

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa:	<b>Escoamento rarefeito sobre placas planas, esferas e cilindros: Um exercício de verificação e validação</b>
Bolsista:	Matheus Medeiros Maciel Monjon
Orientador(a):	Rodrigo Cassineli Palharini
Período a que se refere o relatório:	Agosto de 2016 à Julho de 2017

### Resumo

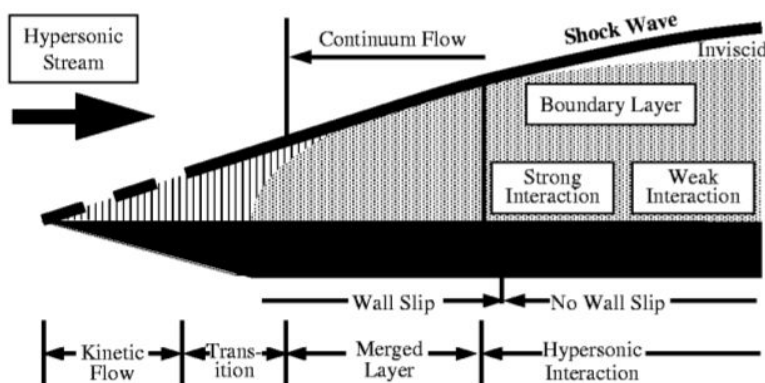
Escoamento sobre geometrias simples tais como placas planas, esferas e cilindros têm sido amplamente utilizado para a validação e verificação de códigos computacionais. Devido a sua simplicidade e por suas características aerodinâmicas serem bem conhecidas, muitos estudos têm utilizado essas geometrias em investigações numéricas e experimentais. O presente estudo, utilizou-se a ferramenta OpenFOAM para a resolução de casos tutoriais visando um primeiro contato com uma ferramenta de simulação computacional. Após a realização dos tutoriais, o código dsmcFoam foi utilizado para resolver um escoamento hipersônico rarefeito sobre uma placa plana. Os resultados obtidos para este caso foram comparados com aqueles disponíveis na literatura. No próximo relatório serão apresentados os resultados computacionais obtidos para escoamentos sobre esferas e cilindros.

### 1. Introdução

Validação e verificação de códigos computacionais são de grande importância para que possamos estabelecer confiança e credibilidade. Para tal fim, inúmeros trabalhos numéricos, experimentais, e teóricos têm sido feitos para tal fim [1-3]. Geralmente, nestes estudos são utilizados escoamentos sobre geometrias simples onde já se conhece com detalhe a estrutura do escoamento ao redor do

objeto. Figura 1 mostra um exemplo de estrutura de escoamento ao redor de uma placa plana.

Neste relatório são apresentados os resultados iniciais de um projeto de iniciação científica onde casos tutoriais foram resolvidos e um escoamento rarefeito sobre uma placa plana foi realizado e os resultados obtidos foram comparados com aqueles disponíveis na literatura.



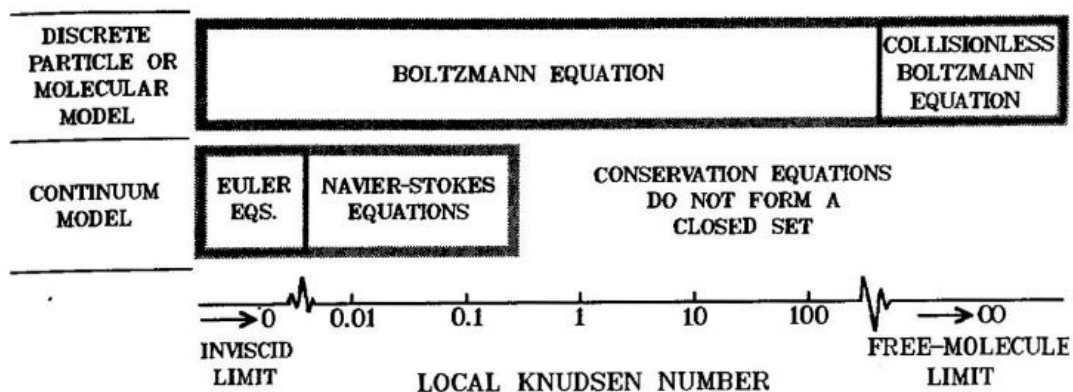
**Figura 1:** Escoamento hipersônico sobre uma placa plana [3].

