

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa:	<b>Aplicação da Técnica DSMC para o Estudo da Reentrada de Asteróides na Atmosfera Terrestre</b>
Bolsista:	Leonardo Maciel Moretti
Orientador(a):	Rodrigo Cassineli Palharini
Período a que se refere o relatório:	Agosto de 2016 à Julho de 2017

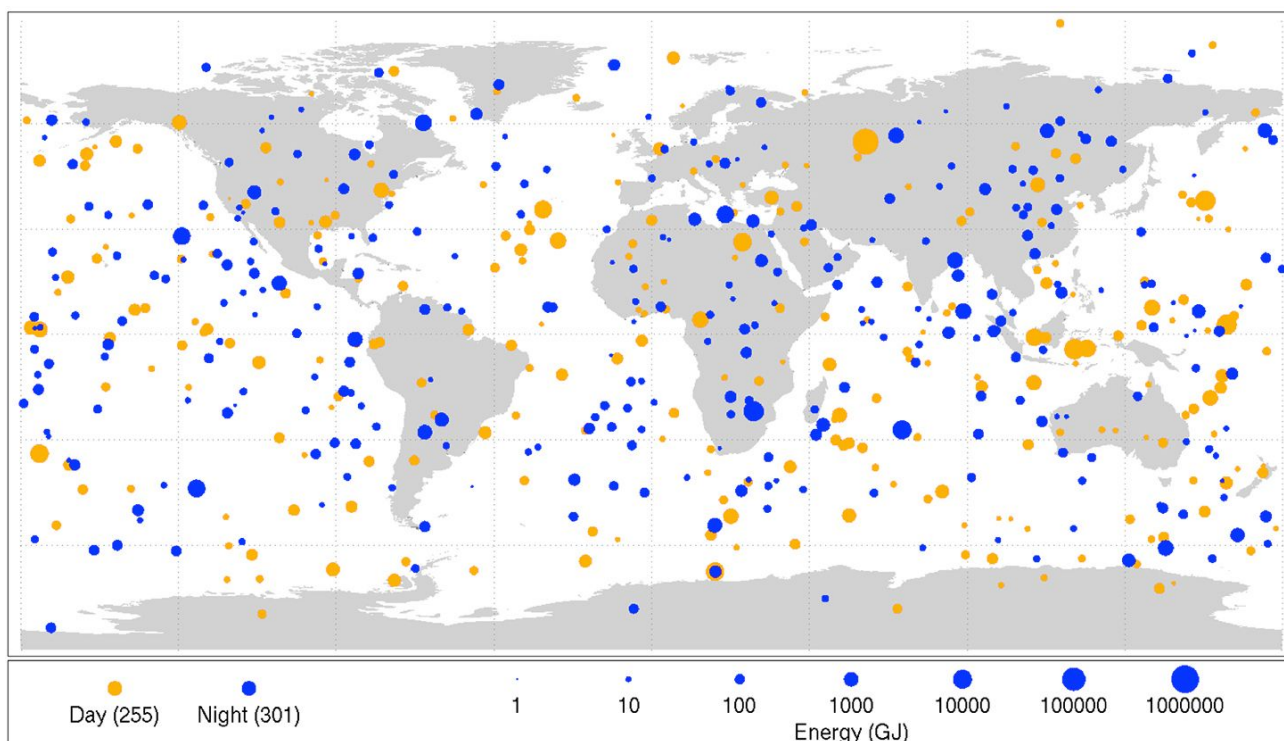
### Resumo

O espaço interplanetário não está inteiramente vazio. À medida que a Terra orbita o Sol ela encontra partículas e objetos que vão desde poeira microscópica até grandes asteroides e cometas. As partículas mais pequenas são muito numerosas e totalmente inofensivas; já os grande asteroides são muito mais raros e a chance de que um deles possa atingir a Terra durante nossas vidas é extremamente pequena. Alguns desses asteroides são corpos enormes de dezenas de quilômetros e seu impacto com a Terra poderia exterminar a maioria dos seres vivos. Desta forma, o presente estudo visa um melhor entendimento da dinâmica da reentrada de asteroides na atmosfera terrestre. Neste estudo, o asteroide Golevka foi simulado durante a reentra a uma altitude de 200 km utilizando a técnica “Direct Simulation Monte Carlo”.

