Introdução a Fluidodinâmica Computacional

João Felipe Mitre[1]

[1] Universidade Federal Fluminense

2018

Plano da apresentação

1. Introdução
2. Metodologia de solução do CFD
3. Seguindo os passos
4. Referências

O que é a Fluidodinâmica Computacional?

A origem do termo:

Utilização de técnicas computacionais para solução de escoamentos.

O que é a Fluidodinâmica Computacional?

A origem do termo:

Utilização de técnicas computacionais para solução de escoamentos.

Então...

Sem ufanismo: Usamos o computador para resolver os problemas que antes resolvíamos na calculadora e antes disso, usamos ábaco e antes ainda, usamos papel e lápis

O que é a Fluidodinâmica Computacional ?

A definição segundo Versteeg e Malalasekra (2007):

A Fluidodinâmica computacional (Computational fluid dynamics, CFD) é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas utilizando simulações computacionais.

O que é a Fluidodinâmica Computacional ?

A definição segundo Versteeg e Malalasekra (2007):

A Fluidodinâmica computacional (Computational fluid dynamics, CFD) é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas utilizando simulações computacionais.

A definição segundo uma variedade de livros ronda os termos:

Conjunto das técnicas de simulação computacional usadas para predizer os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos.

O que é a Fluidodinâmica Computacional ?

A definição segundo Versteeg e Malalasekra (2007):

A Fluidodinâmica computacional (Computational fluid dynamics, CFD) é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas utilizando simulações computacionais.

A definição segundo uma variedade de livros ronda os termos:

Conjunto das técnicas de simulação computacional usadas para predizer os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos.

Minha definição predileta (uma definição multifísica):

Conjunto das técnicas numéricas para obter a solução de equações matemáticas que descrevem um problema de interesse.

O que é CFD ?

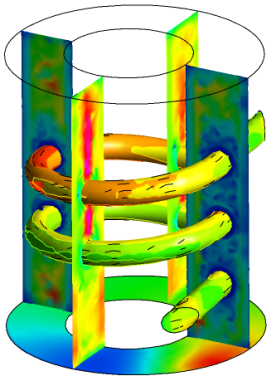
Uma ferramenta é apenas uma ferramenta.

- **CFD**: *Computational Fluid Dynamics*

O que é CFD ?

Uma ferramenta é apenas uma ferramenta.

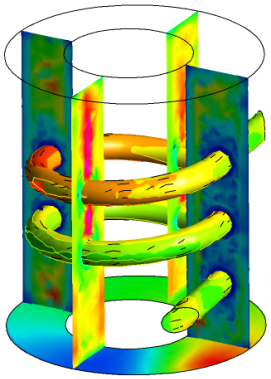
- **CFD**: *Computational Fluid Dynamics*
- **CFD**: *Colourful Fluid Dynamics*



O que é CFD ?

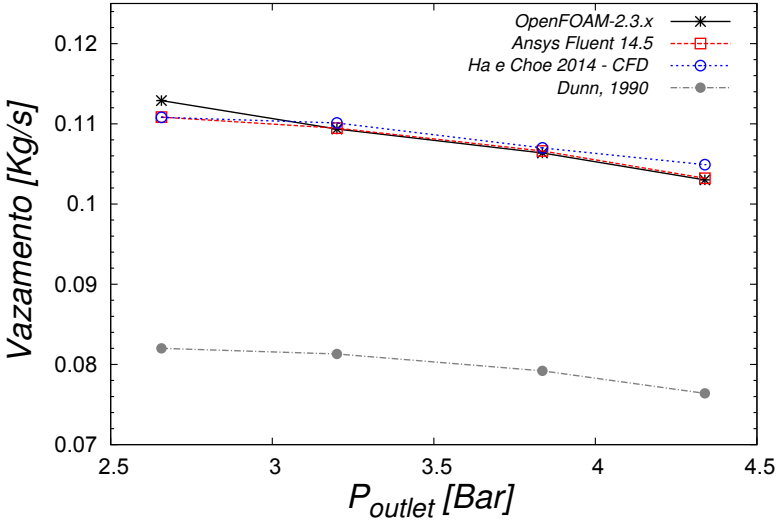
Uma ferramenta é apenas uma ferramenta.

- **CFD**: *Computational Fluid Dynamics*
- **CFD**: *Colourful Fluid Dynamics*

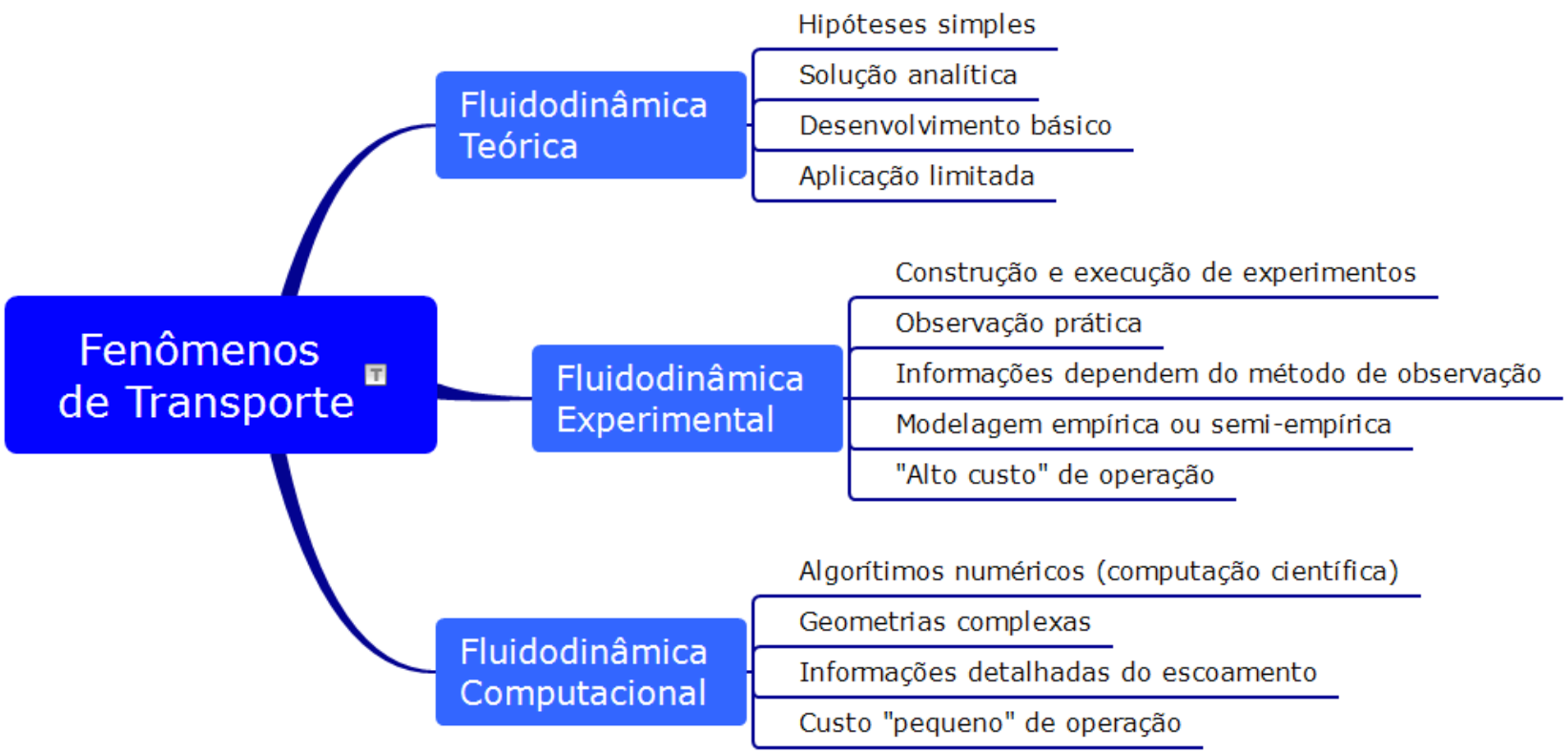


Pode ser melhor...

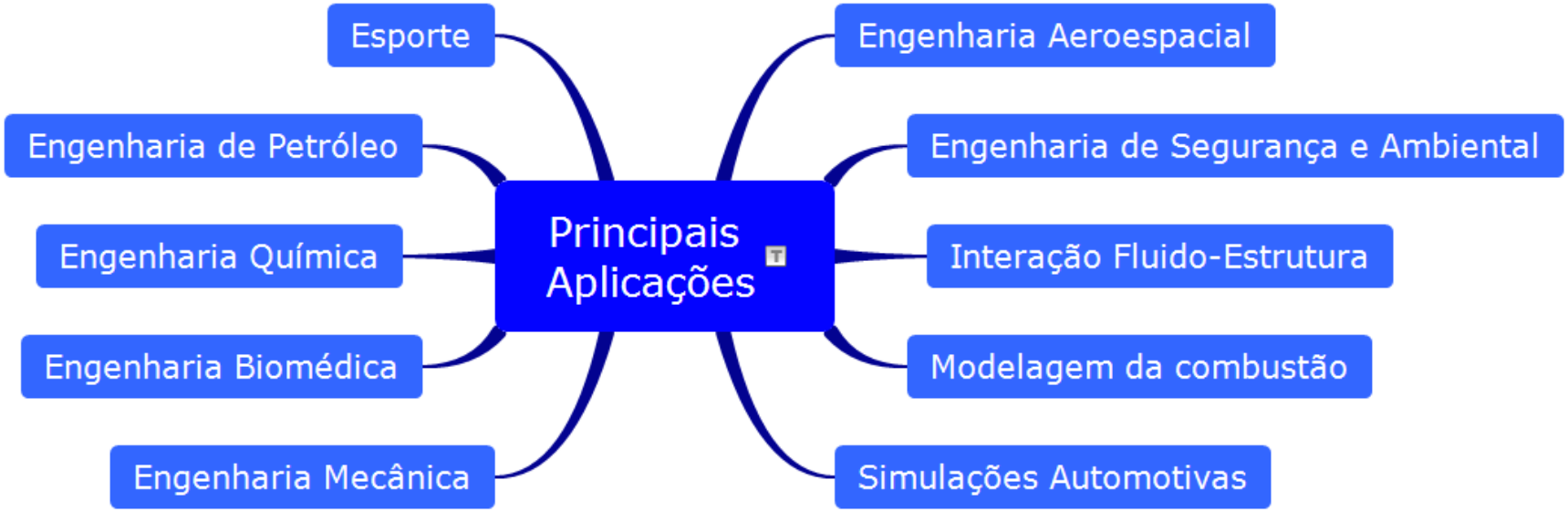
- Um resultado baseado em gráficos de linhas pode ser muito mais interessante e informativo.



