

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

JULIANA PAIVA CAVALCANTE

Dinâmica de anéis densos: análise dos anéis de Chariklo

Guaratinguetá

2022

Juliana Paiva Cavalcante

Dinâmica de anéis densos: análise dos anéis de Chariklo

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Bacharel em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Bacharel em Física .

Orientador: Profº Dr. Rafael Sfair

Guaratinguetá
2022

C377d	Cavalcante, Juliana Paiva Dinâmica de anéis densos: análise dos anéis de Chariklo / Juliana Paiva Cavalcante – Guaratinguetá, 2022. 48 f : il. Bibliografia: f. 37-38 Trabalho de Graduação em Física – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Rafael Sfair de Oliveira 1. Satélites - Órbitas. 2. Asteróides - Órbitas. 3. Métodos de simulação. I. Título.
CDU 629.783	

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

JULIANA PAIVA CAVALCANTE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "**GRADUANDO EM**
BACHARELADO EM FÍSICA BACHAREL EM FÍSICA "

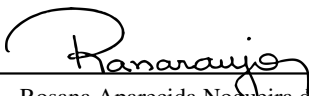
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
FÍSICA

Profº Dr. JÚLIO MARNY HOFF DA SILVA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Profº Dr. Rafael Sfair
Orientador/UNESP-FEG



Dra. Rosana Aparecida Nogueira de Araújo
INPE



Profº Dr. Bruno Eduardo Morgado
UFRJ - OV

Março , 2022

DADOS CURRICULARES

JULIANA PAIVA CAVALCANTE

NASCIMENTO 1995 - Franca / SP

FILIAÇÃO Fábio Cavalcante
Adriana Paiva de Oliveira

2013 / 2022 Bacharelado em Física
Universidade Estadual Paulista "Julio de
Mesquita Filho- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Projeto de Pesquisa

Iniciação científica com o projeto **Dinâmica de anéis densos: análise dos anéis de Chariklo**, sob a orientação do Prof. Dr. Rafael Sfair, no período de janeiro de 2021 até março de 2022.

AGRADECIMENTOS

Tenho imenso respeito e gratidão por todos os amigos que me acompanharam nessa jornada. Vocês me deram suporte e forças para sempre seguir em frente. Agradeço especialmente meu amigo Tiago e meu orientador Dr. Rafael. Vocês foram peças fundamentais para o meu desenvolvimento e para minha trajetória, me dando apoio em todos os momentos que pareciam ser impossíveis.

Este trabalho contou com o apoio das seguintes entidade(s):

FAPESP (Proc. 2016/24561-0) - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

DFG German Research Foundation project 446102036

RESUMO

Em uma campanha realizada em Junho de 2013 para observar o centauro Chariklo que possui sua órbita na região entre Saturno e Urano foi possível detectar através de análises da curva de luz o primeiro sistema de anéis ao redor de um centauro já registrado. O seguinte trabalho tem como objetivo estudar a região dos anéis $C1R$ e $C2R$ de Chariklo a fim de compreender quais efeitos um satélite hipotético (denominado aqui como protolua) pode causar nas partículas situadas em trechos de regiões próximas a ele através de simulações numéricas. Utilizando o integrador numérico SEI foram determinadas as dimensões da fração do anel analisada (*boxsize*) para diferentes tipos de modelagem nas quais podemos observar os efeitos da auto-gravidade das partículas que constituem esse anel assim como os efeitos da perturbação gravitacional causados após inserir protoluas de tamanhos 500 m, 1.000 m e 1.500 m. Os modelos numéricos criados foram divididos em dois grupos de acordo com seu regime de colisão *hard-sphere* ou *merge*. As simulações com o modelo de colisão *hard-sphere* não apresentaram resultados favoráveis pois em nenhuma das condições avaliadas foi percebida uma certa influência nessa região, o que não é coerente ao sistema observado dos anéis de Chariklo. As simulações com colisões do tipo *merge* se tornam mais interessante pois nesses casos é possível observar uma certa perturbação nas partículas da região de interesse, embora precise de alguns ajustes devido a quantidade de partículas que são geradas para se produzir um resultado coerente.

PALAVRAS-CHAVE: Chariklo. anéis. simulações numéricas.

ABSTRACT

In an observing campaign conducted in June 2013 to observe the centaur Chariklo that has its orbit between Saturn and Uranus detected through light curve analysis the first ring system around a centaur ever recorded. This work aims to study through numerical simulations Chariklo $C1R$ and $C2R$ rings to understand which effects a hypothetical satellite (hereafter proto moon) can cause particles located in some regions close to it. We used the SEI numerical integrator and set the dimensions of the analyzed ring fraction (boxsize) for different types of models in which we can observe the effects of the self-gravity of the particles that constitute this ring as well as the gravitational perturbation effect caused after inserting proto moon of sizes 500 m, 1.000 m and 1.500 m. The numerical models were divided into two groups according to their collision regime hard-sphere or merge. The simulations with the hard-sphere collision model did not show favourable results because none of the evaluated conditions realized certain influence in this region, which is not coherent with the observed system of Chariklo rings. The simulations with collisions merge type become more interesting because in these cases are possible to observe certain perturbation in the particles in the region of interest, although it needs some adjustments due to the number of particles that are generated to produce a coherent result.

KEYWORDS: Chariklo. rings. numerical simulations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Representação artística de Chariklo e seu sistema de anéis.	13
Figura 2	Órbita de Chariklo (em branco) em comparação com as órbitas dos planetas do sistema solar.	14
Figura 3	Curva de luz de Chariklo.	15
Figura 4	Espectro de Chariklo (em cinza). A linha em preto é o espectro de Chariklo junto com seu sistema de anéis.	15
Figura 5	Diagrama dos parâmetros das forças para o sistema de anéis de Chariklo. As duas linhas verticais representam a posição radial dos anéis enquanto as linhas coloridas tracejadas indicam os parâmetros.	19
Figura 6	Esquematização dos anéis de Chariklo. A esquerda encontra-se uma representação de Chariklo e seu sistema de anéis, já na figura a direita tem-se uma ampliação de parte dos anéis, junto com a ilustração da possível lua.	21
Figura 7	Posições xy de um trecho do disco de partículas com 19,47 km de extensão formado por partículas de 10 – 50 m sem adição de protolua para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> (modelo I) e <i>merge</i> (modelo i).	26
Figura 8	Diagrama dos anéis densos sem adição de protolua para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i> representados no plano xz	27
Figura 9	Diagrama dos anéis densos com adição de protolua de 500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	29
Figura 10	Simulações dos anéis densos com adição de protolua de 500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i> no plano xz	30
Figura 11	Simulações dos anéis densos com adição de protolua de 1000 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	31
Figura 12	Simulações dos anéis densos com adição de protolua de 1.000 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i> plano xz	32
Figura 13	Diagrama dos anéis densos com adição de protolua de 1.500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i> no plano xy	33
Figura 14	Diagrama dos anéis densos com adição de protolua de 1500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i> plano xz	34
Figura 15	Gráfico da evolução da profundidade óptica em função do tempo para as simulações de colisão <i>merge</i>	36
Figura 16	Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel com 5 km sem adição de protolua para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	40
Figura 17	Diagrama das posições iniciais e finais no plano xz de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel com 5 km sem adição de protolua para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	41
Figura 18	Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel com 5 km contido por uma protolua de 500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	42
Figura 19	Diagrama das posições iniciais e finais no plano xz de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel de 5 km contido por uma protolua de 500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	43
Figura 20	Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel de 5 km contido por uma protolua de 1.000 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	44

Figura 21	Diagrama das posições iniciais e finais no plano xz de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel d 5 km contido por uma protolua de 1.000 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	45
Figura 22	Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel de 5 km contido por uma protolua de 1.500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i>	46
Figura 23	Diagrama das posições x e y de partículas de raio 10 – 100 m em um trecho de 5 km do anel com adição de protolua de 1500 m para os tipos de colisão <i>hard-sphere</i> e <i>merge</i> no plano xz	47
Figura 24	Diagrama das posições xy das partículas de raio 10 – 50 m para os modelos com colisão tipo <i>merge</i> distribuídas em um <i>boxsize</i> de 19, 47 km com protoluas de 500 m em (a) e (b), 1.000 m em (c) e (d) e 1.500 m em (e) e (f).	48
Figura 25	Diagrama das posições xz das partículas de raio 10 – 50 m para os modelos com colisão tipo <i>merge</i> distribuídas em um <i>boxsize</i> de 19, 47 km com protoluas de 500 m em (a) e (b), 1.000 m em (c) e (d) e 1.500 m em (e) e (f).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Propriedades físicas e orbitais de Chariklo.	16
Tabela 2	–	Propriedades físicas e orbitais dos sistema de anéis de Chariklo.	17
Tabela 3	–	Descrição dos métodos simulados para o tipo de colisão <i>hard-sphere</i>	23
Tabela 4	–	Descrição dos métodos simulados para o tipo de colisão <i>merge</i>	24
Tabela 5	–	Profundidade óptica observada para os modelos com colisão do tipo <i>hard-sphere</i>	35

SUMÁRIO

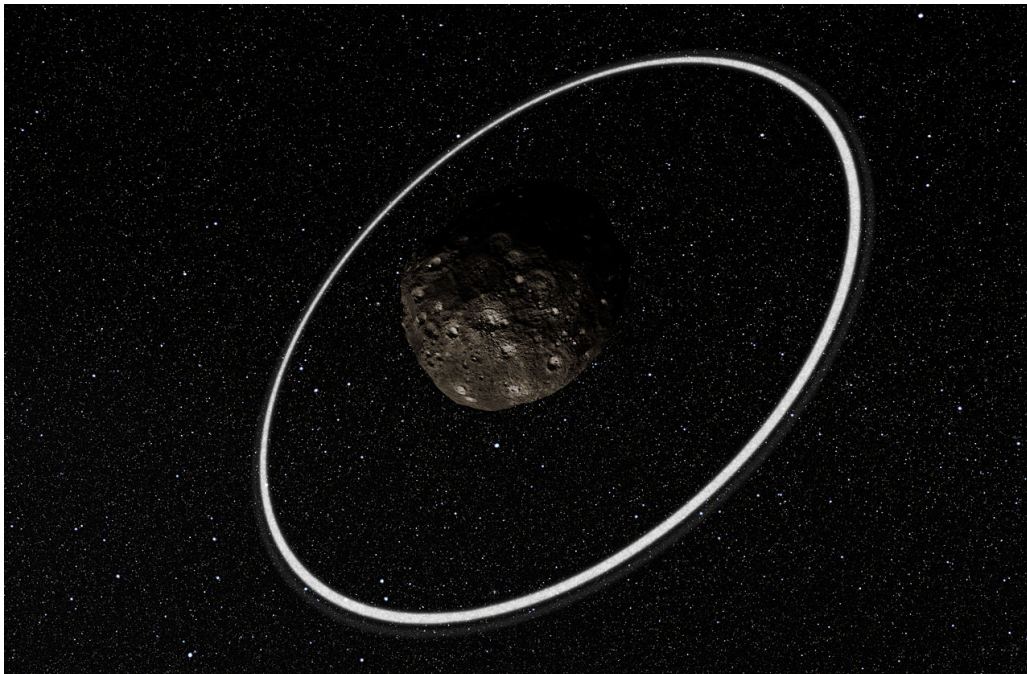
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CHARIKLO	13
1.2	ANÉIS	14
2	FORÇAS PERTURBATIVAS	18
3	METODOLOGIA	21
3.1	PARÂMETROS FÍSICOS DO SISTEMA	21
3.2	MODELOS NUMÉRICOS	22
3.2.1	COLISÕES <i>HARD-PHERE</i>	23
3.2.2	COLISÕES <i>MERGE</i>	23
4	RESULTADOS	25
4.1	DISCO DE PARTÍCULAS	25
4.2	PROTOLUA DE 500 m	28
4.3	PROTOLUA DE 1.000 m	30
4.4	PROTOLUA DE 1.500 m	32
4.5	ANÁLISE DA PROFUNDIDADE ÓPTICA	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Em 1997 o astrônomo norte-americano James Scotti observou pela primeira vez o maior centauro já descoberto, posteriormente nomeado de (10199) Chariklo (Figura 1). Centauros são pequenos objetos que orbitam o sol, localizados no sistema solar exterior entre as órbitas de Saturno e Urano (GLADMAN; MARSDEN; VANLAERHOVEN, 2008) (Figura 2). Segundo Horner, Evans e Bailey (2004) centauros são corpos dinamicamente instáveis e sofrem constantes evoluções nas suas órbitas, o que pode desviá-los de suas órbitas em cerca de milhões de anos devido aos frequentes encontros próximos com planetas gigantes gasosos.

Observações realizadas em 2013 nos trouxeram informações surpreendentes: Chariklo é o primeiro asteroide identificado a possuir um sistema de anéis bem definidos, o primeiro corpo confirmado além dos planetas gigantes gasosos a possuir anéis (BRAGA-RIBAS et al., 2014).

Figura 1 – Representação artística de Chariklo e seu sistema de anéis.



fonte: Lucie Maquet (2014).