### 1. Introdução

Objetos celestes são chamados “Near Earth Objects” (ou NEOs) quando sua órbita cruza ou está a 0,3 unidades astronômicas (UA) da Terra [1,2]. O conhecimento associado a esses objetos é bastante limitado e não podem ser detectados muito tempo antes do impacto. Entretanto, a trajetória de asteróides podem ser melhor predita pelas técnicas e ferramentas computacionais disponíveis atualmente.

No estudo da reentrada e impacto dos dos asteroides na atmosfera terrestre deve-se considerar as altas velocidades de reentrada, sua massa, e a energia que será dissipada em seu impacto [3]. Figura 1 mostra a localização dos impactos com a atmosfera terrestre de meteoros/meteoritos e a energia liberada [4]. Dependendo do tamanho, composição, e velocidade, as conseqüências de um potencial impacto são mínimas. Objetos inferiores a 10 m provavelmente serão destruídos durante a reentrada. Entretanto, asteroides cujo tamanho estão acima de 10 km poderiam provocar o fim de nossa civilização, como ocorreu no período geológico Cretáceo-Terciário com extinção dos dinossauros. Além disso, o potencial impacto de asteroides com a superfície terrestre pode provocar tsunamis, formação de crateras, e lançar grande quantidade de poeira na atmosfera terrestre.



**Figura 1:** Localização do impacto de meteoros/meteoritos com a atmosfera terrestre no período entre 1994 e 2013. Pontos em azul representam impactos ocorridos durante a noite e pontos em amarelo impactos ocorridos durante o dia.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho é obter um melhor entendimento sobre a dinâmica de reentrada de asteroides na atmosfera terrestre. Neste

estudo, a estrutura do escoamento bem como as propriedades na superfície do asteroide Golevka serão investigados utilizando a técnica computacional “Direct Simulation Monte Carlo”.

## 2. Método computacional

A técnica numérica mais bem sucedida para a computação de escoamentos hipersônicos rarefeitos é “Direct Simulation Monte Carlo” (DSMC) [5]. Com base no algoritmo desenvolvido na referência [5], um novo código aberto chamado dsmcFoam foi desenvolvido para a resolução de problemas complexos em engenharia que envolve a condição de gás rarefeito [6]. Este novo código DSMC foi desenvolvido pela University of Strathclyde e disponibilizado pela empresa OpenFOAM em seu website [7]. As principais características do código dsmcFoam incluem inicialização de partículas em geometrias arbitrárias, malhas não estruturadas e estruturadas, capacidade de executar simulações transientes ou estacionárias, e processamento paralelo ilimitado. Na técnica DSMC, uma partícula simulada representa um grande número de moléculas reais que compõe o gás a ser simulado. As partículas se movem pelo domínio computacional, colidem entre elas, ocorre a redistribuição da energia entre as partículas que colidiram e uma nova posição é calculada [5].

## 3. Geometria e parâmetros computacionais

De acordo com a literatura atual, o asteroide 6489 Golevka foi observado pela primeira vez em 10 de Maio de 1991 por Heleanor F. Hellin. Em 1995, este asteroide foi investigado por radares de três observatórios: **Goldstone** (Califórnia), **Yevpatoria** radio telescope (Ucrânia), e **Kashima** (Japão). Desta forma, a nomeação deste asteroide deu-se pelo uso das letras iniciais de cada observatório que conduziu o primeiro estudo científico. De acordo com as observações feitas, o asteroide Golevka possui 0,6 km de largura e 1,4 km de comprimento. Seu peso total é de aproximadamente 210 bilhões de quilogramas e é considerado um dos menores asteroides com órbita ao redor

do Sol. Sua órbita é elíptica com um período de 3.97 anos a uma velocidade média de 16980 m/s. A menor distância entre o asteroide e a Terra acontecerá no ano de 2046, onde esta distância será de 7.500,000 km ou 0.05 distância astronômica (UA).