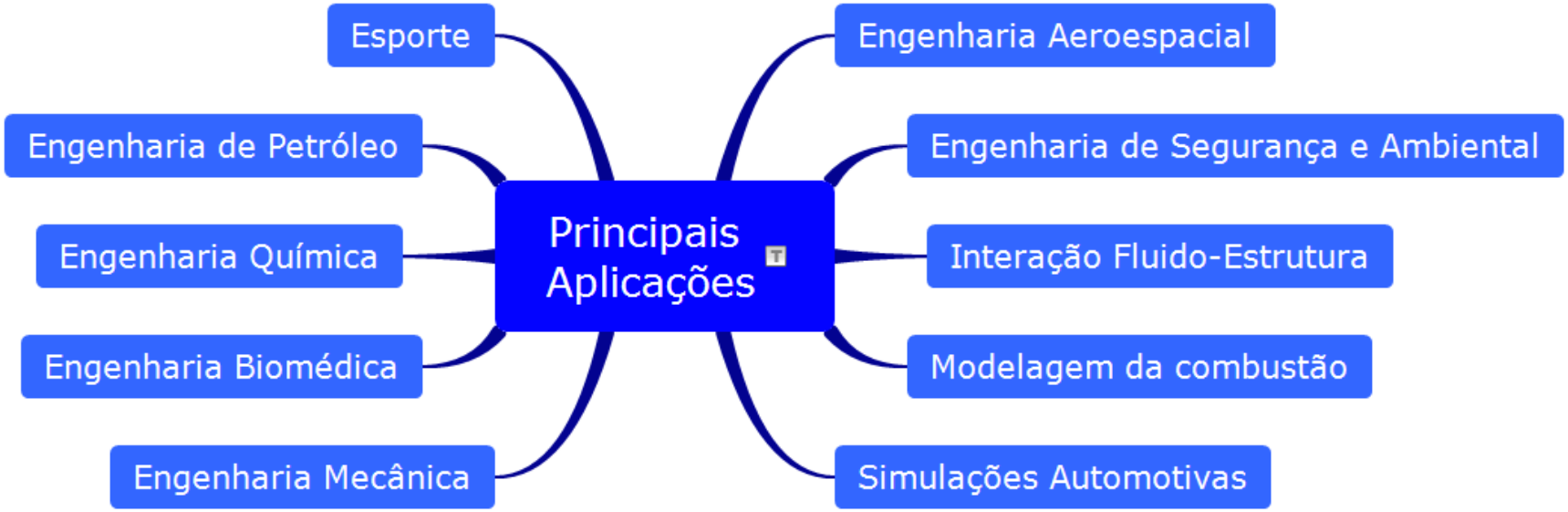
Por que usar o CFD?



Aplicações


Principais Aplicações
Esporte
Engenharia de Petróleo
Engenharia Química
Engenharia Biomédica
Engenharia Mecânica
Engenharia Aeroespacial
Engenharia de Segurança e Ambiental
Interação Fluido-Estrutura
Modelagem da combustão
Simulações Automotivas

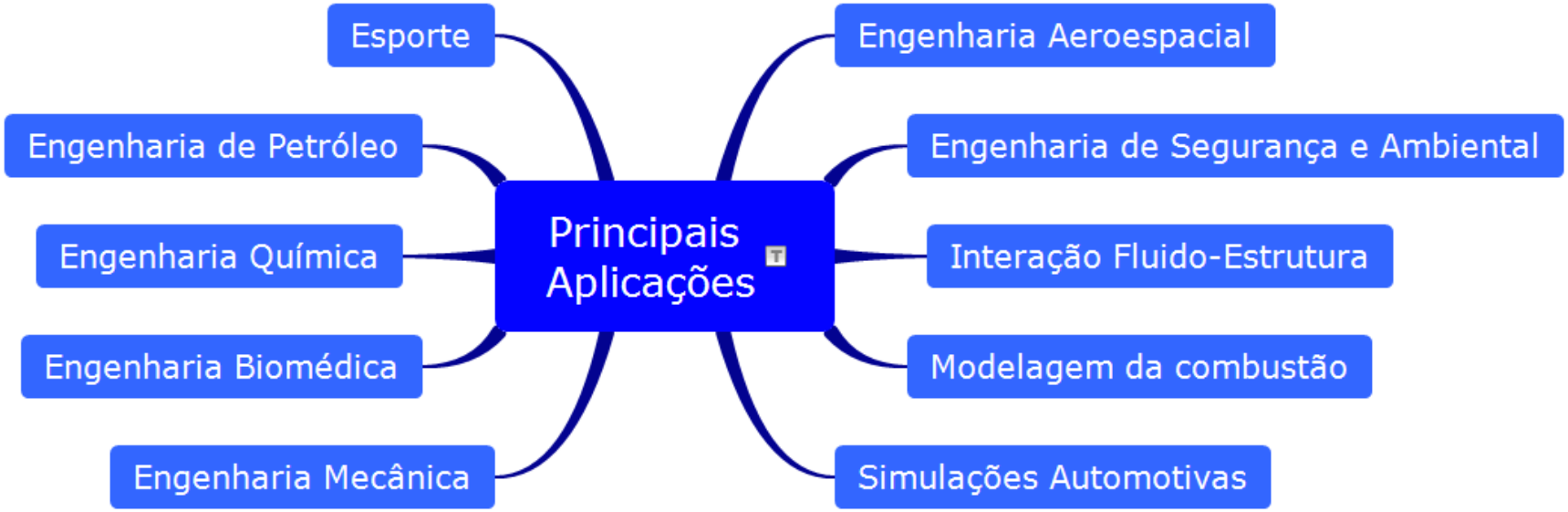
Aplicações



Entretanto...

- As fronteiras do conhecimento não são triviais...

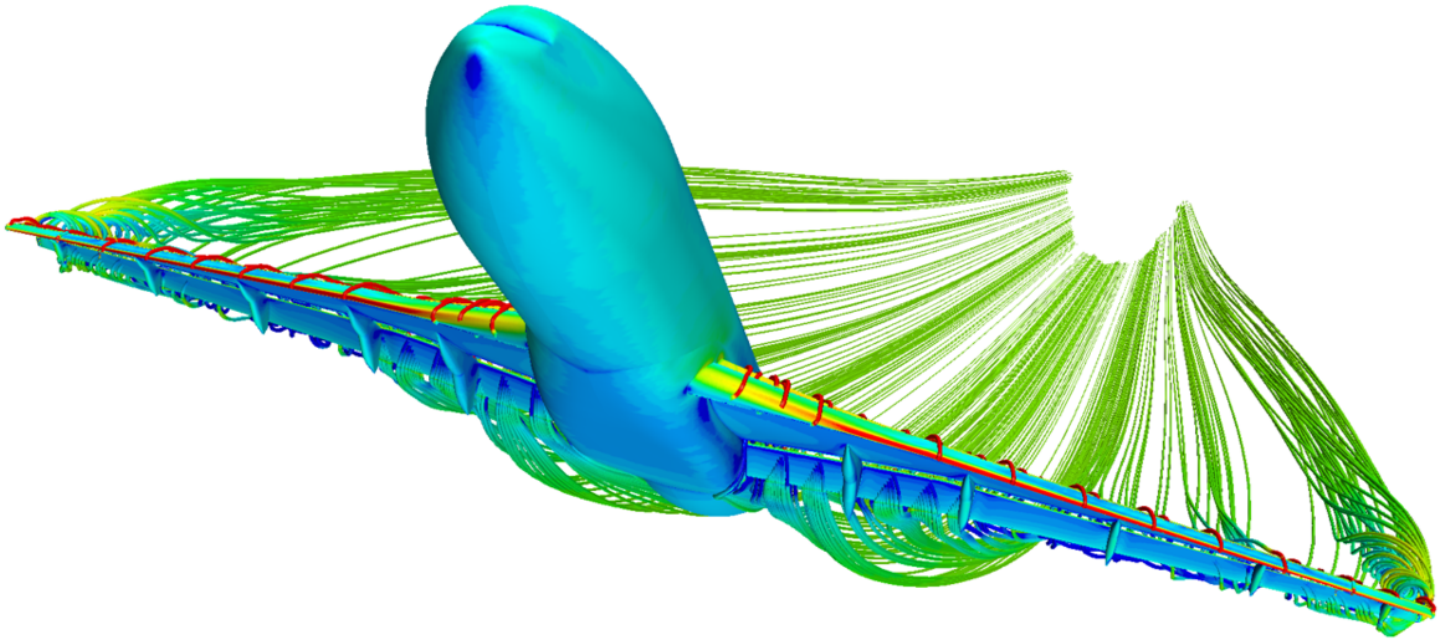
Aplicações



Entretanto...

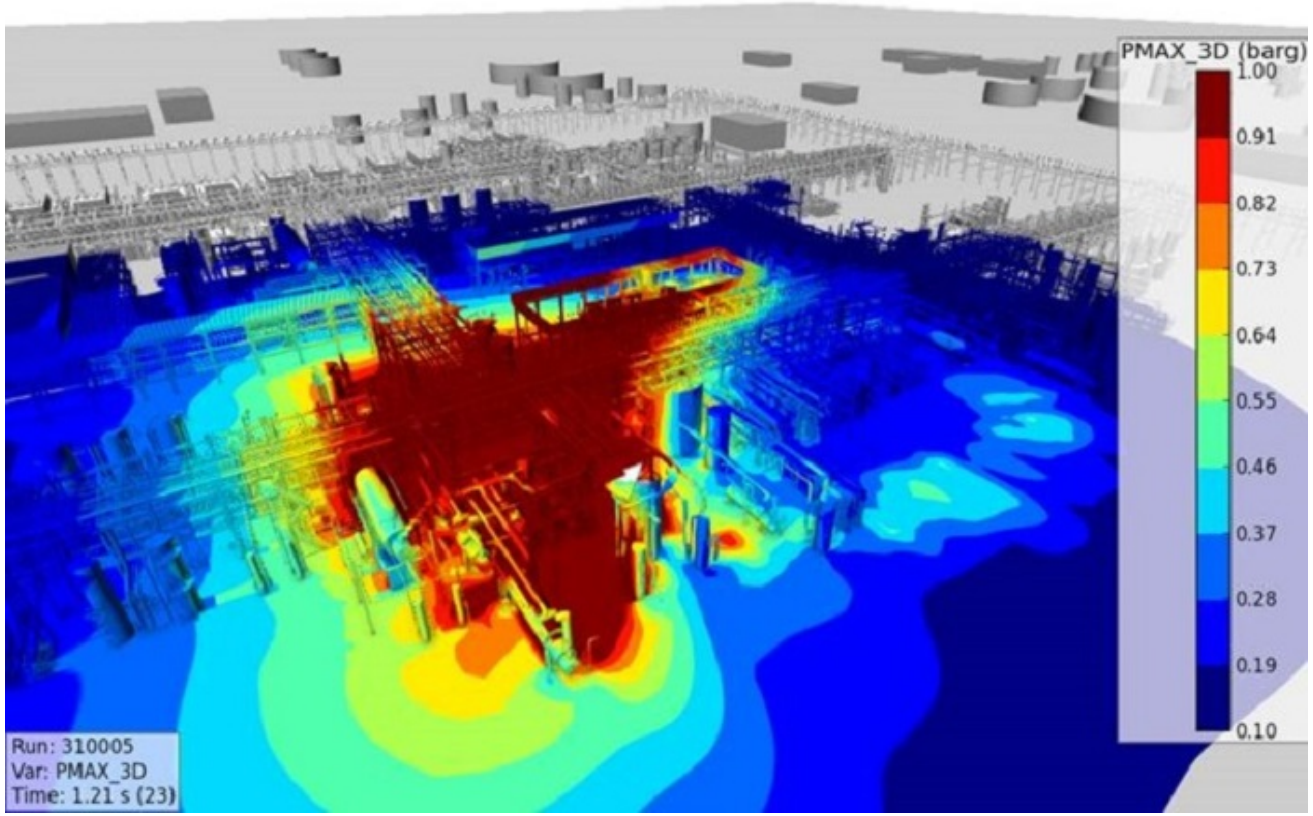
- As fronteiras do conhecimento não são triviais...
- Como separar o escoamento em uma tubulação flexível de um escoamento em uma veia?

