



universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

2024/2025

Tópicos adicionais

V. A. F. Costa

MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Introdução

A generalidade dos softwares de CFD têm como base o cálculo de escoamentos

Geralmente incluem modelos de turbulência, de duas ou mais equações

Geralmente permitem a consideração de transferência de energia térmica, através da consideração de uma equação diferencial para a temperatura (balanço de energia interna)

Permitem facilmente a consideração de outros fenómenos/processos de transferência, por consideração das equações diferenciais adicionais adequadas (com a mesma forma da equação geral de conservação/balanço), uma por cada variável adicional

Situações não tão usuais, ou que não permitem um tratamento direto baseado numa ou em várias equações diferenciais gerais de conservação/balanço requerem tratamentos e/ou módulos especiais

Soluções CFD de base, com módulos adicionais para esses casos

Soluções de software comercial construídas, de base, a pensar em fenómenos multifísicos

MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Transferência simultânea de calor e de massa

Mais uma equação diferencial, neste caso para a fração mássica do componente (massa da espécie química j) em causa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_j) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_j) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_j) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_j) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho D_j \frac{\partial c_j}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho D_j \frac{\partial c_j}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho D_j \frac{\partial c_j}{\partial z}\right) + S_{m_j}$$

Se houver efeitos cruzados (influência das transferência de calor na transferência de massa, e da transferência de massa na transferência de calor (efeitos de Dufour e de Soret), eles entram como termos fonte das respectivas equações diferenciais

Dependência das propriedades não apenas da temperatura mas também da fração mássica dos componentes (espécies químicas) em causa

Pode haver mais que um componente mássico em causa (uma equação diferencial adicional para cada uma dessas frações mássicas)

...

MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Sistemas de malhas móveis, e de malhas adaptativas

Há problemas em que a malha deve acompanhar a evolução da solução

O domínio de cálculo, ele mesmo, evolui, e muda a localização das suas fronteiras, à medida que evolui o processo de cálculo

Muito do que se abordou da malha tem a ver apenas com as suas características geométricas; e a distribuição das variáveis a calcular?

Escoamentos de superfície livre

E se no domínio de cálculo há vários fluidos que não se misturam?

Nesse caso há interfaces entre os vários fluidos (exemplo de um reservatório de água parcialmente cheio)

Necessidade de determinar a localização (dinâmica) da interface de separação entre os dois fluidos: métodos de captura da localização da interface entre os dois fluidos

Condições de fronteira na interface

Condições de conservação na interface

...



MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Escoamentos multifásicos

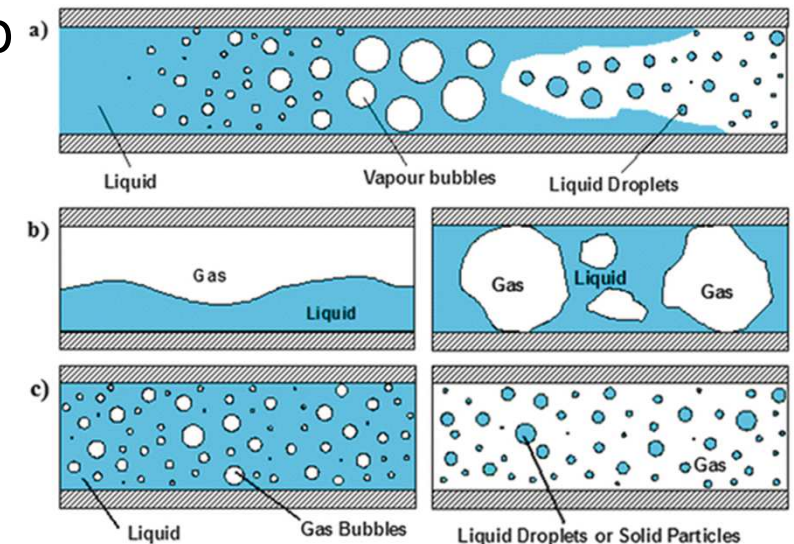
Há escoamentos que envolvem múltiplas fases: sólido (partículas), líquido, gasoso

Caso de leitos fluidizados, de sistemas de transporte de partículas, sistemas de despoeiramento, sistemas de combustão, sistemas de mistura combustível+ar...