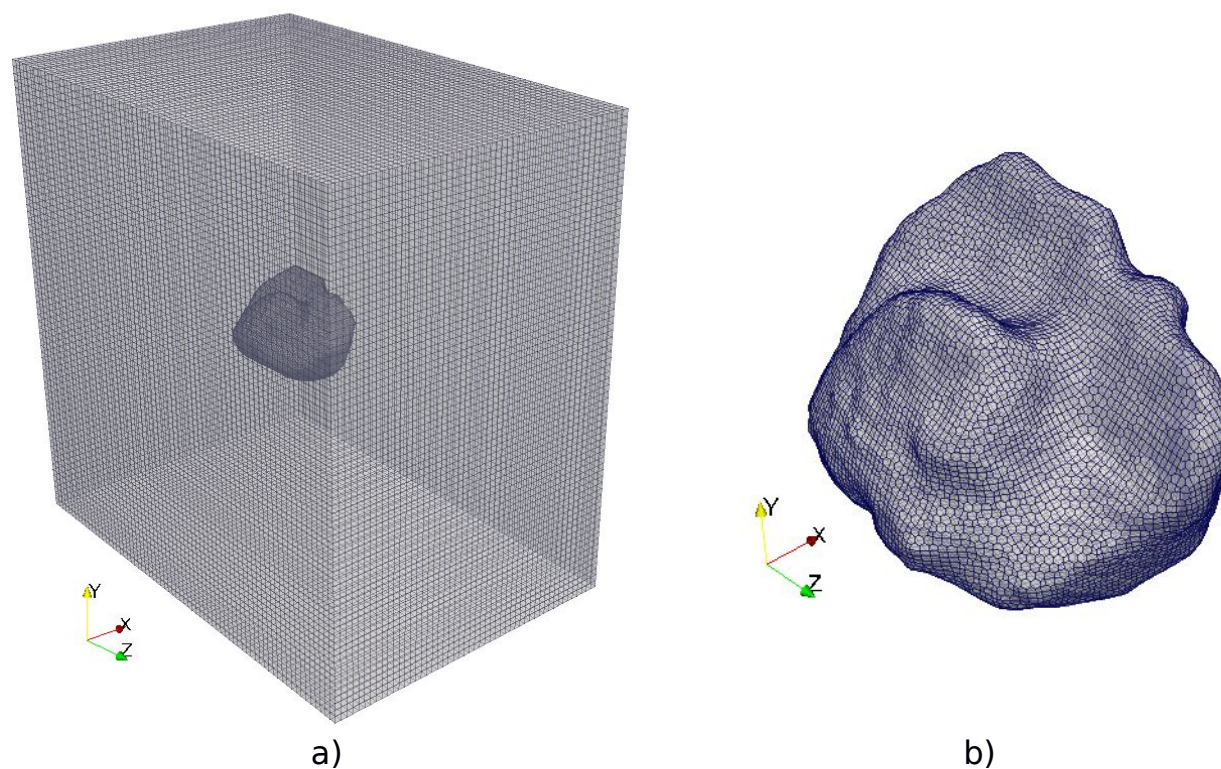
As propriedades do escoamento não perturbado utilizadas na simulação da reentrada do asteroide Golevka estão tabuladas na Tabela 1. Estas propriedades correspondem a uma altitude de reentrada de 200 km. Nesta altitude, a atmosfera é composta por nitrogênio e oxigênio molecular e oxigênio atômico [8]. A velocidade de reentrada do asteroide e a temperatura na superfície foram consideradas constante a 12000 m/s e 1000 K, respectivamente.

<b>Parâmetros</b>	<b>Velocidade (<math>U_{\infty}</math>)</b>	<b>Pressão (<math>P_{\infty}</math>)</b>	<b>Temperatura (<math>T_{\infty}</math>)</b>	<b>Massa específica (<math>\rho_{\infty}</math>)</b>	<b>LCM* (<math>\lambda_{\infty}</math>)</b>
<b>Valores</b>	<b>12000 [m/s]</b>	<b><math>4.81 \times 10^{-3}</math> [Pa]</b>	<b>854.56 [K]</b>	<b><math>1.86 \times 10^{-08}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>4.18 [m]</b>

