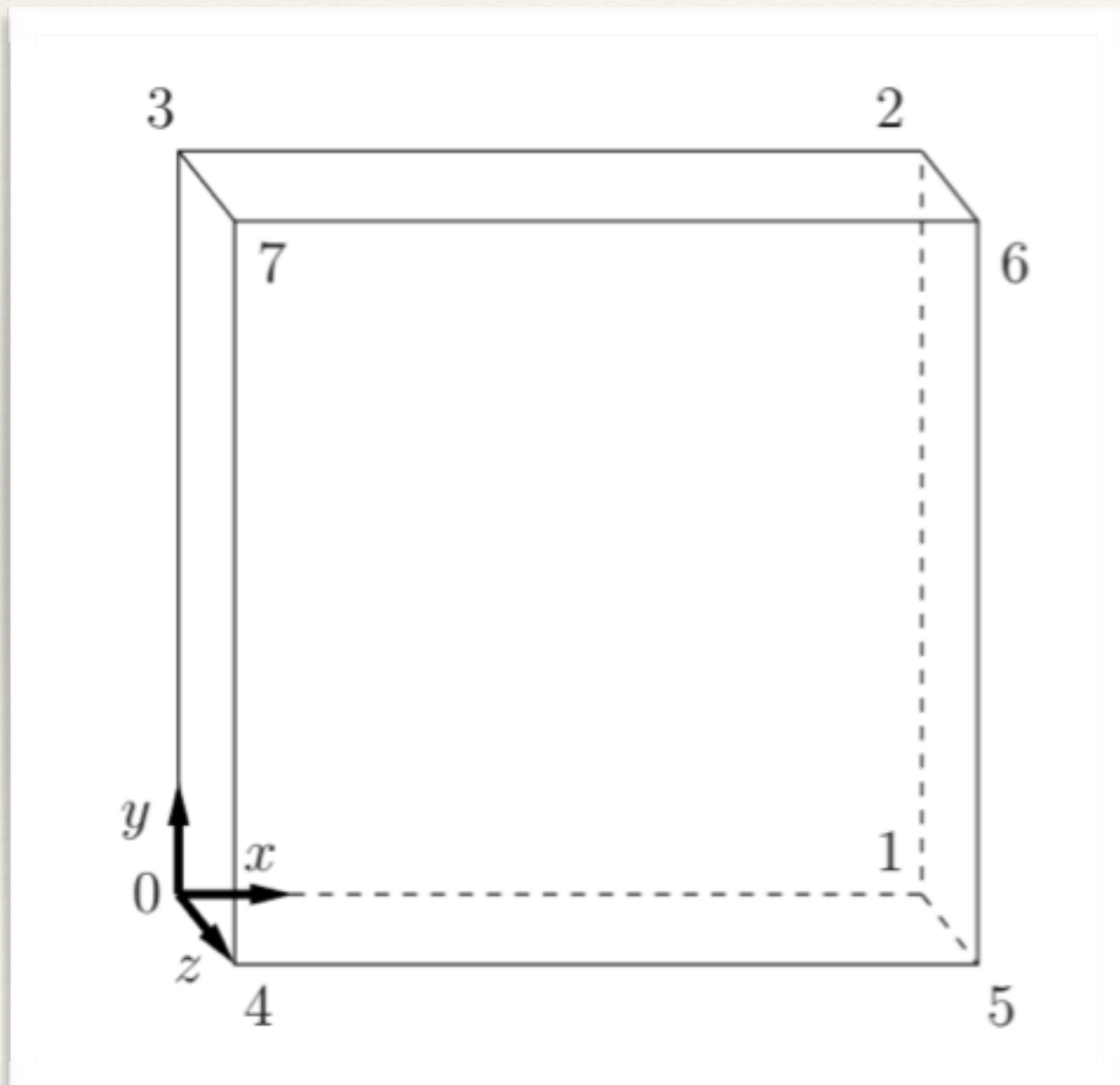
Solvers do OpenFOAM:

- ❖ **pisoFoam:** Escoamento incompressible, transiente (PISO), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- ❖ **pimpleFoam:** Escoamento incompressible, estacionário (PIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- ❖ **simpleFoam:** Escoamento incompressible, estacionário (SIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- ❖ **icoFoam:** Escoamento incompressible, transiente, laminar e fluido Newtoniano.

