Aplicações de Transferência de Calor em CFD – Mini - curso

Engenharia Mecânica

URI – Campus de Erechim

Prof. Cristiano Vitorino da Silva

Objetivos: Implementar os principais modos de transferência de calor (condução, convecção e radiação, Figura 1.1) através de Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD, a fim de realizar uma introdução aos softwares de ICEM CDF (geometrias e malhas) e Ansys CFX (Volumes Finitos) verificando os resultados obtidos a fim de comprovar as teorias consolidadas na literatura.

1-Modos de transferência de calor

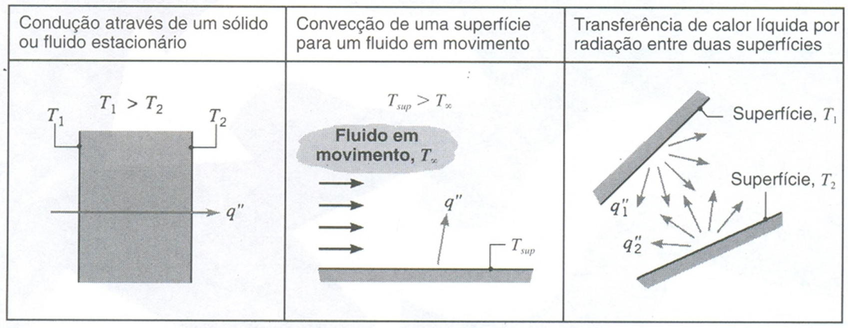


FIG. 1.1 Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

1.1 Condução: Meio SÓLIDO ou LÍQUIDO ESTACIONÁRIO.

A distribuição da temperatura num meio é modelada pela equação da difusão do calor:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}$$

Com a distribuição de temperaturas pode-se obter os fluxos de calor pela lei de Fourier:

$$q_x''=-k\frac{dT}{dx}$$

1.2 Convecção: SUPERFÍCIE SÓLIDA e um FLUIDO EM MOVIMENTO, tanto natural como forçada.

1.2.1 Convecção Forçada - O escoamento é causado por meio externo – ventilador por exemplo!

Neste tipo de escoamento, o parâmetro importante para se avaliar se o escoamento é laminar ou turbulento é o número de Reynolds

$$\mathrm{Re}_x=\frac{\rho u_\infty x}{\mu}\quad\begin{array}{l}\longrightarrow \text{Forças de Inércia}\\ \longrightarrow \text{Forças viscosas}\end{array}$$

As Figuras 6.6 e 6.7 mostram o desenvolvimento de uma camada limite sobre uma placa plana e os perfis de velocidades para escoamentos quanto em regime laminar e em regime turbulento. O principal parâmetro a ser determinado na transferência de calor é o coeficiente de convecção:

$$h = \frac{-k_f \, \partial T/\partial y\big|_{y=0}}{\left(T_s - T_\infty\right)}$$

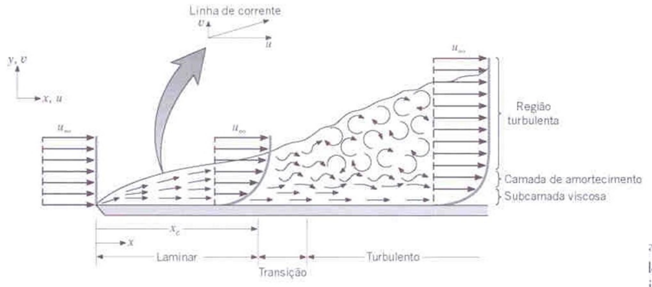
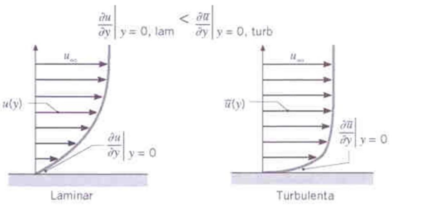


FIGURA 6.6 Desenvolvimento da camada-limite de velocidade sobre uma placa plana.



'IGURA 6.7 Comparação dos perfis de velocidades nas camadas-limite le velocidade laminar e turbulenta para a mesma velocidade na corrente ivre.[3]

1.2.2 Convecção Natural ou Livre - O escoamento é induzido por forças de empuxo originadas por diferenças de massa específica, a qual é dependente de:

$$\rho = f\left(p, T, N_\infty\right)$$

Na convecção livre ou natural os efeitos da transferência de calor verificada sobre uma superfície são verificados na camada limite, a qual pode ser modelada pelas equações abaixo:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = g\beta_T\left(T - T_\infty\right) + \gamma\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

$$\left(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}\right) = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)$$

É importante observar que as camadas limite de convecção natural não estão restritas ao escoamento laminar. INSTABILIDADES FLUIDODINÂMICAS PODEM APARECER.

Distúrbios no escoamento podem ser amplificados, levando à transição de escoamento laminar para turbulento. Ver Fig. 9.5.

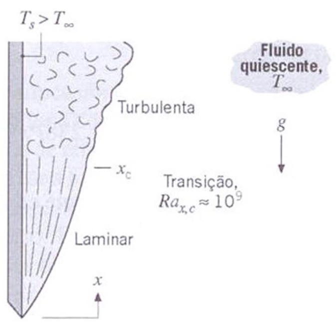


FIGURA 9.5 Transição na camada-limite de convecção natural em uma placa vertical.