\* LCM - Livre caminho médio

**Tabela 1:** Condições do escoamento não perturbado para atmosfera terrestre à 200 km de altitude [8].

A malha computacional e a geometria do asteroide utilizada na simulação computacional são mostrados na Figura 2. A malha computacional, Figura 2 a), é composta por 286.332 elementos onde cada célula computacional possui o tamanho de um terço do livre caminho médio nas direções x, y, e z. As condições de contorno aplicadas na entrada e nas laterais do domínio computacional foram de escoamento não perturbado. Entretanto, na saída do domínio, vácuo foi escolhido como condição de contorno pois o escoamento nesta região é supersônico e probabilidade de uma partícula simulada retornar a região de simulação é quase nula. Na Figura 2 b) é mostrada a malha computacional na superfície do asteroide Golevka. A condição de contorno escolhida para superfície foi o modelo interação gás-superfície chamado difuso.



**Figura 2:** Domínio computacional para reentrada do asteroide Golevka à 200 km de altitude e b) malha computacional na superfície do asteroide.

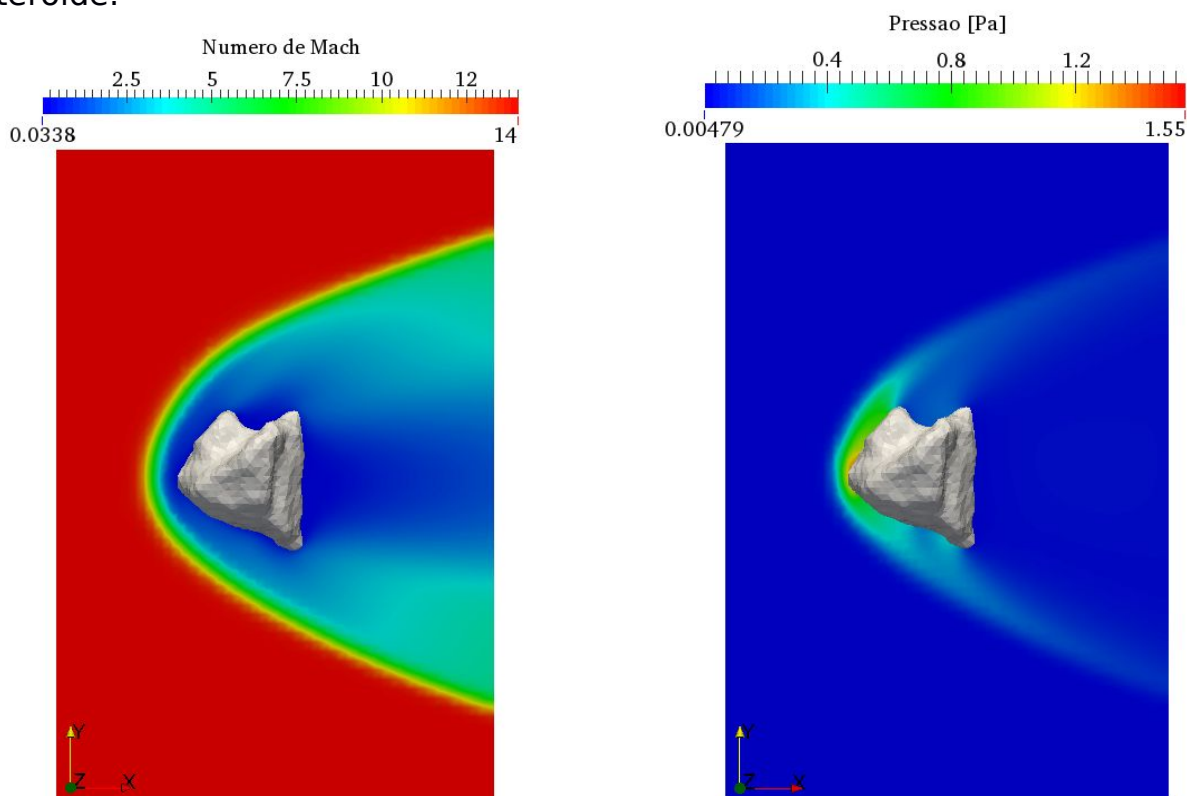
#### 4. Resultados computacionais

Nesta seção, os resultados computacionais obtidos durante as simulações computacionais da reentrada do asteroide Golevka a uma altitude de 200 km são apresentados. O foco principal é apresentar a estrutura dos escoamento (número de Mach, pressão, temperatura, e massa específica) ao redor do asteroide bem como as propriedades da superfície (transferência de calor, pressão, e tensão de cisalhamento)