Araujo, Sfair e Winter (2016) mostraram que no caso de Chariklo mesmo esses encontros próximos não afetam a estabilidade de seus anéis. Provavelmente sua origem se deu no cinturão de Kuiper (BAILEY; MALHOTRA, 2009), mas não necessariamente a de seus anéis, que podem ter sido gerados através de encontros próximos com esses gigantes gasosos ou até mesmo através de um impacto direto com algum corpo menor que ~ 10 km (PAN; WU, 2016). Nesse segundo cenário o efeito de auto-gravidade das partículas provenientes do impacto pode ser responsável pela formação de satélites hipotéticos, o que acarretaria no confinamento dessas partículas em um sistema de anéis (BRAGA-RIBAS et al., 2014).

Nas seções seguintes será introduzido um levantamento bibliográfico com enfoque nas características físicas e orbitais de Chariklo (seção 1.1) e seus sistema de anéis (seção 1.2).

1.1 CHARIKLO

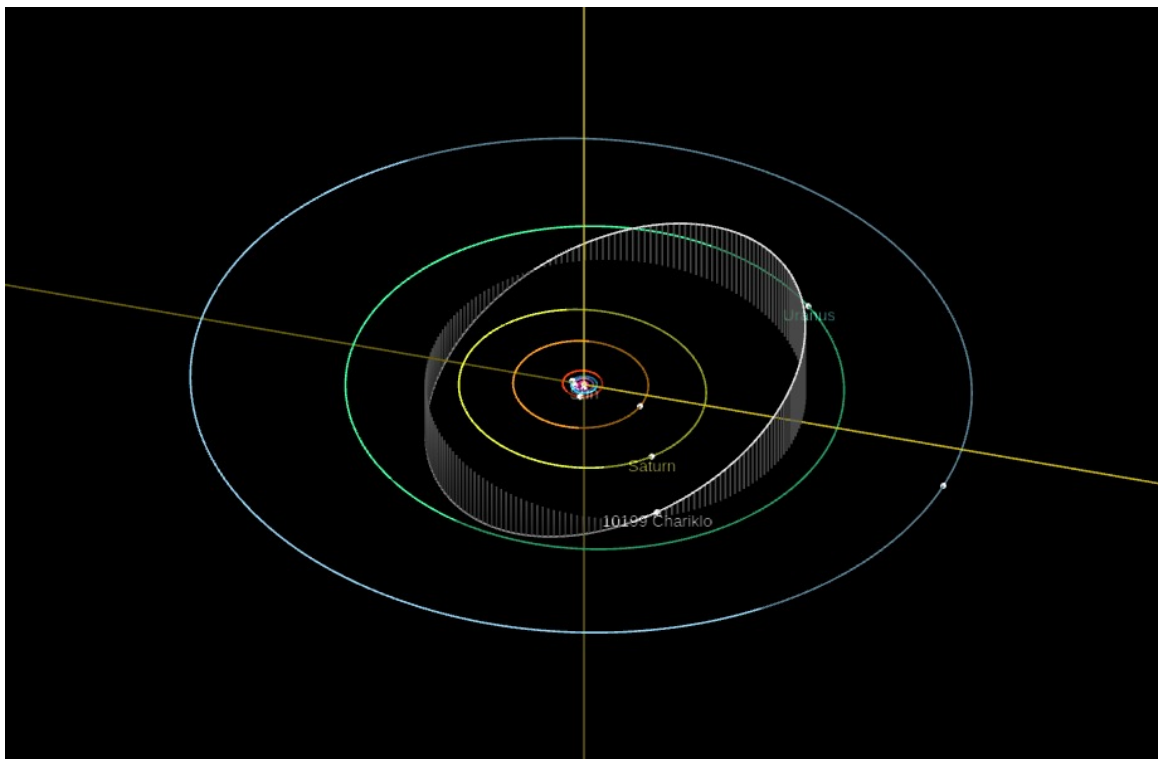
Chariklo é o maior centauro conhecido atualmente, com um formato semelhante a um corpo elipsoidal achatado nos polos e no equador, tendo seus semieixos com dimensões iguais a 143, 8, 135, 2

e 99,1 km (MORGADO et al., 2021). A órbita de Chariklo está próximo da ressonância de 4:3 com Urano Horner, Evans e Bailey (2004), possui um semieixo maior de $a = 15,8$ ua, com excentricidade de $e = 0,171$ e uma inclinação em relação ao plano Terra - Sol de $i = 23^\circ$ (DESMARS, 2015). A Tabela 1 apresentada ao final desse capítulo resume os parâmetros físicos e orbitais de Chariklo.

Considerando Chariklo como um corpo esférico de raio 124 km e densidade equivalente à do gelo ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$), Araujo, Sfair e Winter (2016) estimaram sua massa em $7,986 \times 10^{18} \text{ kg}$. Posteriormente Leiva et al. (2017) aferiu que a massa de Chariklo estaria entre $6 - 8 \times 10^{18} \text{ kg}$.

Análises espectroscópicas revelaram que a superfície de Chariklo é escura, com albedo de 0,042 (FORNASIER et al., 2014). É composto em 80% de material refratário, dos quais 60% de carbono amorfo, 30% de silicatos, 10% de material orgânico, além de 3% de gelo (WOOD et al., 2017). Chariklo tem um período orbital de aproximadamente 63 anos, enquanto o seu período rotacional dura quase 7h.

Figura 2 – Órbita de Chariklo (em branco) em comparação com as órbitas dos planetas do sistema solar.



fonte: JPL/NASA (2022).

1.2 ANÉIS

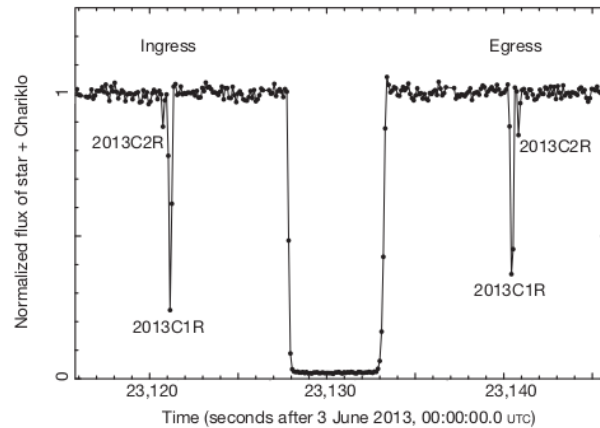
Durante uma campanha para observar a ocultação de Chariklo realizada em Junho 2013 notou-se a presença de quedas adicionais na curva de luz desse Centauro, indicando a possível existência de um sistema de anéis compactos, confirmado posteriormente a partir da coerência nos dados obtidos durante as observações em diversos países da América do Sul (BRAGA-RIBAS et al., 2014). A Figura 3 mostra a curva de luz obtida nesse evento.

As quedas nas curvas de luz representam que esse sistema é composto por dois anéis, *C1R* e *C2R*, também conhecidos com Oiapoque e Chuí, respectivamente, nomes que se referem aos dois rios localizados nos extremos do Brasil.

O primeiro (*C1R*) trata-se do anel mais interno, com uma densidade superficial que varia entre $30 - 100 \text{ g/cm}^2$ e largura de aproximadamente 7,17 km (BRAGA-RIBAS et al., 2014), sendo ele o

anel mais denso e de maior extensão radial. Esse resultado foi obtido considerando-se que sua massa estimada seja equivalente a de um corpo composto de gelo com 2 km de diâmetro. Para a densidade superficial do anel *C2R* foi considerada uma massa total corresponde a 1/8 da massa de *C1R* e sua largura radial é de 3,6 km Braga-Ribas et al. (2014). O sistema de anéis que orbitam Chariklo estão localizado numa distância radial de 390 km, próximo a ressonância 3:1 em relação ao seu movimento médio e período rotacional (LEIVA et al., 2017).

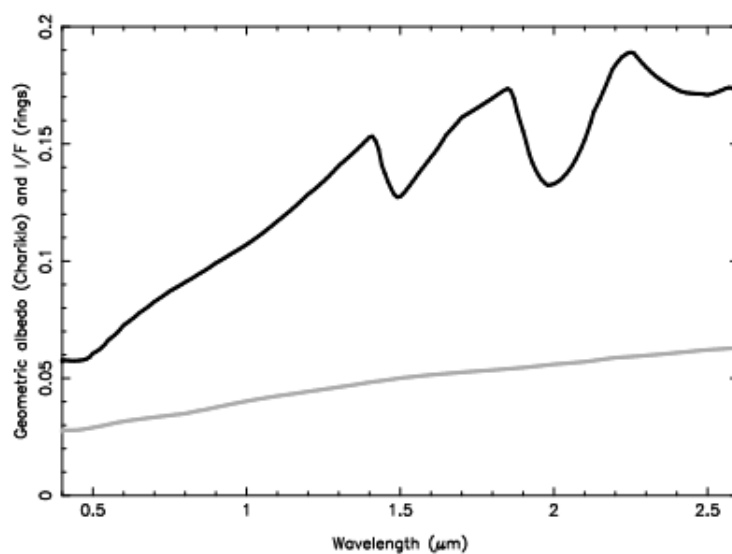
Figura 3 – Curva de luz de Chariklo.



fonte: Braga-Ribas et al. (2014).

Através de análises espectroscópicas, Duffard et al. (2014) constataram que os anéis são formados basicamente de 40 – 70% de silicatos, 10 – 30% de tolina e, diferentemente de Chariklo, também possuem 20% de gelo em sua composição. Na Figura 4 podemos ver os espectros do corpo principal com (em preto) e sem (em cinza) seus anéis. A subtração desses dois resulta no espectro desse sistema de anéis.

Figura 4 – Espectro de Chariklo (em cinza). A linha em preto é o espectro de Chariklo junto com seu sistema de anéis.



fonte: Sicardy et al. (2016).

Assim como Chariklo seus anéis também possuem material escuro. *C1R* e *C2R* apresentam profundidade óptica de aproximadamente 0,449 e 0,05, respectivamente. A distância radial do anel

mais interno com relação a Chariklo equivale a 390,6 km e a do anel mais externo, 404,8 km. A falha que separa ambos anéis possui 8,7 km e nenhum material foi detectado naquela região, com profundidade óptica máxima de 0,004 (BRAGA-RIBAS et al., 2014). A Tabela 2 trás informações sobre as propriedades físicas e orbitais dos anéis $C1R$ e $C2R$.

Pouco se conhece sobre as propriedades dos anéis de Chariklo, inclusive o tamanho das partículas que os compõem e se existe ou não satélites pastores responsáveis por esse confinamento. Outra questão ainda em aberto é o motivo pelo qual ele possui uma falha. Alguns estudos levantam hipóteses de que Chariklo possui pequenas luas, uma possível explicação para sua estrutura atual.

Conforme Braga-Ribas et al. (2014) as forças resultantes das interações entre os elementos dos anéis seriam suficientes para espalhá-lo em alguns milhares de anos. Eles acordam para possibilidade de possíveis satélites pastores maciços, que seriam responsáveis pelo confinamento dessas partículas.

Para Sicardy et al. (2016) os anéis de Chariklo são bem jovens e alguns mecanismos poderiam facilmente ejetar suas partículas, como por exemplo a pressão de radiação de Poynting Robertson que afetaria principalmente partículas micrométricas em poucos meses. A presença de satélites pastores poderiam explicar o confinamento desses anéis.

Michikoshi e Kokubo (2017) concluem que a existência dos anéis estreitos de Chariklo requer a presença de satélites não observados, principalmente se forem formados por partículas pequenas (menor que 1 cm). O tamanho desses satélites depende diretamente da distância dele com relação a borda do anel, além da densidade e do tamanho (também não determinado observacionalmente) das partículas.

Pan e Wu (2016) sugerem a existência de um satélite de ~ 1 km de raio dentro da falha dos anéis, assim como acontece nos sistemas de anéis de Saturno e Urano. Entretanto para se observar tal objeto requer uma alta precisão nos dados observacionais.

Este trabalho tem como objetivo estudar a estabilidade dos anéis de Chariklo e analisar a falha existente entre eles, a partir da inserção de um satélite hipotético (denominado posteriormente como proto-lua), como foi proposto por Braga-Ribas et al. (2014), Pan e Wu (2016) entre outros trabalhos. Para verificar a possibilidade de tal configuração existir nesse sistema, primeiramente foi realizado uma análise analítica, compreendendo assim as forças mais relevantes que atuam nas partículas desse anel, também foi realizada uma estimativa do tamanho desse possível satélite e posteriormente criado diversos modelos numéricos, representando diferentes configurações iniciais.

No capítulo 2 será apresentado um estudo analítico prévio das principais forças atuantes na região onde os anéis estão localizados. O capítulo 3 descreve detalhadamente as condições iniciais das simulações numéricas, assim como o desenvolvimento dos modelos numéricos propostos com e sem adição da proto-lua. No capítulo 4 são discutidos os resultados, verificando as melhores condições para a estabilidade do anel. Por fim, o último capítulo trás as considerações gerais.

Tabela 1 – Propriedades físicas e orbitais de Chariklo.

(10199) Chariklo	
e^1	0,171
a^2	15,8 ua
i^1	23.37°
Dimensões elipsoidais ³	143,8, 135,2 e 99,1 km
Período orbital ¹	63 anos
Massa ¹	6×10^{18} — 8×10^{18}

fonte: ¹Leiva et al. (2017), ²JPL/NASA (2022), ³Morgado et al. (2021).

