

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta  
Dissertação será disponibilizado  
somente a partir  
de 09/05/2023

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**JULIO CESAR MONTEIRO DOS SANTOS**

**Fluxo de material para o disco circumplanetário necessário para a formação de satélites de planetas gigantes**

Guaratinguetá

2022

**Julio Cesar Monteiro dos Santos**

**Fluxo de material para o disco circumplanetário necessário para a formação de satélites de planetas gigantes**

Dissertação de mestrado apresentada ao Conselho de Curso de Pós-Graduação em Mestrado em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Física.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Ernesto Vieira Neto

Guaratinguetá

2022

S237f Santos, Julio Cesar Monteiro dos  
Fluxo de material para o disco circumplanetário necessário para a formação de satélites de planetas gigantes / Julio Cesar Monteiro dos Santos – Guaratinguetá, 2022.  
76 f : il.  
Bibliografia: f. 73-76

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.  
Orientador: Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto

1. Satélites - Órbitas. 2. Integração numérica. 3. Sistema solar. I. Título.

CDU 629.783(043)

**JULIO CESAR MONTEIRO DOS SANTOS**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRADO EM FÍSICA”**

**PROGRAMA: FÍSICA  
CURSO: MESTRADO**

**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto**  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
**Prof. Dr. ERNESTO VIEIRA NETO**  
Orientador - UNESP  
participou por videoconferência

  
**Prof. Dr. RAFAEL RIBEIRO DE SOUSA**  
UNESP  
participou por videoconferência

  
**Prof. Dr. FERNANDO VIRGILIO ROIG**  
Observatório Nacional  
participou por videoconferência

Maio de 2022

## **DADOS CURRICULARES**

### **JULIO CESAR MONTEIRO DOS SANTOS**

**NASCIMENTO** 21/04/1996 - Pindamonhangaba / SP

**FILIAÇÃO** Patrícia Aparecida Monteiro dos Santos

**2020 / 2022** Mestrado em Física  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá

**2016 / 2019** Graduação em Física  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá

Aos meus avós Maria e Pedro que me ensinaram que a distância entre sonho e realidade é apenas uma  
atitude, eu dedico esse trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sua graça e sabedoria que me capacitaram a realizar este trabalho.

A minha família, em especial aos meus avós maternos Maria e Pedro que apesar de não estarem mais aqui, sempre me apoiaram e enfrentaram comigo os momentos mais difíceis. Agradeço ao apoio e carinho de meus tios André e Daniela e minha mãe Patrícia.

Agradeço também ao apoio da minha linda esposa Laís, pois ela me encorajou quando achei que não era capaz, e agradeço por estar ao meu lado durante todo o processo deste trabalho e por ser minha companheira e melhor amiga.

Ao meu orientador Ernesto Vieira Neto por toda dedicação e incentivo para comigo. Obrigado por acreditar em mim e me inspirar a ser um pesquisador melhor a cada dia.

Agradeço aos meus professores Ricardo Aparecido de Moraes e Rafael Ribeiro de Sousa por responderem aos meus infinitos e-mails de dúvidas e por me ajudarem sempre.

Aos meus amigos João, Évelin e Millena por mesmo longe fazerem parte do meu mestrado através de conselhos e ajuda.

Agradeço à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro referente a bolsa de Mestrado vinculada ao Projeto Temático “A Relevância dos Pequenos Corpos em Dinâmica Orbital”.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - (2019/21857-3) vinculado ao Projeto Temático “A Relevância dos Pequenos Corpos em Dinâmica Orbital” (2016/24561-0).

*“Sempre fui grato aos meus mentores [...] e tentei me certificar de que cada um deles soubesse do meu apreço. Mas parece-me claro que não aprendi sobre as coisas mais essenciais com os meus professores [...], aprendi com meus avós, que nada sabiam sobre ciência“*  
*(parafraseado de Carl Sagan)*