Aplicações

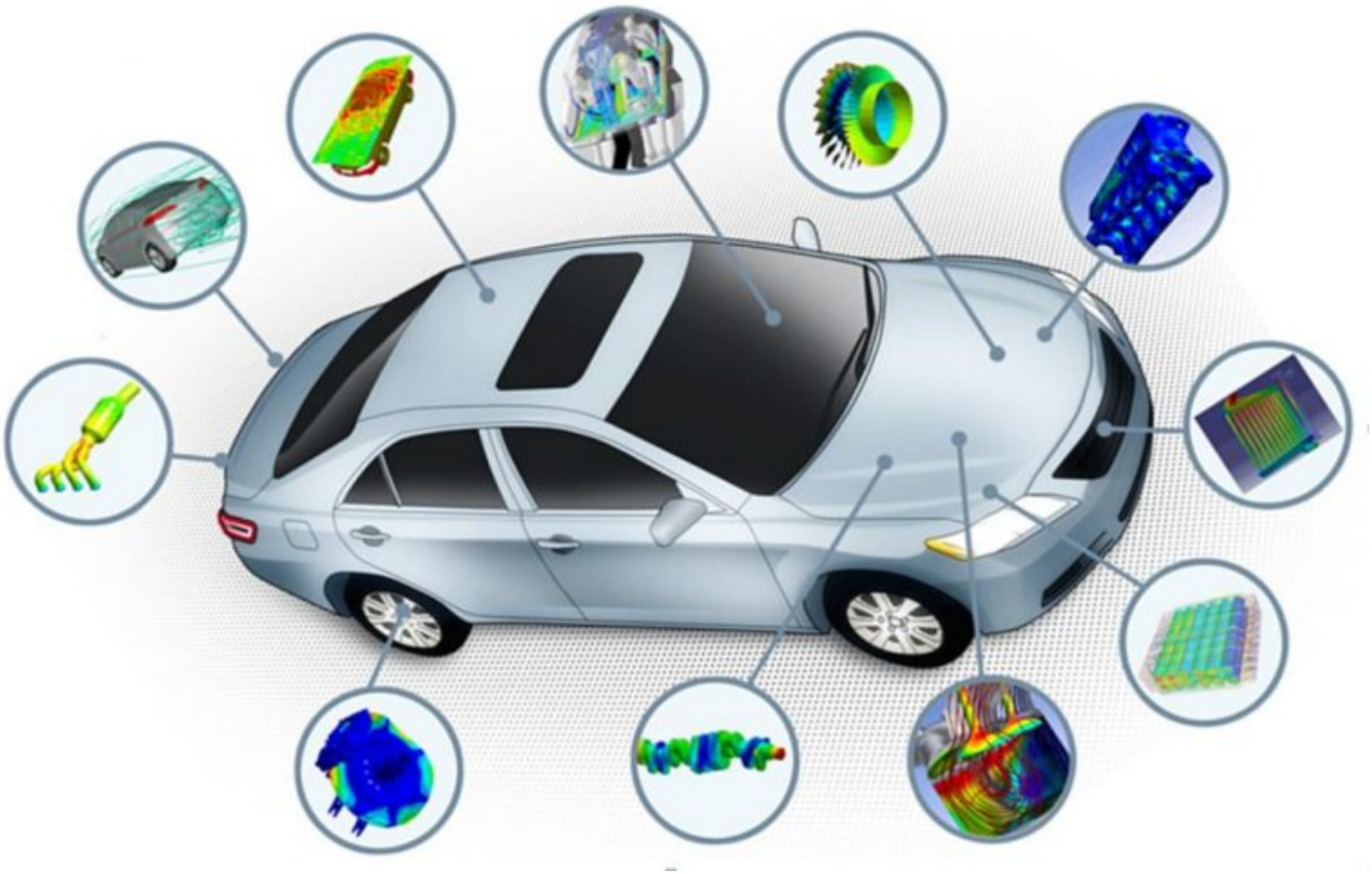


Aplicações

Aplicações


PMAX_3D (barg)
1.00
0.91
0.82
0.73
0.64
0.55
0.46
0.37
0.28
0.19
0.10
Run: 310005
Var: PMAX_3D
Time: 1.21 s (23)

Aplicações



Plano da apresentação

1. Introdução
2. Metodologia de solução do CFD
3. Seguindo os passos
4. Referências

Metodologia básica do CFD

Quais os passos a seguir ?

Metodologia básica do CFD

Quais os passos a seguir ?

São os passos que devemos percorrer para obter a solução das equações matemáticas que foram utilizadas para descrever o problema de interesse de forma correta e precisa.

Metodologia básica do CFD

Quais os passos a seguir ?

São os passos que devemos percorrer para obter a solução das equações matemáticas que foram utilizadas para descrever o problema de interesse de forma correta e precisa.

Primeiro e mais elementar dos passos:

Metodologia básica do CFD

Quais os passos a seguir ?

São os passos que devemos percorrer para obter a solução das equações matemáticas que foram utilizadas para descrever o problema de interesse de forma correta e precisa.

Primeiro e mais elementar dos passos:

- Saber o que queremos !

Metodologia básica do CFD

Quais os passos a seguir ?

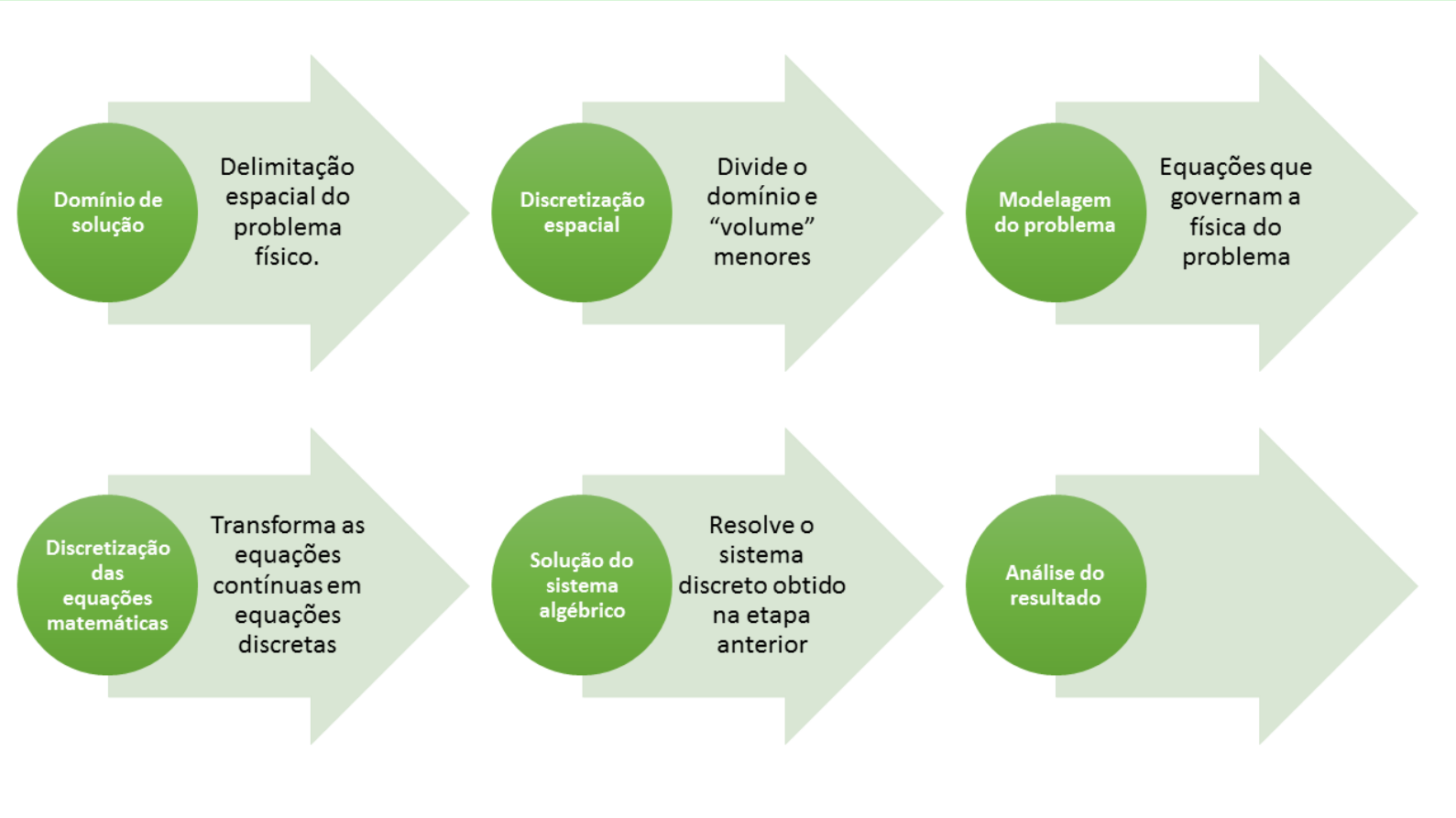
São os passos que devemos percorrer para obter a solução das equações matemáticas que foram utilizadas para descrever o problema de interesse de forma correta e precisa.

Primeiro e mais elementar dos passos:

- Saber o que queremos !
- **Se não sabemos o que queremos, qualquer coisa obtida serve !!!**

Metodologia básica do CFD

Fluxograma da solução



Plano da apresentação

1. Introdução
2. Metodologia de solução do CFD
3. Seguindo os passos
4. Referências

Conhecendo o que queremos...

Resposta intimamente ligada ao problema estudado

- Verificação preliminar "do aspecto do escoamento".
- Avaliação do perfil de velocidades (ou vazão).
- Identificação de zonas de estagnação.
- Identificação de pontos mais quentes ou mais frios.
- Perfil de pressão e perda de carga.
- Tensões sobre as paredes.
- Otimização geométrica do equipamento.

Conhecendo o que queremos...

Resposta intimamente ligada ao problema estudado

- Verificação preliminar "do aspecto do escoamento".
- Avaliação do perfil de velocidades (ou vazão).
- Identificação de zonas de estagnação.
- Identificação de pontos mais quentes ou mais frios.
- Perfil de pressão e perda de carga.
- Tensões sobre as paredes.
- Otimização geométrica do equipamento.
- Entre outros objetivos ...

Conhecendo o que queremos...

Resposta intimamente ligada ao problema estudado

- Verificação preliminar "do aspecto do escoamento".
- Avaliação do perfil de velocidades (ou vazão).
- Identificação de zonas de estagnação.
- Identificação de pontos mais quentes ou mais frios.
- Perfil de pressão e perda de carga.
- Tensões sobre as paredes.
- Otimização geométrica do equipamento.
- Entre outros objetivos ... **muitos outros...**

Domínio físico da solução

Onde vamos resolver o problema ?

- Normalmente, modelamos o fluido, a região com fluido.
- É o "espectro" contrário "da peça sólida". O vazio.
- Em alguns casos, consideramos o interior sólido.
- Deve ser abrangente para estudar o objetivo de interesse.

Domínio físico da solução

Onde vamos resolver o problema ?

- Normalmente, modelamos o fluido, a região com fluido.
- É o "espectro" contrário "da peça sólida". O vazio.
- Em alguns casos, consideramos o interior sólido.
- Deve ser abrangente para estudar o objetivo de interesse.

Programas de criação de "geometrias"

- blockMesh
- Design Modeler
- SolidWorks
- FreeCAD
- Salomé
- entre outros

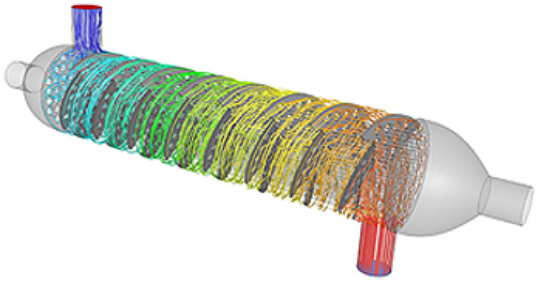
Domínio físico da solução

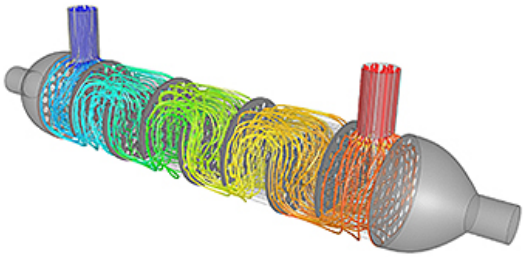
Onde vamos resolver o problema ?

- Normalmente, modelamos o fluido, a região com fluido.
- É o "espectro" contrário "da peça sólida". O vazio.
- Em alguns casos, consideramos o interior sólido.
- Deve ser abrangente para estudar o objetivo de interesse.