Tabela 2 – Propriedades físicas e orbitais dos sistema de anéis de Chariklo.

Anéis		
<i>C1R</i>	Largura	7, 17 km
	Profundidade óptica	0, 449
	Distância radial de Chariklo	390, 6 km
<i>C2R</i>	Largura	3, 4 km
	Profundidade óptica	0, 05
	Distância radial de Chariklo	404, 8 km
Falha entre os anéis <i>C1R</i> e <i>C2R</i>		8, 7 km
Profundidade óptica na falha		< 0, 004

fonte:Braga-Ribas et al. (2014).

2 FORÇAS PERTURBATIVAS

As partículas dos anéis são constantemente perturbadas por diversos tipos de forças que afetam direta ou indiretamente suas características físicas e/ou orbitais no decorrer de sua evolução. Essas forças podem ser do tipo gravitacional, pressão de radiação solar, ressonância, forças devido ao achatamento em corpos irregulares, entre outras. Em alguns casos o efeito de uma determinada força principal passa a ser predominante no sistema, já o efeito de muitas delas podem ser muito pequenas ao compará-las.

No caso de um sistema de anéis de partículas a compreensão dos principais efeitos perturbativos sobre a dinâmica orbital de cada corpúsculo que constitui esse anel é de extrema relevância, pois em algumas situações essas forças são tão intensas que acabam por tornar as outras pouco evidentes, podendo desconsiderá-las sem grandes perdas (SIQUEIRA, 2019).

Conforme Hamilton e Krivov (1996) as partículas confinadas em um sistema de anéis são principalmente afetadas pela força gravitacional do corpo central. Através da abordagem realizada em seu trabalho foi possível determinar parâmetros adimensionais para desenvolver um modelo de comparação ao que se refere a magnitude das forças perturbatórias.

Sendo o Sol o corpo mais massivo do sistema solar, sua gravidade afeta o movimento das partículas de um anel e pode ser sentida forte ou fracamente por qualquer outro objeto, tornando assim possível determinar uma relação entre a sua influência gravitacional e a influência do corpo hospedeiro do anel nas partículas através do parâmetro S definido como:

$$S = \frac{3}{4} \frac{n_{\odot}}{n} \quad (1)$$

onde $n_{\odot}$ é o movimento médio do corpo central (Chariklo) ao redor do Sol e n o movimento médio da partícula, determinado como:

$$n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{GM}{a_c^3}} \quad (2)$$

na qual G é a constante gravitacional e M e a_c a massa e o semieixo maior do corpo central, respectivamente (MURRAY; DERMOTT, 1999).

No que concerne aos sistema formado por Chariklo e seus anéis essa força de gravitação solar aplicada às partículas deve ser pequena, já que ela é inversamente proporcional ao quadrado da distância e Chariklo que possui o semieixo maior de 15 ua. Assim sendo, uma análise com relação à força que Chariklo exerce sobre as partículas em razão da força gravitacional do Sol se torna mais interessante (equação 3).

$$P_C = \frac{4}{3} \frac{n}{n_{\odot}} \quad (3)$$

tratando-se o parâmetro P_C como a perturbação gravitacional que Chariklo exerce sobre uma partícula.

Tendo em consideração que Chariklo é um corpo irregular de formato elipsoidal tornou-se possível um estudo sobre o efeito que as força decorrentes de seu achatamento causa nas partículas confinadas, utilizando-se de um termo quadrupolo axissimétrico (J_2) para assim definir um parâmetro de achatamento W dado através da equação 4 (HAMILTON; KRIVOV, 1996):

$$W = \frac{3}{2} \left(\frac{R_C}{a_c} \right)^2 J_2 \left(\frac{n}{n_{\odot}} \right) \quad (4)$$

aos quais R_C é definido pelo raio de Chariklo e equivale a 124 km Araujo, Sfair e Winter (2016) e J_2 é um termo harmônico esférico perturbativo de Chariklo.

Segundo Hu e Scheeres (2004) o coeficiente J_2 pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$J_2 = \frac{1}{2}(2I_{zz} - I_{xx} - I_{yy}) \frac{1}{m_C R_C} \quad (5)$$

sendo m_C a massa de Chariklo. Os momentos de inércia I_{xx} , I_{yy} e I_{zz} são definidos por Murray e Dermott (1999) da seguinte forma:

$$I_{xx} = \frac{1}{5}(B^2 + C^2)m_C \quad (6)$$

$$I_{yy} = \frac{1}{5}(A^2 + C^2)m_C \quad (7)$$

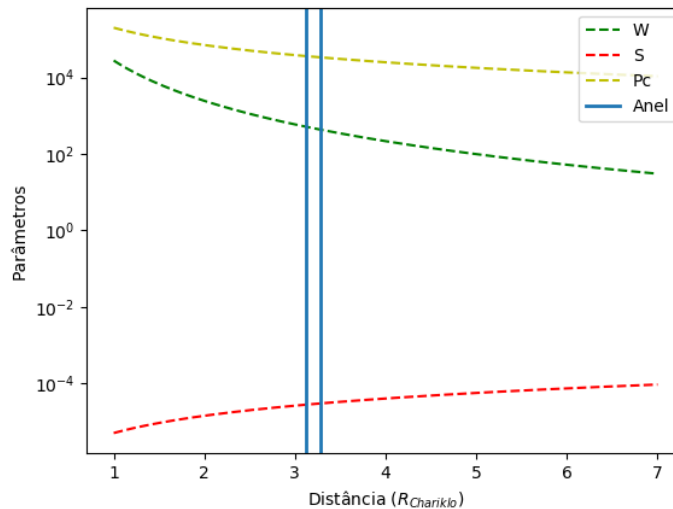
$$I_{zz} = \frac{1}{5}(A^2 + B^2)m_C \quad (8)$$

onde A , B e C os semieixos de Chariklo.

Assumindo uma massa m_C para Chariklo de 6×10^{18} pois para esse valor estimado de sua massa seu efeito de perturbação gravitacional será menor sobre as partículas do anel, tendo as dimensões de seus semieixos dadas por 145, 8, 135, 2 e 99, 1 km (vide tabela 1), foi possível determinar o valor de 0,1236 para o J_2 .

Com o objetivo de analisar quais forças perturbadoras são mais ativas nas região de influência das partículas que compõem o anel foram calculados os parâmetros S , P_C e W para uma partícula em uma região próxima a Chariklo (até $6 R_C$), representados na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama dos parâmetros das forças para o sistema de anéis de Chariklo. As duas linhas verticais representam a posição radial dos anéis enquanto as linhas coloridas tracejadas indicam os parâmetros.



fonte: Produção do próprio autor.

Com base na Figura 5 pode-se concluir que as forças mais influentes na região dos anéis de Chariklo são aquelas produzidas pelo próprio corpo central, tais como sua força gravitacional (P_C) e de achatamento (W). O efeito de maré solar se torna mais intenso conforme Chariklo se aproxima do Sol, porém não é forte o suficiente para sobrepor os efeitos das forças internas a esse sistema, que chegam a ser cerca de 10.000 vezes mais intensas.

Também foi possível observar que o efeito causado pelas forças P_C e W , separadamente ou sobrepostas podem afetar no comportamento orbital das partículas constituintes desse anel. Neste

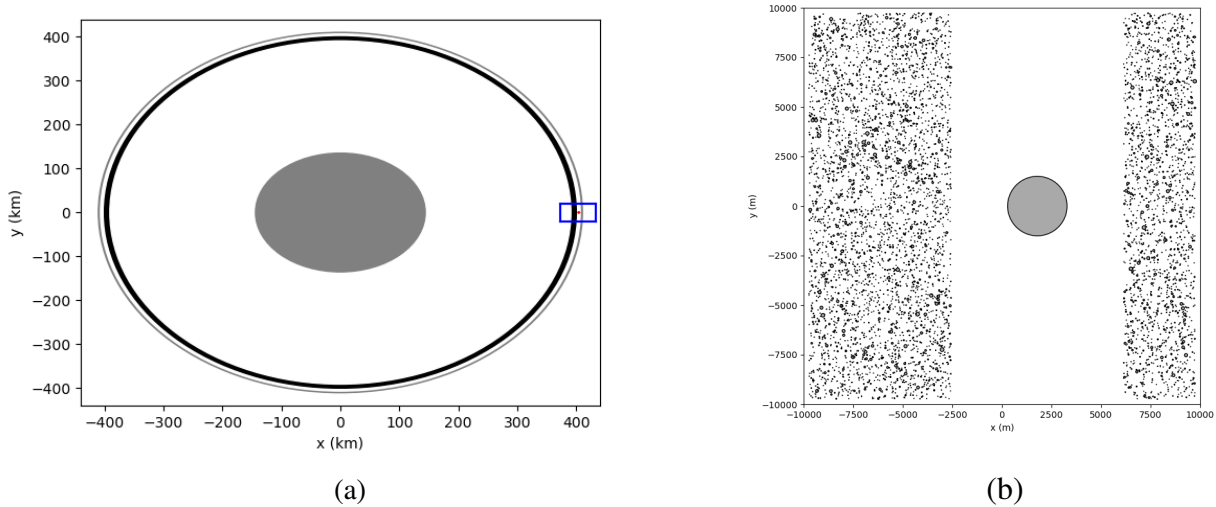
trabalho foi considerado apenas a força gravitacional exercida pelo corpo principal nas partículas do anel, tendo como planejamento para simulações futuras a inclusão do efeito de achatamento causado pelo coeficiente J_2 .

3 METODOLOGIA

Para compreender a natureza dos anéis de Chariklo e o efeito causado por um possível satélite situado na falha do anel foram criadas 17 simulações numéricas com diferentes configurações iniciais, variando parâmetros como massa e tamanho das partículas, assim como a inserção de um pequeno satélite hipotético, a protolua. Também foi explorado o caso de um anel único, sem o satélite e sem a falha.

A abordagem utilizada neste trabalho consta de simulações numéricas desenvolvidas da criação de uma caixa retangular (*boxsize*) com dimensões variando de 5 km até a largura total do anel, com valor máximo de 19,47 km Braga-Ribas et al. (2014), tendo como objetivo analisar os efeitos sentidos por partículas situadas em uma pequena região nas vizinhanças do possível satélite. Essa largura máxima de 19,47 km foi definida a partir do limite interno do primeiro anel (*C1R*) até o limite externo do segundo anel *C2R*. A ??-(a) mostra uma esquematização do sistema de anéis de Chariklo, enquanto a ??-(b) é uma ampliação de um trecho do anel simulado dentro do *boxsize*. Na seção 3.1 serão determinados os parâmetros físicos do sistema e na seção 3.2 serão definidos os modelos numéricos desenvolvidos para as simulações.

Figura 6 – Esquematização dos anéis de Chariklo. A esquerda encontra-se uma representação de Chariklo e seu sistema de anéis, já na figura a direita tem-se uma ampliação de parte dos anéis, junto com a ilustração da possível lua.



fonte: Produção do próprio autor.

3.1 PARÂMETROS FÍSICOS DO SISTEMA

Um satélite situado dentro de um anel pode gerar instabilidade no movimento de suas partículas, criando uma região vazia no entorno de sua órbita. O encontro entre o satélite com as partículas provoca o aumento da excentricidade de suas órbitas, causando o espalhamento dessas partículas em um espaço de tempo de poucos períodos orbitais (MURRAY; DERMOTT, 1999).

A largura (W_{ch}) dessa região vazia gerada devido aos encontros próximos com o satélite pode ser estimada através da equação 1 Hänninen (1993):

$$W_{ch} \sim 2,1\mu^{1/3}a_{pl} \quad (1)$$

onde μ é a razão de massa entre o satélite e Chariklo e a_{pl} é o semieixo maior do satélite.

Assumi-se que a protolua seja composta pelo mesmo material das partículas, considerando que ela possa ter sido formada simultaneamente com o surgimento dos anéis ou a partir de uma possível acreção de sua matéria. Supondo a protolua como um corpo esférico e de densidade ρ equivalente à das partículas do anel foi possível determinar o tamanho de seu raio r_{pl} :

$$r_{pl} \sim \frac{0,3W_{ch}}{a_{pl}} \left(\frac{m_C}{\rho} \right)^{1/3} \quad (2)$$

onde m_C é a massa de Chariklo.

Conforme Leiva et al. (2017) a massa de Chariklo está entre $6 - 8 \times 10^{18}$ kg. Aferindo uma massa m_C de Chariklo equivalente a 6×10^{18} kg, definindo $a \sim 398$ km como a distância radial do centro da falha do sistema e a largura desta da falha equivalente a $8,7$ km encontrou-se um valor máximo para o raio da protolua de $1,5$ km, o que dificilmente seria observável pois requer uma altíssima precisão dos métodos observacional. Esse resultado é coerente com as propostas contidas em Pan e Wu (2016), onde supõe-se que esse raio deve ser de ~ 1 km, respeitando o limite do raio de Roche de Chariklo e, assim, evitando possíveis fragmentações.