##### 4.1 Estrutura do escoamento

Neste trabalho a estrutura do escoamento é definida como a distribuição das propriedades primárias do escoamento ao redor do corpo. As propriedades consideradas são: Número de Mach, pressão, temperatura, e massa específica.

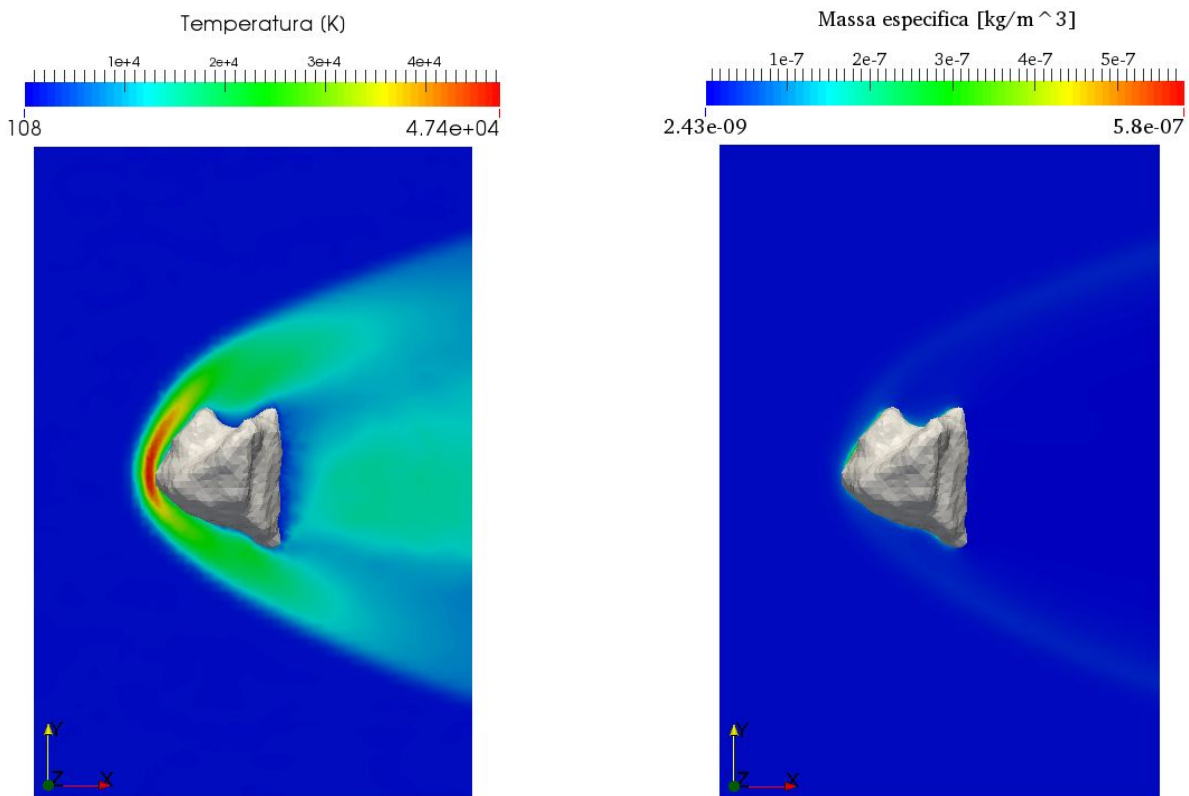
Figura 3 apresenta a distribuição do número de Mach e pressão ao redor do asteroide Golevka para altitude de 200 km. Como pode ser visto na Figura 3 a), o número de Mach é alto na entrada do domínio computacional; entretando, o escoamento é desacelerado devido a presença do asteroide. A formação de uma onda de choque a montante do corpo é claramente observada. Além disso, devido a expansão do gas na região da esteira do asteroide, o número de Mach é baixo nesta região. De acordo com a Figura 3 b), pode-se observar uma região de alta pressão a frente do asteroide. Esta região de alta pressão é formada devido a onda de choque e ao impacto das moléculas de ar na superfície do asteroide.