Geralmente há uma abordagem Lagrangeana para acompanhamento das partículas sólidas, e uma abordagem Euleriana para o fluido

Necessidade de levar em consideração o two-way coupling: o escoamento interfere sobre o movimento das partículas, e o movimento das partículas interfere sobre o escoamento

...



MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Escoamentos em meios porosos

Há várias abordagens

Assumir o equilíbrio térmico local (localmente, igual temperatura para o fluido e para a matriz porosa)

Não assumir o equilíbrio térmico local, e considerar um coeficiente de troca de calor entre a matriz porosa e o fluido

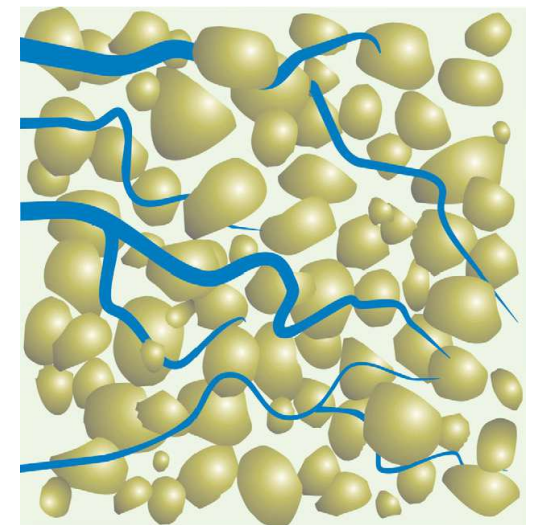
O fluido pode saturar totalmente, ou apenas parcialmente, a matriz porosa

Matriz porosa caracterizada por uma porosidade e por uma permeabilidade K (definida a partir da Lei de Darcy)

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_{tot}} \qquad u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

Relação de Kozeny-Carman

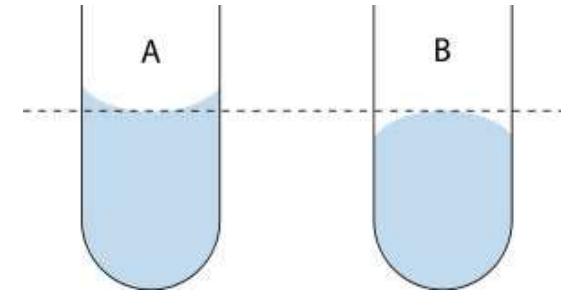
$$K = (\textit{esfericidade})^2 \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2}$$



MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Escoamentos em meios porosos

Necessidade de considerar fenómenos como a capilaridade



Usualmente considera-se o meio poroso saturado como uma única fase, com propriedades ‘médias’ correspondentes a uma combinação de fluido e de matriz porosa

Equação diferencial da quantidade de movimento (equação de Darcy-Brinkman-Forchheimer)

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \mathbf{v}) + \frac{1}{\varepsilon^2} [\nabla \cdot \rho_f \mathbf{v} \mathbf{v}] = -\nabla p - \underbrace{[\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{eff}]}_{\text{termo de Brinkman}} + \rho_f \mathbf{g} - \underbrace{\frac{\mu}{K} \mathbf{v}}_{\text{termo de Darcy}} - \underbrace{\frac{\rho_f c_F}{\sqrt{K}} |\mathbf{v}| \mathbf{v}}_{\text{termo de Forchheimer}}$$

MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Transferência de calor por radiação

Modo de transferência de calor substancialmente diferente da difusão e da advecção

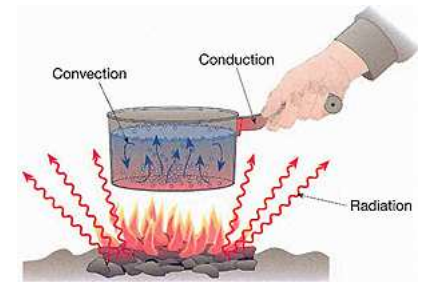
Geralmente descrito por leis ‘muito próprias’

Leis de transferência que se podem basear em métodos probabilísticos

Interação da radiação com os outros modos de transferência de calor

Condições de fronteira para a radiação

Sempre presente, mas nem sempre relevante



Combustão

Pode incluir muitos dos modos de transferência anteriormente referidos

Ligação forte entre os vários modos de transferência de calor e de massa

Adicionalmente, inclui a geração de grandes quantidades de energia térmica por unidade de volume (reações exotérmicas)

Fenómenos e processos que ocorrem a escalas espaciais e temporais muito diferentes, no mesmo domínio de cálculo

...



MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Interação fluido-estrutura

O fluido em escoamento interfere sobre as superfícies sólidas que o delimitam, as quais podem sofrer deformações sob a ação do fluido

O escoamento pode afetar, assim, as fronteiras do domínio fluido

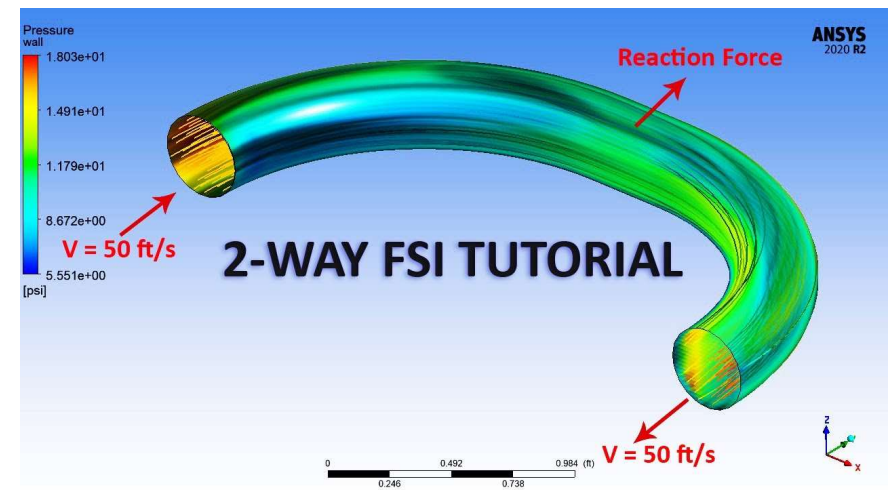
Interação mútua fluido-estrutura e estrutura-fluido

Necessidade de calcular, em simultâneo, as interações de um sobre o outro

No caso geral deve ser considerado o two-way coupling

Meios que flutuam no fluido, e meios que se deformam por ação do fluido

...



MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Escoamentos compressíveis

Relevantes em múltiplas aplicações em que o fluido é um gás ou um vapor

Aerodinâmica, turbomáquinas (ventiladores, compressores, turbinas, ...),
...

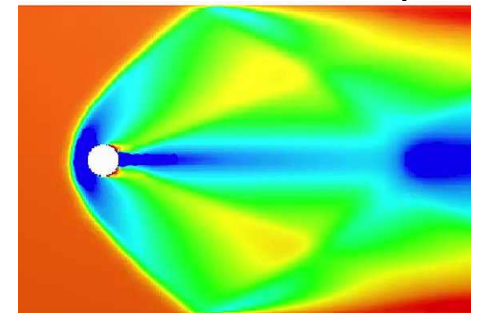
Equação de estado que relaciona massa volúmica, temperatura e pressão: por exemplo, para um gás ideal: $P = \rho RT$

Há adaptações dos métodos numéricos desenvolvidos para o cálculo de escoamentos incompressíveis para o cálculo de escoamentos compressíveis

Para velocidades elevadas pode haver o desenvolvimento de ondas de choque

Escoamento subsónico e escoamento supersónico (o número de Mach)

...



MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL

Notas finais

O uso de software de CFD para situações especiais requer, entre outros:

Estudo adicional sobre a física dessas situações especiais

Que o software tenha os módulos para o tratamento dessas situações especiais

Estudo adicional sobre como os módulos adicionais do software tratam essas situações especiais

Aprendizagem adicional sobre como usar o software para resolver essas situações especiais

Soluções de software para resolução de problemas multifísicos