O próximo passo é estimar as condições iniciais para os anéis. Segundo Braga-Ribas et al. (2014) os anéis são compostos por partículas de gelo e possui densidade superficial estimada entre $300 - 1.000$ kg/m². A massa do anel $C1R$ é equivalente a um corpo de gelo com raio de 1 km e o anel $C2R$ é um corpo de tamanho radial de $0,5$ km, correspondente à metade de $C1R$. A partir desses dados foi possível calcular a densidade superficial total do anel $\sigma \sim 553,3$ kg/m². Para determinar a massa das partículas assumimos essas esféricas, de densidade $\rho = 500$ kg/m³.

3.2 MODELOS NUMÉRICOS

Buscando maior coerência com os resultados observados foi adotado para a prática das simulações o Rebound/Symplectic Epicycle Integrator (SEI) Rein e Tremaine (2011), um integrador simplético desenvolvido para estudo de trechos de discos e anéis planetários em pequena escala para situações em que não se é possível simular um disco inteiro, apropriado para casos nos quais a interação gravitacional entre as partículas seja grande se comparada com o região de influência de Hill das mesmas. O integrador trabalha com uma região limitada do anel e aplica condições periódicas de contorno, de forma que se a partícula ultrapassa o limite de uma das bordas ela é recolocada na borda oposta. Isso permite analisar efeitos locais com um custo computacional reduzido. Ele também utiliza-se de um parâmetro Ω , que é a velocidade angular da órbita média dado pela equação 3:

$$\Omega = \sqrt{\frac{G(m_C + m_{pl})}{a_{pl}^3}} \quad (3)$$

sendo m_{pl} a massa da protolua. Substituindo na equação 3 os valores definidos na seção 2.1 tem-se que o Ω correspondente para uma protolua localizada no centro da falha é igual a:

$$\Omega = 7,95381 \times 10^{-5} s^{-1} \quad (4)$$

A aceleração inicial das partículas assim como as velocidades nas direções x e z são iguais a zero. A velocidade em y foi determinada da seguinte forma:

$$v_y = -1,5x\Omega \quad (5)$$

No caso da protolua, a velocidade inicial na direção y era zero.

O tempo de integração definido em todas as simulações é referente a 10^4 períodos orbitais de uma partícula orbitando na borda externa do anel $C2R$. Esse tempo de integração foi mantido fixo em todas

as simulações. Com o objetivo de produzir um modelo numérico coerente com o atual sistema de anéis de Chariklo foram realizadas simulações em dois regimes diferentes de colisão: colisão do tipo *hard-sphere* e do tipo *merge* que serão apresentadas nas próximas seções.

3.2.1 COLISÕES *HARD-PHERE*

Nesse tipo de colisão, após um encontro entre duas partículas ser detectado o integrador SEI utiliza um parâmetro definido como coeficiente de restituição, que será responsável por conservar a quantidade de movimento, a massa e em alguns casos também conserva a energia.

Inicialmente foram criados dois modelos numéricos para um único anel extenso de 19,47 km constituídos por partículas cujos raios variavam de 10 – 50 m (modelo I) e 10 – 100 m (modelo II), distribuídas de forma uniforme de maneira aleatória no plano xy dentro dos limites do *boxsize* nas direções x e y e assumindo $z = 0$. O tamanho do raio dessas partículas foi distribuído aleatoriamente, definido segundo uma lei de potência de expoente igual a -3 .

A partir dos dados obtidos nesses dois modelos (esses resultados serão discutidos nos próximos capítulos) foi compreendida a necessidade de novas simulações com a adição de protoluas cujos raios variavam de 500 m, 1.000 m e 1.500 m. Com o objetivo de analisar a perturbações em regiões próximas a esses possíveis proto-satélites foi criado um *boxsize* de 5.000 m.

O modelo III foi desenvolvido para uma protolua de 500 m posicionada na origem juntamente com partículas com tamanhos variando entre 10 – 50 m. Para o modelo IV a mesma configuração foi mantida, alterando apenas a variação entre o raio das partículas para 10 – 100 m.

Nos modelos V e VI foram adicionadas protoluas com raio de 1.000 m, variando o raio das partículas de 10 – 50 m e 10 – 100 m respectivamente.

Para os modelos VII e VIII foram criadas simulações numéricas cujo o raio da protolua era 1.500 m, que é o valor máximo para um possível satélite situado na falha do anel, como determinado a partir da equação 2. No modelo VII o tamanho das partículas variavam de 10 – 50 m enquanto no modelo VIII variavam de 10 – 100 m. A tabela 3 resume os principais parâmetros que se diferenciam entre os modelos dessa seção.

Tabela 3 – Descrição dos métodos simulados para o tipo de colisão *hard-sphere*.

COLISÕES <i>HARD-SPHERE</i>			
Modelo	r_{pl} (m)	Tamanho das partículas (m)	Boxsize (m)
I	-	10-50	19.470
II	-	10-100	19.470
III	500	10-50	5.000
IV	500	10-100	5.000
V	1.000	10-50	5.000
VI	1.000	10-100	5.000
VII	1.500	10-50	5.000
VIII	1.500	10-100	5.000

fonte: Produção do próprio autor.

3.2.2 COLISÕES *MERGE*

No caso de colisões tipo *merge*, ao constatar o contato entre duas partículas o integrador irá uni-las fazendo com que a partícula com menor massa seja removida, conservando a quantidade de movimento, massa e volume, mas não a energia.

Assim como o método apresentado na seção 3.2.1 foram criados inicialmente dois modelos numéricos para um único anel com largura radial de 19,47 km constituídos por partículas cujos raios

variavam de 10 – 50 m (modelo *i*) e 10 – 100 m (modelo *ii*). A forma de distribuição das partículas dentro do regime do *boxsize* foi mantida, alterando apenas o tipo de colisão.

Como objeto de comparação entre os métodos desenvolvidos para colisões do tipo *hard-sphere* foram criadas outras seis simulações numéricas, com a adição das protolua de dimensão igual a 500 m, 1.000 m e 1.500 m, variando o raio das partículas. Nessas configurações também foi mantido o *boxsize* de 5 km com o intuito de analisar os efeitos causados na vizinhança desse possível satélite.

Para o modelo *iii* foi acrescida uma protolua de 500 m posicionada aleatoriamente dentro das delimitações do *boxsize* com um conjunto de partículas com tamanhos variando entre 10 – 50 m. No modelo *iv* alteramos apenas a variação entre o raio das partículas para o intervalo 10 – 100 m.

O modelo *v* consiste em um anel composto por partículas que variavam de 10 – 50 m enquanto no modelo *vi* essas partículas tinham variação radial de 10 – 100 m. Em ambos os modelos foi adicionada uma protolua com extensão radial de 1.000 m.

Por fim temos os modelos *vii* e *viii*, aos quais foram adicionados uma protolua de 1.500 m de raio e as partículas que constituíam esse sistema variavam em 10 – 50 m e 10 – 100 m de raio, respectivamente.

Análises a partir dos dados gerados por todas as simulações anteriores mostraram a indispensabilidade de novas simulações, com o objetivo de avaliar não apenas o efeito da protolua em partículas localizadas em regiões próximas a ela, mas também analisar seu efeito em toda a região do sistema de anéis a partir. Para esses casos foi utilizado um *boxsize* de 19,47 km, tamanho esse definido anteriormente como a largura radial do anel. As partículas variavam em tamanho de 10 – 50 m e se mantiveram distribuídas uniformemente de maneira aleatória no plano *xy* se mantendo nos limites do *boxsize* nas direções *x* e *y* e assumindo $z = 0$. O modelo *ix* foi adaptado para uma protolua de 500 m enquanto os modelos *x* e *xi* apresentam protolua com raios de 1.000 m e 1.500 m, respectivamente. A tabela 4 mostra detalhadamente todas as configurações apresentadas nesta seção.

Tabela 4 – Descrição dos métodos simulados para o tipo de colisão *merge*.

COLISÕES <i>MERGE</i>			
Modelo	r_{pl} (m)	Tamanho das partículas (m)	Boxsize (m)
i	-	10-50	19.470
ii	-	10-100	19.470
iii	500	10-50	5.000
iv	500	10-100	5.000
v	1.000	10-50	5.000
vi	1.000	10-100	5.000
vii	1.500	10-50	5.000
viii	1.500	10-100	5.000
ix	500	10-50	19.470
x	1.000	10-50	19.470
xi	1.500	10-50	19.470

fonte: Produção do próprio autor.

4 RESULTADOS

Para melhor compreensão dos resultados obtidos através das simulações numéricas foram criados diversos diagramas relacionando as posições das partículas do anel em diferentes instantes de tempo, possibilitando assim o estudo da evolução do sistema hipotético de anel proposto e os efeitos nele causado devido a presença ou ausência da protolua.

A discussão dos resultados será abordada neste capítulo na forma de cinco seções: a primeira apresentando as simulações sem a adição da protolua e comparando os dois regimes de colisões propostos. As três seções subsequentes terão um enfoque nos modelos numéricos acrescidos das protoluas de 500 m (seção 4.2), 1.000 m (seção 4.3) e 1.500 m (seção 4.4), sempre defrontando os resultados entre as simulações com colisões do tipo *merge* e *hard-sphere*. Na última seção será realizada uma análise da evolução da profundidade óptica em relação ao tempo.

4.1 DISCO DE PARTÍCULAS

Os modelos numéricos elaborados para os casos de um anel constituído apenas por partículas são importantes para compreender a dinâmica que ocorre entre esses corpúsculos contidos nessa região, analisando então a possibilidade da formação de uma possível lua, visto que Braga-Ribas et al. (2014) menciona a hipótese da criação de possíveis satélites a partir do material presente no disco.

As quatro simulações exploradas nesta seção são diferenciadas apenas pelo seus tipos de colisão e pela variação da extensão radial das partículas, que estão entre 10 – 50 m e 10 – 100 m. Essas simulações se referem aos os modelos I, II para colisão do tipo *hard-sphere* e *i* e *ii* para colisão do tipo *merge*. A Figura 7 apresenta o diagrama das coordenadas das partículas com tamanhos entre 10 – 50 m no plano xy nos instantes inicial (coluna à esquerda) e final (coluna à direita) de cada simulação, comparando os resultados dos regimes de colisão *Hard-sphere* nos diagramas (a) e (b) com resultados obtidos para o regime *merge*, como mostrados nos diagramas (c) e (d).

No regime *hard-sphere* todas as partículas se mantiveram estáveis durante todo o período da simulação. Não houve acreção de matéria em nenhuma delas assim como não foi possível observar a abertura de uma falha nessa região. No modelo I a simulação possuía ~ 11.500 diferentes partículas, enquanto o modelo II gerou um anel com ~ 5.500 partículas, o que equivale a 100% da quantidade inicial de partículas. Essa diferença na quantidade de partículas acontece pois a massa total m_{ring} no trecho do anel simulado era estimada conforme as dimensões do *boxsize*, determinada através da equação 1:

$$m_{ring} = \sigma xy \quad (1)$$

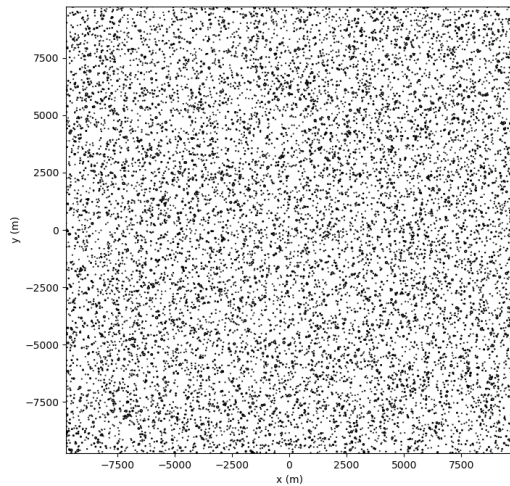
onde σ é a densidade superficial do anel e x e y são as dimensões da largura do *boxsize* nessas respectivas direções.

Assim como na Figura 7, a Figura 8 mostra as posições xz das partículas nos instantes inicial e final para os dois diferentes regimes de colisão adotados. Inicialmente nos modelos I e II as partículas estavam todas dispostas no plano xy , mas após menos de 100 períodos orbitais foi possível observar o ganho de uma certa inclinação com relação ao eixo z , fazendo esse material se dispersar em um curto período de tempo. O diagrama da Figura 8(d) mostra que no final da simulação I a maioria das partículas estão confinadas dentro de um intervalo entre -2.500 até 2.500 km. Para comparação, os anéis de Saturno possuem uma espessura de até 1.000 m (ZEBKER; TYLER, 1984).

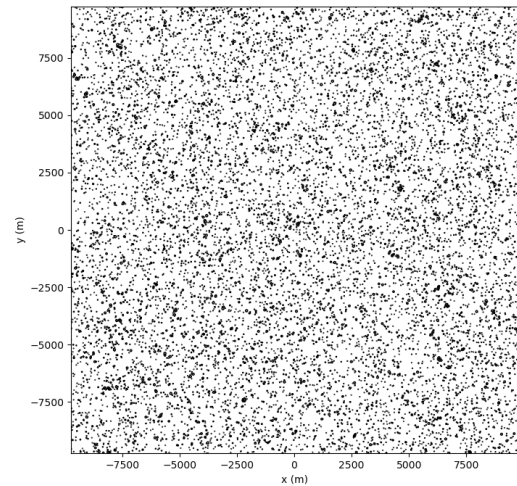
Os resultados obtidos através dos modelos I e II não mostram nenhuma forma de acreção, não sendo possível observar nenhuma formação de satélites e nem a criação de falhas na região de interesse. Ao contrário dos modelos que se utilizam do regime *hard-sphere*, no tipo de colisão *merge* as partículas colidem e se aglutinam rapidamente formando alguns corpos maiores com tamanhos de até 150 m,

como observado no modelo i . No modelo ii algumas partículas atingiram um tamanho superior a 200 m. Devido ao enorme número de colisões que ocorrem dentro do anel foi possível analisar que em um curto período de tempo essas colisões fossem responsáveis por fazer permanecer apenas 50 partículas no sistema de anéis.