## 2. Método computacional

O presente estudo utiliza a técnica computacional “Direct Simulation Monte Carlo” (DSMC) para a realização das simulações. Para o entendimento da técnica DSMC é necessário primeiro entender que DSMC é um técnica estatístico de resolução de diversos problemas matemáticos e probabilísticos baseados na geração computacional de números randômicos. O DSMC utiliza o método Monte Carlo para simulações de escoamentos de gases rarefeitos descritos em termos de probabilidades de colisão entre as moléculas de gás. Proposto pelo Professor de Aeronáutica Graeme Bird, da Universidade de Sydney, o método DSMC é utilizado quando o livre caminho médio, distância média entre sucessivas colisões moleculares, está em uma escala semelhante à aquela do problema a ser atacado. O número de Knudsen é um número adimensional que descreve o grau de rarefação de um gás,

$$Kn = \lambda/L \tag{1}$$

em que  $\lambda$  é o livre caminho médio das moléculas e  $L$  é a dimensão característica do escoamento. A equação de Navier-Stokes (NS) resolve os problemas de gases no regime do contínuo e com o  $Kn$  menores do que 0.1 [4]. Devido aos efeitos de rarefação, NS não pode ser utilizadas para  $Kn > 0.1$ . Nessa condição, o método DSMC apresenta melhores resultados.



**Figura 2:** Limites do número de Knudsen [4].

No presente trabalho foi utilizado o código computacional dsmcFoam. Este código foi desenvolvido pela University of Strathclyde [5] e disponível através da ferramenta computacional OpenFoam. Uma simulação no OpenFoam é constituída de: pré-processamento, que utiliza ferramentas de criação de malha; a resolução do problema por meio dos códigos computacionais de acordo com as necessidades do usuário; e pós-processamento, na qual é utilizado os dados do caso resolvido para visualização em softwares com o Paraview [6]. A utilização de softwares CFD licenciados possui um alto custo, enquanto a utilização do OpenFoam é gratuita, possibilitando a utilização dos seus diversos recursos para a resolução de problemas da engenharia. A versão do OpenFoam utilizada nos casos deste trabalho é a 2.4.0.

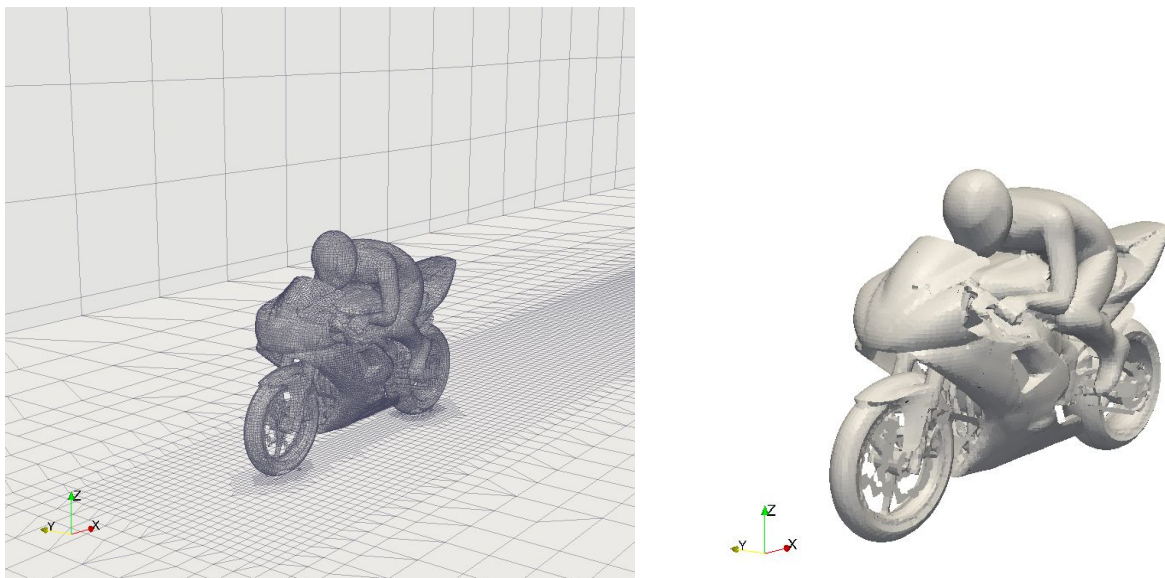
### 3. Resultados computacionais

Para o desenvolvimento deste projeto, este foi dividido em duas partes: 1) resolução de casos tutoriais para o aprendizado da ferramenta OpenFOAM e 2) utilização do código dsmcFoam para a resolução dos problemas propostos. Na