Programas de criação de "geometrias"

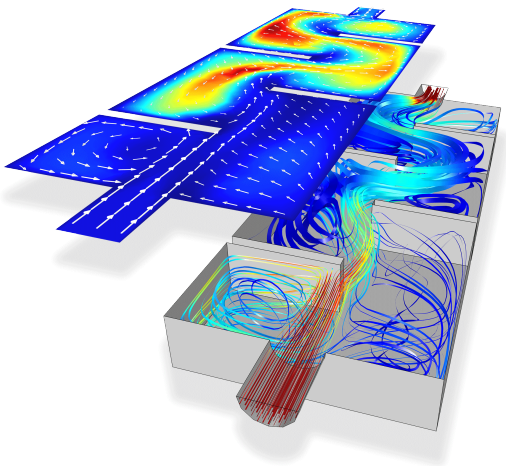
- blockMesh
- Design Modeler
- SolidWorks
- FreeCAD
- Salomé
- entre outros



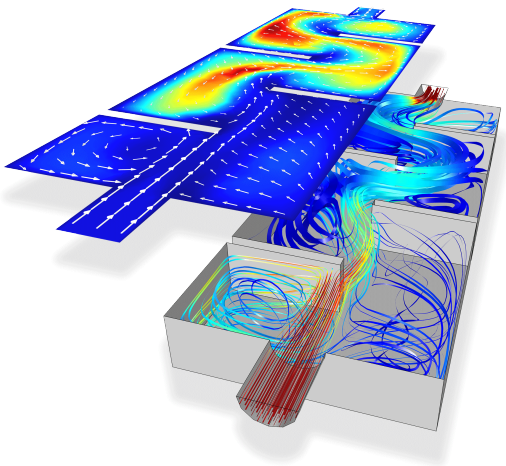


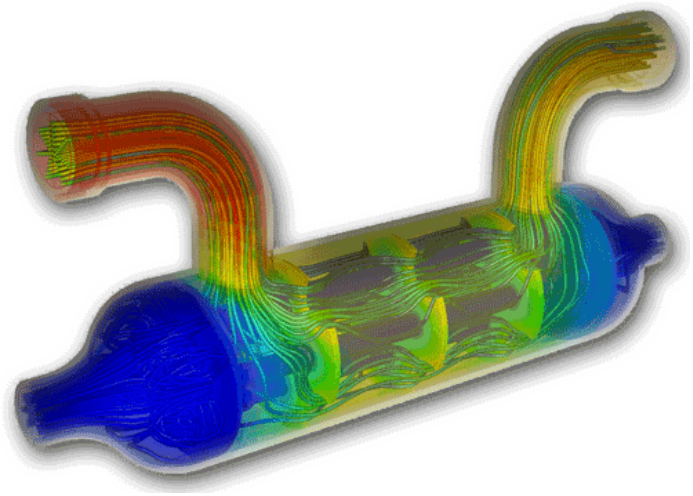
Domínio físico da solução

Domínio físico da solução

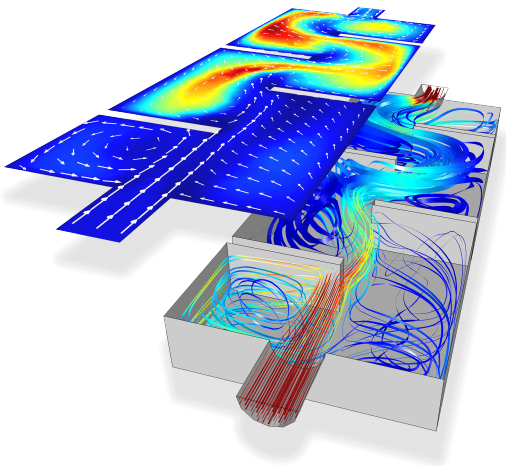


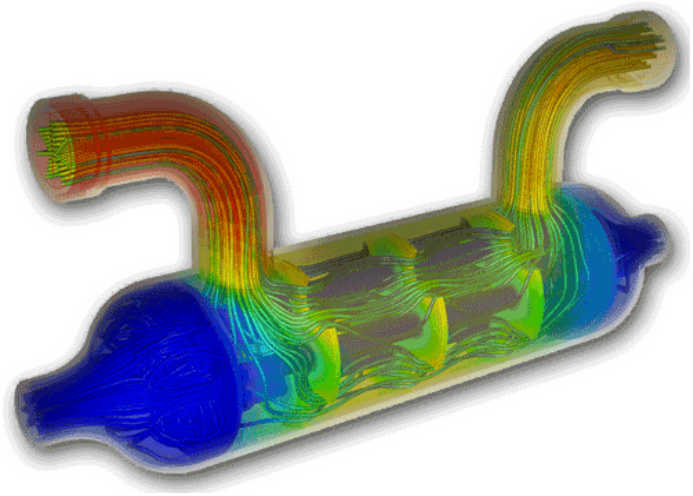
Domínio físico da solução

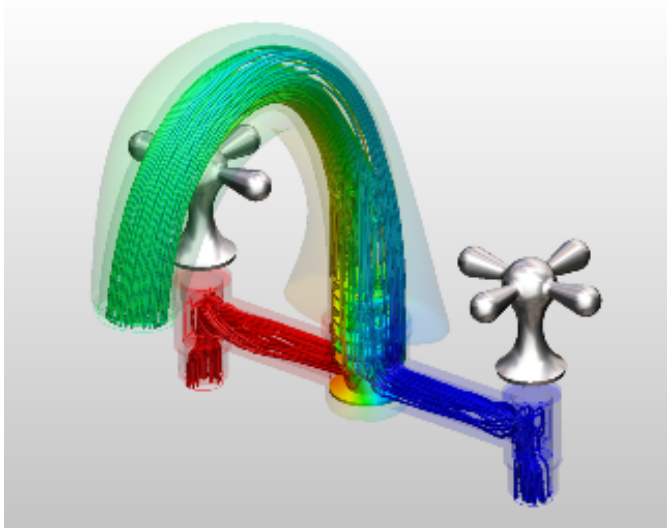




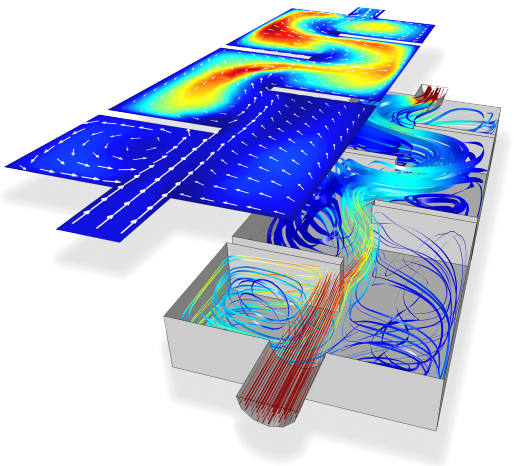
Domínio físico da solução

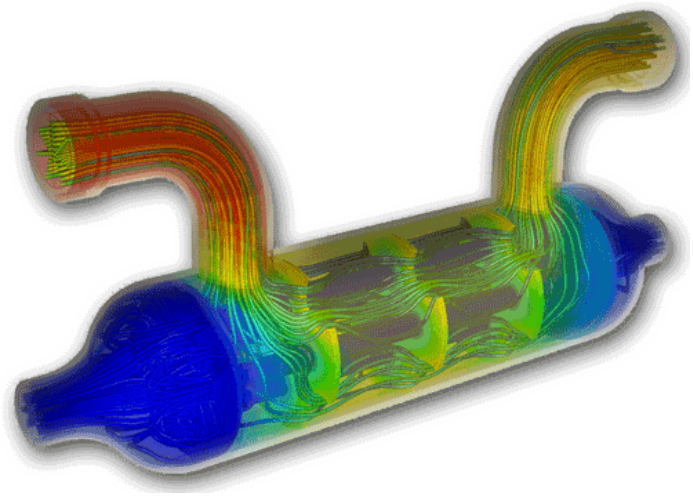


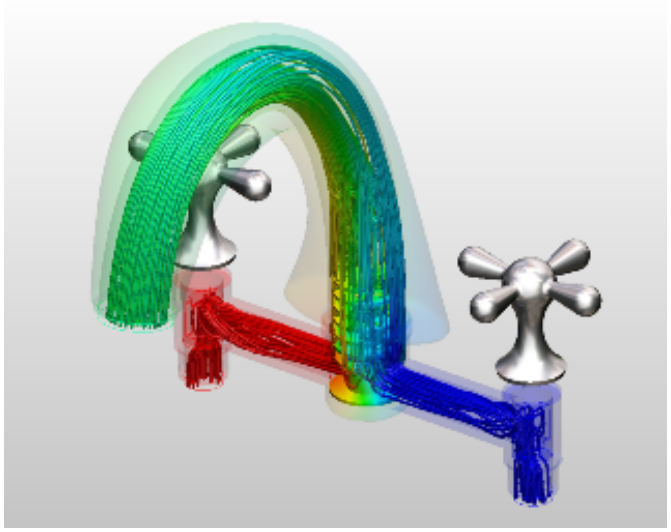


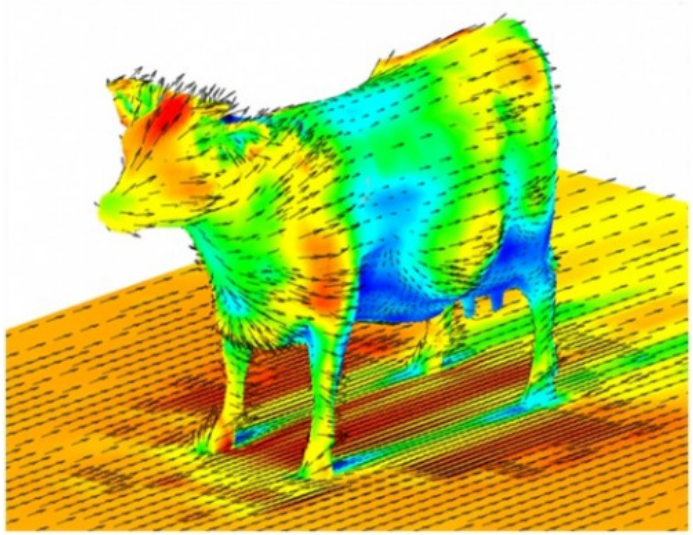


Domínio físico da solução

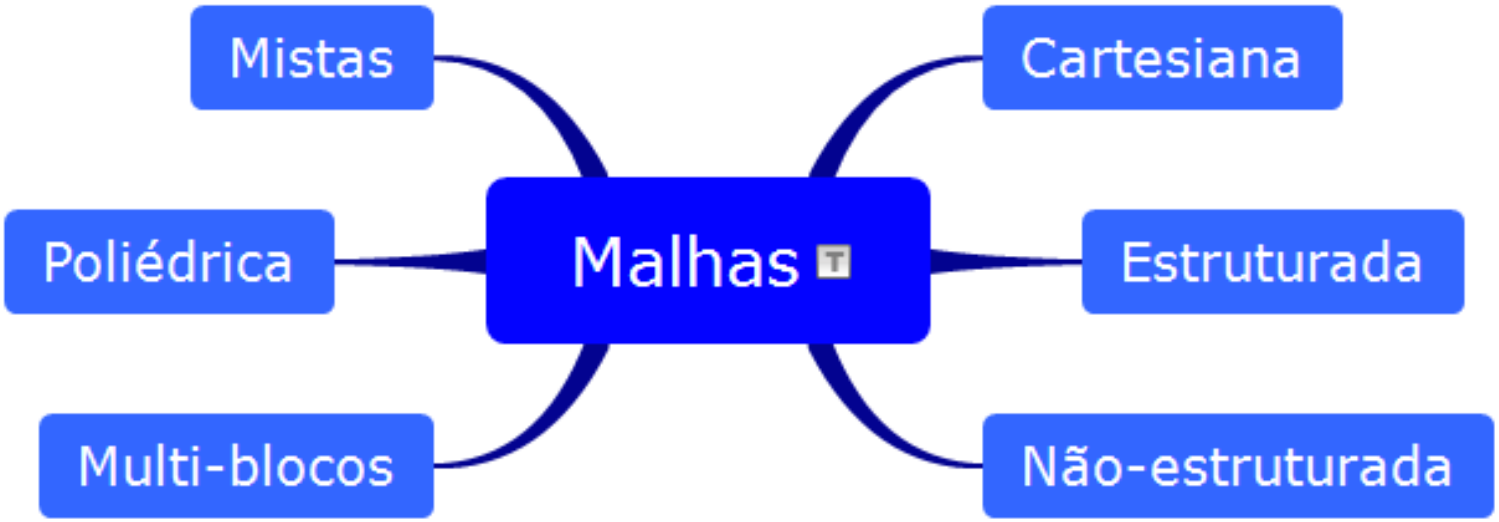








Discretização espacial/Malhas



Discretização espacial/Malhas

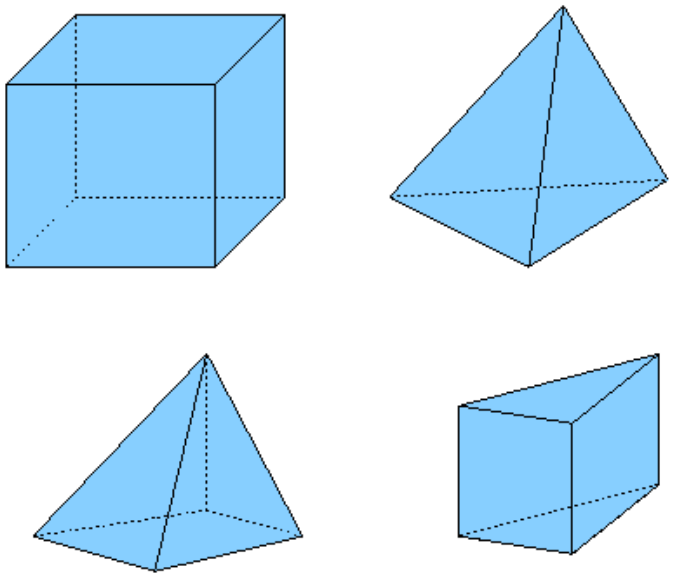
Programas para geração de malhas

- blockMesh / snappyHexMesh
- cfMesh
- Pointwise
- ICEMCFD
- CFX Meshing

Discretização espacial/Malhas

Programas para geração de malhas

- blockMesh / snappyHexMesh
- cfMesh
- Pointwise
- ICEMCFD
- CFX Meshing



Discretização espacial/Malhas

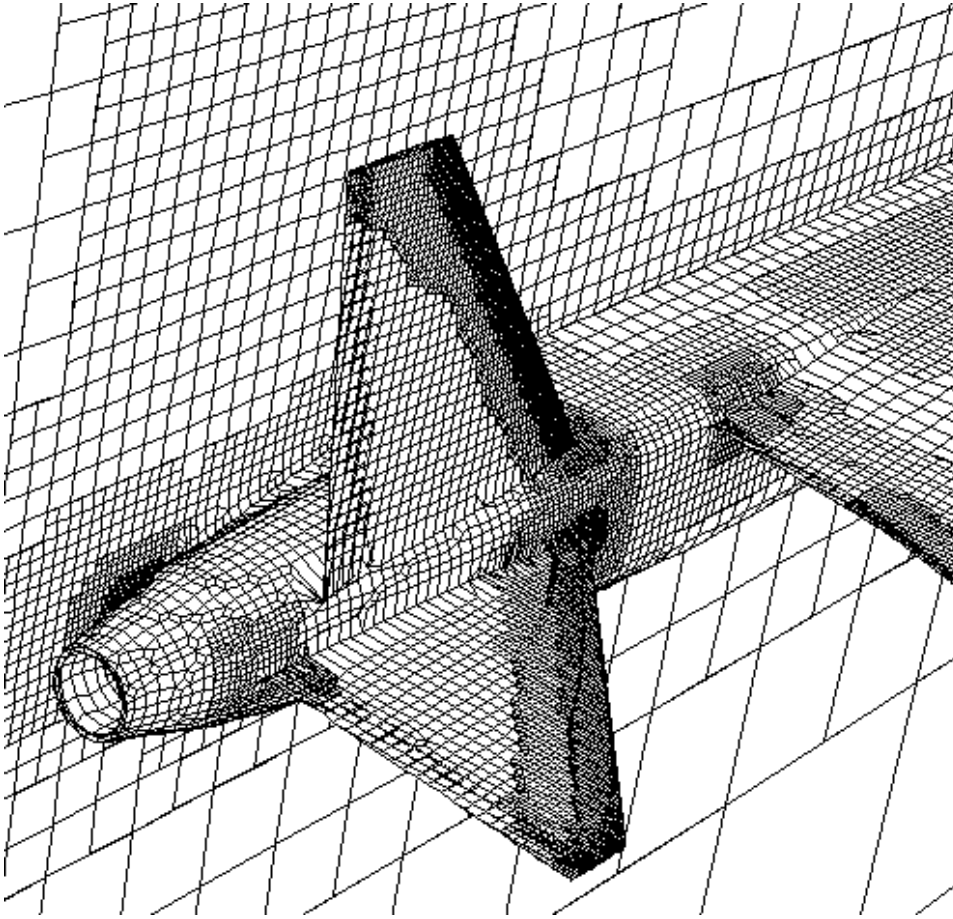
Malhas cartesianas