Essa transição dependerá da magnitude relativa das forças de empuxo e das forças viscosas. É comum correlacionar sua ocorrência em termos do número de Rayleigh

$$Ra_{x,c} = Gr_{x,c}\,\mathrm{Pr} = \frac{g\beta\left(T_s - T_\infty\right)x^3}{\nu\alpha} \approx 10^9$$

onde

$$Gr_L \equiv \frac{g\beta\left(T_s - T_\infty\right)L^3 \longrightarrow \text{Forças de Empuxo}}{\nu^2 \longrightarrow \text{Forças viscosas}}$$

Quando se avaliam escoamentos confinados em cavidades com superfícies em temperaturas diferentes podem surgir as instabilidades devido a variações de massa específica produzindo efeitos distintos, como mostrado na Figura 9.1.

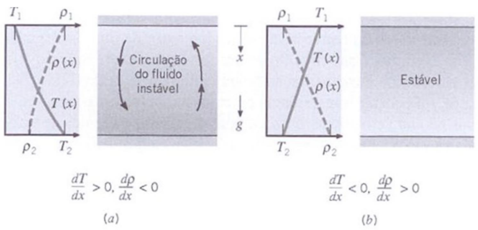


FIGURA 9.1 Condições em um fluido entre grandes placas horizontais a diferentes temperaturas. (*a*) Gradiente de temperatura instável. (*b*) Gradiente de temperatura estável.

Quando se tem a instalação da convecção natural pelo efeito do empuxo surgem escoamentos característicos de recirculação como os verificados na Figura C.1.

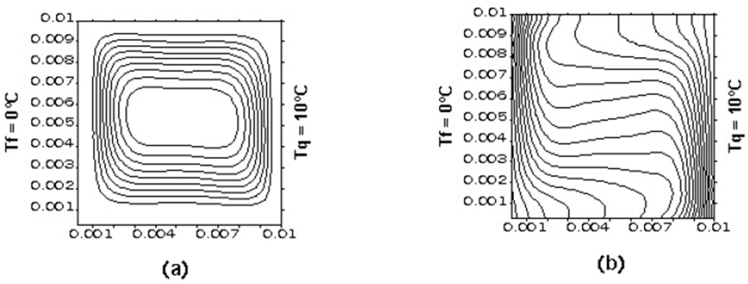


Figura C.1 – Problema clássico de convecção natural em uma cavidade quadrada: (a) Função de corrente, (b) Isotermas.

1.3 Radiação - NÃO PRECISA DE UM MEIO. Toda a superfície que tiver temperatura não nula (T >0K) transfere energia na forma de ondas eletromagnéticas. Assim, o espectro de radiação pode ser verificado na Figura 12.3.

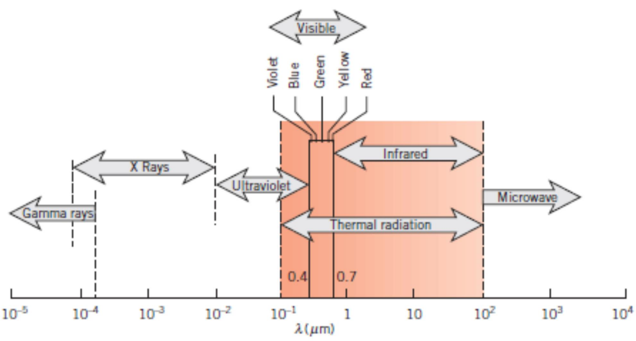


FIGURE 12.3 Spectrum of electromagnetic radiation.

Como a radiação é uma troca liquida de energia entre superfícies tem-se que mutuamente temos emissão e absorção de energia. Considere uma superfície de área dA, como a mostrada na Figura 12.9, verifica-se que a sua emissão se dará em diferentes direções sobre todo o hemisfério formado sobre esta superfície, considerando um ângulo sólido formado em torno de cada uma destas direções. Além disto, deve-se prever também a integração da radiação em seu espectro de emissão, considerando-se o meio participante ou não no processo.

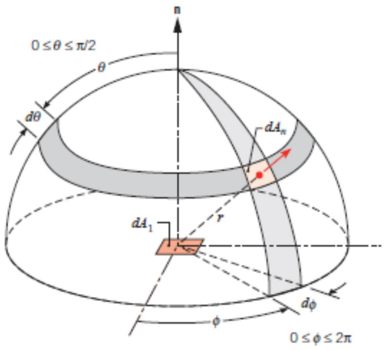


FIGURE 12.9 Emission from a differential element of area dA_1 into a hypothetical hemisphere centered at a point on dA_1.

A radiação é então modelada pela conhecida RTE – *Radiative Transfer Equation*. Existem vários métodos para a resolução da RTE sob o ponto de vista espacial da transferência de calor. Entretanto, não há um método que apresente bons resultados em todas as aplicações, cada um possui suas limitações e vantagens.