## RESUMO

O sistema de satélites galileanos tem uma arquitetura similar a do Sistema Solar, entre as similaridades está o fato dos satélites apresentarem órbitas quase circulares e coplanares com o plano equatorial de Júpiter. Uma outra característica dos galileanos é que esses apresentam densidade decrescente conforme se afastam do planeta, ou seja, o mais denso é o satélite mais próximo ao planeta enquanto o menos denso é o mais distante (Lunine e Stevenson, 1982). Existem modelos de formação dos satélites galileanos equivalentes aos da formação dos planetas, todavia na escala do disco circumplanetário. Neste trabalho de dissertação de mestrado são considerados dois modelos principais que descrevem a formação desses satélites através do disco circumplanetário. O modelo de Massa Mínima para a Sub-Nébulas (MMSN) (Lunine e Stevenson, 1982) sugere que os satélites galileanos se formaram em um disco circumplanetário ao redor de Júpiter durante o último estágio de formação do planeta. Nessa fase o disco não recebe mais material e pode ser aproximado por um disco circumplanetário não-turbulento, sem a formação de vórtices, com baixa possibilidade de aglomeração de material em zonas específicas no disco ou transporte descontínuo durante a formação dos satélites. Por outro lado, o segundo modelo (Canup e Ward, 2002) sugere um outro tipo de disco circumplanetário: o disco possui inicialmente pouca massa em gás e poeira e vai crescendo em massa adquirindo material oriundo do disco circumstelar. Neste trabalho é estudada a formação de sistemas de satélites sob as considerações do modelo MMSN e também do modelo do Disco com Déficit de Gás. São realizadas simulações numéricas hidrodinâmicas com o objetivo de se obter informações que caracterizam o disco de gás em volta do planeta. As simulações são feitas utilizando o código hidrodinâmico FARGO 3D (Benitez-Llambay e Masset, 2016), entretanto esse tipo de código traz consigo dificuldades como a resolução necessária para obter informações com precisão devido a simplicidade de seu integrador de N-corpos do tipo Rung-Kutta. Assim, para se obter resultados mais rápidos são utilizadas as simulações hidrodinâmicas para entender o comportamento do disco de gás ao redor do planeta e então essas informações são usadas no pacote de integração numérica de N-corpos REBOUND. Portanto, foram realizadas simulações numéricas com o uso do REBOUND (Rein e Liu, 2012) adaptando o código para estudar o crescimento dos satélites durante a fase colisional. Durante as simulações, são explorados parâmetros como a distribuição radial e a massa dos sólidos no disco, a densidade da nuvem de gás e a proporção de massa e gás do disco, como também a posição da linha de gelo ao longo do disco, considerando as informações obtidas através das simulações hidrodinâmicas. Isso é feito para elucidar em comparação com o modelo de Déficit de Gás a relevância do fluxo de matéria durante a formação dos satélites.

**PALAVRAS-CHAVE:** Formação de satélites. Integração Numérica. Satélites Galileanos.

## ABSTRACT

The Galilean satellite system has an architecture similar to that of the Solar System, among the similarities is the fact that the satellites present almost circular and coplanar orbits with the equatorial plane of Jupiter, in addition the Galileans also present decreasing density as they move away from the planet, that is, the densest is the satellite closest to the planet while the least dense is the most distant (Lunine and Stevenson, 1982), as observed for terrestrial planets in the Solar System. There are models for the formation of Galilean satellites equivalent to the formation of planets, however on the scale of the circumplanetary disk. There are two main models that describe the formation of these satellites across the circumplanetary disk. The Minimum Mass Sub-Nebula (MMSN) model (Lunine and Stevenson, 1982) suggests that Galilean satellites form in a circumplanetary disk around Jupiter during the last stage of planet formation. At this stage, the disk does not receive any more material and can be approximated by a non-turbulent circumplanetary disk, without the formation of vortexes, with little possibility of agglomeration of material in specific zones in the disk or discontinuous transport during the formation of the satellites. The second model (Canup and Ward, 2002) suggests, on the other hand, another type of circumplanetary disk: the disk initially has little mass in gas and dust and then grows in mass acquiring material from the circumstellar disk. In this work, the formation of satellite systems is studied under the considerations of the MMSN model and the reproduction of the Disk with Gas Deficit model is also carried out. Hydrodynamic simulations are performed in order to obtain information that characterizes the gas disk around the planet. The simulations are performed using the FARGO 3D hydrodynamic code (Benitez-Llambay and Masset, 2016), however this type of code brings with it difficulties such as the resolution required to obtain information accurately due to the simplicity of its Rung-Kutta N-body type integrator. Thus, in order to obtain faster results, hydrodynamic simulations are used to understand the behavior of the gas disk around the planet and then this information is used in the REBOUND N-body package. Therefore, numerical simulations were performed using REBOUND (Rein and Liu, 2012) adapting the code to study the growth of satellites during the collision phase. During the simulations, parameters such as the radial distribution and the mass of the solids in the disk, the density of the gas cloud and the proportion of mass and gas of the disk, as well as the position of the ice line along the disk are explored considering the information obtained through hydrodynamic simulations. This is done to elucidate in comparison with the Gas Deficit model the relevance of the flow of matter during the formation of the satellites.