primeira parte deste projeto cerca de 4 casos tutoriais foram resolvidos; entretanto, somente o caso “motorBike” será mostrado neste relatório. Na segunda parte deste projeto foi necessário o aprendizado da técnica computacional “Direct Simulation Monte Carlo”. Esta técnica, implementado no código dsmcFoam, foi utilizada para resolver um escoamento rarefeito hipersônico sobre uma placa plana. Os resultados obtidos serão discutidos nas próximas seções.

#### 4.1 Escoamento sobre uma moto de corrida

Para a resolução deste caso tutorial, utilizou-se o código CFD simpleFoam, disponível no pacote computacional OpenFOAM. Este código é utilizado para escoamentos incompressivos onde a modelagem de turbulência pode ser ativada e desativada. A malha computacional e a geometria utilizada é mostrada na Figura 3.

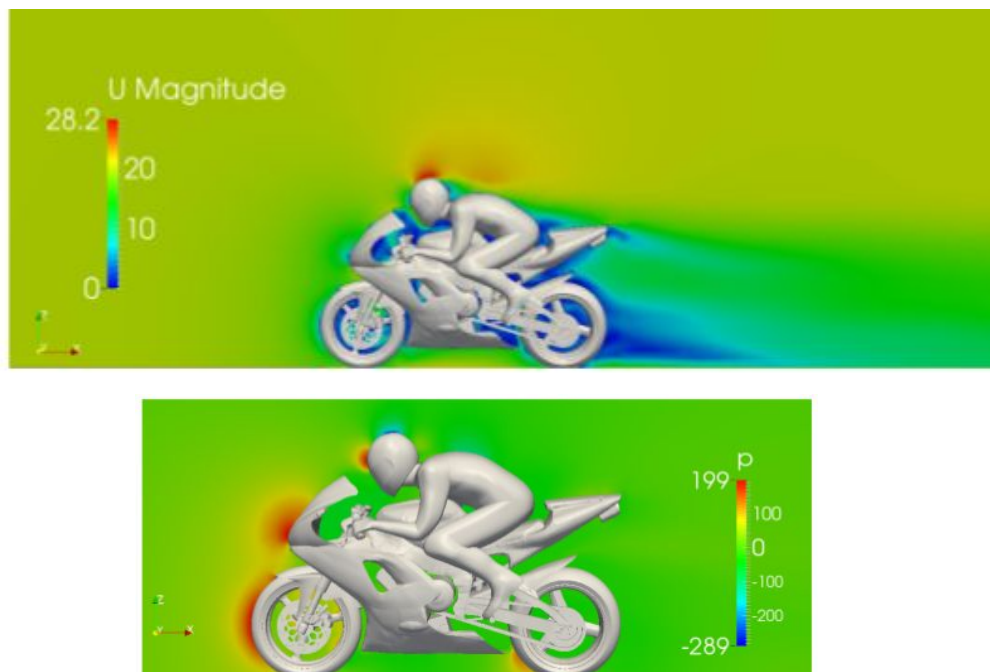


**Figura 3:** a) Malha computacional e b) geometria da moto de corrida.

Um escoamento de ar com velocidade de 20 m/s sobre a moto foi simulado utilizando o código simpleFoam. A geometria moto mais motociclista foi disponibilizada pelo OpenFOAM na qual suas dimensão é de 2x0.8x1.3 metros. Para esta simulação, o domínio computacional foi elaborado utilizando-se das

ferramentas blockMesh e snappyHexMesh. O total de células computacionais utilizadas para a resolução do problema foi de 307299 elementos. Longe da superfície da moto as dimensões das células computacionais utilizadas foram de 1x1x1 metro; entretanto, uma zona de refinamento ao redor do conjunto moto mais motociclista foi utilizada para que os efeitos de turbulência fossem capturados. Para este caso, o número de Reynolds foi de  $6.7 \times 10^5$  e o passo no tempo utilizado foi de 1 segundo

