



Introdução a CFD usando o OpenFOAM®

Professora Livia Jatobá

SAPE - 2025

Programa

- O que é CFD?
- Etapas de uma simulação CFD
 - Equações básicas e o Método dos Volumes Finitos
 - Convergência numérica e de malha
- Visão geral e estrutura do OpenFOAM®
- Ferramentas de análise de resultados: Paraview e Gnuplot
- Tutoriais de escoamento incompressível

O que é CFD?

- Computational Fluid Dynamics
- Dinâmica dos Fluidos Computacional

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

Porque CFD?

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

Particularidades de uma simulação CFD

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

Por que OpenFOAM?

Open source Field Operation And Manipulation

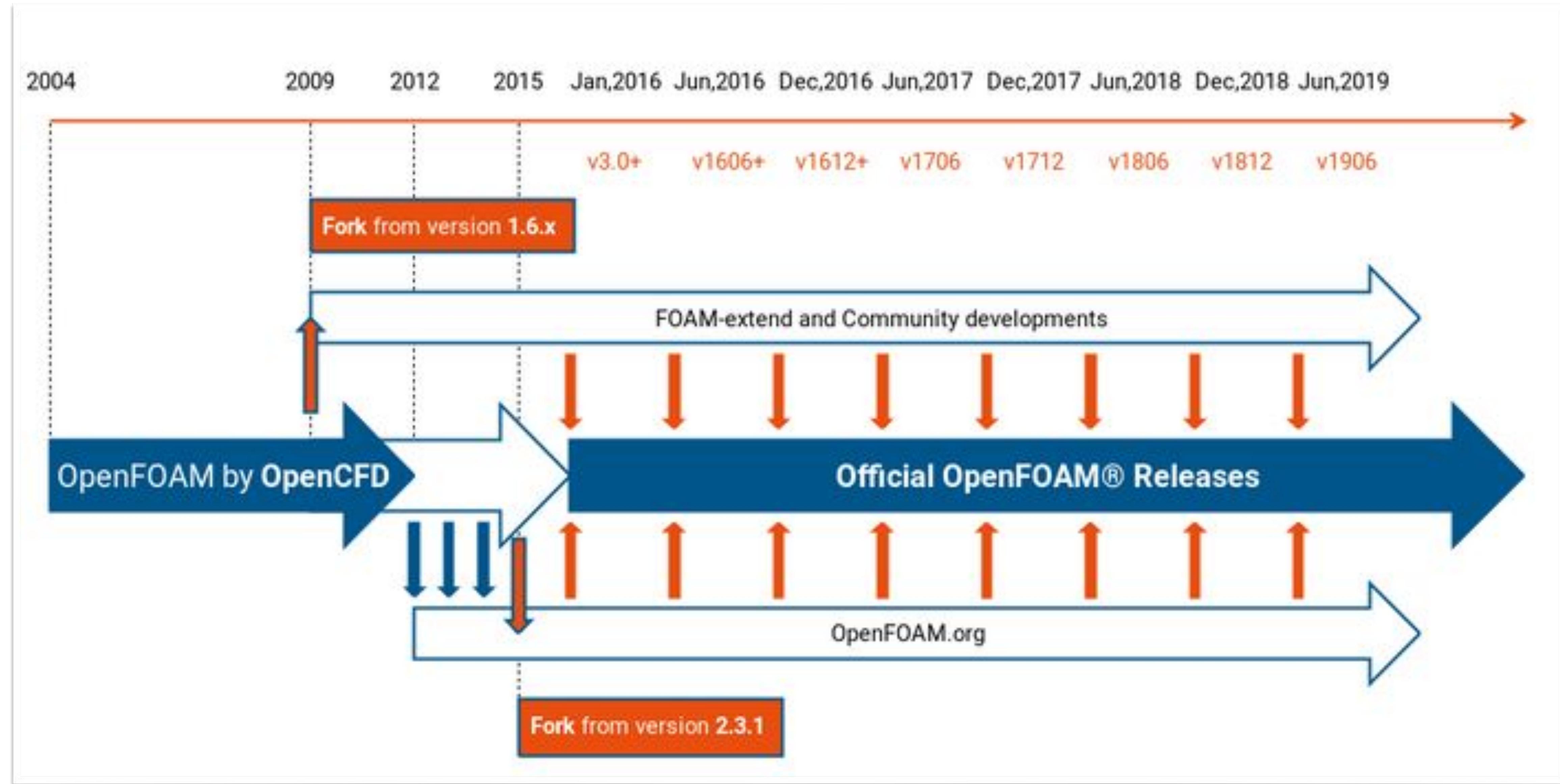
:)

- 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.