**KEYWORDS:** Satellites formation. NUmeric integration. Galilean Satellites.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>14</b>
2.1	Simulações hidrodinâmicas: estudo da dinâmica da parte gasosa do disco circumplanetário . . . . .	14
<b>2.1.1</b>	<b>FARGO: um código para simulações hidrodinâmicas e magnetohidrodinâmicas</b>	<b>15</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Disco com déficit de gás e fluxo de matéria para o disco circumplanetário</b> . .	<b>16</b>
2.2	Simulações de N-corpos: estudo da dinâmica da parte sólida do disco circumplanetário	18
<b>2.2.1</b>	<b>REBOUND: um integrador de N-corpos</b> . . . . .	<b>18</b>
<b>2.2.2</b>	<b>O modelo de massa mínima para a sub-nébulas e a implementação das forças sobre os sólidos do disco circumplanetário</b> . . . . .	<b>20</b>
2.2.2.1	Implementação das forças extras nas simulações de N-corpos . . . . .	20
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>26</b>
3.1	Simulações hidrodinâmicas: características dos discos simulados e análises . . . .	26
3.2	Simulações de N-corpos realizadas e estudos analíticos . . . . .	33
<b>3.2.1</b>	<b>Migração</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Estudos analíticos</b> . . . . .	<b>35</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Simulações de N-corpos considerando diferentes perfis de densidade <math>\beta</math></b> . . . .	<b>40</b>
3.2.3.1	Perfil de densidade $\beta = 1$ . . . . .	40
3.2.3.2	Perfil de densidade $\beta = 1/2$ . . . . .	41
<b>3.2.4</b>	<b>Estudos analíticos</b> . . . . .	<b>42</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Simulações de N-corpos considerando diferentes parâmetros de viscosidade <math>\alpha</math></b>	<b>47</b>
3.2.5.1	Disco de dissipação mais lenta ( $\alpha = 4.0 \times 10^{-5}$ ) . . . . .	48
3.2.5.2	Disco de dissipação mais rápida ( $\alpha = 5.0 \times 10^{-3}$ ) . . . . .	51
<b>3.2.6</b>	<b>Arrasto sobre satelitesimais</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Estudos adicionais para aplicação nas simulações de N-corpos na fase colisional</b>	<b>57</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Simulações de N-corpos: estudo da fase colisional de formação dos satélites</b> .	<b>59</b>
3.2.8.1	Simulações de N-corpos com $h = 0.05$ . . . . .	62
3.2.8.2	Simulações de N-corpos com $h = 0.10$ . . . . .	65
3.2.8.3	Simulações de N-corpos com $h = 0.15$ . . . . .	69
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

É comum definir que os planetas gigantes possuem duas categorias de satélites: satélites regulares e os satélites irregulares. Ficam definidos como satélites regulares aqueles que apresentam órbitas prógradas próximas ao planeta, aproximadamente circulares e aproximadamente coplanares com o equador do planeta (Lubow e Martin, 2013; Barr, 2016). Esses satélites podem ter sido formados próximos ao corpo que orbitam, em um disco ou anel circumplanetário. Entretanto, outras possibilidades são possíveis para a formação dos satélites regulares, como por exemplo, no caso da Lua, um satélite regular da Terra, formado a partir de material oriundo da colisão do planeta com um corpo externo (Canup e Asphaug, 2001; Canup, 2004, 2012). Os satélites irregulares por sua vez são mais prováveis de terem sido formados em outras regiões, mais afastadas da região de maior atração gravitacional dos seus planetas, e capturados a partir de uma instabilidade dinâmica que os jogaram em encontros próximos com os planetas (Nesvorný, Vokrouhlický e Morbidelli, 2007) ou a partir de efeitos dissipativos como o arrasto aerodinâmico (Čuk e Burns, 2004). Os satélites irregulares apresentam órbitas mais excêntricas e mais inclinadas que os satélites regulares, um resultado provável da dinâmica de captura que estes satélites sofreram.

O Sistema Solar possui satélites que apresentam características bem peculiares. Entre eles pode-se citar o sistema de satélites galileano, Io, Europa, Ganimedes e Calisto, além do único satélite do Sistema Solar com atmosfera, Titã, e também possui um sistema de anéis que interagem com seus satélites. Os satélites galileanos encontram-se em órbitas aproximadamente circulares e coplanares, o que indica que possivelmente eles devem ter se formado em um disco circumplanetário. Todavia, como os quatro satélites possuem composições distintas em relação a porcentagem de rocha e gelo, acredita-se que eles se formaram em diferentes regiões do disco cujo qual possui uma distribuição de temperatura em que os satélites rochosos são formados nas regiões mais quentes, enquanto que os satélites com maior fração de gelo se formam além da temperatura de condensação da água. Essa linha de gelo existente no disco circumplanetário se dá principalmente pela presença de fontes de aquecimento como: aquecimento viscoso no disco, aquecimento devido a acreção de material pelo disco circumplanetário, luminosidade advinda do planeta pai e a temperatura ambiente da nebulosa da estrela (Heller e Pudritz, 2015). Além disso, Io, Europa e Ganimedes encontram-se em cadeias de ressonância de movimento médio o que pode indicar que houve uma migração destes satélites durante a sua formação e pelos seus efeitos com o gás que resultou em captura em ressonância de movimento médio (Ogihara e Ida, 2012).