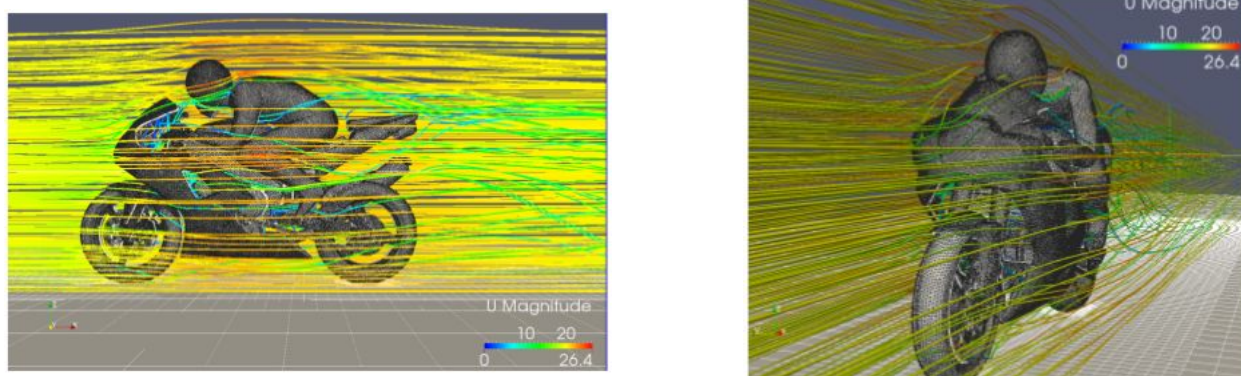
Figura XXX mostra a distribuição de velocidade e pressão ao redor da moto de corrida. Como podemos perceber na Figura 4 a), a velocidade do escoamento de ar é reduzida perto da superfície da moto, principalmente na região da esteira. Entretanto, podemos verificar um significativo aumento da velocidade ao redor do capacete do motociclista. Na região da viseira a velocidade é baixa e a medida que o ar escoar ao redor da superfície curva do capacete, este é acelerado e expande atrás do motociclista.



**Figura 4:** Distribuição de velocidade e pressão ao redor da moto.

Na Figura 5 é mostrada as linhas de corrente ao redor da moto de corrida. Esta é uma maneira eficiente de se visualizar o escoamento ao redor de um objeto.

Como podemos observar, a presença da moto perturba o escoamento e regiões de recirculação podem ser vistas a jusante da moto de corrida.



**Figura 5:** Linhas de corrente ao redor da moto.

#### 4.2 Escoamento hipersônico rarefeito sobre uma placa plana

O escoamento rarefeito sobre uma placa plana foi simulado utilizando a técnica “Direct Simulation Monte Carlo”. Para este caso o gás é composto puramente por moléculas de nitrogênio a uma velocidade e temperatura de 1073.80 m/s e 116 K, respectivamente. Estas condições de escoamento são equivalentes às aquelas apresentadas por Tisuboi et al. [3] em seu trabalho numérico/experimental. As condições do escoamento não perturbado estão tabuladas na Tabela 1.

Parâmetros	Velocidade ( $U_\infty$ )	Pressão ( $P_\infty$ )	Temperatura ( $T_\infty$ )	Massa específica ( $\rho_\infty$ )	LCM* ( $\lambda_\infty$ )
Valores	1073.80 [m/s]	2.12 [Pa]	116.00 [K]	$6.03 \times 10^{-05}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$7.95 \times 10^{-04}$ [m]