O modelo DTRM assume que a radiação que deixa a superfície de um elemento em uma determinada gama de ângulos sólidos pode ser aproximada pelo comportamento de um único raio. A equação para a variação da intensidade radiante (*I*) em [W/m²] ao longo do percurso (s) em [m], já considerando-se o meio difuso, é definida por,

$$\frac{dI}{ds} + \alpha I = \frac{\alpha \sigma T^4}{\pi}$$

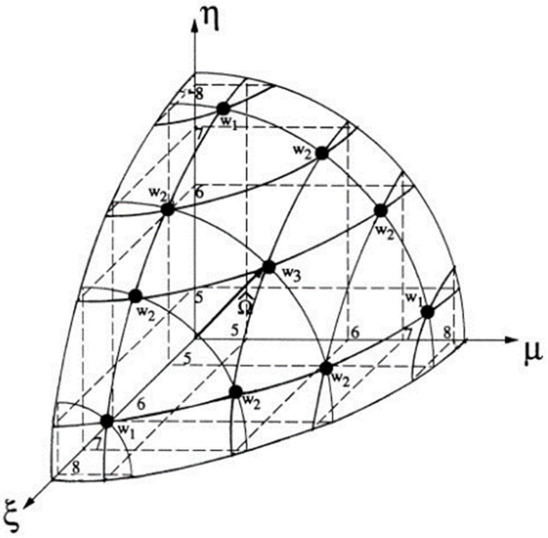
onde α representa o coeficiente de absorção gasosa em [1/atm.m], T representa a temperatura local do gás em [K], σ é a constante de Stefan-Boltzmann, no valor de 5,67 x 10^{-8} [W/m².K4].

O DTRM integra a equação anterior ao longo de uma série de raios, logo, se α é constante ao longo do raio, I(s) pode ser determinada por:

$$I(s) = \frac{\sigma T^4}{\pi} \times \left(1 - e^{-\alpha s}\right) + I_0 e^{-\alpha s}$$

onde I_0 é a intensidade de radiação no início do percurso incremental, o qual é determinado pela condição de contorno apropriada. A fonte de energia no fluido devido à radiação é então calculada assumindo-se a mudança da intensidade ao longo do percurso para cada raio, que é rastreado através do volume de controle. A acurácia deste modelo é limitada em relação ao número de raios utilizados, sendo que um valor razoável seria de 8 raios.

Apesar da natureza isotrópica da radiação, a discretização da radiação em 16 raios torna resolução numérica computacional simplificada, pois a equação é resolvida apenas para cada raio, em todos os volumes finitos que compõem a malha. A Figura 12.10 apresenta a quarta parte de um hemisfério de um volume finito e os pontos de discretização. Os raios partem do centro do volume e atravessam os pontos grifados.



12.10 – Volume finito submetido a um fluxo de calor radiativo.

1.3.1 Modelo Espectral GG – Gray Gas

Este modelo é um dos mais simples e apresenta limitações, já que para uma espécie química gasosa o coeficiente de absorção sofre grande variação, em função do comprimento de onda. Entretanto trata-se de um modelo muito difundido que pode ser útil em várias aplicações de engenharia, além de reduzir significativamente o esforço computacional requerido c apresentando resultados satisfatórios.

2-Modelagem básica de um escoamento não isotérmico turbulento em CDF

A modelagem básica de um escoamento um escoamento não isotérmico turbulento em CDF consiste na aplicação das equações de conservação de massa e espécies, quantidade de movimento e de energia, além de modelos de turbulência como o k-ε ou o k-ω. A seguir apresentam-se estas equações.

2.1 Conservação de Massa e Espécie

A primeira equação resolvida pelo sistema é a conservação de massa e espécies químicas. Ela é resolvida para velocidade, pressão, temperatura dentre outras propriedades do fluido. O escoamento médio é modelado utilizando campos simples de temperatura, pressão, velocidade e turbulência. De acordo com Ansys (2011), para fluidos multicomponente, em regime estacionário, considerando-se a média de Favre, a equação de conservação pode ser expressa como descrito abaixo.

$$\frac{\partial\left(\tilde{\rho}_i \tilde{U}_j\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho_i\left(\tilde{U}_{ij}-\tilde{U}_j\right) - \overline{\tilde{\rho}_i''U_j''}\right) + S_i$$

Sendo o termo $\tilde{U}_j = \sum\left(\tilde{\rho}_i \tilde{U}_{ij}\right) \Big/ \overline{\rho}.\tilde{\rho}_i$ a velocidade média em m/s; $\bar{\rho}$ a massa específica kg/m3; $\overline{U}_j$ é o vetor da velocidade também em m/s e $\widetilde{U}_{ij}$ é a velocidade da massa média do componente fluido *ij* m/s. O termo $\rho_i\left(\tilde{U}_{ij}-\tilde{U}_j\right)$ denota a vazão mássica específica dada em kg/m².s. O último termo da equação é o termo fonte S_i. Ele compreende as reações químicas, e quando se trata de um escoamento sem reações, gerações ou consumo de um dado componente i, seu valor é zero. O termo de vazão mássica relativa é modelado para o movimento relativo dos componentes da mistura e o principal efeito é o do gradiente de concentração, conforme descrito por:

$$\rho_i\left(\tilde{U}_{ij}-\tilde{U}_j\right)=-\frac{\rho D_i}{\bar{\rho}}\frac{\partial\tilde{\rho}_i}{\partial x_i}$$

onde D_i é a difusividade cinemática em m^2/s.

Com a substituição dos termos dessas expressões na equação da conserva~]ao da massa, considerando os termos turbulentos escalares sujeitos à uma dissipação turbulenta, obtêm-se equação da conservação de espécies químicas:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\tilde{U}_j\tilde{Y}_i\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\rho D_i+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial\tilde{Y}_i}{\partial x_j}\right)+\bar{S}_i$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta (Ns)/m^2 e Sc_t é o número de Schmidt turbulento.