As características dos satélites do Sistema Solar, tanto orbitais, quanto química, indicam que não há um único processo de formação, e portanto é preciso considerar as características singulares de cada sistema de satélites para propor os modelos de formação. Lunine e Stevenson (1982) sugeriram a ideia de um disco de material sólido e gás em torno de Júpiter, com uma quantidade mínima de massa que poderia providenciar a massa de rocha necessária para formar os satélites galileanos com a composição de rocha que esses possuem. Em seu trabalho, os autores concluem que seu modelo é capaz de explicar uma formação rápida dos satélites galileanos, mas não conseguem explicar as

diferenças nas superfícies de Ganímedes e Calisto, sobretudo a não diferenciação observada em Calisto. O modelo de Lunine e Stevenson (1982) ficou conhecido como Modelo de Massa Mínima para a Sub-nébulas, em inglês MMSN (“Minimal Mass Sub-Nebula”).

O modelo de massa mínima para a sub-nébulas passou por aprimorações devido a contribuições de trabalhos como o de Mosqueira e Estrada (2003a,b). Nesses trabalhos os autores consideram uma nuvem de gás densa dentro do raio centrífugo do planeta, onde o envelope gasoso alcança o balanço centrífugo, e depois dessa fronteira a nuvem de gás fica com pouca densidade, se estendendo até uma fração do Raio de Hill ( $R_H$ ) do planeta. Todavia, no trabalho de Moraes, Kley e Vieira Neto (2018) é discutido um modelo para o disco circumplanetário de Júpiter onde é admitido que embriões de satélites, quando possuem massa o suficiente, se desacoplam do gás e as forças de arrasto deixam de ser significativas. Os autores argumentam isso baseados em resultados de simulações hidrodinâmicas.

O modelo de massa mínima para a sub-nébulas não apresenta fluxo de massa vindo de ambiente exterior ao disco circumplanetário, ou seja, dado o perfil do gás existente na nuvem, não há mais entrada de matéria. Um modelo de formação dos satélites galileanos alternativo ao MMSN é o modelo proposto por Canup e Ward (2002). Os autores propuseram um modelo onde o processo de formação de satélites ocorre nos momentos finais da formação do planeta gigante, de forma que o disco circumplanetário ainda está sendo suprido por material vindo do disco circumstelar (Kley, 1999; Lubow, Seibert e Artymowicz, 1999). Nesse modelo, o disco circumplanetário apresenta uma densidade três ordens de grandeza menor de gás para a formação de satélites quando comparada com o MMSN. Esse modelo é conhecido como Modelo de Disco com Déficit de Gás (“gas-starved disk”) (Canup e Ward, 2002, 2006, 2009). No modelo de déficit de gás, satélites são formados, migram e colidem, muitos são absorvidos pelo planeta, e os satélites observados são os sobreviventes desse processo (Moraes, Kley e Vieira Neto, 2018). Esse processo explica certas características dos satélites dos planetas gigantes, como a diferenciação incompleta de Calisto (Canup e Ward, 2002). Entretanto, em seu trabalho Mosqueira e Estrada (2003b) argumentam que esse processo pode atrasar a formação dos satélites e, até mesmo, prevenir sua formação, pois nesse modelo, durante a formação do planeta, a quantidade de material sólido no disco circumplanetário deve ser insuficiente, mesmo que haja material sólido e gasoso entrando no disco circumplanetário nesse ponto da formação do planeta.

Considerando os dois modelos clássicos, MMSN e disco com déficit de gás, a grande diferença entre eles está no fato da entrada, ou não, de matéria, já que no modelo de massa mínima o disco é estático, ou seja, não há entrada de massa, enquanto no modelo de disco com déficit de gás, o disco circumplanetário é continuamente alimentado pelos braços espirais que o conectam ao disco protoplanetário. Neste projeto de dissertação de mestrado o objetivo é estudar o fluxo de material do disco protoplanetário para dentro do disco circumplanetário. Em adição a isso, verificar como a variação de parâmetros que caracterizam o disco de poeira e gás influenciam sobre as características dos satélites formados.