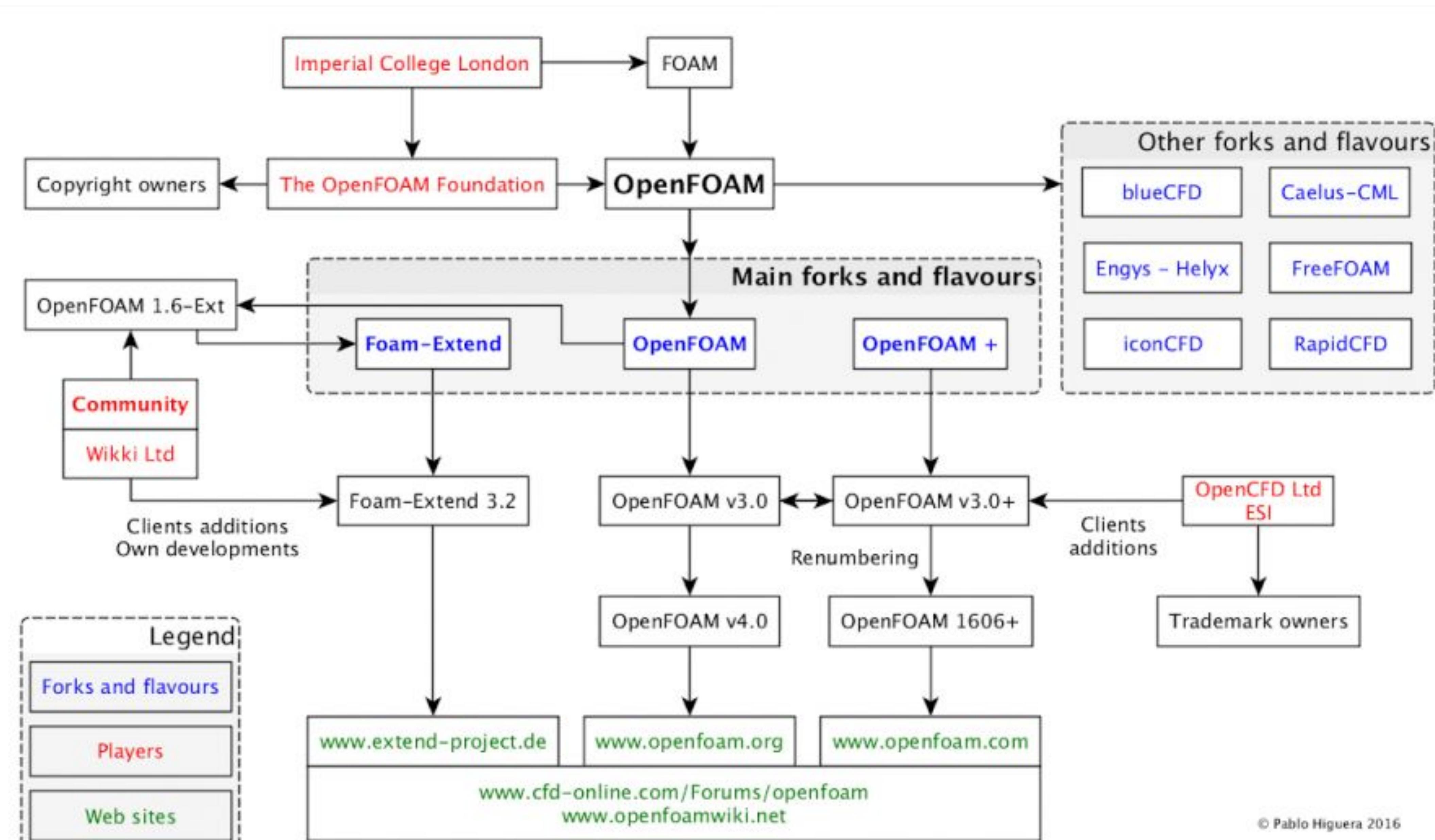
:(

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

Histórico do OpenFOAM



Histórico do OpenFOAM



Etapas de uma simulação CFD

**1^a. Etapa:
pré-processamento**

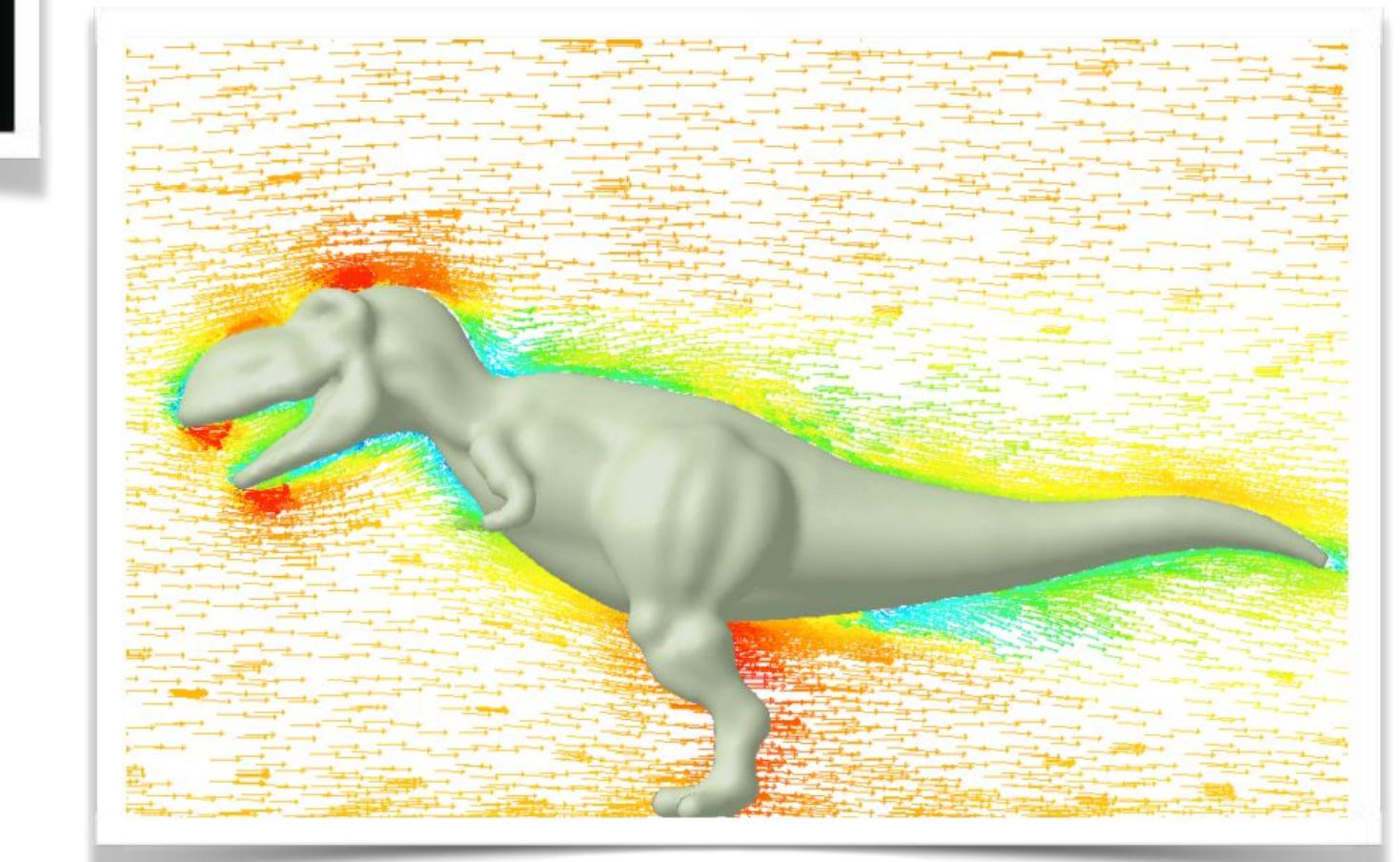
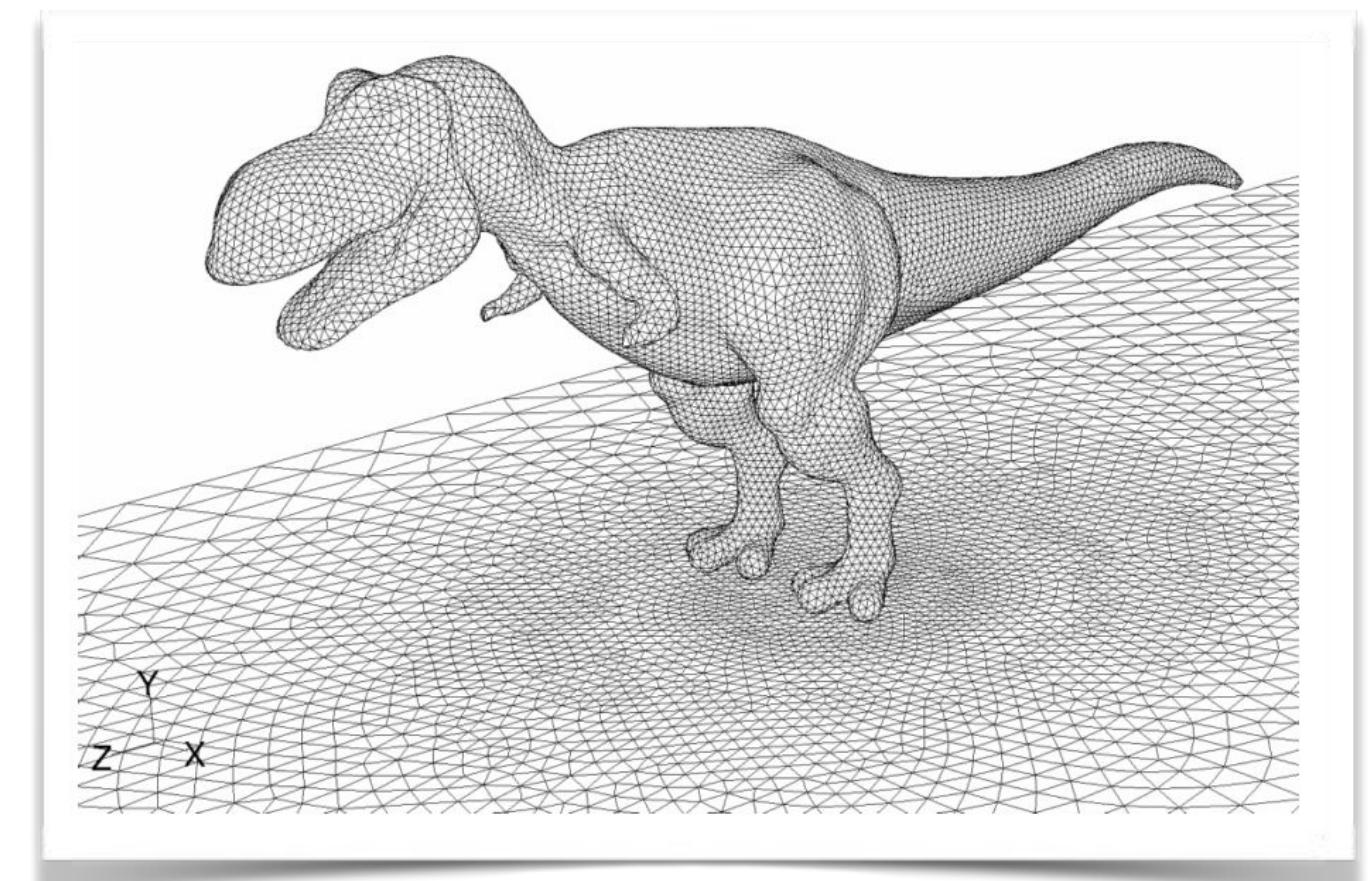
2^a. Etapa: solução

```
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.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' + \rho \mathbf{f}_m$$

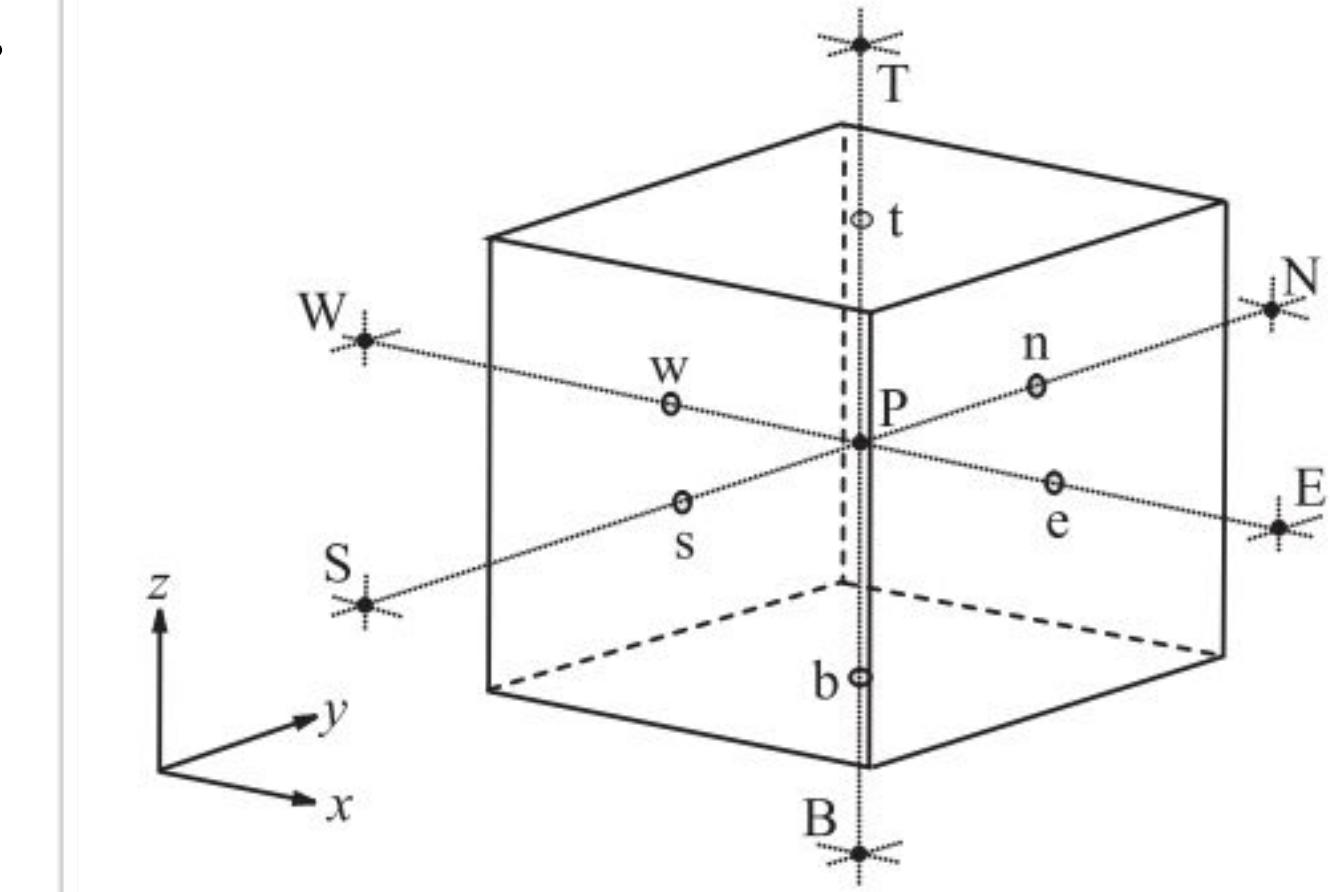
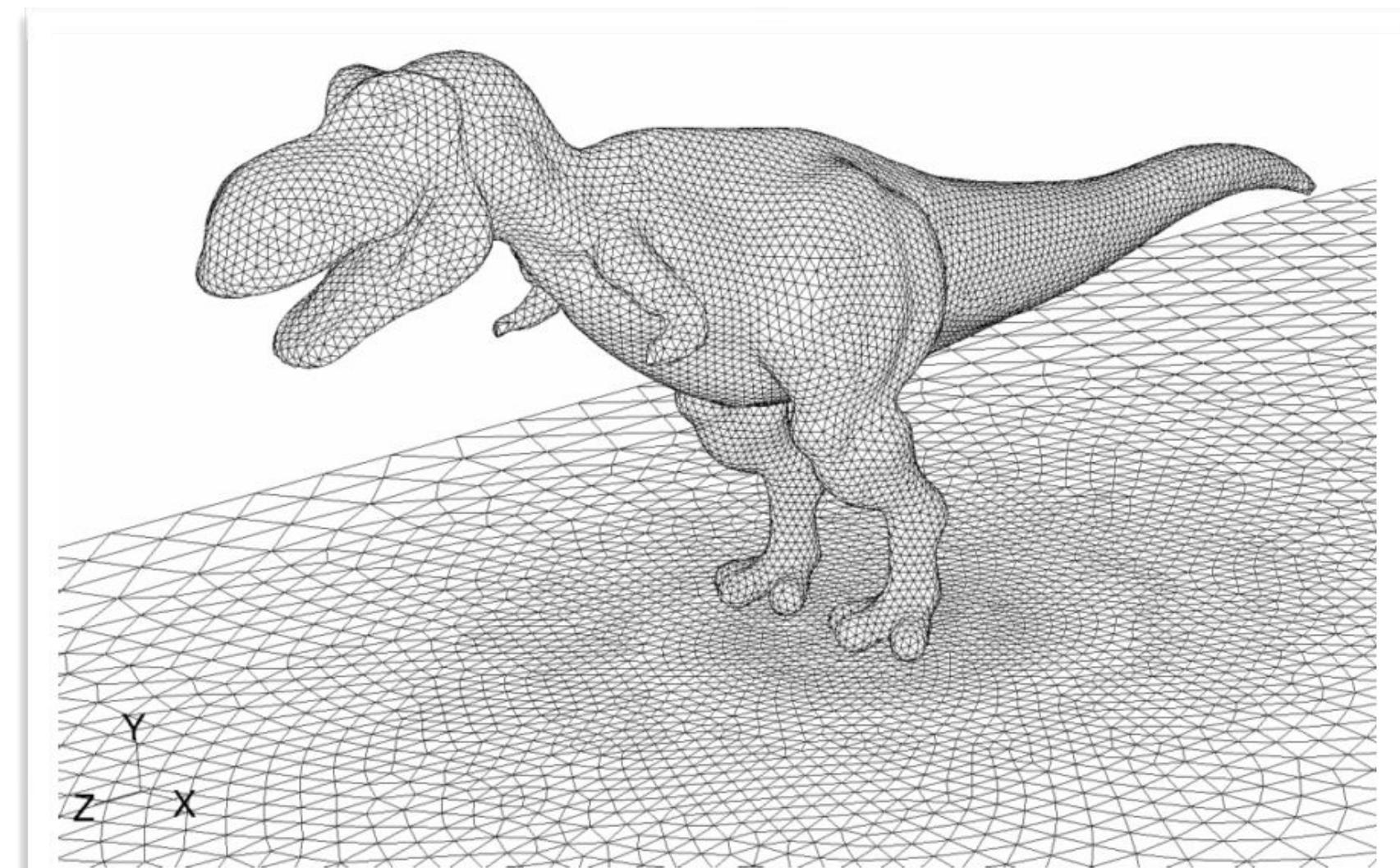
$$\frac{\partial (\rho e_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_{tot} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \dot{q}_v$$

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

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.



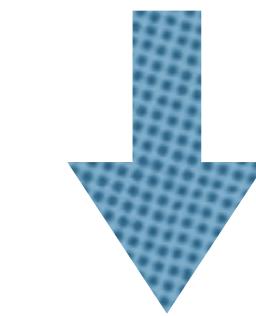
Etapas de uma simulação CFD