2.2 Conservação da Quantidade de Movimento

A conservação da quantidade de movimento para o escoamento do fluido é obtida através de ANSYS:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\tilde{U}_i\tilde{U}_j\right)=-\frac{\partial p^*}{\partial x_j}\delta_{ij}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\tilde{U}_i}{\partial x_j}\right)+\frac{\partial\tilde{U}}{\partial x_j\partial x_i}+\bar{S}_U$$

onde $\mu_{eff}=\mu+\mu_t$, sendo μ a viscosidade dinâmica (Ns)/m^2 e μ_t a viscosidade turbulenta em (Ns)/m^2 definida como $\mu_t=C_\mu\rho k^2/\varepsilon$. O termo $p^*=\bar{p}-(2/3)k$ é a pressão modificada em Pa, C_μ é uma constante empírica para o modelo de turbulência, sendo igual a 0,09, $\bar{p}$ é a pressão média da mistura gasosa expressa em Pa e δ_{ij} é a função delta de Kronecker. $\bar{S}_U$ é o termo fonte, inserido para modelar o empuxo e a força de arrasto gerada pelo transporte de partículas, e outros termos matemáticos gerados pelos modelos de turbulência, dado em W/m³. O modelo de Boussinesq é empregado para representar a força de empuxo gerada pelas variações de densidade e o modelo *k-ω* é aplicado para descrever a turbulência no escoamento (WILCOX, 1988).

2.3 Conservação de Energia

O transporte de energia em função da difusão de cada espécie química pode ser determinado por

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\tilde{U}_j\tilde{h}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_{con}\frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_j}+\sum_i^{Nc}\tilde{h}_i\left(\rho D_i+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial\tilde{Y}_i}{\partial x_j}+c_p\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_j}\right)+\bar{S}_T$$

onde $\tilde{h}$ é a entalpia média kJ/kg e c_p é o calor específico em kJ/(kgK), que é determinado por $c_p=\sum_i\tilde{Y}_i c_{p,i}$, onde $c_{p,i}$ e $\tilde{Y}_i$ são o calor específico e a média da fração mássica da i-espécies química da mistura; $k_{condução}$ é a condutividade térmica dada em W/mK, Pr_t é o número turbulento de Prandtl, e $\overline{S}_T$ representam as fontes de energia térmica devido a transferência por radiação, as reações químicas e sumidouro de energia cuja unidade é W/m³, respectivamente.

2.4 Modelo de Turbulência k – ω

O modelo de turbulência k - ω, implementado, assume que a viscosidade turbulenta é conectada à energia cinética turbulenta e à frequência da turbulência através da equação abaixo:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$$

Conforme Wilcox (1988), as equações para energia cinética turbulenta, k, e sua frequência turbulenta, ω, podem ser obtidas conforme.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho}\widetilde{U}_j \omega\right) = \left(\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + P_k - \beta' \rho k \omega$$

e

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\rho}\widetilde{U}_j \omega\right) = \left(\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2$$

onde β', β e α são constantes empíricas do modelo de turbulência, σ_k e σ_ω são os números de Prandtl de energia cinética e frequência, respectivamente, e P_k é o termo fonte que representa produção ou destruição de energia cinética turbulenta dado por $P_k = \mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$.

3-Aplicações

A seguir apresentam-se os casos a serem resolvidos para condução numa placa plana 2D, convecção forçada num tubo, convecção livre numa cavidade retangular e radiação de uma superfície para um meio semiesférico.

3.1 Condução

A geometria a ser implementada no ICEM CFD está mostrada na Figura 3.1. Adotar dimensões em metros no ICEM.

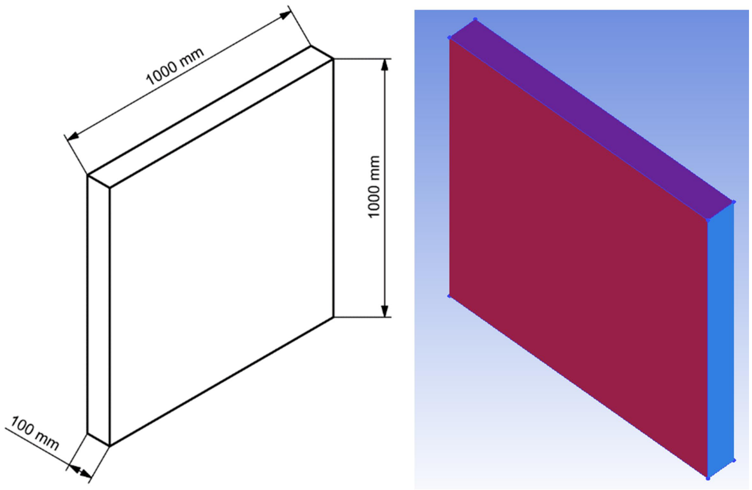
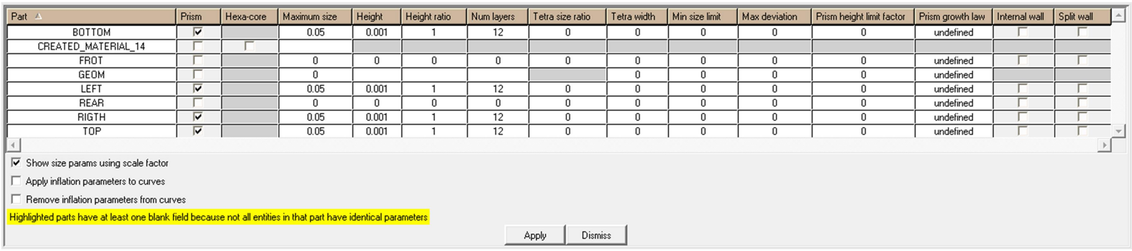


Figura 3.1 – Placa plana 2D.