Neste trabalho de dissertação foi empregado esforço em estudar as bibliografias publicadas que tratam sobre os dois modelos de formação de satélites citados, MMSN e disco com déficit de gás, assim como reproduzi-los. Além disso, foi estudado o pacote FARGO 3D utilizado para realizar simulações hidrodinâmicas (Benitez-Llambay e Masset, 2016), pois através dele é possível estudar as

características e a evolução do disco quando um corpo está imerso nele, como por exemplo, perfil de densidade superficial do disco, perfil de temperatura do disco, e é também possível observar os efeitos que o corpo, seja planeta ou satélite, que está imerso no disco produz no próprio disco de gás, assim como é possível verificar o tipo de migração que esses corpos apresentam em relação a esse disco. Foi também realizado o estudo do pacote REBOUND (Rein e Liu, 2012), que é um integrador de N-corpos que permite a adição de outras forças em um sistema, forças adicionais à força gravitacional entre os N corpos.

O pacote FARGO foi utilizado para obter informações que caracterizam o disco de gás em volta do planeta, assim como usado para estudar os modelos MMSN e de Déficit de Gás, sobretudo para verificar a formação dos braços espirais que conectam o disco circumplanetário ao disco protoplanetário (Canup e Ward, 2002). Szulágyi et al. (2014) estudaram como a viscosidade influencia a taxa de acreção de planetas com massas comparáveis a de Júpiter quando imersos em um disco de gás. Neste trabalho foram realizadas simulações hidrodinâmicas considerando um disco não viscoso e um disco com baixa viscosidade para verificar a influencia desse parâmetro sobre a quantidade de material que é transportado do disco protoplanetário para o disco circumplanetário. O pacote hidrodinâmico FARGO 3D (Benitez-Llambay e Masset, 2016) permite a modelagem do disco protoplanetário como fluídos de densidades diferentes, assim é possível simular as partículas de poeira existente no disco como um fluido pressurizado (Benitez-Llambay e Pessah, 2018). Entretanto, um problema com a utilização desse tipo de código é a resolução necessária para obter informações com precisão devido a simplicidade de seu integrador de N-corpos do tipo Runge-Kutta. Desse modo, as simulações hidrodinâmicas são usadas para entender o comportamento das partículas no disco protoplanetário e então são utilizadas essas informações no pacote de N-corpos REBOUND, para estudar a fase colisional que deverá provocar o crescimento dos satélites, assim como implementar as forças extras sobre embriões e satelitesimais tais como definidas por Moraes, Kley e Vieira Neto (2018). O pacote REBOUND foi utilizado para implementar as forças extras a que estão sujeitos embriões e satelitesimais, estudar a coerência dessa implementação com os resultados esperados, além de fazer um estudo do perfil de densidade do disco  $\beta$ . Posteriormente com o pacote REBOUND serão simulados discos circumplanetários compostos de milhares de corpos, sendo eles embriões e satelitesimais.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto de mestrado tem por objetivo estudar o fluxo de material para o disco circumplanetário e identificar possíveis inconsistências nos modelos de formação de satélites mais aceitos, o de massa mínima e o de déficit de gás. Para realizar esse objetivo são utilizadas ferramentas computacionais como o FARGO e o REBOUND para a reprodução dos modelos clássicos, sendo eles o modelo de disco com déficit de gás (Canup e Ward, 2002) e modelo de massa mínima para a sub-nébulas (Lunine e Stevenson, 1982). Além disso estuda-se o fluxo de material para o disco circumplanetário de modo a verificar a viabilidade da implementação de um modelo misto que considere as melhores características dos modelos clássicos.

Neste trabalho foram estudadas as ferramentas computacionais FARGO e REBOUND, sendo que a primeira ferramenta foi utilizada para realizar simulações hidrodinâmicas e dessa forma estudar a dinâmica da parte gasosa do disco. O pacote REBOUND foi utilizado para realizar simulações de N-corpos e dessa forma estudar a dinâmica da parte sólida do disco circumplanetário.

A partir da reprodução do modelo de disco com déficit de gás e do estudo da influência da viscosidade sobre o disco de gás, seção 3, foi possível verificar que através dos braços espirais que se formam no disco de gás (ver figura 5), ocorre o transporte de matéria do disco protoplanetário para o disco circumplanetário. Foi visto que a viscosidade influencia sobre o tamanho do disco circumplanetário, além da quantidade de gás presente na região próxima ao planeta. Esse resultado concorda com o trabalho de Szulágyi et al. (2014), pois em seu trabalho os autores verificam que quanto menor a viscosidade, mais próximo ao planeta as ondas de gás se propagam e se chocam. O disco circumplanetário se forma nas regiões próximas ao planeta onde o gás passa a apresentar trajetória circular em torno do planeta, o que ocorre mais próximo ao planeta quanto menor for a viscosidade.