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.

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



$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

Etapas de uma simulação CFD

1^{a.} Etapa: pré-processamento

- Discretização das equações diferenciais (método numérico).

Método dos Volumes Finitos

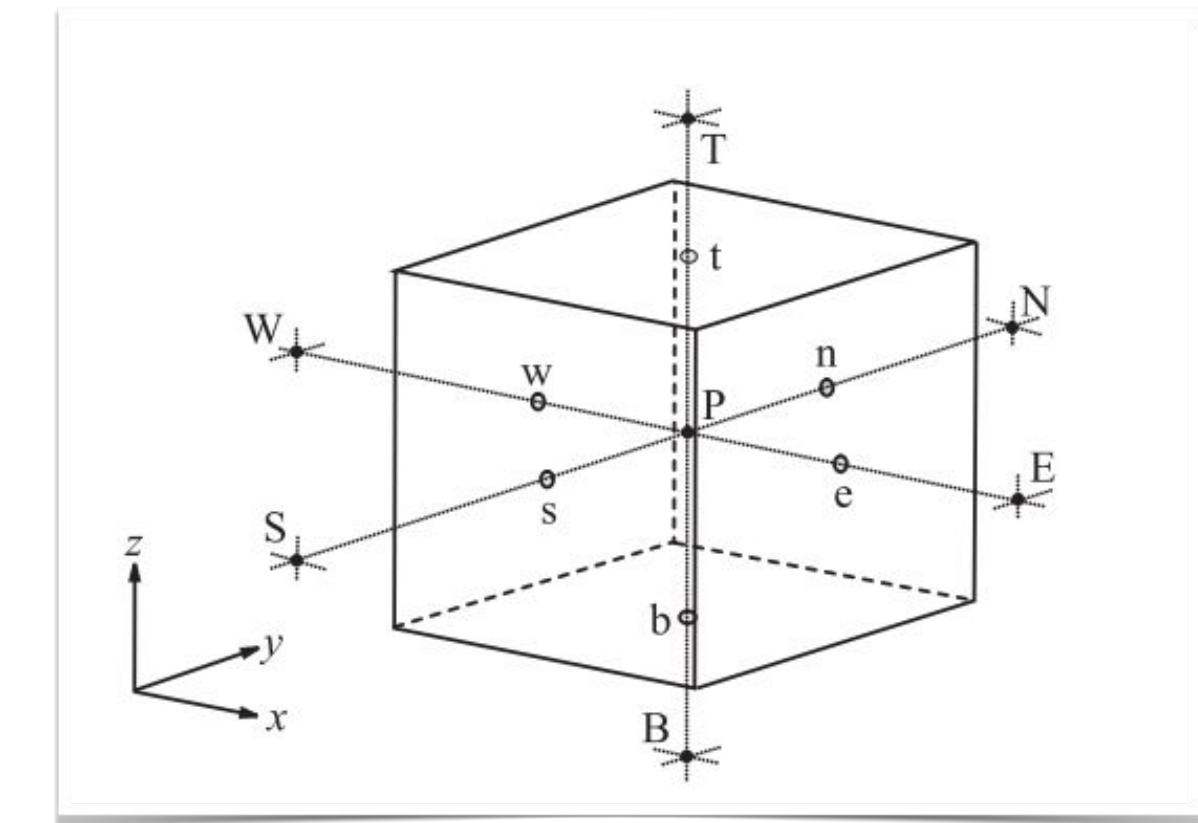
$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \phi) \right) dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} (\nabla \cdot \mathbf{t}_\phi + S_\phi) dV dt$$

A escolha dos esquemas de interpolação:

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

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

OBS: O fvschemes é o arquivo onde essas escolhas são feitas.



Etapas de uma simulação CFD

2^a. Etapa: pos-processamento

- 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

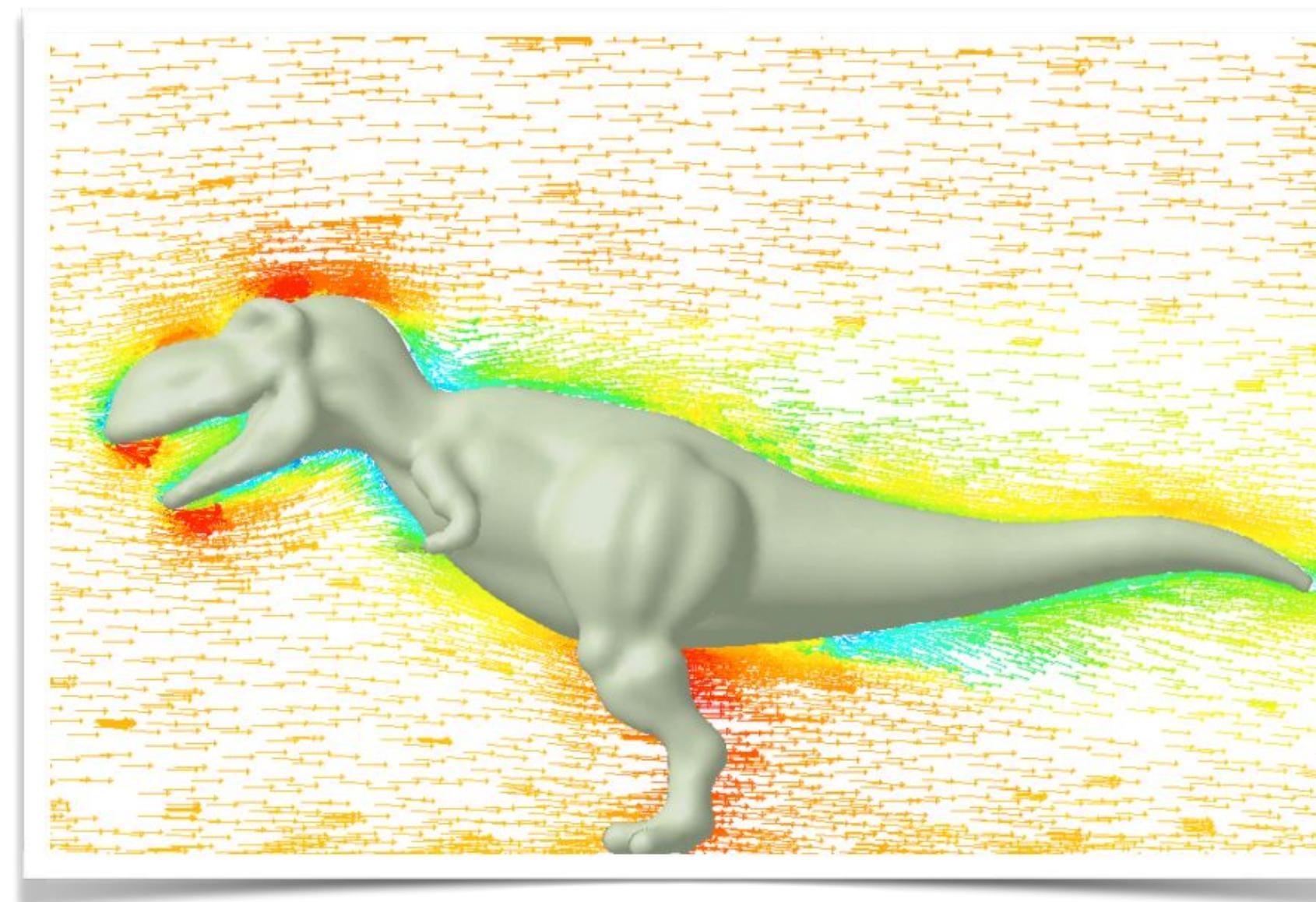
End
```