**Figura 3:** Distribuição do número de Mach e pressão ao redor do asteroide Golevka.

A distribuição de temperatura de massa específica ao redor do asteroide Golevka é mostrado na Figura 4. De acordo com a Figura 4 a), pode-se observar uma região de alta temperatura a montante do asteroide. Nesta região, caracterizada pela formação de uma onda de choque, a temperatura máxima atingida foi de 47400 K. Figura 4 b) mostra a distribuição de massa específica

entorno do corpo. Como podemos observar, há uma alta concentração de moléculas a frente do asteroide. Devido a sua alta velocidade de reentrada, as moléculas de ar tendem a serem “compactadas” a frente do asteroide.



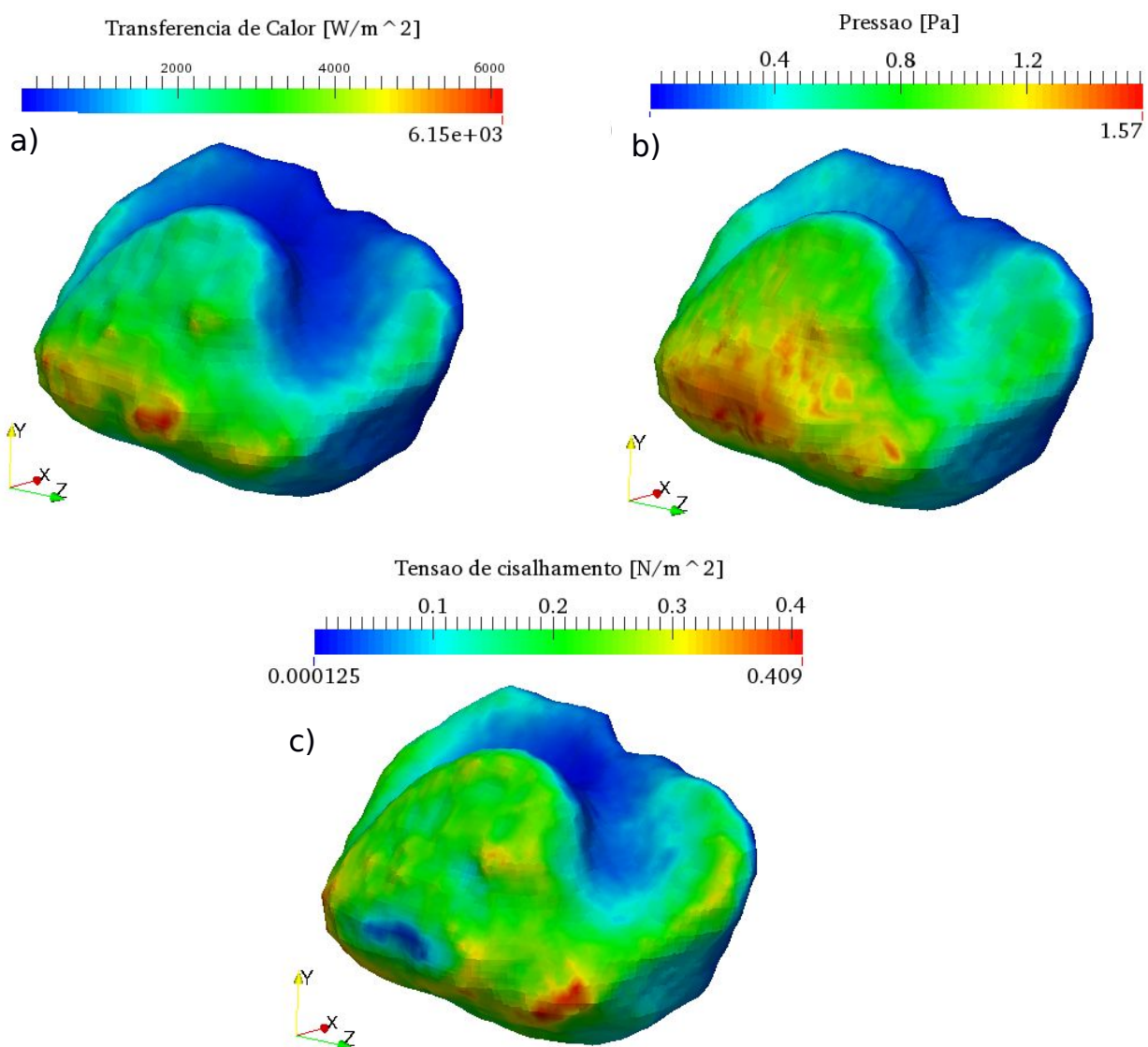
**Figura 4:** Distribuição do temperatura e massa específica ao redor do asteroide Golevka.