Observou-se também que para o caso viscoso, o fluxo de material para o disco circumplanetário é na verdade na direção do disco circumplanetário para fora, enquanto na simulação sem viscosidade, o fluxo é para dentro na direção do planeta. Isso contribui para a diferença no tamanho disco circumplanetário. Isso acontece devido ao choque entre *streamlines*, pois assim o fluxo de gás perde momento angular e é atraído em direção ao planeta. O planeta acreta todo o gás que vêm dessa região de choque, assim o tamanho do disco circumplanetário reduz em relação ao caso viscoso, embora exista mais gás nessa região. Essa observação concorda com o que é discutido no trabalho de Szulágyi et al. (2014).

O parâmetro de viscosidade  $\alpha$  mostrou ser importante também nas simulações de N-corpos. Na seção 4 é possível ver que discos mais viscosos,  $\alpha$  da ordem de  $10^{-3}$ , parecem favorecer a migração dos satélites e sua eventual captura em cadeia de ressonância de movimentos médio, tal como observado para os três satélites mais internos do sistema galileano: Io, Europa e Ganimedes que estão em ressonância de movimento médio 1:2:4. Todavia, o parâmetro  $\alpha$  sozinho não é capaz de produzir esse cenário, visto que nas figuras 19 e 20 apesar de usar  $\alpha = 5.0 \cdot 10^3$  os satélites colidem com o planeta. O parâmetro que foi alterado de modo a produzir a captura dos satélites internos em cadeia de ressonância foi o perfil de densidade local  $\beta$ , sendo que na figura 21 o valor usado foi de  $\beta = 1/2$ . Desse modo,

pode-se verificar a relevância do estudo dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . Sendo que discos mais viscosos e com densidade que se comporta como uma função  $\approx r^{-1/2}$  são bem sucedidos em reproduzir a migração de satélites como os galileanos.

Com os estudos prévios a respeito da fase colisional pode-se dar sequencia a este trabalho de dissertação e realizar simulações considerando 2021 corpos, sendo o planeta, 20 embriões e 2000 satelitesimais. Os parâmetros estudados foram o parâmetro  $\alpha$  de viscosidade e a razão de aspecto  $h$ , além de considerar um esquema para a composição dos corpos e perda da água que os constituem durante sua evolução. Foi observado que as simulações com maior viscosidade tendem a formar mais satélites e em regiões mais distantes ao planeta quando comparado ao caso menos viscoso. Isso se dá devido a atenuação da ação do gás sobre a migração dos corpos, uma vez que esse se dissipa mais rapidamente. Quanto a composição em gelo, observa-se que elas tiveram uma alteração baixa ao longo das simulações e não condiz com o que se observa para os satélites Io, Europa, Ganimedes e Calisto, dessa forma além dos mecanismos de aquecimento dos corpos devido as forças sofridas pela interação com o gás, como o arrasto considerado na taxa de ablação, devem ser adicionadas outras forças que geram calor nos corpos e eventual perda de água, como por exemplo força de maré. O estudo realizado serviu para compreender o comportamento da parte gasosa e sólida do disco circumplanetário, tal como a dinâmica do disco e suas características descritas através de parâmetros como o parâmetro de viscosidade  $\alpha$  e o perfil de densidade local  $\beta$  e a razão de aspecto, assim como o fluxo de gás para o disco circumplanetário. Observa-se também que sistemas com maior viscosidade favorecem a formação satélites em regiões mais distantes, dessa forma um valor entre o usado nas duas simulações poderia favorecer a formação de satélites nas posições onde se encontram as luas de Galileu. Essa viscosidade mais elevada já é um parâmetro distinto daquele usado no MMSN, que considera sistemas com menor viscosidade, dessa forma o resultado aqui mostrado pode sugerir a possibilidade de um modelo híbrido que considere características do MMSN e também do modelo de disco com déficit de gás, uma vez que nesse modelo considera-se sistemas com maior viscosidade.