- Os elementos da malha são hexaédros.
- Existe um refino local para adequar a superfície da malha.
- Os elementos de superfície podem ficar muito pequenos.

Discretização espacial/Malhas

Malhas cartesianas

- Os elementos da malha são hexaédros.
- Existe um refino local para adequar a superfície da malha.
- Os elementos de superfície podem ficar muito pequenos.



Discretização espacial/Malhas

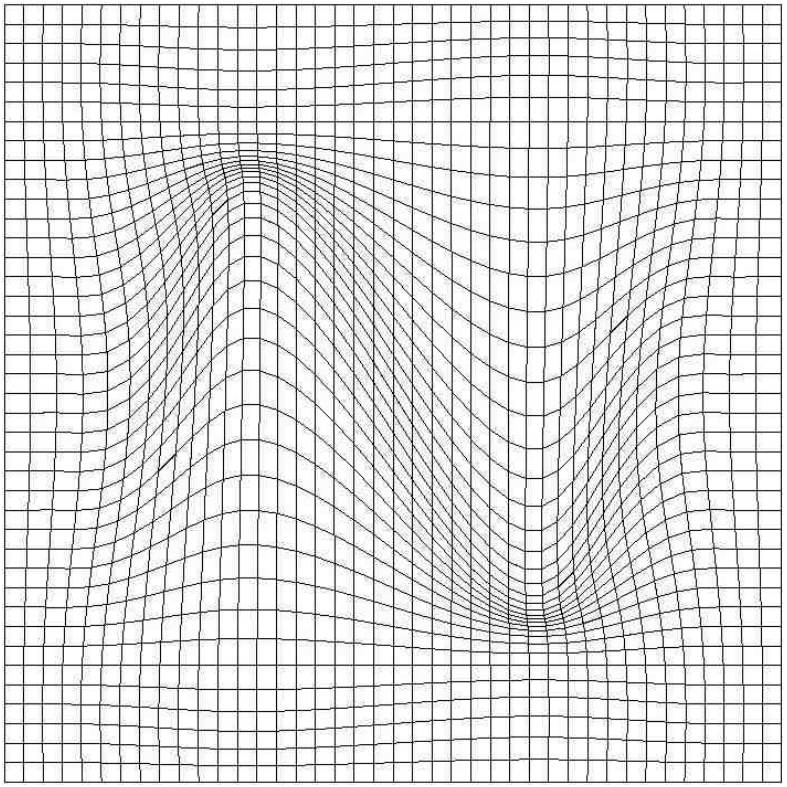
Malhas Estruturadas "*body-fitted*"

- Malhas com elementos hexaédricos e regularmente conectados.
- A malha se adapta ao contorno.
- Difícil controlar o refino local da malha em geometrias complexas.

Discretização espacial/Malhas

Malhas Estruturadas "*body-fitted*"

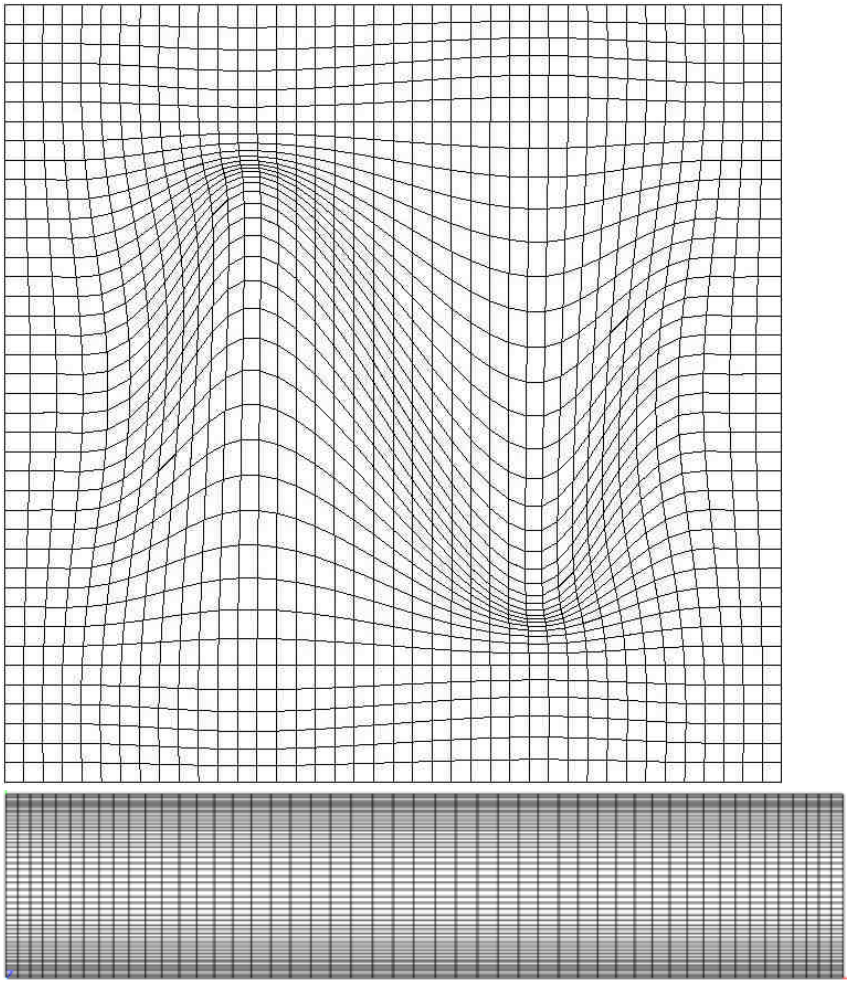
- Malhas com elementos hexaédricos e regularmente conectados.
- A malha se adapta ao contorno.
- Difícil controlar o refino local da malha em geometrias complexas.



Discretização espacial/Malhas

Malhas Estruturadas "*body-fitted*"

- Malhas com elementos hexaédricos e regularmente conectados.
- A malha se adapta ao contorno.
- Difícil controlar o refino local da malha em geometrias complexas.