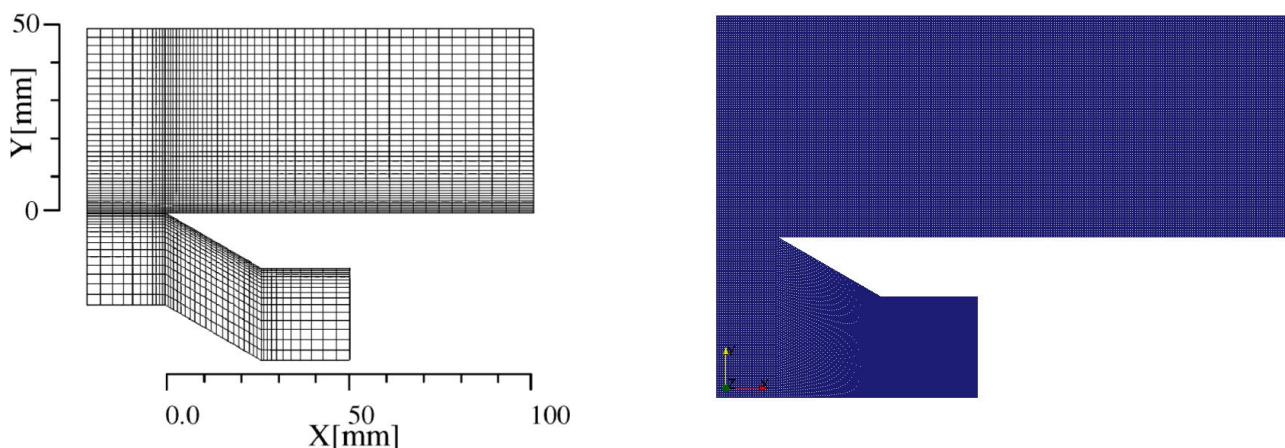
\* LCM - Livre caminho médio

**Tabela 1:** Condições do escoamento não perturbado [3].

Para a realização do experimento mencionado na referência [3] utilizou-se uma placa de cobre com 100 mm de largura por 130 mm com um ângulo de chanfro de 30°. A distância entre o bordo de ataque da placa e o bocal onde o gás nitrogênio era ejetado foi de 15 mm. Essas mesmas dimensões foram

utilizadas para a realização das simulações computacionais; entretanto, não levou-se em conta a largura da placa plana, ou seja, simulações foram realizadas sobre uma geometria em 2D. Os resultados das simulações para a geometria em 3D serão apresentadas nos próximos relatórios. Figura 6 mostra a malha computacional empregada na referência [3], a esquerda, e a malha computacional empregada no presente trabalho, a direita.