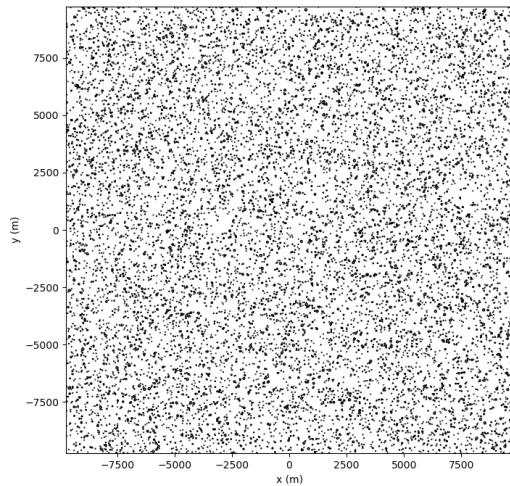
Figura 7 – Posições xy de um trecho do disco de partículas com 19,47 km de extensão formado por partículas de 10 – 50 m sem adição de protolua para os tipos de colisão *hard-sphere* (modelo I) e *merge* (modelo i).



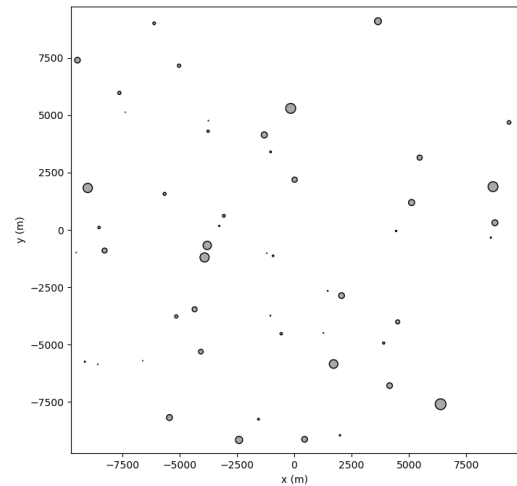
(a) Instante inicial - modelo I



(b) Instante final - modelo I



(c) Instante inicial - modelo i

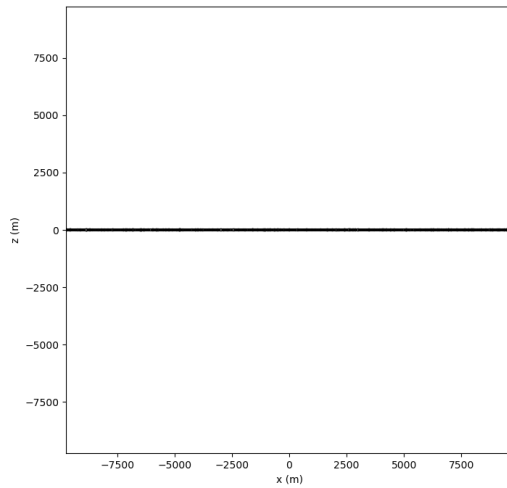


(d) Instante final - modelo i

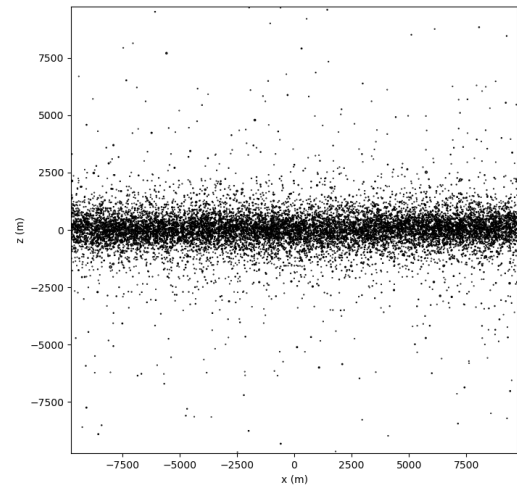
fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados obtidos para ambos os regimes nos casos em que as partículas variavam em raio de 10 – 100 m são apresentados na Figura 16 do apêndice.

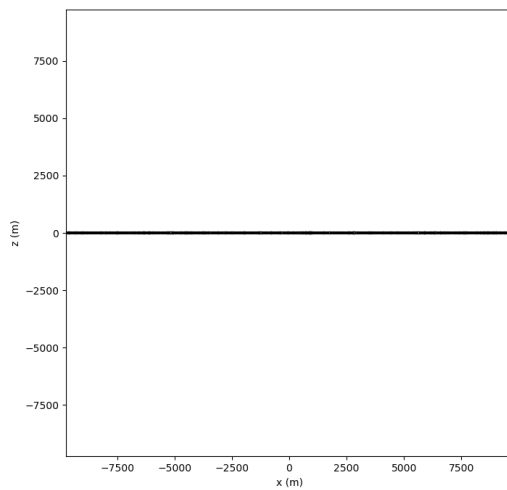
Figura 8 – Diagrama dos anéis densos sem adição de protolua para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge* representados no plano xz.



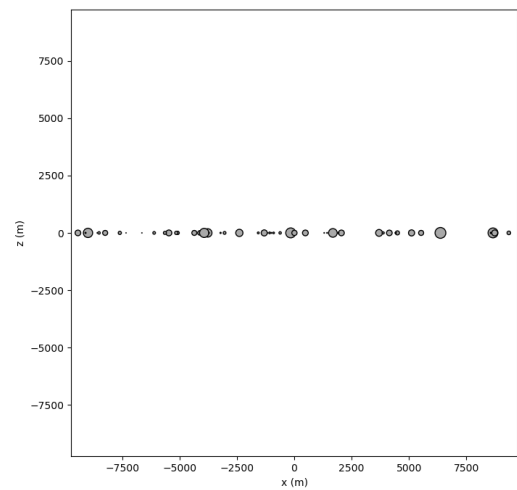
(a) Instante inicial - modelo I



(b) Instante final - modelo I



(c) Instante inicial - modelo i



(d) Instante final - modelo i

fonte: Produção do próprio autor.

4.2 PROTOLUA DE 500 M

Os modelos numéricos descritos na seção 4.1 não apresentaram resultados condizentes com o sistema de anéis de Chariklo, tendo em vista que não foi possível observar a formação de uma protolua, nem de uma falha dentro desse sistema e, em alguns casos, as colisões entre as partículas foram responsáveis por varrer a região analisada restando pouco material nesses locais. A partir dessas análises foi inserida uma protolua com raio equivalente de 500 m dentro de um *boxsize* de 5.000 m a fim de observar se os efeitos causados por essa protolua em regiões próximas possibilitaria a formação de uma falha e talvez uma acreção de matéria nesse corpo mais massivo.

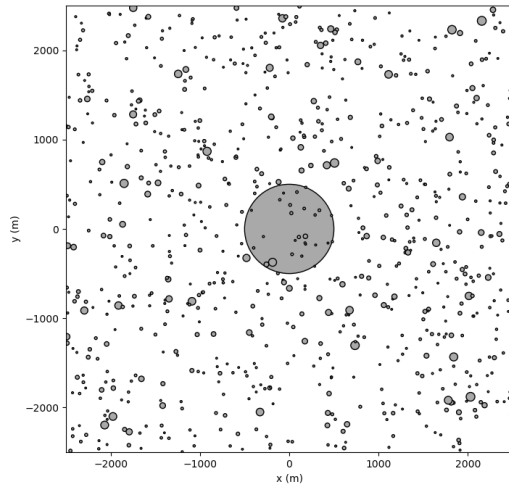
A Figura 9 e a Figura 10 trazem as posições iniciais e finais de partículas com raios entre 10 – 50 m representadas nos planos *xy* e *xz* para os modelos III e *iii*. É possível notar que o regime de colisão adotado no modelo III faz com que a inserção da protolua de 500 m cause uma certa instabilidade nas posições das partículas espalhando-as ao longo de todo *boxsize*, mas ainda assim essa perturbação não se mostra suficiente para reproduzir a falha observada no sistema de anéis de Chariklo. Os modelos IV e *iv* para partículas com 10 – 100 m serão apresentados na figura Figura 17 do apêndice.

Ao final das simulações cada um desses modelos continha aproximadamente 800 partículas devido as dimensões do *boxsize* estarem reduzida. Em razão da proporção de massa entre a protolua e as partículas ser no mínimo 0,001, a interação gravitacional das partículas com a protolua também causa uma pequena alteração na órbita do satélite. Esse efeito é mais intenso nas simulações com partículas de até 100 m.

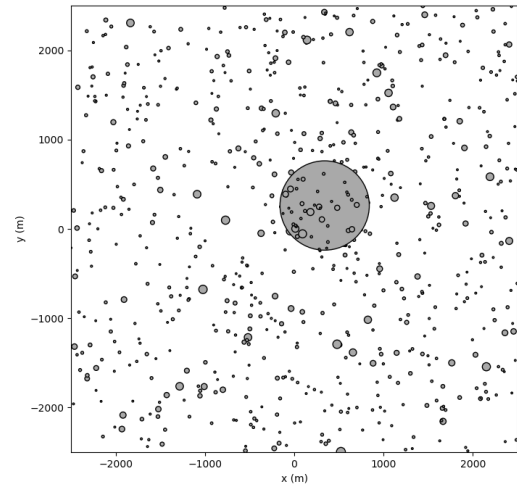
No regime de colisão *merge* (modelo *iii*) houve acreção de massa na protolua e assim como nas simulações *i* e *ii* algumas partículas também crescem, restando ao final da simulação menos de 0,5 % da quantidade inicial dos corpos simulados dentro dos limites do *boxsize*.

Posteriormente aos resultados dessas simulações foi realizado uma nova simulação envolvendo a extensão total do anel sob o regime de colisão *merge* (modelo *ix*). No total foram geradas 11.679 diferentes partículas nessa simulação e os seus resultados foram incluídos no apêndice. Entretanto, mesmo analisando a extensão completa do anel, quase nenhuma partícula sobreviveu ao tempo total de integração. o que é improvável fisicamente já que o anel é observável.

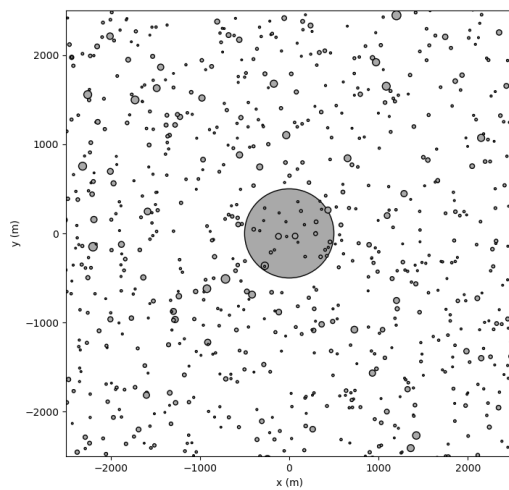
Figura 9 – Diagrama dos anéis densos com adição de protolua de 500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



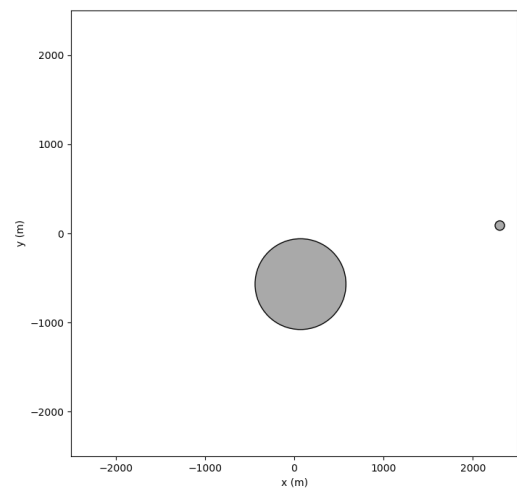
(a) Instante inicial - modelo III



(b) Instante final - modelo III



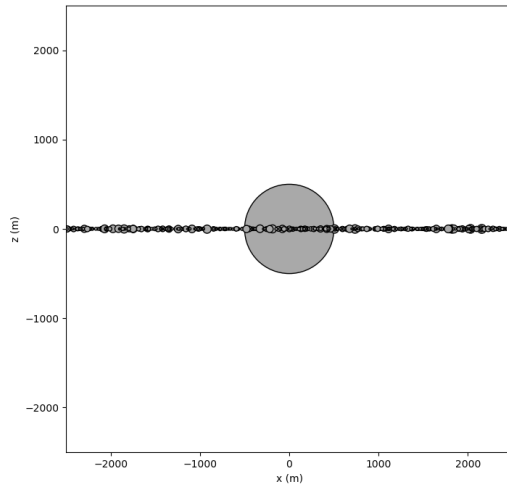
(c) Instante inicial - modelo *iii*



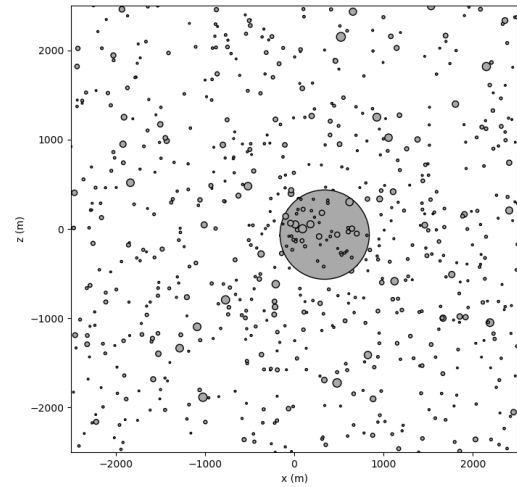
(d) Instante final - modelo *iii*

fonte: Produção do próprio autor.