OBS: O [fvSolutions](#) é o arquivo onde essas escolhas da solução são feitas

Etapas de uma simulação CFD

3^a. Etapa: pos-processamento

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



Convergência

Tipos de convergência

- Convergência da solução numérica.
- Convergência de malha.

Convergência

Tipos de convergência

- **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.

OBS: O foamLog é o utilitário que permite extrair dados para análise da convergência

Convergência

Tipos de convergência

- **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.

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

Tipos de convergência

- **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.

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.

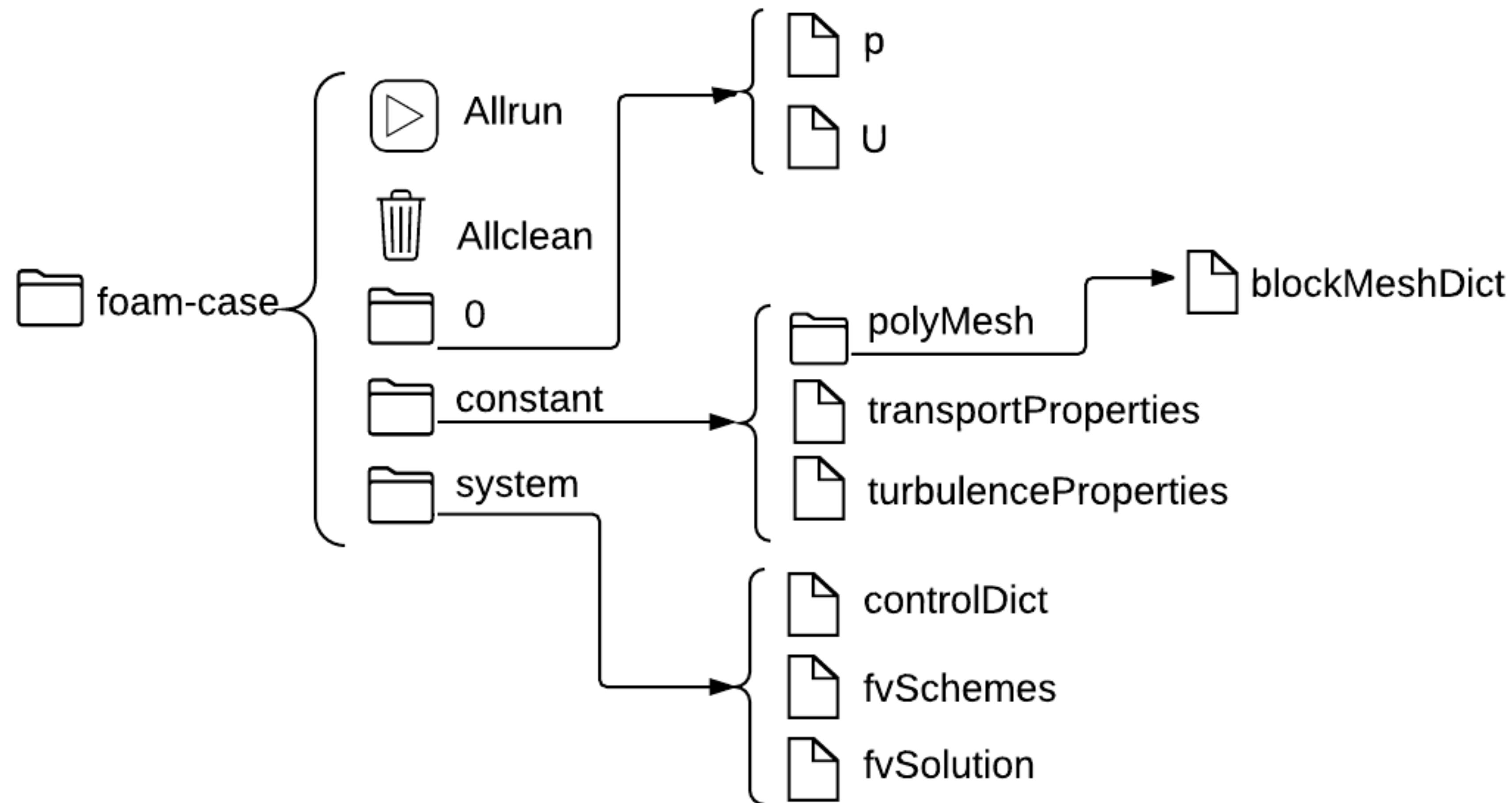
Convergencia

Tipos de convergencia

- **Convergência de malha**

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

Estrutura de um caso no OpenFOAM





KEEP
CALM
AND
KEEP
FOAMing

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).

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

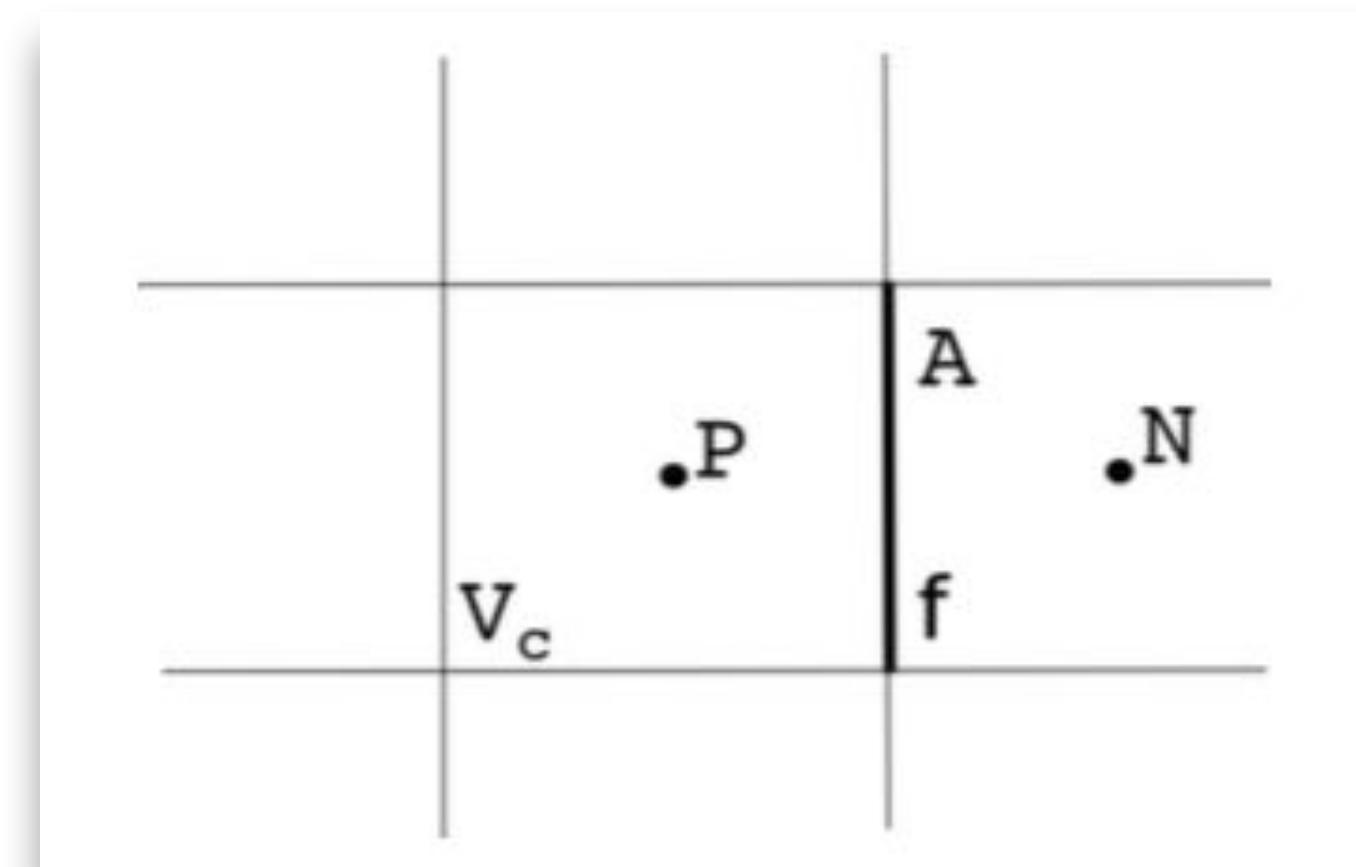
ϕ é uma propriedade volumétrica qualquer, \mathbf{t}_ϕ depende do modelo de transporte molecular e S_ϕ é o termo volumétrico.