Discretização espacial/Malhas

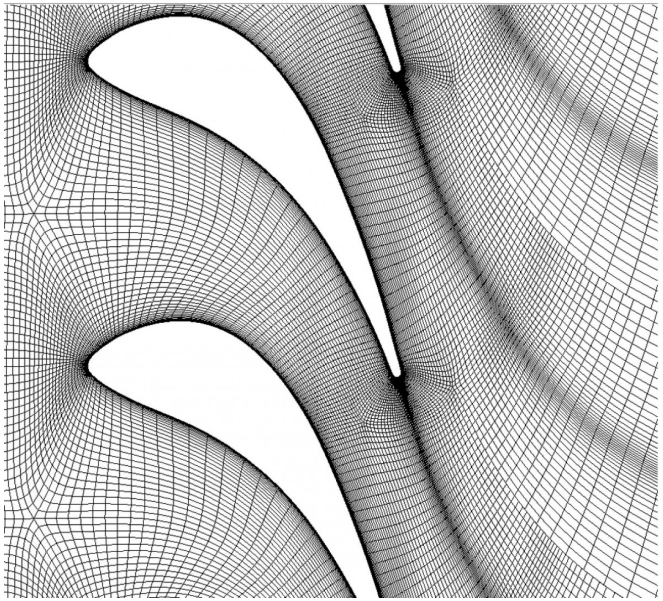
Malhas Multi-blocos

- Composta por vários blocos de uma malha estruturada tipo "*body-fitted*"
- Mais fácil criar um refino local em geometrias mais complexas.
- Pode ser um processo muito custoso (tempo de trabalho) adaptar os blocos na geometria.

Discretização espacial/Malhas

Malhas Multi-blocos

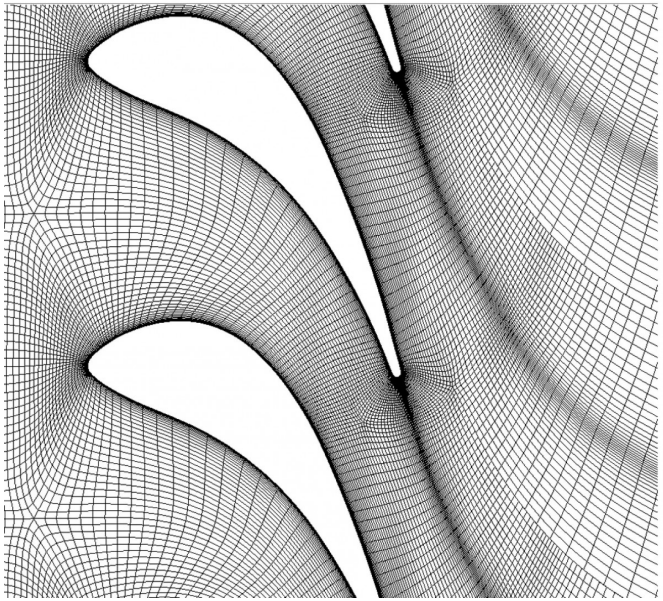
- Composta por vários blocos de uma malha estruturada tipo "*body-fitted*"
- Mais fácil criar um refino local em geometrias mais complexas.
- Pode ser um processo muito custoso (tempo de trabalho) adaptar os blocos na geometria.

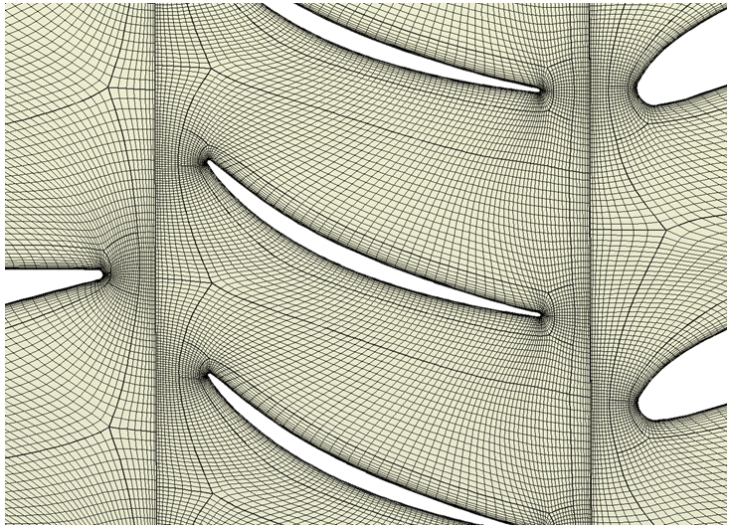


Discretização espacial/Malhas

Malhas Multi-blocos

- Composta por vários blocos de uma malha estruturada tipo "*body-fitted*"
- Mais fácil criar um refino local em geometrias mais complexas.
- Pode ser um processo muito custoso (tempo de trabalho) adaptar os blocos na geometria.





Discretização espacial/Malhas

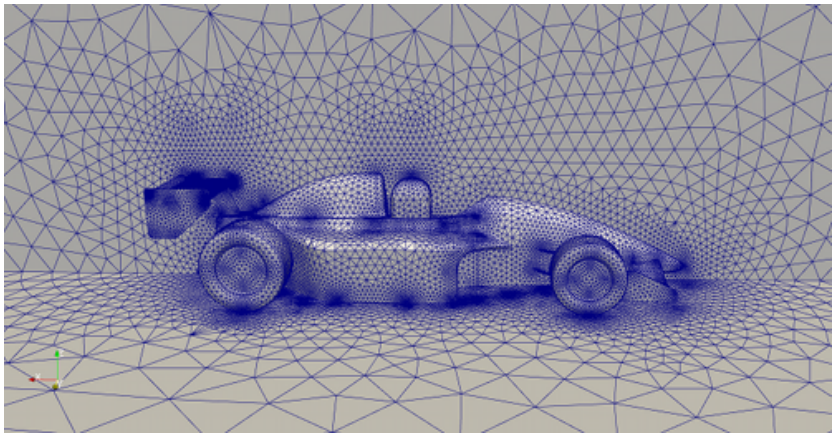
Malhas Não-estruturadas

- Permite utilizar diversos elementos básicos diferentes: hexaedros, primas, cunhas, pirâmides, etc.
- Pode apresentar baixo grau de ortogonalidade e deformação dos elementos básicos.
- Para descrição adequada da região próxima a parede, requer grande quantidade de volumes.

Discretização espacial/Malhas

Malhas Não-estruturadas

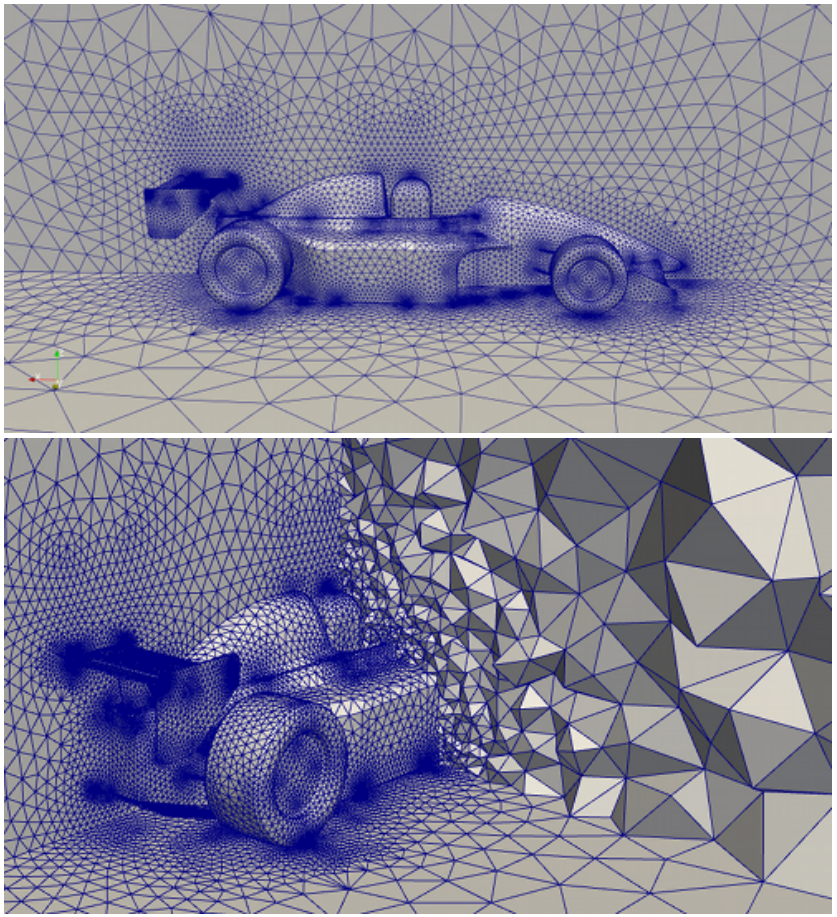
- Permite utilizar diversos elementos básicos diferentes: hexaedros, primas, cunhas, pirâmides, etc.
- Pode apresentar baixo grau de ortogonalidade e deformação dos elementos básicos.
- Para descrição adequada da região próxima a parede, requer grande quantidade de volumes.



Discretização espacial/Malhas

Malhas Não-estruturadas

- Permite utilizar diversos elementos básicos diferentes: hexaedros, primas, cunhas, pirâmides, etc.
- Pode apresentar baixo grau de ortogonalidade e deformação dos elementos básicos.
- Para descrição adequada da região próxima a parede, requer grande quantidade de volumes.



Discretização espacial/Malhas

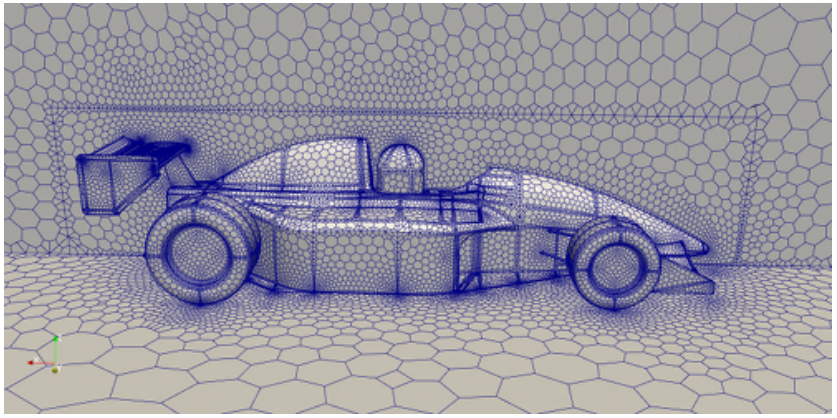
Malhas poliédricas

- Utilização de elementos poliédricos.
- Menos células por volume, distorção e não-ortogonalidade mínimas, melhor conectividade entre células.
- Metodologia mais confiável de geração de malhas automáticas.
- Ainda assim, pode gerar um tamanho de malha maior que o necessário para boa descrição do problema.

Discretização espacial/Malhas

Malhas poliédricas

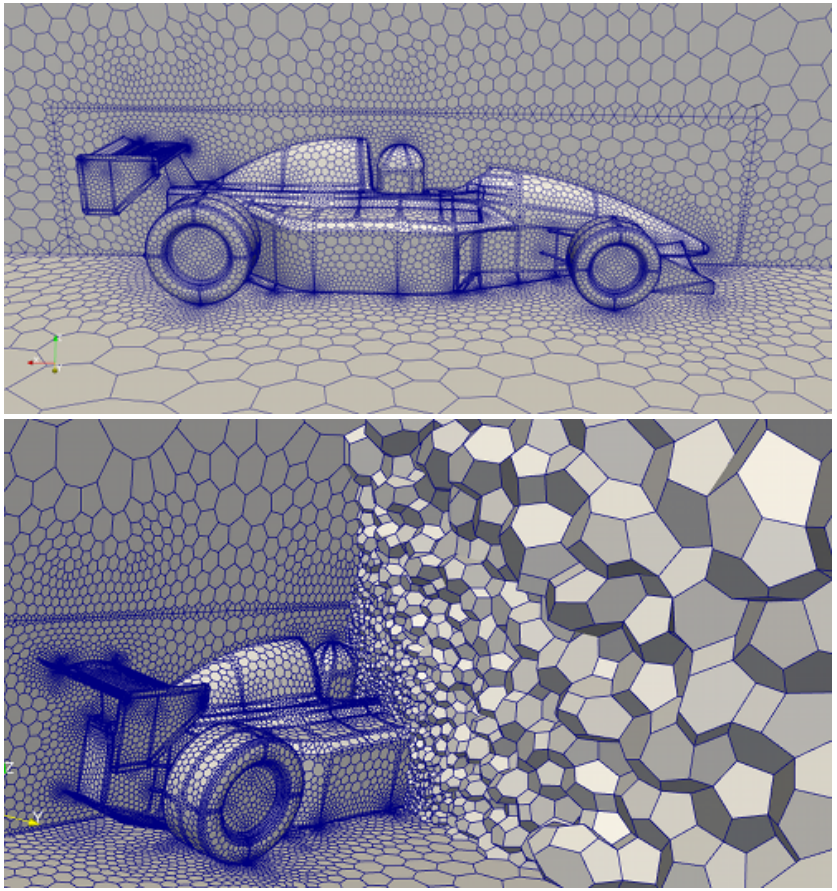
- Utilização de elementos poliédricos.
- Menos células por volume, distorção e não-ortogonalidade mínimas, melhor conectividade entre células.
- Metodologia mais confiável de geração de malhas automáticas.
- Ainda assim, pode gerar um tamanho de malha maior que o necessário para boa descrição do problema.