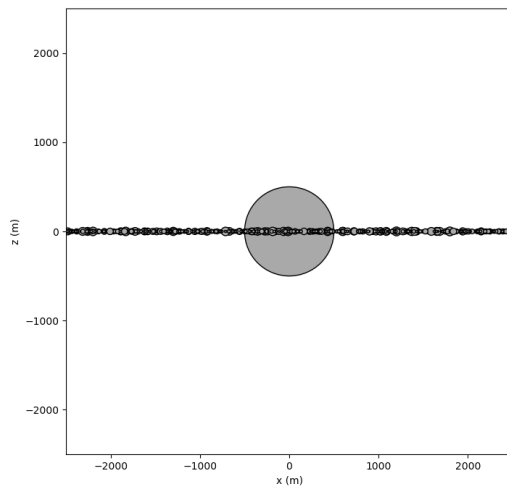
Figura 10 – Simulações dos anéis densos com adição de protolua de 500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge* no plano xz .



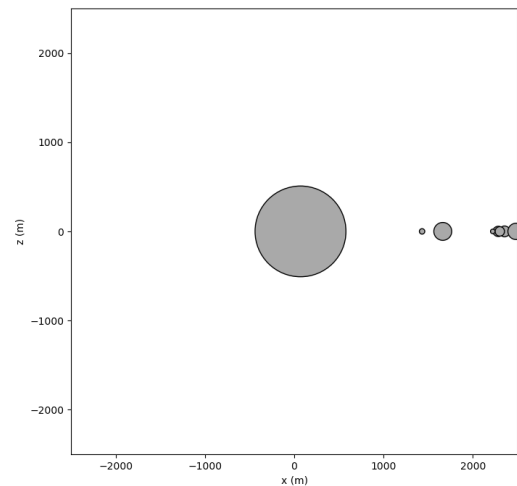
(a) Instante inicial - modelo III



(b) Instante final - modelo III



(c) Instante inicial - modelo *iii*



(d) Instante final - modelo *iii*

fonte: Produção do próprio autor.

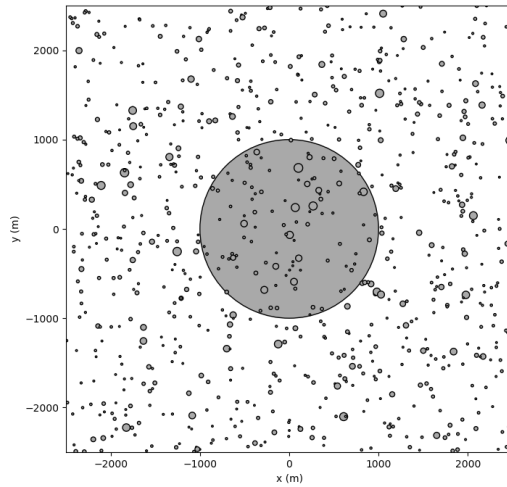
4.3 PROTOLUA DE 1.000 M

Devido ao tamanho da falha observada nos anéis de Chariklo (8,7 km) era esperado que nenhuma partícula permanecesse naquela região, entretanto as simulações III e IV não reproduziram isso.

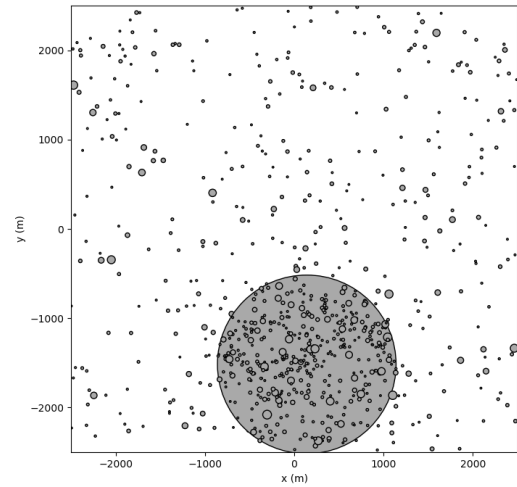
Nesta seção serão discutidos os modelos V, VI, v e vi aos quais foram adicionadas protoluas com raio de 1.000 m que de acordo com Pan e Wu (2016) está dentro dos limites de Roche de Chariklo. Na Figura 11 e Figura 12 são apresentados os diagramas de condições iniciais e finais das posições das partículas em xy e xz , com seus raios variando entre 10 – 50 m.

Em ambos os modelos de simulações v e vi (figura Figura 18 no apêndice) todas as partículas foram removidas devido as colisões entre as próprias partículas e com a protolua. Como o tamanho do *boxsize* analisado era de 5.000 m (um tamanho inferior ao da falha) era esperado esse resultado pois é uma região próxima onde apenas o hipotético satélite deveria sobreviver.

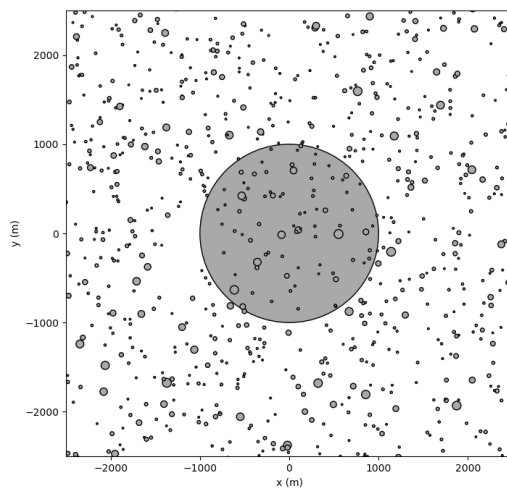
Figura 11 – Simulações dos anéis densos com adição de protolua de 1000 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



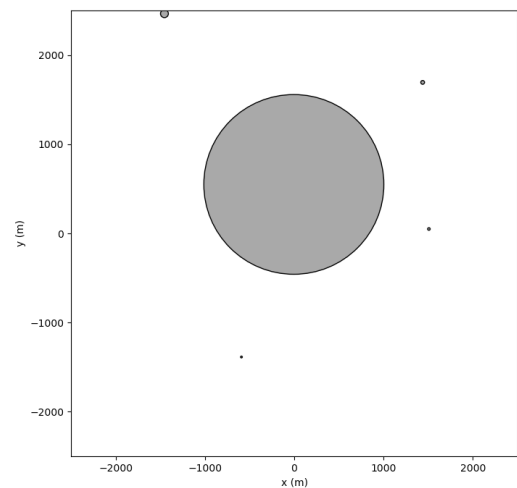
(a) Instante inicial - modelo V



(b) Instante final - modelo V



(c) Instante inicial - modelo v



(d) Instante final - modelo v

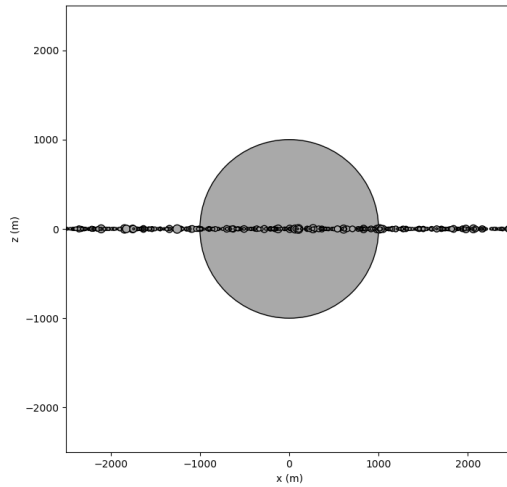
fonte: Produção do próprio autor.

Nos modelos V e VI a quantidade de partículas permanece estável durante toda a simulação. Porém presença da protolua fez com que as partículas se espalhassem pelo *boxsize* desfazendo toda a estrutura do anel inicial formado, entretanto não há nenhuma acreção de massa nem no satélites e nem nas partículas do anel. As representações dos modelos VI e vi se encontram na figura Figura 20 no apêndice.

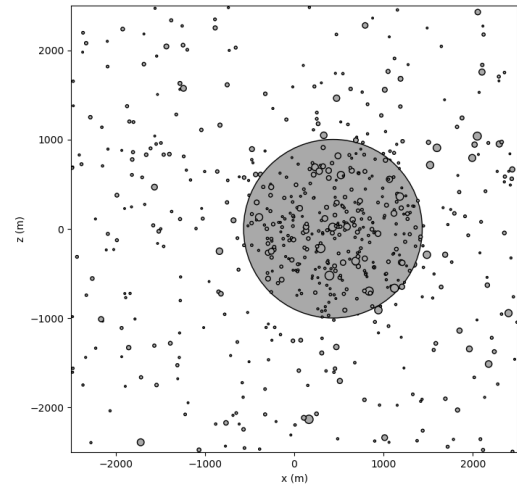
A quantidade média de partículas produzidas pelos modelos V e v são de aproximadamente 800 partículas, enquanto VI e vi possuem 200. Essa diferença acontece pois ambos conjuntos de simulações possuíam diferentes intervalos para o tamanho das partículas.

Da mesma modo que na seção anterior foi produzida uma tendo como dimensões do *boxsize* a largura total do anel, criando mais de 11.000, contudo o resultado também foi negativo pois todas as partículas do anel colidiam entre si ou e/ou com a proto lua.

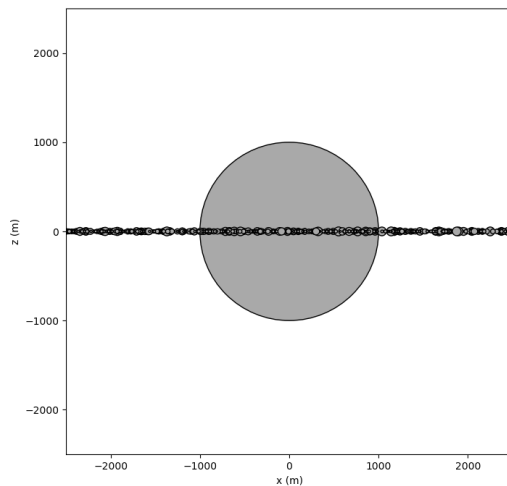
Figura 12 – Simulações dos anéis densos com adição de protolua de 1.000 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge plano xz*.



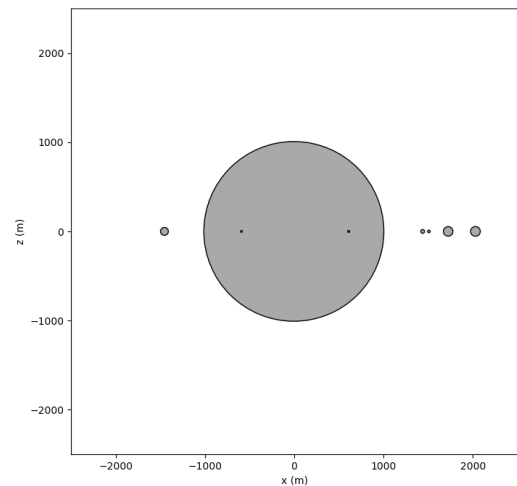
(a) Instante inicial - modelo V



(b) Instante final - modelo V



(c) Instante inicial - modelo v



(d) Instante final - modelo v

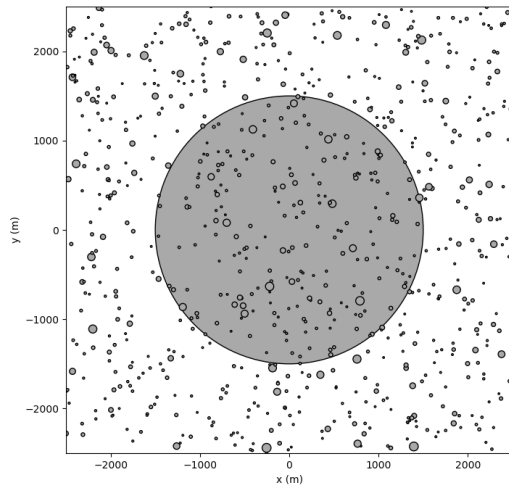
fonte: Produção do próprio autor.