#### 4.2 Propriedades na superfície

Nesta seção, as propriedades na superfície obtidas durante a simulação computacional do asteroide Golevka 200 km de altitude serão discutidas.

A distribuição da transferência de calor, pressão, e tensão de cisalhamento nas superfície do asteroide é mostrada na Figura 5. De acordo com a Figura 5 a), a transferência de calor é mais intensa na região frontal do asteroide e diminui a medida que o escoamento se expande ao redor do corpo. Devido as

irregularidades na superfície do asteroide, pode notar vários pontos onde a transferência de calor é mais intensa; entretanto, o valor máximo atingido foi  $6150 \text{ W/m}^2$ . A distribuição de pressão, Figura 5 b), segue a mesma tendência vista na distribuição de transferência de calor, ou seja, a pressão na superfície é maior na região frontal e diminui consideravelmente com a expansão do escoamento na região de esteira. Em contraste com a transferência de calor e pressão, a distribuição da tensão de cisalhamento é baixa na região frontal do asteroide e aumenta nas laterais devido a alta velocidade nestas regiões.



**Figura 5:** Distribuição de transferência de calor, b) pressão, e c) tensão de cisalhamento na superfície do asteroide Golevka.



#### **4. Conclusões**

No presente trabalho, o asteroide Golevka foi simulado durante a reentrada atmosférica utilizando a técnica computacional “Direct Simulation Monte Carlo”. A altitude selecionada para o estudo de reentrada foi de 200 km acima da superfície terrestre.

Durante a reentrada do asteroide, verificou-se a formação de uma onda de choque a montante do corpo. Esta onda de choque foi responsável por um aumento significativo na temperatura, pressão, e massa específica na região frontal do asteroide. Devido a onda de choque, a distribuição da transferência de calor e pressão na superfície do asteroide também ocorreu na região frontal. Entretanto, os maiores valores para a tensão de cisamento ocorreram nas laterais, onde o escoamento é acelerado devido a sua expansão ao redor do corpo.

#### **4. Próximas Etapas**

Devido ao curto período de bolsa PIBIC (6 meses), os resultados computacionais obtidos até o presente momento são apresentados para o asteroide Golevka durante a reentrada na atmosfera terrestre somente para altitude de 200 km. Nas próximas etapas desse trabalho, outras duas altitudes de reentrada serão consideradas. Além disso, outros dois asteroides (Geographos e Castalia) serão estudados para as altitudes selecionadas.

#### **Referências**

- [1] British Task Force on Potentially hazardous Near Earth Object, “Report of the task force.” British Minister of Science, 2000
- [2] Near Earth Object Science Definition Team. “Study to determine the feasibility of extending the search of near-earth objects to smaller limiting diameters.” Technical report, NASA, Aug. 2003.



- [3] Truitt, R.W. Hypersonic Aerodynamic, Ronald Press Company, New-York, 1959.
- [4] Website “Jet Propulsion Laboratory”, NASA,  
<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4380>, acessado em 01/06/2017.
- [5] Bird, G. A., Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Oxford Univ. Press, Oxford, U.K., 1994.
- [6] 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.
- [7] OpenFOAM, <http://www.openfoam.org/>, acessado em Maio de 2017.
- [8] National Oceanic and Atmospheric Administration, “U.S. Standard Atmosphere”, NOAA, Oct. 1976.