Discretização espacial/Malhas

Malhas poliédricas

- Utilização de elementos poliédricos.
- Menos células por volume, distorção e não-ortogonalidade mínimas, melhor conectividade entre células.
- Metodologia mais confiável de geração de malhas automáticas.
- Ainda assim, pode gerar um tamanho de malha maior que o necessário para boa descrição do problema.



Discretização espacial/Malhas

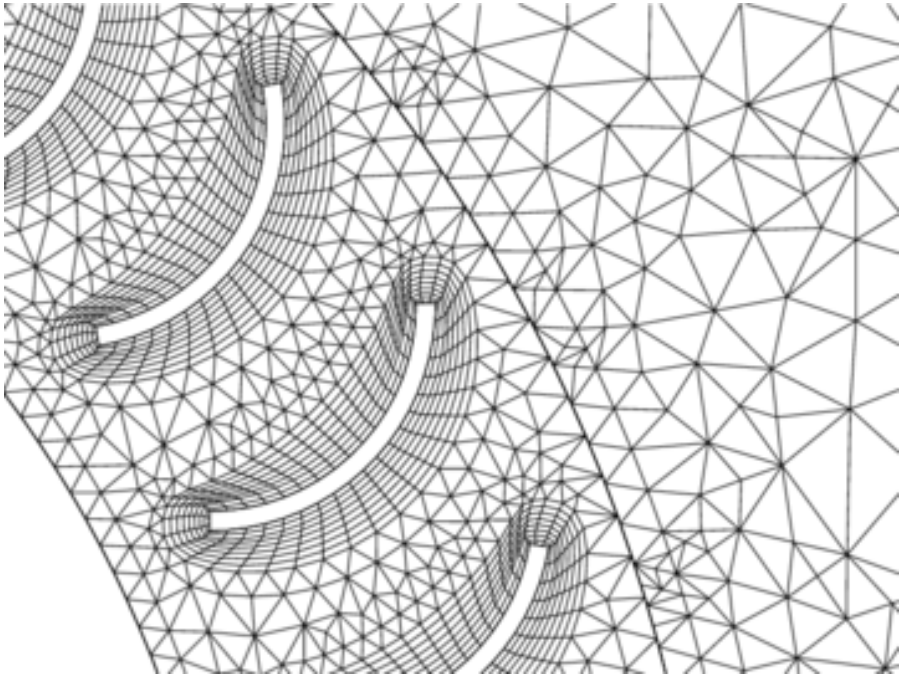
Malhas Mistas

- Permite unir elementos hexaédricos com elementos de outra natureza (tetraédros, cunhas, poliédros, etc).
- É o melhor tipo para descrever geometrias complexas.
- Pode ter os mesmos problemas das malhas não-estruturada.
- Pode ser muito trabalhoso fazer uma boa malha.

Discretização espacial/Malhas

Malhas Mistas

- Permite unir elementos hexaédricos com elementos de outra natureza (tetraédros, cunhas, poliédros, etc).
- É o melhor tipo para descrever geometrias complexas.
- Pode ter os mesmos problemas das malhas não-estruturada.
- Pode ser muito trabalhoso fazer uma boa malha.



Discretização espacial/Malhas

Discretização espacial/Malhas

Malhas adaptativas

- A malha se adapta em torno da um aspecto de interesse.

Discretização espacial/Malhas

Malhas adaptativas

- A malha se adapta em torno da um aspecto de interesse.

Malhas móveis

- A malha se move, pois as fronteiras do domínio do fluido são móveis.

Discretização espacial/Malhas

Malhas adaptativas

- A malha se adapta em torno da um aspecto de interesse.

Malhas móveis

- A malha se move, pois as fronteiras do domínio do fluido são móveis.

Refino de malha

- Deve descrever o problema físico. Deve haver tantos volumes quanto sejam necessários, mas não mais que isso.

Discretização espacial/Malhas

Malhas adaptativas

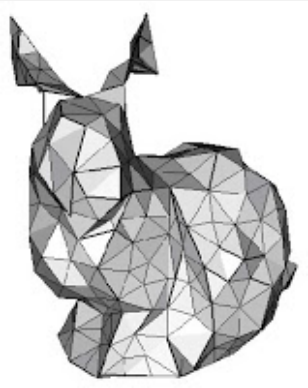
- A malha se adapta em torno da um aspecto de interesse.

Malhas móveis

- A malha se move, pois as fronteiras do domínio do fluido são móveis.

Refino de malha

- Deve descrever o problema físico. Deve haver tantos volumes quanto sejam necessários, mas não mais que isso.



Discretização espacial/Malhas

Malhas adaptativas

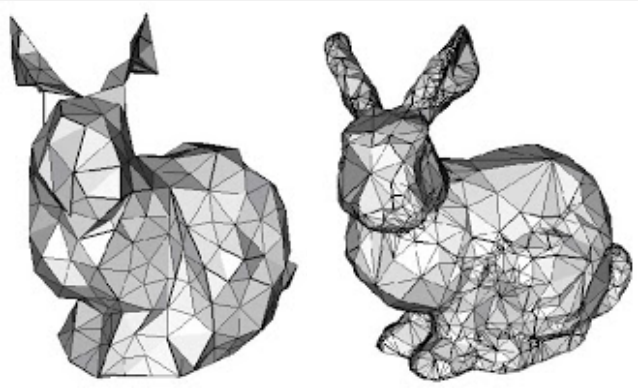
- A malha se adapta em torno da um aspecto de interesse.

Malhas móveis

- A malha se move, pois as fronteiras do domínio do fluido são móveis.

Refino de malha

- Deve descrever o problema físico. Deve haver tantos volumes quanto sejam necessários, mas não mais que isso.



Discretização espacial/Malhas

Malhas adaptativas

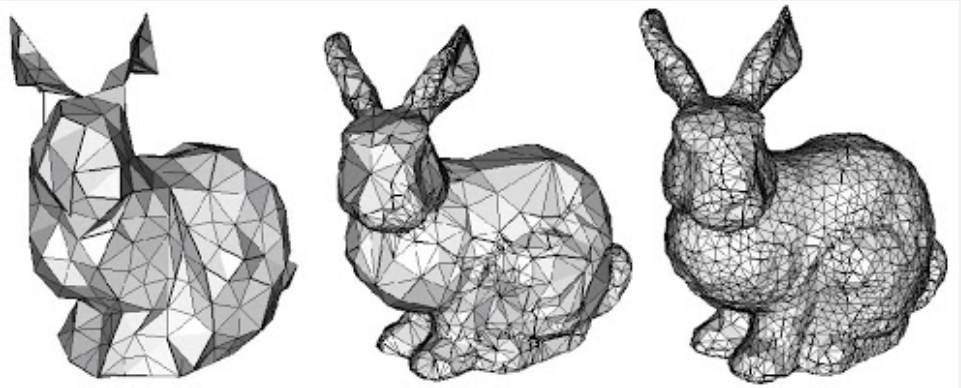
- A malha se adapta em torno da um aspecto de interesse.

Malhas móveis

- A malha se move, pois as fronteiras do domínio do fluido são móveis.

Refino de malha

- Deve descrever o problema físico. Deve haver tantos volumes quanto sejam necessários, mas não mais que isso.



Discretização espacial/Malhas

Malhas adaptativas

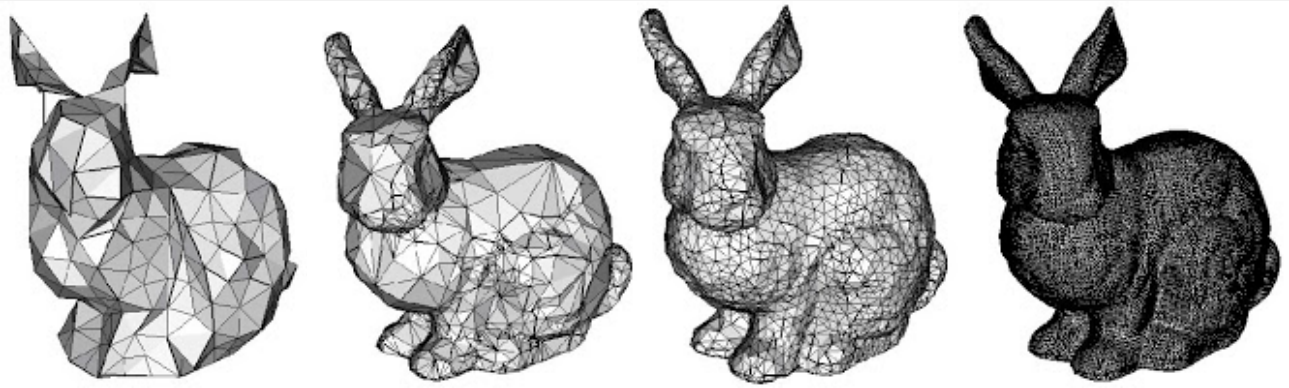
- A malha se adapta em torno da um aspecto de interesse.

Malhas móveis

- A malha se move, pois as fronteiras do domínio do fluido são móveis.

Refino de malha

- Deve descrever o problema físico. Deve haver tantos volumes quanto sejam necessários, mas não mais que isso.



Discretização espacial/Malhas

Características de uma boa malha

- skewness: define o grau de afastamento do tipo ideal do mesmo elemento.
- ortogonalidade: mostra o grau afastamento do ângulo do elemento em relação ao hexaédro.
- volume change: não deve haver grandes alterações nos tamanhos do elementos vizinhos.
- aspect ratio: razão entre os tamanhos das arestas de um mesmo elemento.

Discretização espacial/Malhas

Principais fontes de erro

- Malha ainda não está refinada adequadamente.
- Baixo grau de ortogonalidade.
- Variação de volume muito grande entre os elementos.
- Razão de aspecto muito ruim.
- Regiões de interface não "conformadas".
- Malhas feitas de forma inadequada nas condições de contorno.

Discretização espacial/Malhas

Principais fontes de erro

- Malha ainda não está refinada adequadamente.
- Baixo grau de ortogonalidade.
- Variação de volume muito grande entre os elementos.
- Razão de aspecto muito ruim.
- Regiões de interface não "conformadas".
- Malhas feitas de forma inadequada nas condições de contorno.

Atenção !!! Muita Atenção !!!

Criar uma malha é um processo artesanal. Uma boa malha gasta tempo e energia do usuário. Pode ser muito trabalhoso fazer uma boa malha.

Modelagem do problema físico

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

- Definição das condições da física, da simulação, de contorno e/ou iniciais.

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

- Definição das condições da física, da simulação, de contorno e/ou iniciais.
- Escolha dos modelos que melhor descrevem o problema

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

- Definição das condições da física, da simulação, de contorno e/ou iniciais.
- Escolha dos modelos que melhor descrevem o problema
- Aplicação de um método de discretização: Diferenças Finitas, Elementos Finitos, **Volumes Finitos**, etc.