Escoamento em uma cavidade

Geometria: $A=B=0,1\text{m}$

Courant



$$Co = \frac{\delta t |\mathbf{U}|}{\delta x}$$

$$\delta x = \frac{d}{n} = \frac{0.1}{20} = 0.005 \text{ m}$$

$$\delta t = \frac{Co \delta x}{|\mathbf{U}|} = \frac{1 \times 0.005}{1} = 0.005 \text{ s}$$

Escoamento em uma cavidade

transportProperties:

```
transportModel Newtonian;  
nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.01;
```

Dimensões no OpenFOAM:

No.	Property	SI unit	USCS unit
1	Mass	kilogram (kg)	pound-mass (lbm)
2	Length	metre (m)	foot (ft)
3	Time	— — — —	second (s) — — — —
4	Temperature	Kelvin (K)	degree Rankine (°R)
5	Quantity	— — — —	mole (mol) — — — —
6	Current	— — — —	ampere (A) — — — —
7	Luminous intensity	— — — —	candela (cd) — — — —



KEEP

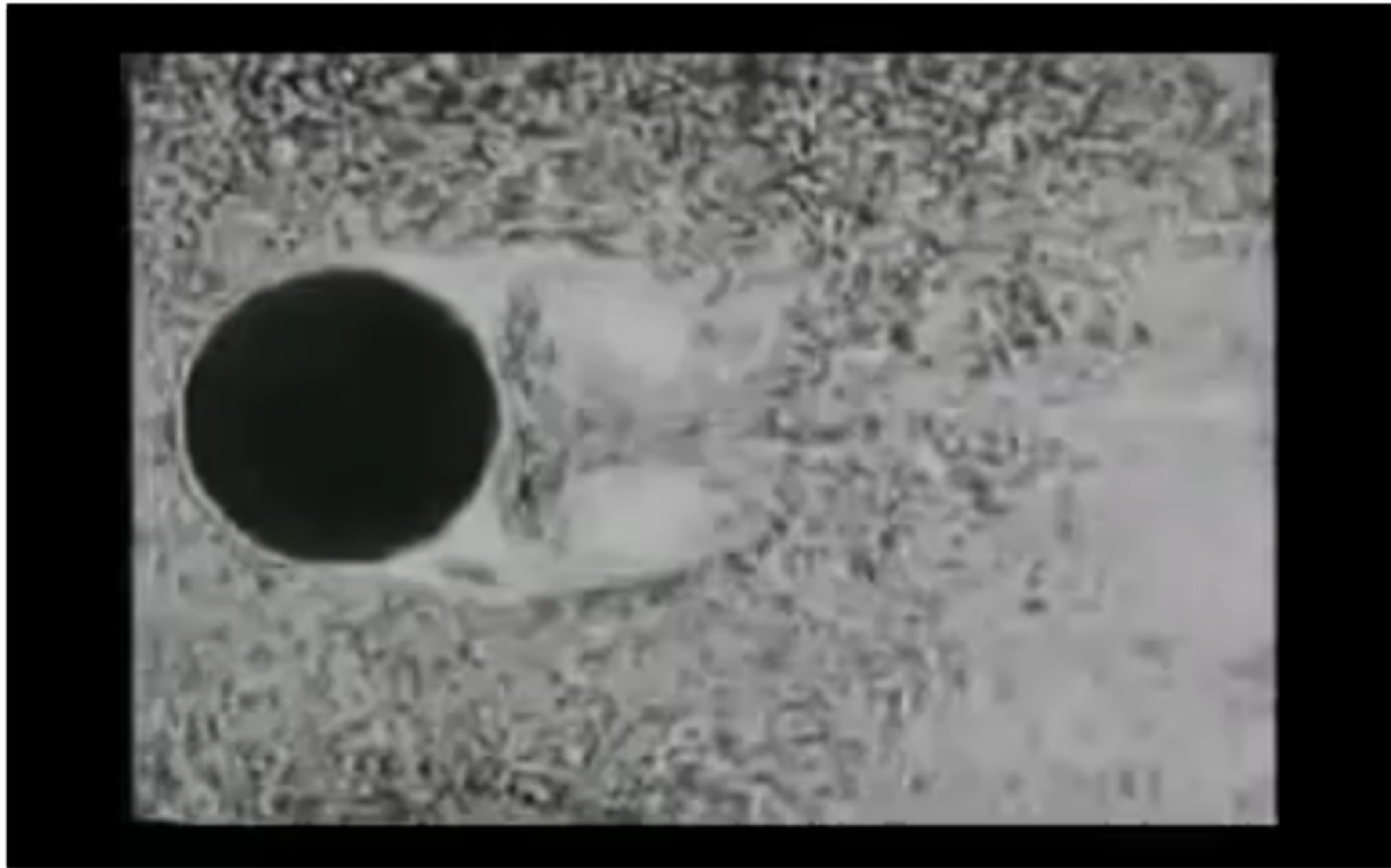
CALM

AND

KEEP

FOAMing

Escoamento em torno de um cilindro





KEEP

FOAMing

AND

SHARE

IT

Referências

- ❖ The OpenFOAM Technology Primer, T. Maric, J. Hopken, K. Mooney, sourceflux, 2014.
- ❖ User Guide, OpenFOAM.
- ❖ An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, H. Versteeg, W. Malalasekera, 2nd Edition, 2007.
- ❖ Wolf Dynamics, OpenFOAM Tutorials: www.wolfdynamics.com/tutorials/openfoam_tutorials/overview.html