Para esta geometria implementar uma malha com tamanho máximo para os volumes de controle de 0,05 m, considerando-se prismas para superfícies laterais direita e esquerda e inferior e superior como mostrado na Figura 3.2.



Part	Prism	Hexa-core	Maximum size	Height	Height ratio	Num layers	Tetra size ratio	Tetra width	Min size limit	Max deviation	Prism height limit factor	Prism growth law	Internal wall	Split wall
BOTTOM	☑		0.05	0.001	1	12	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐
CREATED_MATERIAL_14	☐	☐												
FROT	☐		0	0	0	0	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐
GEOM	☐		0					0	0	0	0	undefined		
LEFT	☑		0.05	0.001	1	12	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐
REAR	☐		0	0	0	0	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐
RIGTH	☑		0.05	0.001	1	12	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐
TOP	☑		0.05	0.001	1	12	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐

☑ Show size params using scale factor
☐ Apply inflation parameters to curves
☐ Remove inflation parameters from curves
Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters
Apply Dismiss

Figura 3.2 – Configuração da malha.

Como resultado tem-se a malha gerada e apresentada na Figura 3.3.

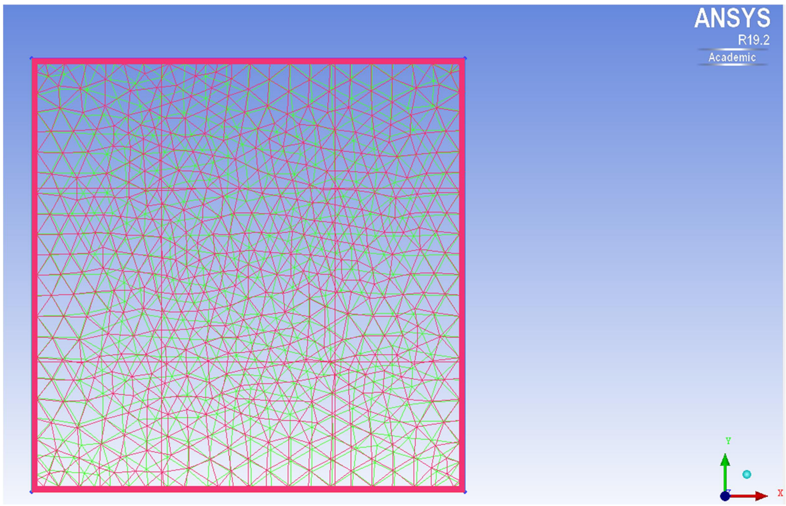


Figura 3.3 –Malha tetraédrica com prismas.

Para implementar o caso no CFX adotar a opção “General Mode”. Usar como material sólido o alumínio. Prescrever como condições de contorno Primeira Espécie (T prescrito) com valore igual a 100ºC na base, e demais superfícies prescrever também temperatura, e igual a 0ºC.

Após a solução realizada visualizar resultados, como os mostrados na Figura 3.4.

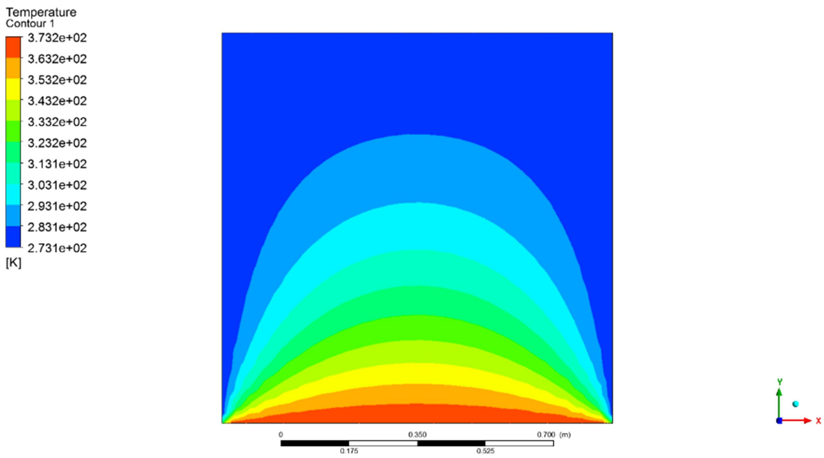


Figura 3.4 – Distribuição de temperaturas.

Testar também demais condições de contorno, com fluxo de calor por convecção prescrito, assumindo T_∞ = 100ºC e h = 100 W/m^{2}ºC na base, mantendo-se as demais condições de contorno do caso anterior.

3.1 Convecção - Forçada

A geometria a ser implementada no ICEM CFD está mostrada na Figura 3.5. Adotar dimensões em milímetros no ICEM.