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:

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

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

Método dos Volumes Finitos

Discretização temporal
explicita:

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

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

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

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 de 1a. ordem (UDS): **Gauss upwind**
- Upwind de 2a. ordem: **linearUpwind**
- TVD (*Total Variation Diminishing*):
 - **Gauss vanLeer**
 - **Gauss SuperBee**
 - **Gauss vanAlbada**

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

Condições de Contorno

- Dirichlet: valor de φ é constante.
- Newmann: 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

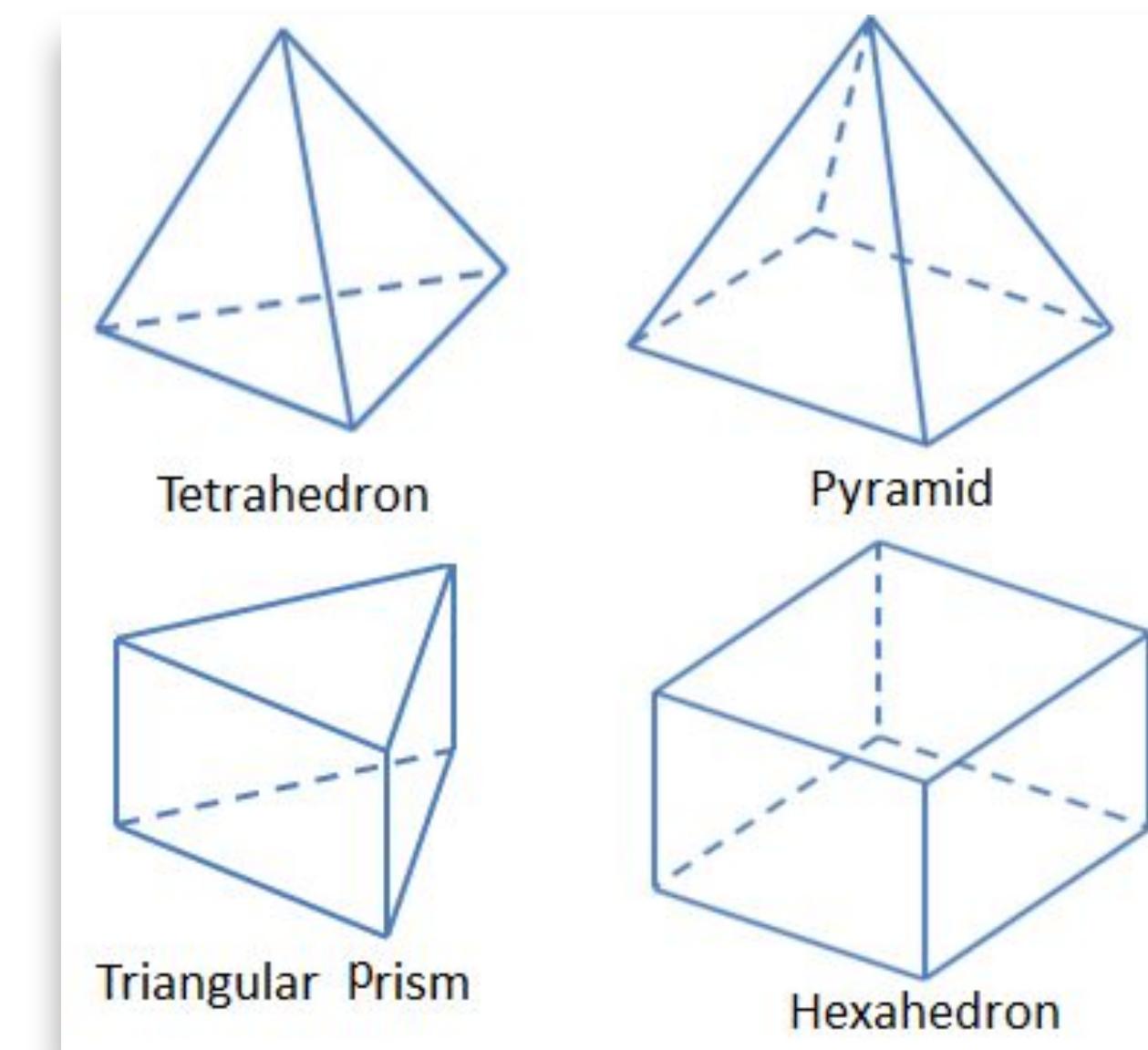
Problemas de convergência?

- 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 *pressure-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.

Malha

É a discretização do modelo geométrico.

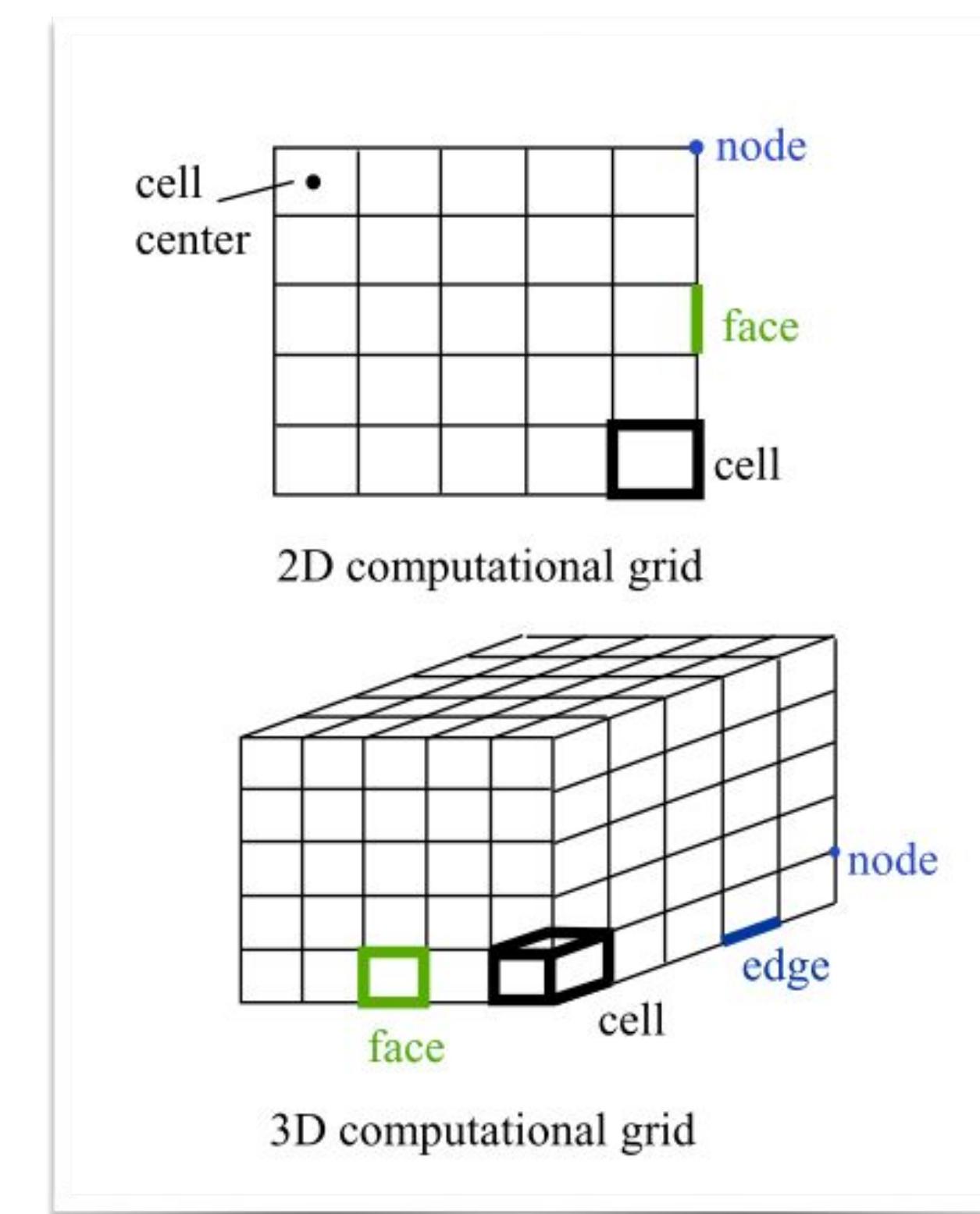
- Geometria é a representação 3D da região de escoamento.
- Malha é a divisão da geometria em vários volumes.
- Quanto maior o número de volumes, menor será o erro.
- A forma do volume afeta o erro da solução numérica.
- De modo geral, a malha precisa ser refinada nas regiões do escoamento onde o gradiente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