## REFERÊNCIAS

1. ADACHI, Isao; HAYASHI, Chushiro; NAKAZAWA, Kiyoshi. The gas drag effect on the elliptic motion of a solid body in the primordial solar nebula. **Progress of Theoretical Physics**, v. 56, n. 6, p. 1756-1771, 1976.
2. BARR, Amy C. Formation of exomoons: a solar system perspective. **Astronomical Review**, v. 12, n. 1-4, p. 24-52, 2016.
3. BRASSER, R.; DUNCAN, M. J.; LEVISON, H. F. Embedded star clusters and the formation of the Oort cloud. **Icarus**, v. 2, n. 191, p. 413-433, 2007.
4. BROUWER, Dirk; CLEMENCE, Gerald M. Methods of celestial mechanics. **Academic Press**, 1961.
5. BENÍTEZ-LLAMBAY, Pablo et al. Planet heating prevents inward migration of planetary cores. **Nature**, v. 520, n. 7545, p. 63-65, 2015.
6. BENÍTEZ-LLAMBAY, Pablo; MASSET, Frédéric S. FARGO3D: a new GPU-oriented MHD code. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 223, n. 1, p. 11, 2016.
7. BENÍTEZ-LLAMBAY, Pablo; PESSAH, Martin E. Torques Induced by Scattered Pebble-flow in Protoplanetary Disks. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 855, n. 2, p. L28, 2018.
8. CANUP, Robin M. Simulations of a late lunar-forming impact. **Icarus**, v. 168, n. 2, p. 433-456, 2004.
9. CANUP, Robin M. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. **Science**, v. 338, n. 6110, p. 1052-1055, 2012.
10. CANUP, Robin M.; ASPHAUG, Erik. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. **Nature**, v. 412, n. 6848, p. 708-712, 2001.
11. CANUP, Robin M.; WARD, William R. Formation of the Galilean satellites: Conditions of accretion. **The Astronomical Journal**, v. 124, n. 6, p. 3404, 2002.
12. CANUP, Robin M.; WARD, William R. A common mass scaling for satellite systems of gaseous planets. **Nature**, v. 441, n. 7095, p. 834-839, 2006.
13. CANUP, Robin M.; WARD, William R. Origin of Europa and the Galilean satellites. **Europa**, p. 59-83, 2009.
14. CHAMBERS, John E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 304, n. 4, p. 793-799, 1999.

15. CILIBRASI, Marco et al. An N-body population synthesis framework for the formation of moons around Jupiter-like planets. **arXiv preprint arXiv:2011.11513**, 2020.
16. CRESSWELL, Paul; NELSON, Richard P. Three-dimensional simulations of multiple proto-planets embedded in a protostellar disc. **Astronomy Astrophysics**, v. 482, n. 2, p. 677-690, 2008.
17. ČUK, Matija; BURNS, Joseph A. Gas-drag-assisted capture of Himalia's family. *Icarus*, v. 167, n. 2, p. 369-381, 2004.
18. ERIKSSON, Linn EJ; RONNET, Thomas; JOHANSEN, Anders. The fate of planetesimals formed at planetary gap edges. **Astronomy Astrophysics**, v. 648, p. A112, 2021.
19. EVERHART, Edgar. An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings. In: **International Astronomical Union Colloquium**. Cambridge University Press, 1985. p. 185-202.
20. FORTNEY, Jonathan J.; MARLEY, Mark S.; BARNES, Jason W. Planetary radii across five orders of magnitude in mass and stellar insolation: application to transits. **The Astrophysical Journal**, v. 659, n. 2, p. 1661, 2007.
21. FUJII, Yuri I. et al. Orbital Evolution of Moons in Weakly Accreting Circumplanetary Disks. **The Astronomical Journal**, v. 153, n. 4, p. 194, 2017.
22. HELLER, René; PUDRITZ, Ralph. Water ice lines and the formation of giant moons around super-jovian planets. **The Astrophysical Journal**, v. 806, n. 2, p. 181, 2015.
23. IZIDORO, André; MORBIDELLI, Alessandro; RAYMOND, Sean N. Terrestrial planet formation in the presence of migrating super-Earths. **The Astrophysical Journal**, v. 794, n. 1, p. 11, 2014.
24. IZIDORO, André et al. The asteroid belt as a relic from a chaotic early solar system. **The Astrophysical Journal**, v. 833, n. 1, p. 40, 2016.
25. KLEY, Willy. Mass flow and accretion through gaps in accretion discs. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 303, n. 4, p. 696-710, 1999.
26. LUNINE, Jonathan I.; STEVENSON, David J. Formation of the Galilean satellites in a gaseous nebula. *Icarus*, v. 52, n. 1, p. 14-39, 1982.
27. LUBOW, S. H.; SEIBERT, M.; ARTYMOWICZ, P. Disk accretion onto high-mass planets. *The Astrophysical Journal*, v. 526, n. 2, p. 1001, 1999.
28. LUBOW, Stephen H.; MARTIN, Rebecca G. Dead zones in circumplanetary discs as formation sites for regular satellites. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 428, n. 3, p. 2668-2673, 2013.
29. MASSET, F. FARGO: A fast eulerian transport algorithm for differentially rotating disks. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 141, n. 1, p. 165-173, 2000.