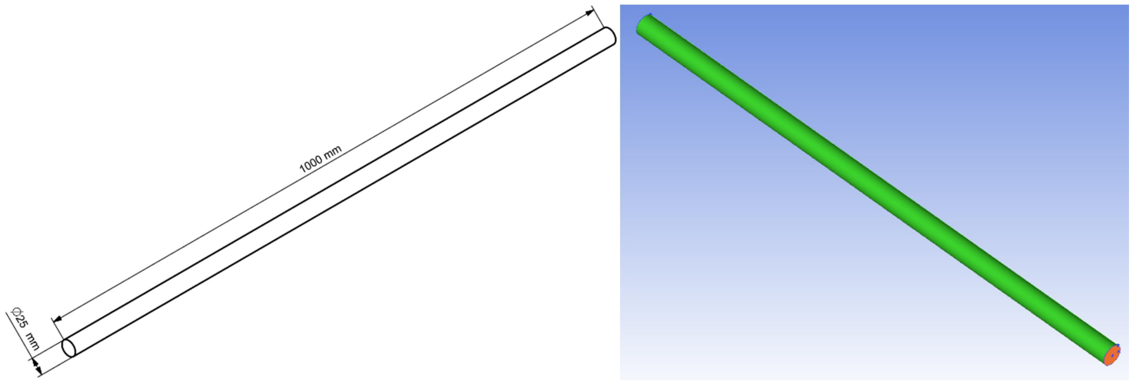


Figura 3.5 – Tubo cilíndrico 3D.

Para esta geometria implementar uma malha com tamanho máximo para os volumes de controle de 5 mm, considerando-se prismas apenas na superfície cilíndrica como mostrado na Figura 3.6.

Part	Prism	Hexa-core	Maximum size	Height	Height ratio	Num layers	Tetra size ratio	Tetra width	Min size limit	Max deviation	Prism height limit factor	Prism growth law	Internal wall	Split wall
CREATED_MATERIAL_6	☐	☐												
GEOM	☐		0					0	0	0	0	undefined		
IN	☐		5	0	0	0	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐
OUT	☐		5	0	0	0	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐
WALL	☑		5	0.1	1	12	0	0	0	0	0	undefined	☐	☐

☑ Show size params using scale factor
☐ Apply inflation parameters to curves
☐ Remove inflation parameters from curves
Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters
Apply Dismiss

Figura 3.6 – Configuração da malha.

Como resultado tem-se a malha gerada e apresentada na Figura 3.7.

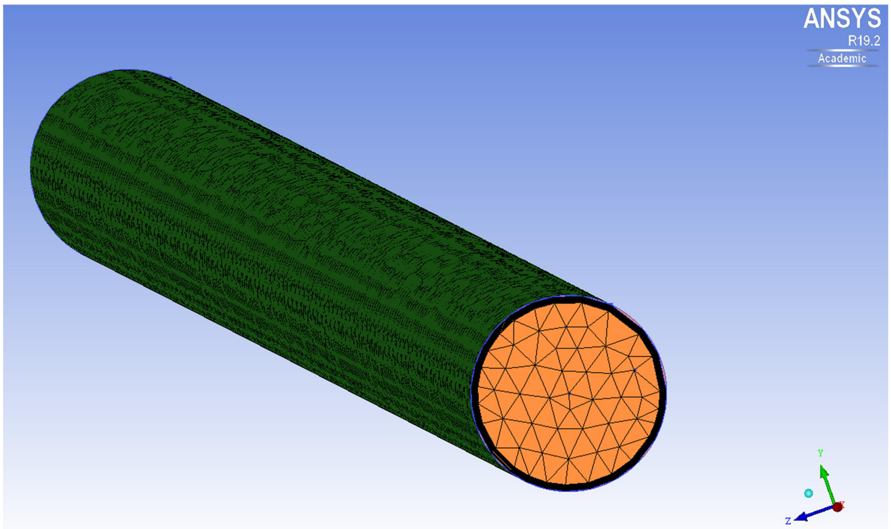


Figura 3.7 –Malha tetraédrica com prismas.

Para implementar o caso no CFX adotar a opção “General Mode”. Usar como material fluido o ar como gás perfeito, prescrevendo-se o modelo k-ω para prever a turbulência. Prescrever como condições de contorno Primeira Espécie (*T* prescrito) com valores para superfície tubular igual a 600ºC, sendo que para a entrada deve prescrever velocidade uniforme de 5 m/s e temperatura de 20ºC, com intensidade de turbulência igual a 10%. Na saída prescrever pressão relativa de 0 Pa.

Após a solução realizada visualizar resultados, como os mostrados na Figura 3.8.

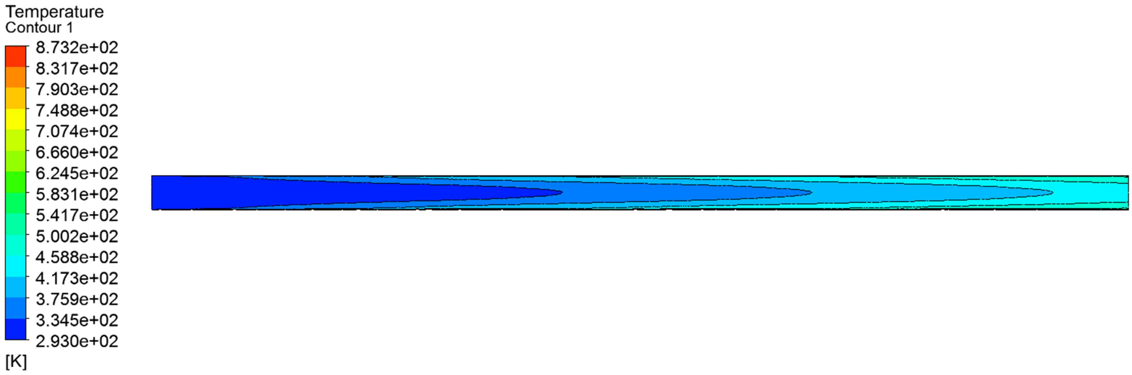


Figura 3.8 – Distribuição de temperaturas.