Malha

Terminologia

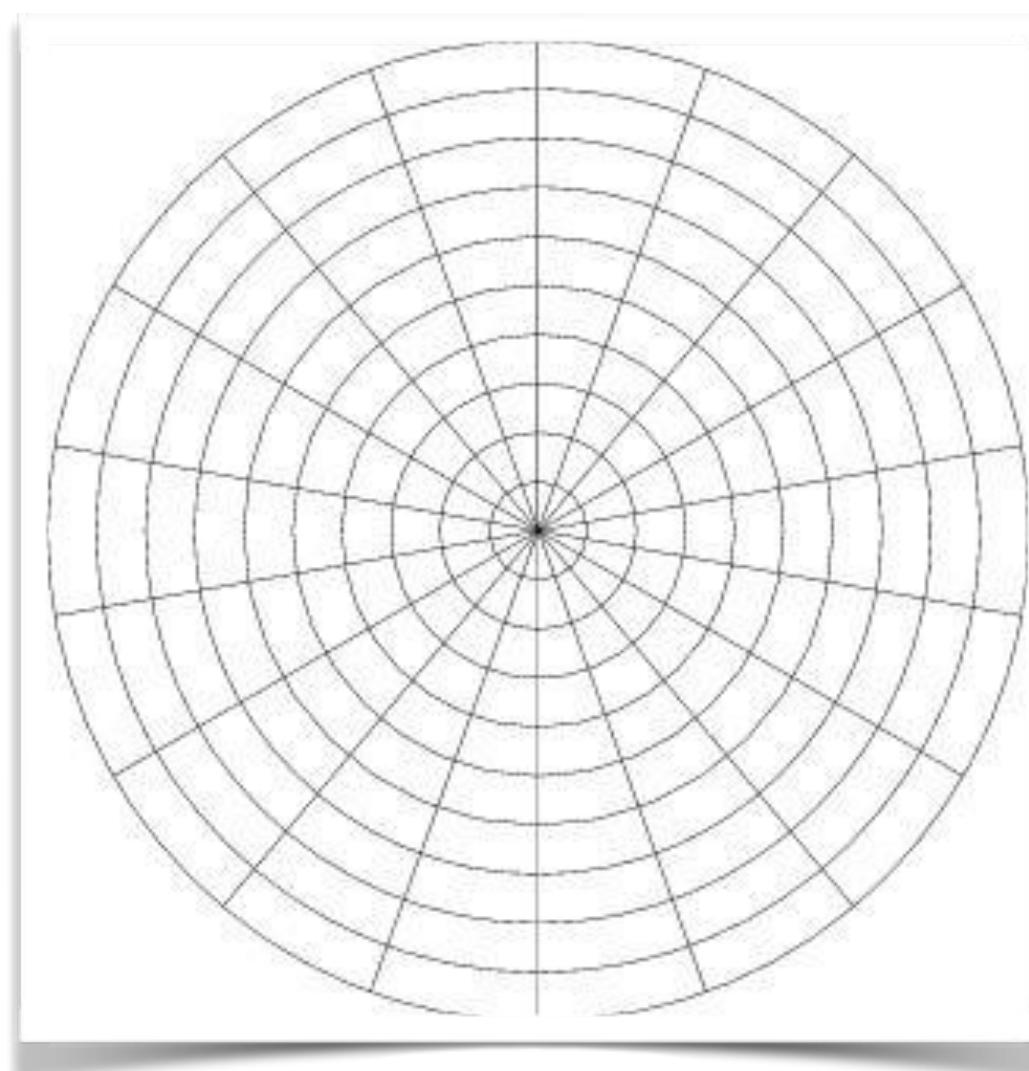
- Cell = volume de controle.
- Node = ponto da malha.
- Cell center = centro do volume de controle.
- Edge = face na fronteira.
- Face = face do volume de controle.
- Zone = grouping of nodes, faces, and cells: – Wall boundary zone. – Fluid cell zone.
- Domain = group of node, face and cell zones.