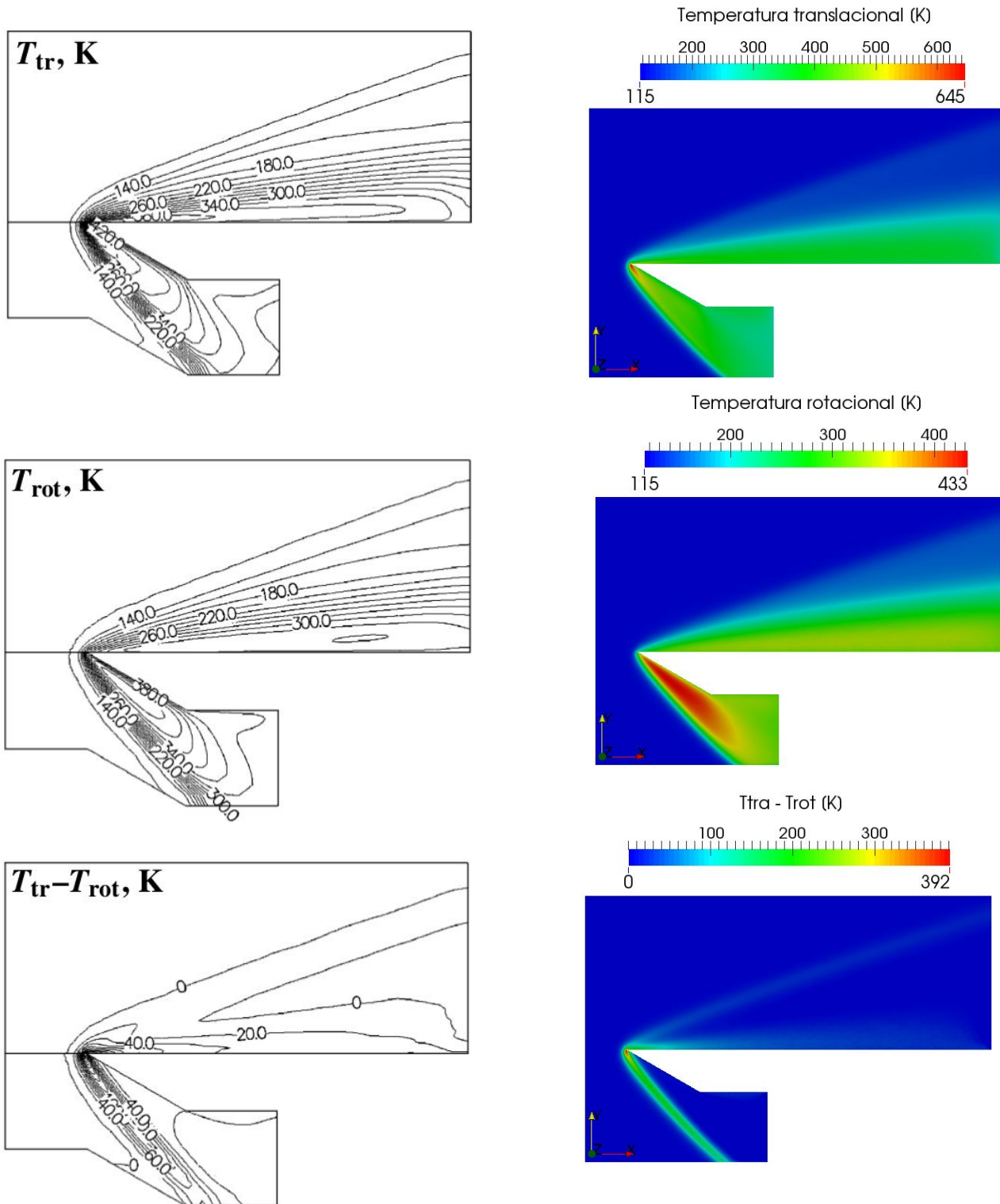
A malha computacional foi feita utilizando a ferramenta blockMesh, disponível no pacote do OpenFOAM. Após o término da malha 2D, 148664 células computacionais foram utilizadas e cada uma com dimensão de 1/3 do livre caminho médio. A temperatura na parede da placa plana foi fixada a 290 K e reflexão difusa foi utilizada como condição de contorno. O passo no tempo utilizado foi de  $5.0 \times 10^{-8}$  e foram necessários 40 processadores para a realização da simulação.



**Figura 6:** Malha computacional empregada por Tsuboi et al. (esquerda) e malha computacional empregada no presente trabalho (direita).

Os resultados obtidos para um escoamento de alta velocidade sobre uma placa plana estão mostrados nas Figuras 7 e 8 para distribuição de temperatura de massa específica, respectivamente. Os resultados obtidos são comparados com aqueles disponíveis na referência [3]. Figura 6 mostra a distribuição de temperatura translacional, rotacional e a diferença entre elas. Podemos observar que os resultados do presente trabalho possui uma boa concordância

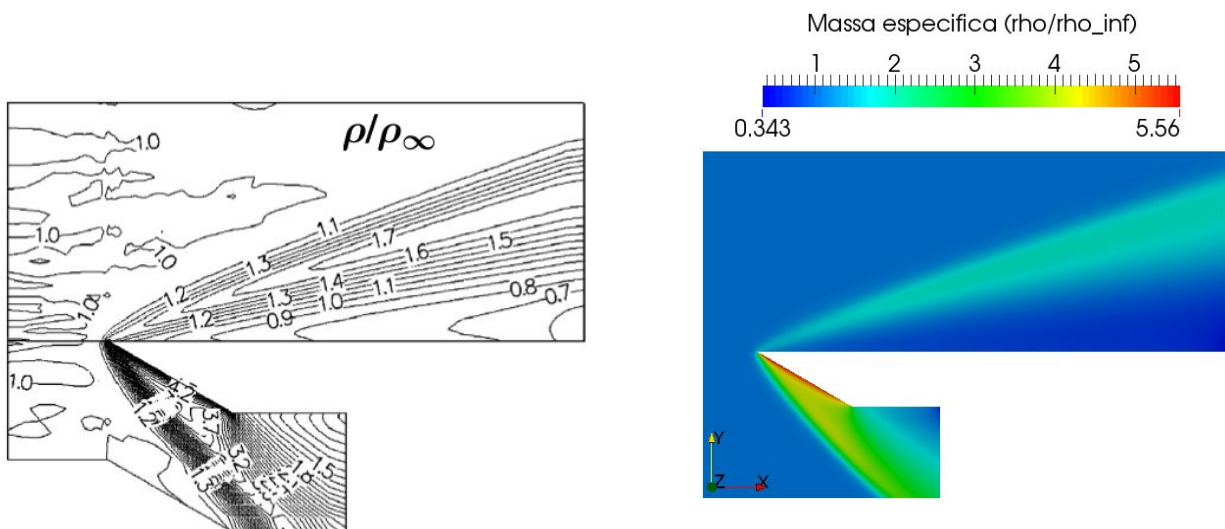
com aqueles disponibilizados por Tsuboi et al. [3] mesmo tendo simulado um escoamento em duas dimensões.