3.1 Convecção - Natural

Para implementação do caso de convecção natural ou livre adota-se a mesma geometria do caso de condução, considerando-se que a placa plana seja uma cavidade 3D retangular.

Para implementar o caso no CFX adotar a opção “General Mode”. Usar como material o ar como gás perfeito. Prescrever como condições de contorno Primeira Espécie (*T* prescrito) com valores para topo igual a 10 ºC, sendo para a base 100 ºC, e demais superfícies prescrever condições de isolamento. Prescrever a gravidade em y como -9,81 m/s^2, e a densidade de referência como sendo 1,15 kg/m^3. Considerar modelo k-ω com produção e dissipação turbulentas para o empuxo. Como caso B, fazer inversão dos valores das temperaturas no topo e na base.

Após a solução realizada visualizar resultados, como os mostrados na Figuras 3.9 e 3.10.

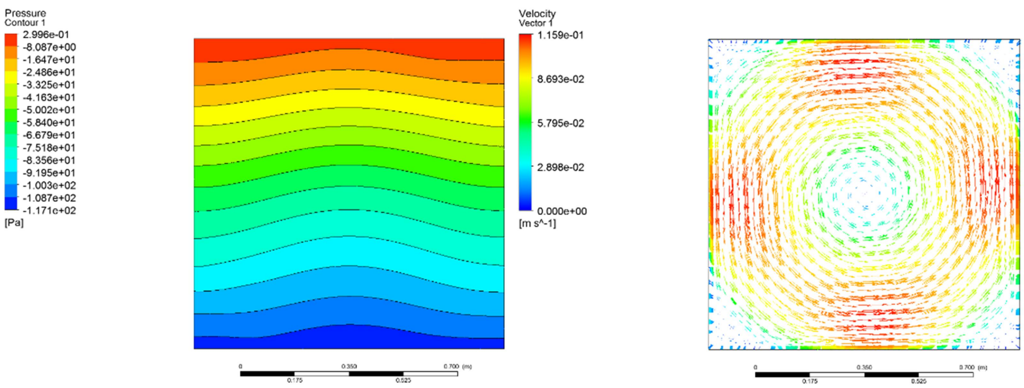


Figura 3.9 – Distribuição de pressões e velocidades.

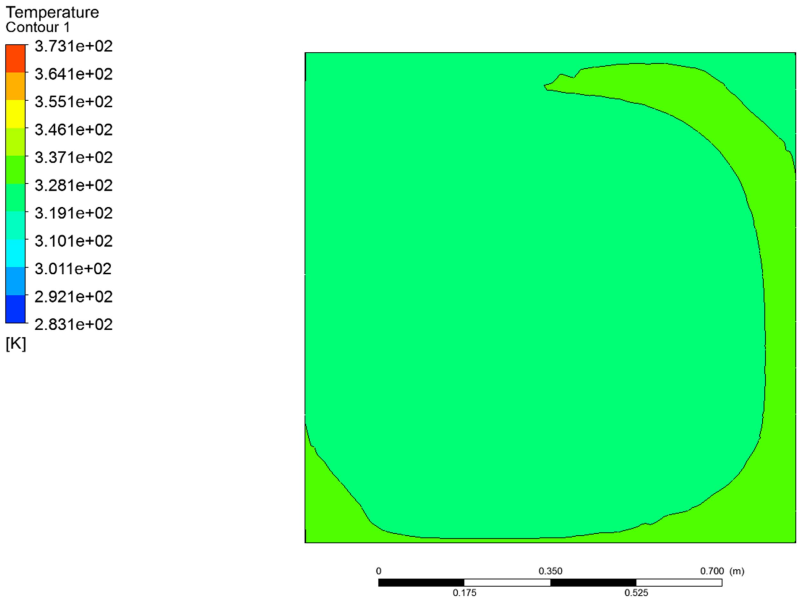


Figura 3.10 – Distribuição de velocidades.

3.1 Radiação

A geometria a ser implementada no ICEM CFD está mostrada na Figura 3.11. Adotar dimensões em milímetros no ICEM.

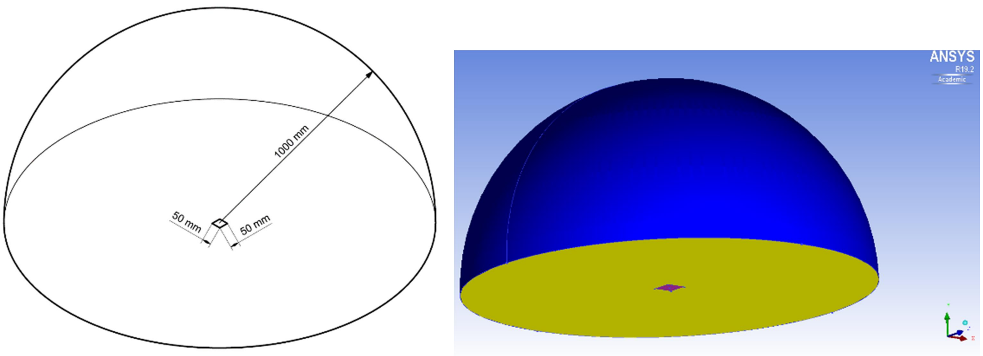


Figura 3.11 – Semiesfera sobre superfície retangular 2D.