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

- Definição das condições da física, da simulação, de contorno e/ou iniciais.
- Escolha dos modelos que melhor descrevem o problema
- Aplicação de um método de discretização: Diferenças Finitas, Elementos Finitos, **Volumes Finitos**, etc.
- No método dos volumes finitos, integrar a equação no volume do elemento.

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

- Definição das condições da física, da simulação, de contorno e/ou iniciais.
- Escolha dos modelos que melhor descrevem o problema
- Aplicação de um método de discretização: Diferenças Finitas, Elementos Finitos, **Volumes Finitos**, etc.
- No método dos volumes finitos, integrar a equação no volume do elemento.
- Gerar um sistema algébrico de equações.

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

- Definição das condições da física, da simulação, de contorno e/ou iniciais.
- Escolha dos modelos que melhor descrevem o problema
- Aplicação de um método de discretização: Diferenças Finitas, Elementos Finitos, **Volumes Finitos**, etc.
- No método dos volumes finitos, integrar a equação no volume do elemento.
- Gerar um sistema algébrico de equações.
- Decidir pelo método de acoplamento da pressão-velocidade.

Modelagem do problema físico

Etapas de um algorítimo de solução CFD

- Definição das condições da física, da simulação, de contorno e/ou iniciais.
- Escolha dos modelos que melhor descrevem o problema
- Aplicação de um método de discretização: Diferenças Finitas, Elementos Finitos, **Volumes Finitos**, etc.
- No método dos volumes finitos, integrar a equação no volume do elemento.
- Gerar um sistema algébrico de equações.
- Decidir pelo método de acoplamento da pressão-velocidade.
- Resolver o sistema algébrico resultante.

Modelagem do problema físico

Modelagem do problema físico

Física do problema

Modelagem do problema físico

Física do problema

- Problema permanente ou transiente?

Modelagem do problema físico

Física do problema

- Problema permanente ou transiente?
- Problema laminar ou turbulento. Se turbulento, qual modelo quer usar?

Modelagem do problema físico

Física do problema

- Problema permanente ou transiente?
- Problema laminar ou turbulento. Se turbulento, qual modelo quer usar?
- Fluido newtoniano ou não-newtoniano?

Modelagem do problema físico

Física do problema

- Problema permanente ou transiente?
- Problema laminar ou turbulento. Se turbulento, qual modelo quer usar?
- Fluido newtoniano ou não-newtoniano?
- Existe reação química? É escoamento multicomponente? Com transferência de calor?

Modelagem do problema físico

Física do problema

- Problema permanente ou transiente?
- Problema laminar ou turbulento. Se turbulento, qual modelo quer usar?
- Fluido newtoniano ou não-newtoniano?
- Existe reação química? É escoamento multicomponente? Com transferência de calor?
- Monofásico ou multifásico? Se multifásico, qual o tipo de modelo?

Modelagem do problema físico

Física do problema

- Problema permanente ou transiente?
- Problema laminar ou turbulento. Se turbulento, qual modelo quer usar?
- Fluido newtoniano ou não-newtoniano?
- Existe reação química? É escoamento multicomponente? Com transferência de calor?
- Monofásico ou multifásico? Se multifásico, qual o tipo de modelo?
- Existem termos de geração? Radiação? Interação fluido-estrutura?

Modelagem do problema físico

Física do problema

- Problema permanente ou transiente?
- Problema laminar ou turbulento. Se turbulento, qual modelo quer usar?
- Fluido newtoniano ou não-newtoniano?
- Existe reação química? É escoamento multicomponente? Com transferência de calor?
- Monofásico ou multifásico? Se multifásico, qual o tipo de modelo?
- Existem termos de geração? Radiação? Interação fluido-estrutura?
- E outras coisas?

Modelagem do problema físico

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

- Especificação do valor inicial, se houver.

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

- Especificação do valor inicial, se houver.
- Especificação de como o domínio interage com as vizinhanças que são representadas pela fronteira.
  - Valor especificado? Fluxo especificado? Constante ou Variável? Condição de simetria?

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

- Especificação do valor inicial, se houver.
- Especificação de como o domínio interage com as vizinhanças que são representadas pela fronteira.
  - Valor especificado? Fluxo especificado? Constante ou Variável? Condição de simetria?

Algumas das condições de simulação

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

- Especificação do valor inicial, se houver.
- Especificação de como o domínio interage com as vizinhanças que são representadas pela fronteira.
  - Valor especificado? Fluxo especificado? Constante ou Variável? Condição de simetria?

Algumas das condições de simulação

- Qual o resíduo considerado aceitável?

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

- Especificação do valor inicial, se houver.
- Especificação de como o domínio interage com as vizinhanças que são representadas pela fronteira.
  - Valor especificado? Fluxo especificado? Constante ou Variável? Condição de simetria?

Algumas das condições de simulação

- Qual o resíduo considerado aceitável?
- Qual o método de interpolação/integração numérica desejado?

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

- Especificação do valor inicial, se houver.
- Especificação de como o domínio interage com as vizinhanças que são representadas pela fronteira.
  - Valor especificado? Fluxo especificado? Constante ou Variável? Condição de simetria?

Algumas das condições de simulação

- Qual o resíduo considerado aceitável?
- Qual o método de interpolação/integração numérica desejado?
- Qual o passo de tempo? Adaptativo ou fixo?

Modelagem do problema físico

Condições de contorno e/ou iniciais

- Especificação do valor inicial, se houver.
- Especificação de como o domínio interage com as vizinhanças que são representadas pela fronteira.
  - Valor especificado? Fluxo especificado? Constante ou Variável? Condição de simetria?

Algumas das condições de simulação

- Qual o resíduo considerado aceitável?
- Qual o método de interpolação/integração numérica desejado?
- Qual o passo de tempo? Adaptativo ou fixo?
- Resolução em um único computador ou divisão em diferentes computadores? Qual a técnica de divisão ?

Modelagem do problema físico

Conservação de Massa

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

Conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) = -\boldsymbol{\nabla} p + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g}$$

Conservação de ϕ, genérico

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) = \boldsymbol{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\tau}_\phi) + f_\phi$$

Modelagem do problema físico

Conservação de ϕ, genérico

$$\int_{V_c} \frac{\partial \rho\phi}{\partial t}\,\mathrm{d}V_c + \int_{V_c} \boldsymbol{\nabla}\cdot(\rho\mathbf{u}\phi)\,\mathrm{d}V_c = \int_{V_c} \boldsymbol{\nabla}\cdot(\boldsymbol{\tau}_\phi)\,\mathrm{d}V_c + \int_{V_c} f_\phi\,\mathrm{d}V_c$$

$$\int_{V_c} \frac{\partial \rho\phi}{\partial t}\,\mathrm{d}V_c + \oint_{S_c} \rho\mathbf{u}\phi\cdot\hat{\mathbf{n}}\,\mathrm{d}S_c = \oint_{S_c} \boldsymbol{\tau}_\phi\cdot\hat{\mathbf{n}}\,\mathrm{d}S_c + \int_{V_c} f_\phi\,\mathrm{d}V_c$$

$$\int_{V_c} \frac{\partial \rho\phi}{\partial t}\,\mathrm{d}V_c = \frac{\phi^{(n)} - \phi^{(n-1)}}{\Delta t} V_c$$

$$\int_{V_c} f_\phi\,\mathrm{d}V_c = f_{\phi_c} V_c$$

$$\oint_{S_c} \rho\mathbf{u}\phi\cdot\hat{\mathbf{n}}\,\mathrm{d}S_c = \sum_f \rho\phi_f S_f\cdot\mathbf{u} \qquad \oint_{S_c} \boldsymbol{\tau}_\phi\cdot\hat{\mathbf{n}}\,\mathrm{d}S_c = \sum_f \boldsymbol{\tau}_f\cdot S_f$$

Discretização das equações matemáticas do modelo

Equação discreta

$$\frac{\phi^{(n)} - \phi^{(n-1)}}{\Delta t} V_c + \sum_f \rho \phi_f S_f \cdot \mathbf{u} + \sum_f \boldsymbol{\tau}_f \cdot S_f + f_{\phi_c} V_c$$

Normalmente:

$$\sum_f \boldsymbol{\tau}_f \cdot S_f = \sum_f \Gamma_F \boldsymbol{\nabla} \phi_f \cdot S_f$$

Equação discreta para sistemas estacionários

$$\sum_f \rho \phi_f S_f \cdot \mathbf{u} + \sum_f \Gamma_F \boldsymbol{\nabla} \phi_f \cdot S_f + f_{\phi_c} V_c$$

$$a_P \phi_P + \sum_{viz} a_{viz} \phi_{viz} = b_P$$

Solução do sistema algébrico

Sistema algébrico resultante

$$\mathbf{A}\phi = \mathbf{b}$$

- Métodos de solução de sistemas lineares:
  - **Solução direta:** Resolve o problema exatamente. Possui erros de truncamento. Comparativamente, possui alto custo computacional. Interessante apenas em casos unidimensionais (1-D).
  - **Solução iterativa:** Obtém uma solução aproximada partindo de uma condição estimada inicial para a matriz. Menor custo computacional em problemas 3-D. Ex.: Gauss-Seidel, CG, GMRES, AMG, entre outros.

Análise do resultado

Análise do resultado

Objetivo

- Primeiro objetivo obrigatório: verificar a qualidade da solução encontrada.
- Obter as informações daquilo que "queremos" no problema físico posto.

Análise do resultado

Objetivo

- Primeiro objetivo obrigatório: verificar a qualidade da solução encontrada.
- Obter as informações daquilo que "queremos" no problema físico posto.

Principais programas

- Quase sempre há um programa "embutido" no pacote CFD (Fluent, CFX-Post, etc).
- Paraview (gratuito), Ensight, TecPlot, etc.

Análise do resultado

Objetivo

- Primeiro objetivo obrigatório: verificar a qualidade da solução encontrada.
- Obter as informações daquilo que "queremos" no problema físico posto.

Principais programas

- Quase sempre há um programa "embutido" no pacote CFD (Fluent, CFX-Post, etc).
- Paraview (gratuito), Ensight, TecPlot, etc.

Objetivos obrigatórios

- Verificar a convergência de malha
- Determinar se as condições de simulação foram adequadas (número de Courant, precisão numérica, etc).
- Avaliar se os modelos físicos foram bem aplicados e se os resultados são compatíveis.

Análise do resultado

Objetivo

- Primeiro objetivo obrigatório: verificar a qualidade da solução encontrada.
- Obter as informações daquilo que "queremos" no problema físico posto.

Principais programas

- Quase sempre há um programa "embutido" no pacote CFD (Fluent, CFX-Post, etc).
- Paraview (gratuito), Ensight, TecPlot, etc.

Objetivos obrigatórios

- Verificar a convergência de malha
- Determinar se as condições de simulação foram adequadas (número de Courant, precisão numérica, etc).
- Avaliar se os modelos físicos foram bem aplicados e se os resultados são compatíveis.Por exemplo:
  - Se a camada limite foi corretamente descrita (y^+).

Análise do resultado

Análise do resultado

Tipos de apresentação

- Gráficos 2-D (preferível)
- Gráficos de contorno (2-D e/ou 3-D)
- Apresentação das linhas de corrente, vetores, isovolumes, etc.
- Resultados integrados médios em área e/ou volume.
- Gráficos combinados

Análise do resultado

Tipos de apresentação

- Gráficos 2-D (preferível)
- Gráficos de contorno (2-D e/ou 3-D)
- Apresentação das linhas de corrente, vetores, isovolumes, etc.
- Resultados integrados médios em área e/ou volume.
- Gráficos combinados (**Cuidado!!! Podem ser bonitos e inúteis**)

Plano da apresentação

1. Introdução
2. Metodologia de solução do CFD
3. Seguindo os passos
4. Referências

Referências

- Versteeg, Malalasekra. An introduction to computational fluid dynamics (2ed.), 2007
- Há centenas de livros sobre o assunto.
  - Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1980
  - Hirsch. Numerical Computation of Internal and External Flows, 2007