**Figura 7:** Contorno de temperatura ao redor da placa plana. Tsuboi et al. [3] (esquerda) e presente trabalho (direita).



Figura 8 mostra a distribuição de massa específica ao redor da placa plana. A massa específica computada está normalizada pela massa específica do meio não perbutado. De acordo com essa figura, os resultados obtidos no presente trabalho possuem uma boa concordância com aqueles mostrados por Tsuboi et al. em seu artigo.



**Figura 8:** Contorno de massa específica normalizada. Tsuboi et al. [3] (esquerda) e presente trabalho (direita).

## 5. Conclusões

No presente trabalho, utilizou-se a ferramenta OpenFOAM para a realização de simulações computacionais sobre diversas geometrias. Neste relatório, foram apresentados os resultados obtido no tutorial motorBike, onde se utilizou o código computacional pimpleFoam (CFD). Além disso, simulações computacionais de um escoamento sobre uma placa plana 2D foram realizadas utilizando o código dsmcFoam (DSMC). O primeiro caso teve como objetivo o aprendizado da ferramenta computacional OpenFOAM, já o segundo caso utilizou-se a técnica “Direct Simulation Monte Carlo”. Os resultados obtidos para o escoamento rarefeito de nitrogênio sobre a placa plana foram comparados com aqueles disponíveis na literatura e boa concordância foi demonstrada entre os resultados.

## 6. Próximas Etapas

Devido ao curto período de bolsa PIBIC (6 meses), os resultados computacionais obtidos até o presente momento são apresentados somente para uma placa plana em duas dimensões. Nas próximas etapas desse trabalho, serão simulados escoamentos rarefeitos sobre esferas e cilindros. Estes resultados serão apresentados e discutidos com mais detalhes nos próximos relatórios.

## 7. Agradecimentos

Agradecimentos Primeiramente ao Prof. Dr. Rodrigo Palharini pela oportunidade de iniciar o trabalho científico junto ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Também ao CNPq pelo financiamento à pesquisa científica.

## Referências

- [1] Nagamatsu, H. T., and Sheer, R. E., Jr., "Hypersonic Shock Wave-Boundary Layer Interaction and Leading Edge Slip," ARS Journal, Vol. 30, April 1960, pp. 454-462.
- [2] McCroskey, W. J., Bogdonoff, S. M., and McDougall, J. C., "An Experimental Model for the Sharp Flat Plate in Rarefied Hypersonic Flow," AIAA Journal, Vol. 4, No. 9, 1966, pp. 1580-1587.
- [3] Tsuboi, N. And Matsumoto, Y., "Experimental and Numerical Study of Hypersonic Rarefied GAs Flow over Flat Plates", AIAA Journal. Vol. 43, No. 6, 2005
- [4] Bird, G. A., Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Oxford Univ. Press, Oxford, U.K., 1994.
- [5] Scanlon, T. J., Roohi, E., White, C., Darband, M., and Reese, J. M., "An Open-Source, Parallel, DSMC Code for Rarefied Gas Flows in Arbitrary Geometries," Computers and Fluids, Vol. 39, No. 10, 2010, pp. 2078-2089.
- [6] OpenFOAM, <http://www.openfoam.org/>, acessado em Maio de 2017.