30. MIGUEL, Yamila; IDA, Shigeru. A semi-analytical model for exploring Galilean satellites formation from a massive disk. **Icarus**, v. 266, p. 1-14, 2016.
31. MORAES, Ricardo A.; KLEY, Wilhelm; VIEIRA NETO, E. Growth and evolution of satellites in a Jovian massive disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 475, n. 1, p. 1347-1362, 2018.
32. MOSQUEIRA, Ignacio; ESTRADA, Paul R. Formation of the regular satellites of giant planets in an extended gaseous nebula I: subnebula model and accretion of satellites. *Icarus*, v. 163, n. 1, p. 198-231, 2003a.
33. MOSQUEIRA, Ignacio; ESTRADA, Paul R. Formation of the regular satellites of giant planets in an extended gaseous nebula II: satellite migration and survival. *Icarus*, v. 163, n. 1, p. 232-255, 2003b.
34. NESVORNÝ, David; VOKROUHLICKÝ, David; MORBIDELLI, Alessandro. Capture of irregular satellites during planetary encounters. **The Astronomical Journal**, v. 133, n. 5, p. 1962, 2007.
35. OGIHARA, Masahiro; IDA, Shigeru. N-body simulations of satellite formation around giant planets: origin of orbital configuration of the Galilean moons. **The Astrophysical Journal**, v. 753, n. 1, p. 60, 2012.
36. PAPALOIZOU, John CB; LARWOOD, John D. On the orbital evolution and growth of protoplanets embedded in a gaseous disc. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 315, n. 4, p. 823-833, 2000.
37. REIN, Hanno; LIU, S.-F. REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. **Astronomy Astrophysics**, v. 537, p. A128, 2012.
38. REIN, Hanno; PAPALOIZOU, John CB. Stochastic orbital migration of small bodies in Saturn's rings. *Astronomy Astrophysics*, v. 524, p. A22, 2010.
39. REIN, Hanno; SPIEGEL, David S. IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 446, n. 2, p. 1424-1437, 2015.
40. ROY, Archie E. **Orbital motion**. 1978.
41. RUSSELL, John L. **Development of a Self-Consistent Gas Accretion Model for Simulating Gas Giant Formation in Protoplanetary Disks**. 2011. Tese de Doutorado.
42. SASAKI, Takanori; STEWART, Glen R.; IDA, Shigeru. Origin of the different architectures of the jovian and saturnian satellite systems. **The Astrophysical Journal**, v. 714, n. 2, p. 1052, 2010.

43. SCHMIDT, Jürgen et al. Dynamics of Saturn's dense rings. In: **Saturn from Cassini-Huygens**. Springer, Dordrecht, 2009. p. 413-458.
44. SHAKURA, Ni I.; SUNYAEV, Rashid Alievich. Black holes in binary systems. Observational appearance. **Astronomy and Astrophysics**, v. 24, p. 337-355, 1973.
45. STONE, James M.; NORMAN, Michael L. ZEUS-2D: a radiation magnetohydrodynamics code for astrophysical flows in two space dimensions. I-The hydrodynamic algorithms and tests. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 80, p. 753-790, 1992.
46. SUETSUGU, Ryo; OHTSUKI, Keiji. Distribution of Captured Planetesimals in Circumplanetary Gas Disks and Implications for Accretion of Regular Satellites. **The Astrophysical Journal**, v. 839, n. 1, p. 66, 2017.
47. SZULÁGYI, Judit et al. Accretion of Jupiter-mass planets in the limit of vanishing viscosity. **The Astrophysical Journal**, v. 782, n. 2, p. 65, 2014.
48. TAKATA, Toshiko; STEVENSON, David J. Despin mechanism for protogiant planets and ionization state of protogiant planetary disks. **Icarus**, v. 123, n. 2, p. 404-421, 1996.
49. TANAKA, Hidekazu; WARD, William R. Three-dimensional interaction between a planet and an isothermal gaseous disk. II. Eccentricity waves and bending waves. **The Astrophysical Journal**, v. 602, n. 1, p. 388, 2004.
50. TANIGAWA, Takayuki; OHTSUKI, Keiji; MACHIDA, Masahiro N. Distribution of accreting gas and angular momentum onto circumplanetary disks. **The Astrophysical Journal**, v. 747, n. 1, p. 47, 2012.
51. TURNER, N. J.; LEE, Man Hoi; SANO, T. Magnetic coupling in the disks around young gas giant planets. **The Astrophysical Journal**, v. 783, n. 1, p. 14, 2014.
52. VAN LEER, Bram. Towards the ultimate conservative difference scheme. IV. A new approach to numerical convection. **Journal of computational physics**, v. 23, n. 3, p. 276-299, 1977.