4.4 PROTOLUA DE 1.500 M

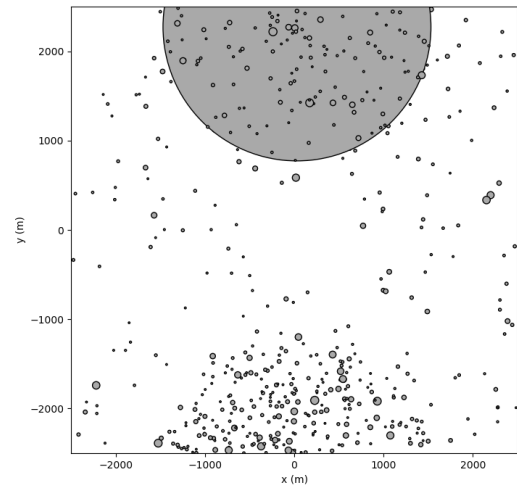
Conforme apresentado na seção 3.2, o tamanho determinado analiticamente na equação 2 para uma possível protolua localizada nessa região é de aproximadamente 1.500 m. Satélites hipotéticos com raios maiores que esse valor poderiam causar grande instabilidade no sistema podendo até mesmo se fragmentar em um determinado período de tempo. Na Figura 13 e Figura 14 são apresentadas as posições iniciais e finais em xy e xz de partículas de 10 – 50 m que constituem um anel delimitado por um boxsize de 5 km de acordo com os modelos apresentados em VII e *vii*

Os resultados mostram que para o tipo de colisão *hard-sphere* também não há nenhuma formação de corpos maiores além das partículas iniciais. Assim como nos demais modelos com esse mesmo regime a interação entre a protolua e as partículas faz com que essas fiquem distribuídas por todo *boxsize*.

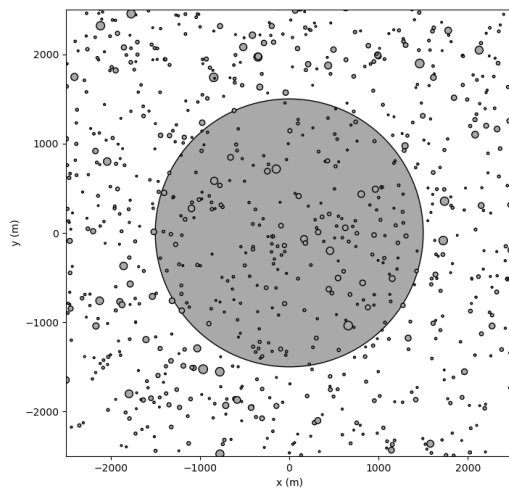
Figura 13 – Diagrama dos anéis densos com adição de protolua de 1.500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge* no plano xy .



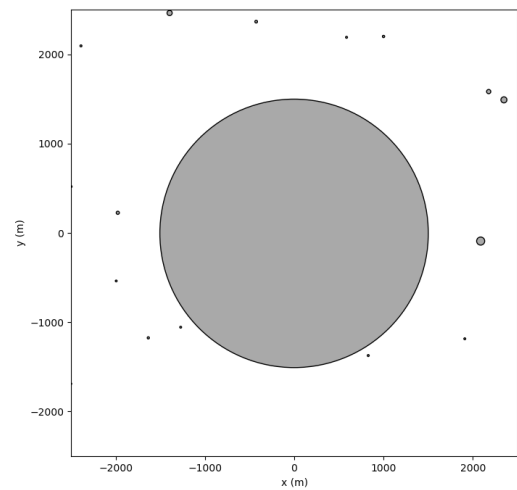
(a) Instante inicial - modelo VII



(b) Instante final - modelo VII



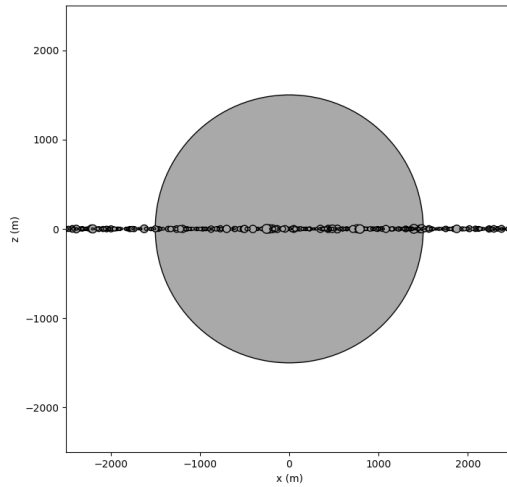
(c) Instante inicial - modelo *vii*



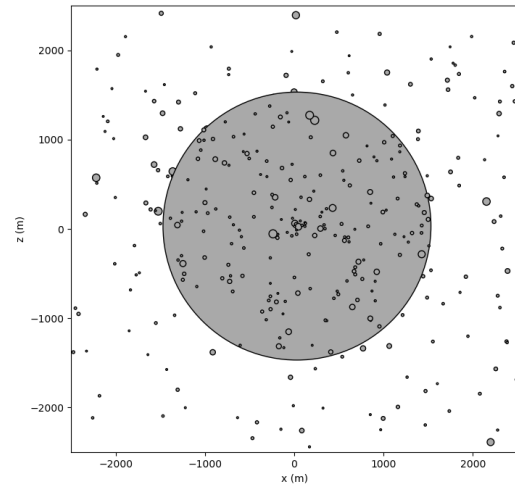
(d) Instante final - modelo *vii*

fonte: Produção do próprio autor.

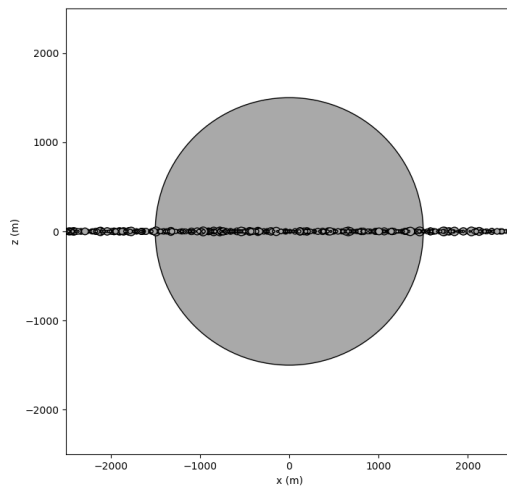
Figura 14 – Diagrama dos anéis densos com adição de protolua de 1500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge* plano xz.



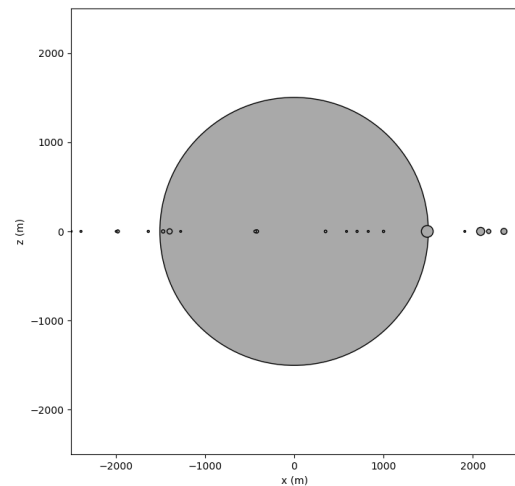
(a) Instante inicial - modelo VII



(b) Instante final - modelo VII



(c) Instante inicial - modelo *vii*



(d) Instante final - modelo *vii*

fonte: Produção do próprio autor.

Nas simulações do tipo *merge* a protolua acreta massa de todas as partículas varrendo toda aquela região, tanto nos casos com partículas de até 50 m que geram um total de 1.611 partículas como também nos casos com partículas de até 100 m ao qual há um total de 282 partículas.

Por fim também foi realizada uma simulação explorando a extensão total do anel de Chariklo para analisar se esse efeito é sentido em regiões mais afastadas da protolua, porém o resultado não foi diferente dos demais apresentados nas seções anteriores e a protolua também colidiu com todas as partículas.

4.5 ANÁLISE DA PROFUNDIDADE ÓPTICA

A profundidade óptica caracteriza a quantidade de luz que passa perpendicularmente através do material do anel. Se trata de um fator logaritmo e está diretamente relacionado com o caminho da luz,

podendo ser utilizado para determinar os parâmetros através do caminho que a luz percorre nos anéis, trazendo maior compreensão sobre sua estrutura.

As partículas de uma anel contém diferentes tamanhos e massa, entretanto supondo que elas possuam um mesmo tamanho (s) e uma distribuição da média do número de partículas por unidade de área seja D , a profundidade óptica pode ser calculada a partir dos seguintes parâmetros:

$$\tau = \pi s^2 D \quad (2)$$

A equação não necessariamente expressa a profundidade óptica observada instrumentalmente, pois assume-se que cada partícula do anel obscurece uma área igual à sua seção transversal.

Braga-Ribas et al. (2014) mediu a profundidade óptica dos anéis de Chariklo, que são 0,449 para o anel $C1R$ e 0,05 para o segundo anel.

Neste trabalho, uma abordagem semelhante a equação 4.5 foi realizada para obter a profundidade óptica dos sistemas de anéis simulados, dado pela equação (HEDMAN, 2013):

$$\tau = \frac{\sum \Delta_p}{\Delta} \quad (3)$$

onde Δ_p é a área superficial das partículas e Δ é a área do *boxsize*, definidas como:

$$\Delta_p = \pi s^2 \quad (4)$$

$$\Delta = xy \quad (5)$$

sendo x e y as dimensões do *boxsize*.

A partir dos resultados obtidos das simulações numéricas foi possível analisar a evolução da profundidade óptica do anel em função do tempo. Esses resultados estão apresentados na tabela 5 para as simulações sob tipo de colisão *hard-sphere* e na Figura 15 para as simulações sob tipo de colisão *merge*.

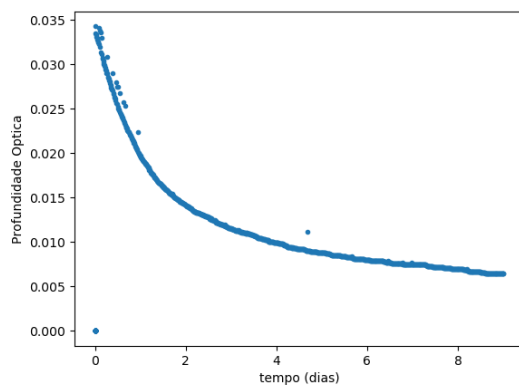
Como nos modelos numéricos que evoluem o regime de colisão *hard-sphere* não se altera a quantidade de partículas, a profundidade óptica permanece constante ao longo do tempo. Entretanto, nas simulações que evoluem o tipo de colisão *merge* a quantidade de partículas reduz drasticamente, sendo assim é possível observar uma queda no τ do anel em um curto período de tempo.

Tabela 5 – Profundidade óptica observada para os modelos com colisão do tipo *hard-sphere*.

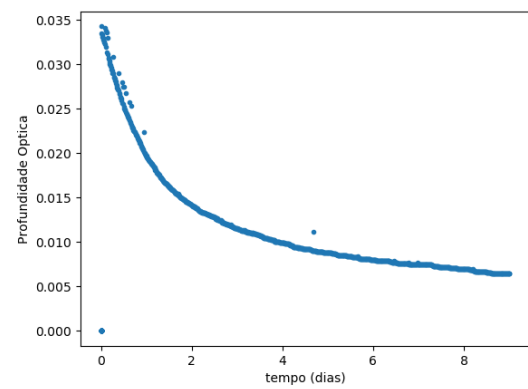
Modelo	τ
I	3.20517×10^{-2}
II	2.09115×10^{-2}
III	4.21205×10^{-3}
IV	5.63645×10^{-2}
V	1.58674×10^{-1}
VI	4.51738×10^{-1}
VII	7.75401×10^{-1}
VII	5.86970×10^{-1}

fonte: Produção do próprio autor.

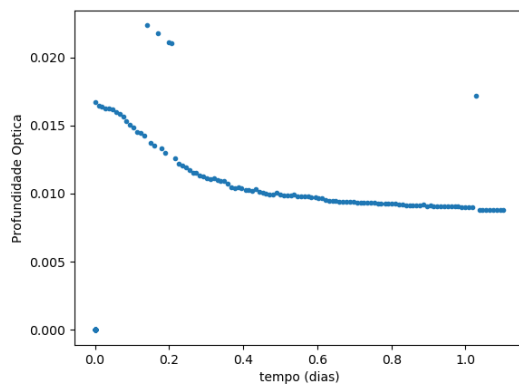
Figura 15 – Gráfico da evolução da profundidade óptica em função do tempo para as simulações de colisão *merge*.



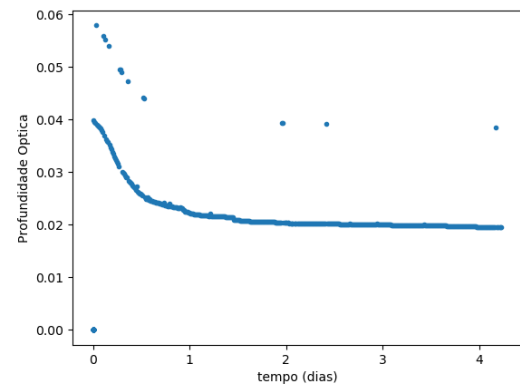
(a) modelo *ii*



(b) modelo *iii*



(c) modelo *v*



(d) modelo *vii*

fonte: Produção do próprio autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No ano 2013 através da ocultação de uma estrela por Chariklo Braga-Ribas et al. (2014) descobriu o primeiro o objeto diferente de um planeta a possuir um sistema de anéis bem definidos. Esse sistema é composto por dois anéis, o mais interno mais denso $C1R$ tem uma largura de 7,17 km enquanto o mais externo $C2R$ possui 3,4 km de largura, esses dois anéis são separados por uma região vazia (falha) de 8,7 km.