Para esta geometria implementar uma malha com tamanho máximo para os volumes de controle de 50 mm, sendo que para a superfície da placa 2D o tamanho deve ser prescrito em 10 mm. Como resultado tem-se a malha gerada e apresentada na Figura 3.12.

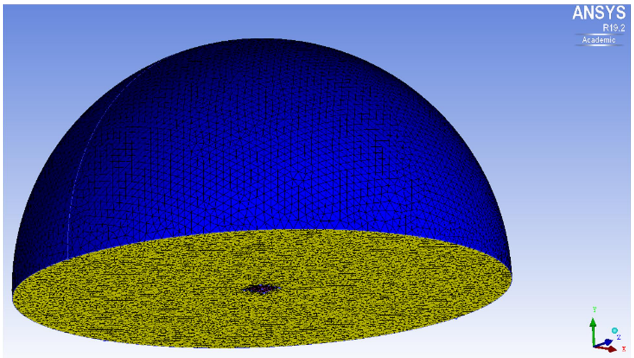


Figura 3.12 –Malha tetraédrica com prismas.

Para implementação do caso de radiação adota-se a mesma geometria apresentada na Figura 3.11, considerando-se que exista uma placa plana retangular no centro da base desta geometria 3D.

Para implementar o caso no CFX adotar a opção "General Mode". Usar como material o ar como gás perfeito e assumir escoamento laminar. Prescrever como condições de contorno Primeira Espécie (T prescrito) na parede esférica igual a 1000 ºC, sendo para placa sobre a base prescrever uma condição de terceira espécie ($T_{\infty} = 20$ ºC; $h_{\infty} = 100$ W/m^{2}K). Na Base prescrever condição de simetria. Desconsiderar a convecção natural e prescrever meio participante. Nos materiais, prescrever o valor de 0,02428x10^{-50} W/mK (isto equivale a zero numérico) para condutividade térmica; e 0 m^{-1} para a absortividade do meio. Para placa e para a superfície esférica prescrever emissividade de 1 (corpo negro). Nas condições iniciais prescrever temperatura de 20ºC.

Após a solução realizada visualizar resultados, como os mostrados na Figuras 3.13.

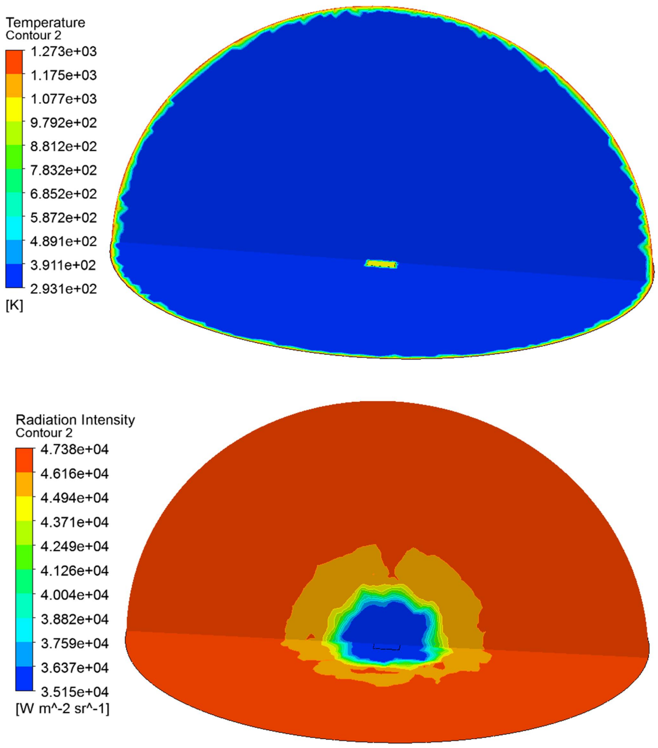


Figura 3.12 – Distribuição de temperaturas e Intensidade de radiação.

É possível na Figura 3.13 verificar os 16 raios onde são resolvidas a RTE sobre a semiesfera.

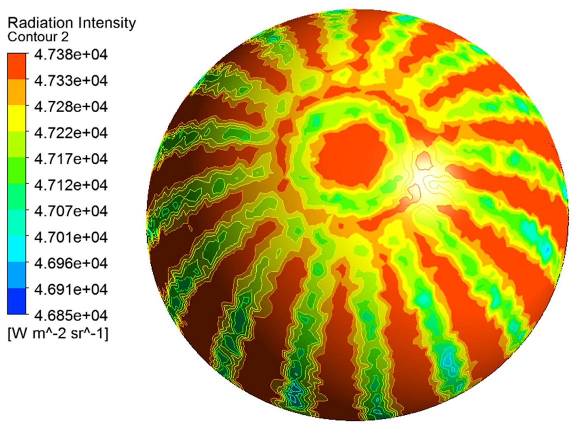


Figura 3.13 –Intensidade de radiação sobre a semiesfera.