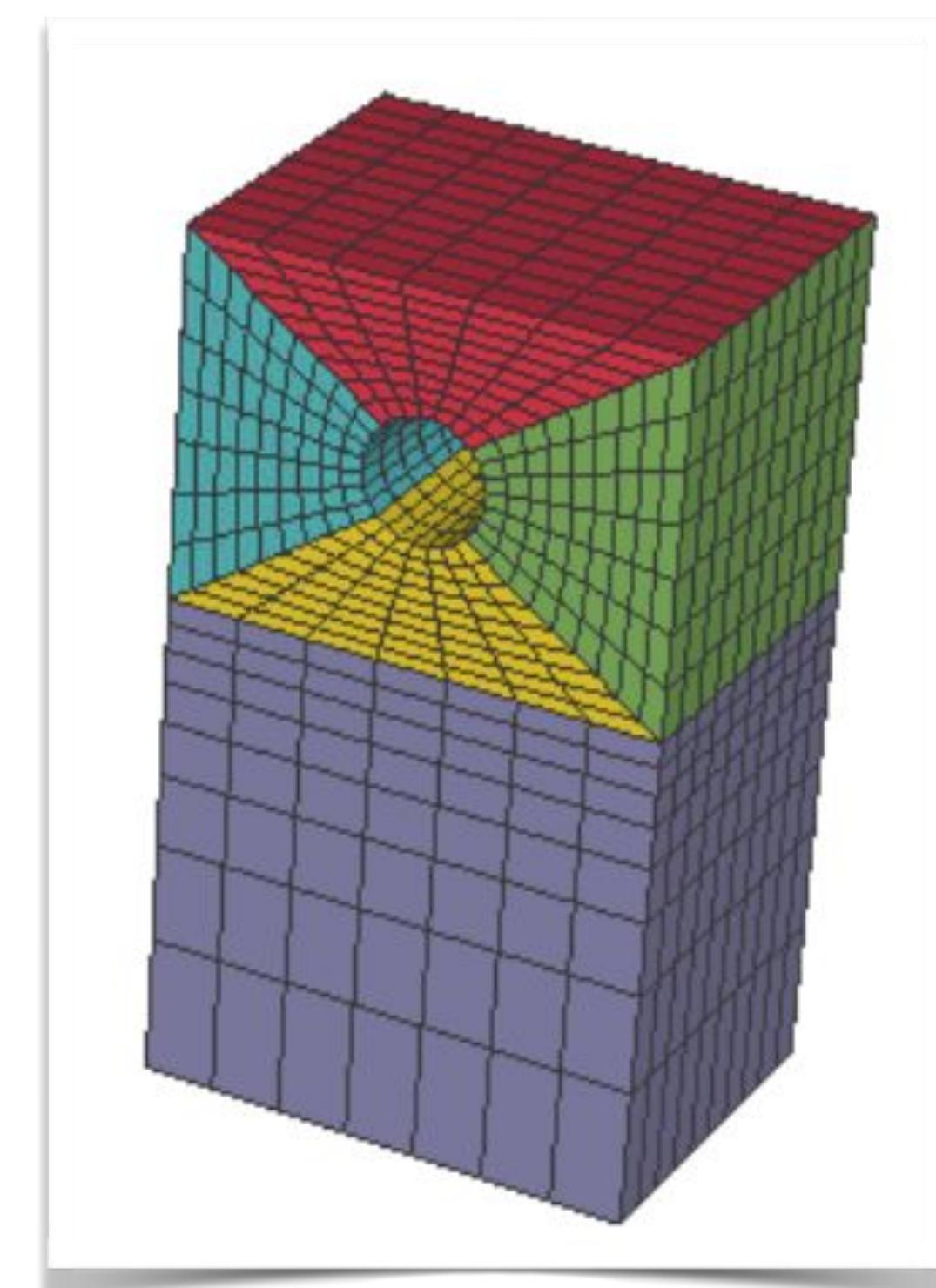
Malha

Tipos de malha

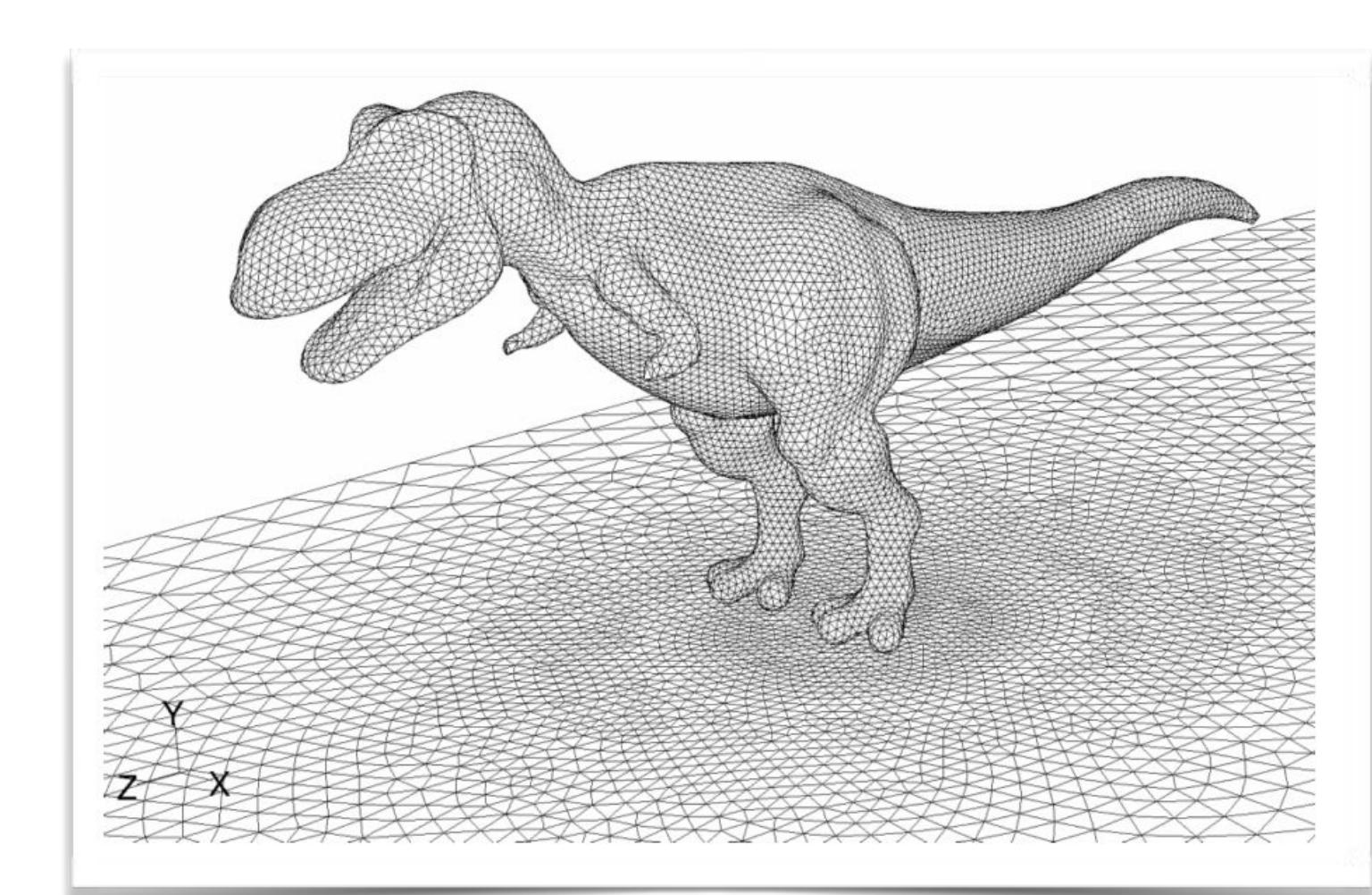
Estruturada



Estruturada por blocos



Não estruturada



Malha

Fronteiras da Malha

- No OpenFoam, as fronteiras (ou contorno) da malha precisam receber um **nome** e uma característica topológicas (**type**).
- Os principais tipos de características topológicas (**type**) 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.



KEEP
CALM
AND
KEEP
FOAMing

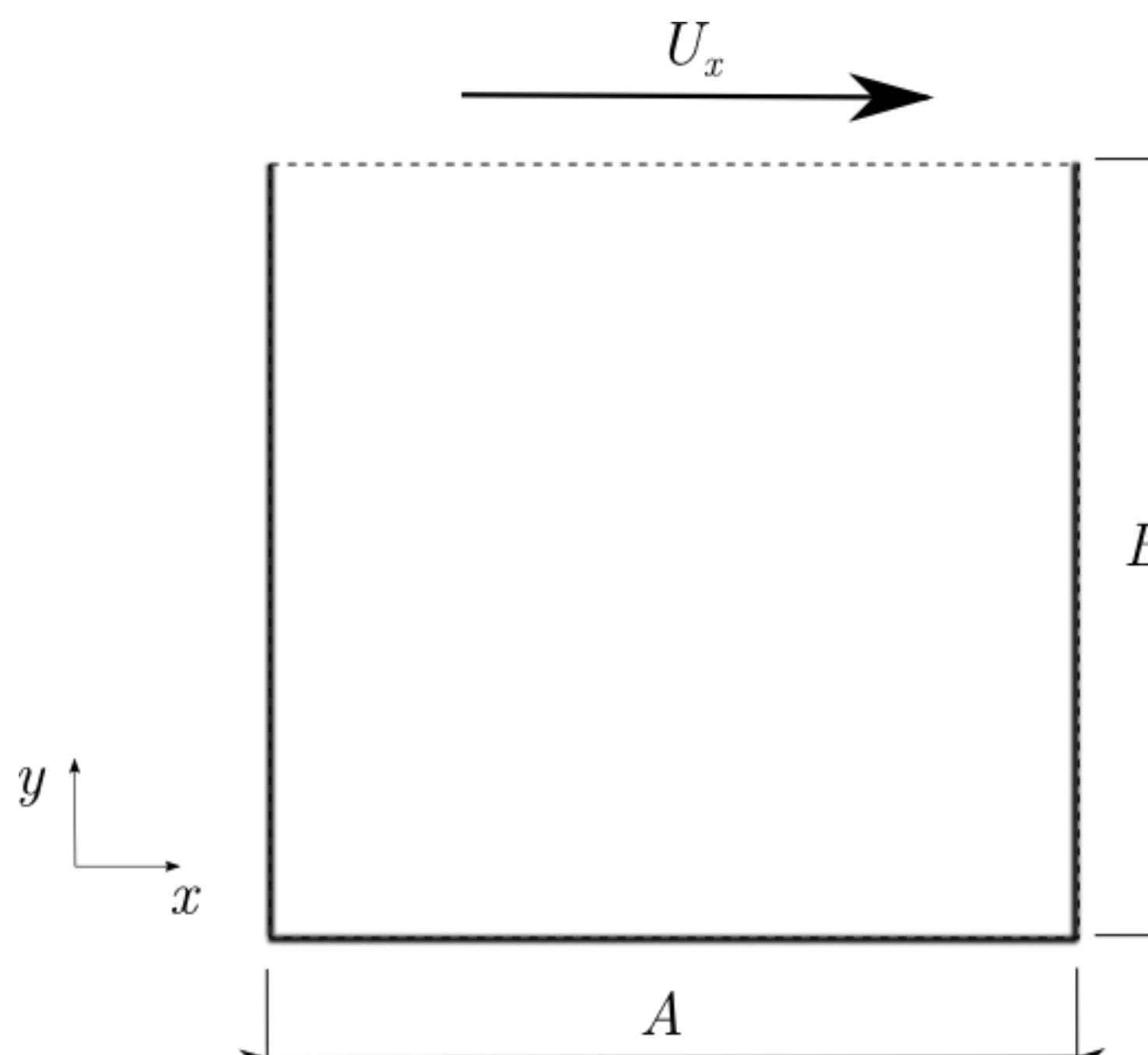
Escoamento em uma cavidade

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

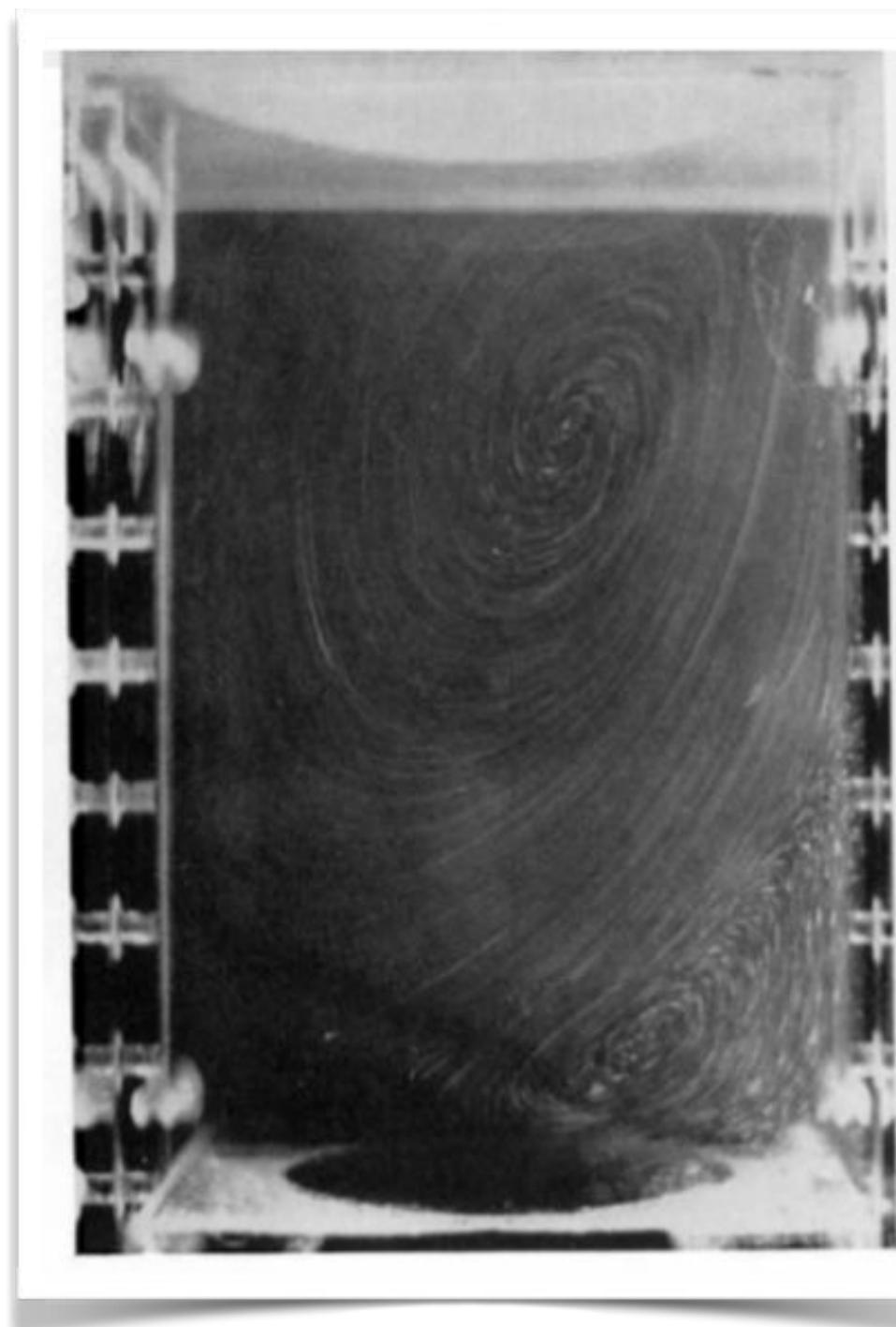
$$Re = \frac{U_x A}{\nu}$$



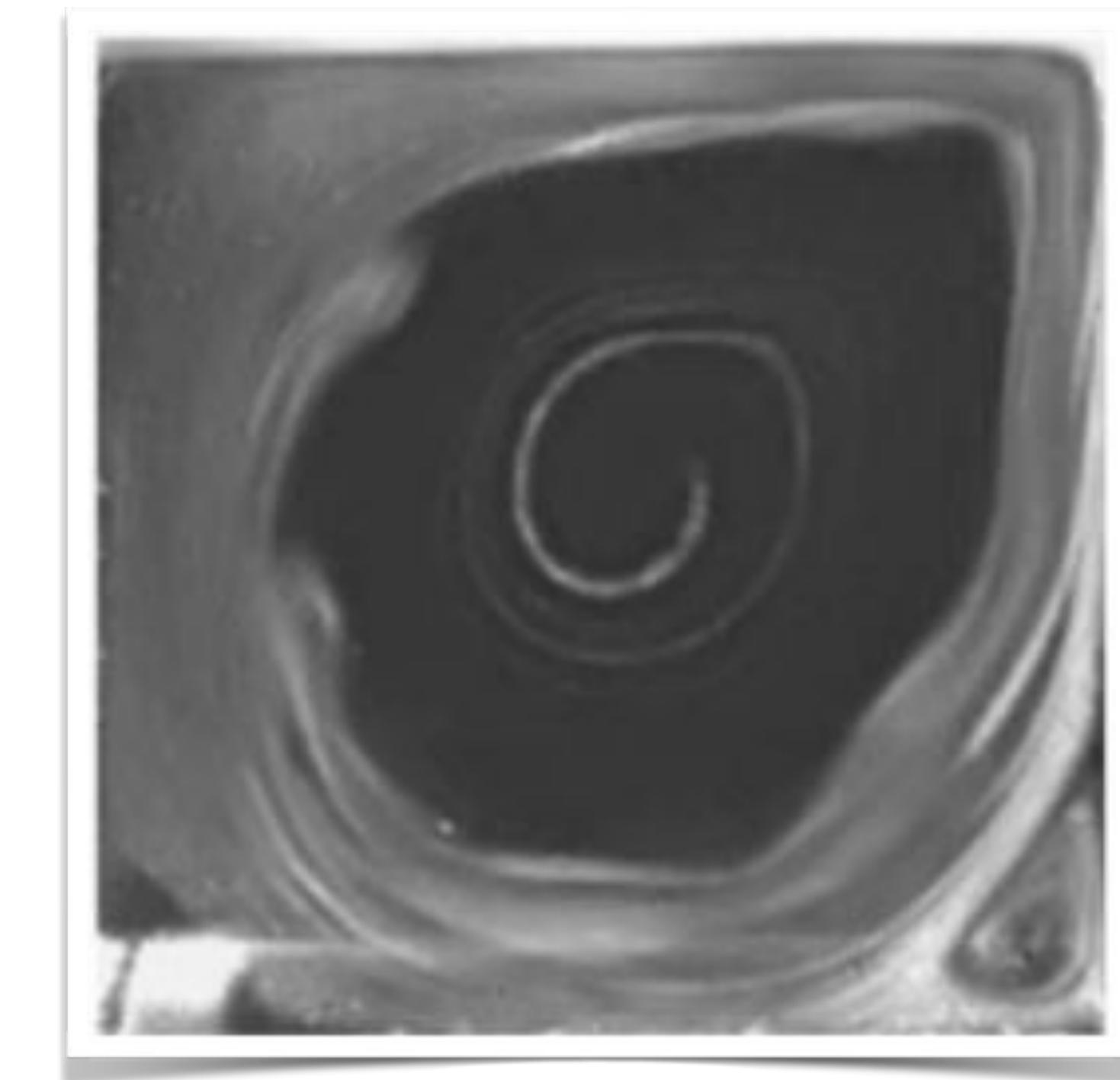
Escoamento em uma cavidade

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 incompressível, transitório (PISO), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- **pimpleFoam**: Escoamento incompressível, estacionário (PIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- **simpleFoam**: Escoamento incompressível, estacionário (SIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- **icoFoam**: Escoamento incompressível, transitório, laminar e fluido Newtoniano.

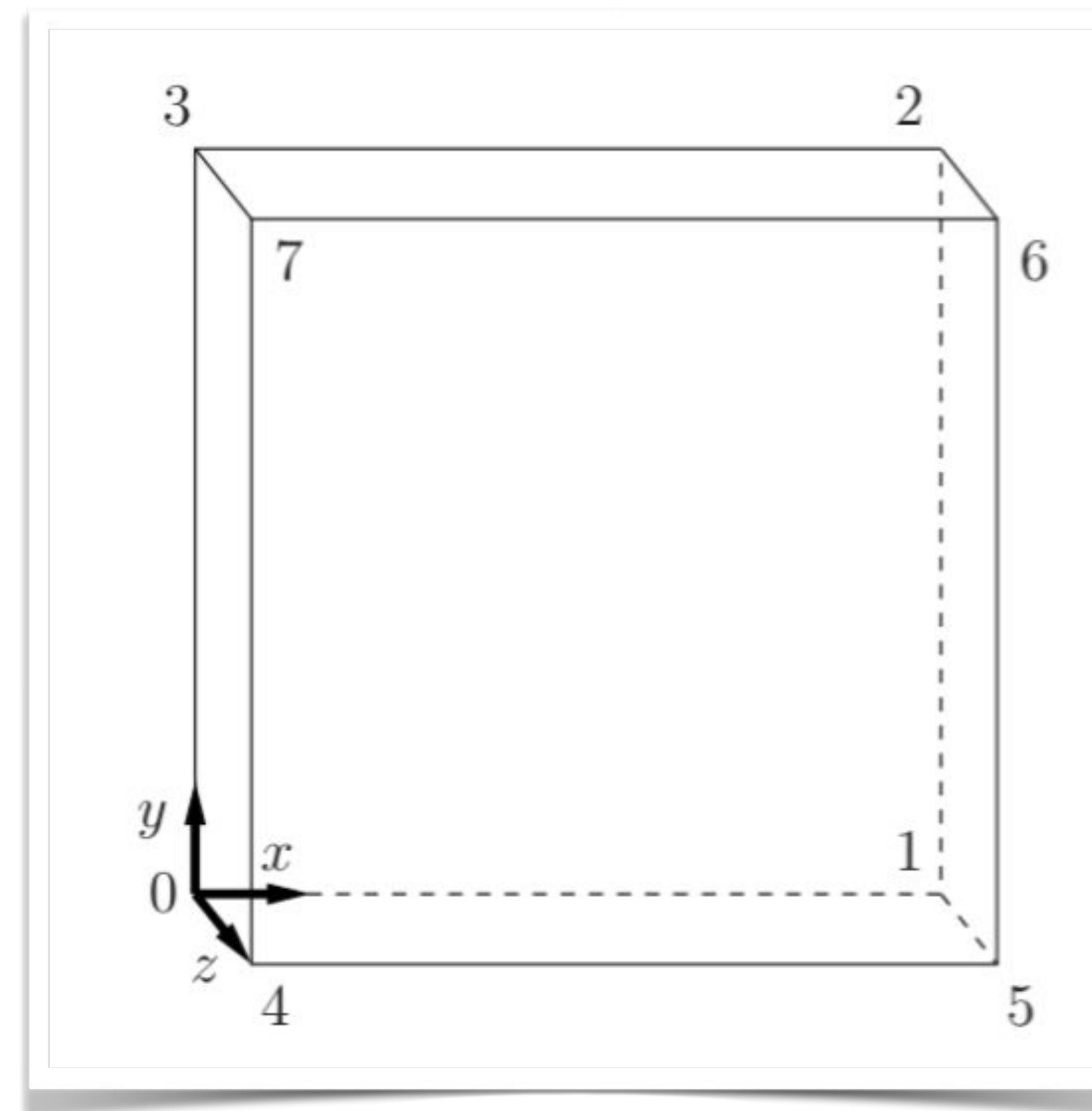
Escoamento em uma cavidade

Solvers do OpenFOAM:

- **pisoFoam**: Escoamento incompressível, transitório (PISO), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- **pimpleFoam**: Escoamento incompressível, estacionário (PIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- **simpleFoam**: Escoamento incompressível, estacionário (SIMPLE), laminar ou turbulento, fluido Newtoniano ou não-Newtoniano.
- **icoFoam**: Escoamento incompressível, transitório, 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;
```

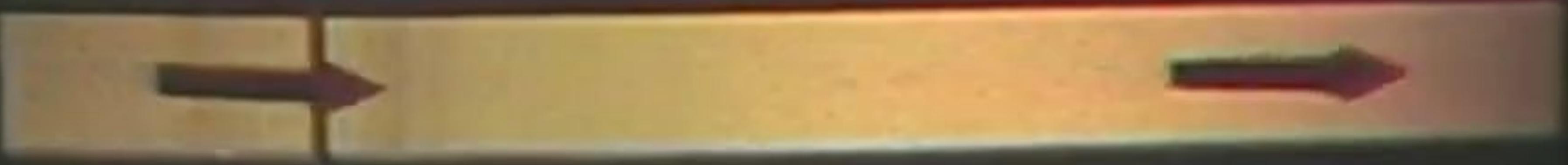
Dimensões no OpenFOAM:

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

Tutorial 01: Escoamento Coutte entre placas planas
Malha ortogonal hexaédrica
Solução do escoamento
Comparação com a solução analítica (verificação)





KEEP
CALM
AND
KEEP
FOAMing



Introdução a CFD usando o OpenFOAM®

Professora Livia Jatobá

SEnIP - 2023