Muito pouco se conhece sobre as partículas que compõem esses anéis e o que os mantém nessa configuração. Braga-Ribas et al. (2014) levantam a hipótese de que satélites pastores seriam responsáveis por manter essas partículas confinadas evitando que elas se espalhem, esses satélites também podem explicar a falha que há entre eles. Pan e Wu (2016) sugerem a existência de um satélite com raio de ~ 1 km na falha desse anel, entretanto observar um objeto de tal dimensão requer uma alta precisão dos dados observacionais.

O objetivo desse trabalho é estudar o sistema de anéis de Chariklo e as regiões próximas à falha do anel a fim de desenvolver um modelo numérico que seja capaz de representar esse sistema de maneira coerente à observada.

Para isso primeiramente foi realizado uma análise analítica das forças mais relevantes que atuam sobre as partículas e o resultado mostrou que essas forças são dadas pela força gravitacional de Chariklo e o efeito de seu achatamento (J_2) atuando na velocidade angular das partículas do anel.

Para Sicardy et al. (2016) e Michikoshi e Kokubo (2017) concluíram que o efeito da radiação de Poynting Robertson garante que o anel de Chariklo não é composto por partículas menores que 1 cm, por esse motivo esse efeito não foi incluso nas análises da seção 2.

Posteriormente foram criados diversos modelos numéricos onde foi simulado um trecho do sistema de anéis, variando parâmetros como massa e tamanho das partículas e da suposta protolua, além do tamanho da fração do anel simulada. As simulações incluíram partículas com tamanho de 10 m até 100 m. Devido as limitações computacionais não foi possível simular partículas com raios menores do que estes aqui propostos.

Dos resultados dos modelos de simulações para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge* podemos concluir que o método de integração mais condizente com o caso observado para o sistema de anéis de Chariklo são os correspondentes as colisões do tipo *merge*, embora não se tenha obtido o resultado esperado. Um dos possíveis motivos para que esse modelo não seja tão eficiente pode se dar pelo fato da grande quantidade de partículas geradas durante as simulações. Uma maneira de resolver esse problema seria diminuindo em raio as partículas em questão de centímetros ou alguns metros, porém isso geraria um número muito grande de partículas e seria computacionalmente inviável.

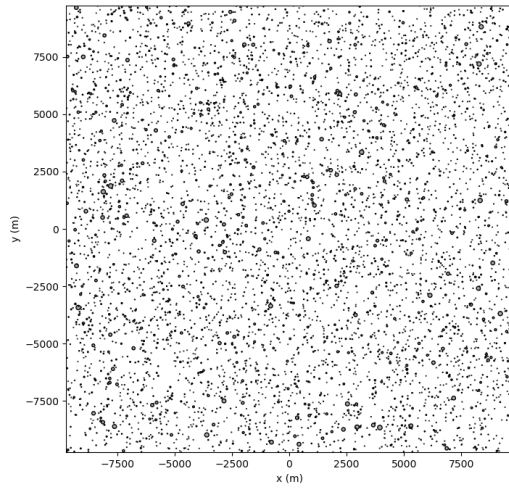
REFERÊNCIAS

- ARAUJO, R.; SFAIR, R.; WINTER, O. The rings of chariklo under close encounters with the giant planets. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 824, n. 2, p. 80, 2016.
- BAILEY, B. L.; MALHOTRA, R. Two dynamical classes of centaurs. **Icarus**, Elsevier, v. 203, n. 1, p. 155–163, 2009.
- BRAGA-RIBAS, F. et al. A ring system detected around the centaur (10199) chariklo. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 508, n. 7494, p. 72–75, 2014.
- DESMARS, J. Detection of yarkovsky acceleration in the context of precovery observations and the future gaia catalogue. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 575, p. A53, 2015.
- DUFFARD, R. et al. Photometric and spectroscopic evidence for a dense ring system around centaur chariklo. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 568, p. A79, 2014.
- FORNASIER, S. et al. The centaur 10199 chariklo: investigation into rotational period, absolute magnitude, and cometary activity. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 568, p. L11, 2014.
- GLADMAN, B.; MARSDEN, B.; VANLAERHOVEN, C. Nomenclature in the outer solar system. **The Solar System Beyond Neptune**, 01 2008.
- HAMILTON, D. P.; KRIVOV, A. V. Circumplanetary dust dynamics: Effects of solar gravity, radiation pressure, planetary oblateness, and electromagnetism. **Icarus**, Elsevier, v. 123, n. 2, p. 503–523, 1996.
- HÄNNINEN, J. Numerical simulations of moon—ringlet interaction. **Icarus**, Elsevier, v. 103, n. 1, p. 104–123, 1993.
- HEDMAN, M. Planetary ring dynamics. **Celestial mechanics, encyclopedia of life support systems (EOLSS)**, 2013.
- HORNER, J.; EVANS, N.; BAILEY, M. Simulations of the population of centaurs—i. the bulk statistics. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 354, n. 3, p. 798–810, 2004.
- HU, W.; SCHEERES, D. Numerical determination of stability regions for orbital motion in uniformly rotating second degree and order gravity fields. **Planetary and Space Science**, v. 52, n. 8, p. 685–692, 2004. ISSN 0032-0633. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063304000315>>.
- JPL/NASA. **Small-Body Database Lookup**. 2022. Disponível em: <https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=chariklo&view=VOP>.
- LEIVA, R. et al. Size and shape of chariklo from multi-epoch stellar occultations. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 154, n. 4, p. 159, 2017.
- MICHIKOSHI, S.; KOKUBO, E. Simulating the smallest ring world of chariklo. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 837, n. 1, p. L13, 2017.
- MORGADO, B. et al. Refined physical parameters for chariklo’s body and rings from stellar occultations observed between 2013 and 2020. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 652, p. A141, 2021.

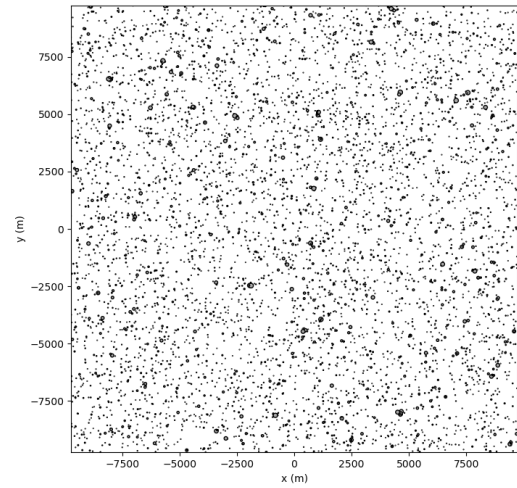
- MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar system dynamics**. [S.l.]: Cambridge university press, 1999.
- PAN, M.; WU, Y. On the mass and origin of chariklo's rings. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 821, n. 1, p. 18, 2016.
- REIN, H.; TREMAINE, S. Symplectic integrators in the shearing sheet. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 415, n. 4, p. 3168–3176, 2011.
- SICARDY, B. et al. Rings beyond the giant planets. **arXiv:1612.03321**, 2016.
- SIQUEIRA, P. B. **Adaptação do integrador Rebound para o estudo de anéis planetários**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, São Paulo - Brasil, 2019. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- WOOD, J. et al. The dynamical history of chariklo and its rings. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 153, n. 6, p. 245, 2017.
- ZEBKER, H.; TYLER, G. Thickness of saturn's rings inferred from voyager 1 observations of microwave scatter. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 223, n. 4634, p. 396–398, 1984.

APÊNDICE

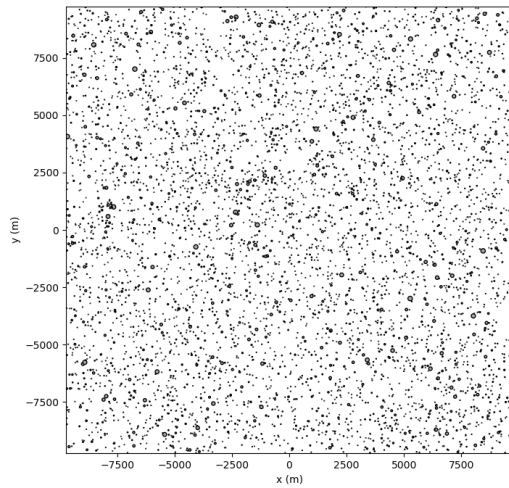
Figura 16 – Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel com 5 km sem adição de protolua para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



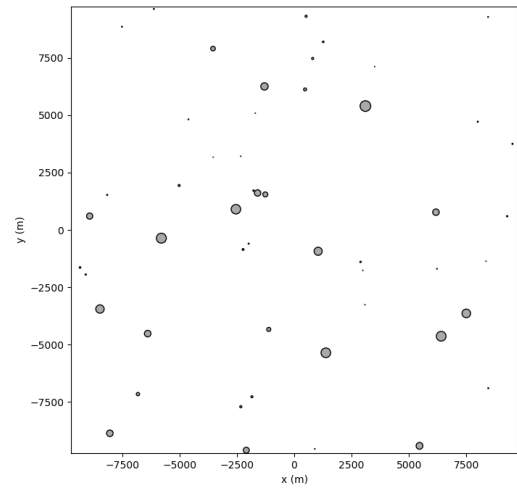
(a) Instante inicial - modelo II



(b) Instante final - modelo II



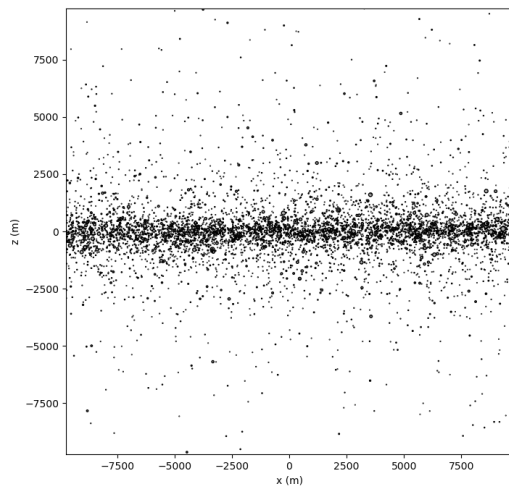
(c) Instante inicial - modelo *ii*



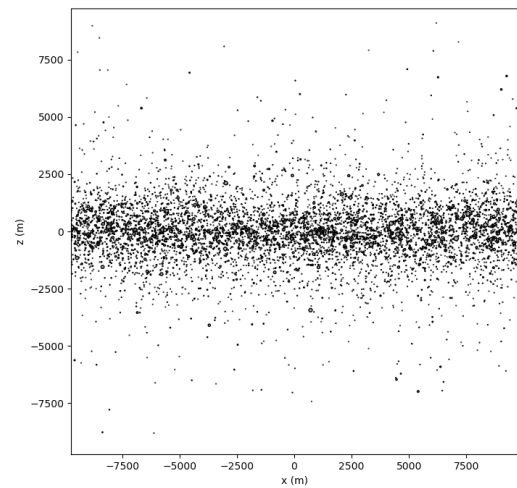
(d) Instante final - modelo *ii*

fonte: Produção do próprio autor.

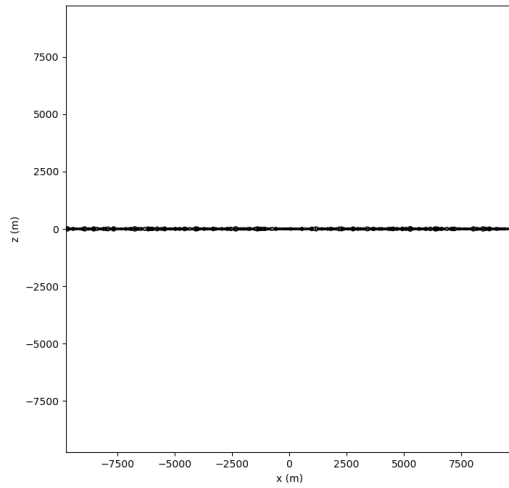
Figura 17 – Diagrama das posições iniciais e finais no plano xz de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel com 5 km sem adição de protolua para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



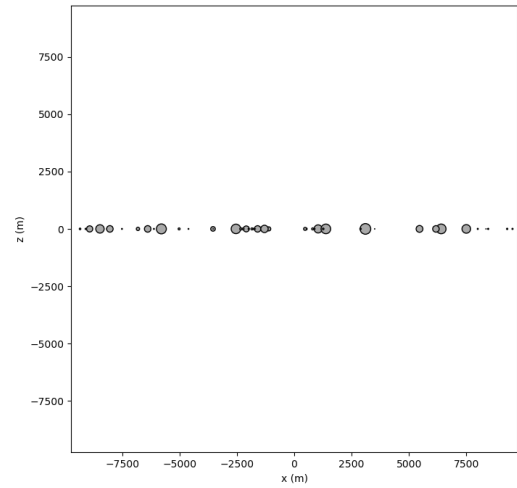
(a) Instante inicial - modelo II



(b) Instante final - modelo II



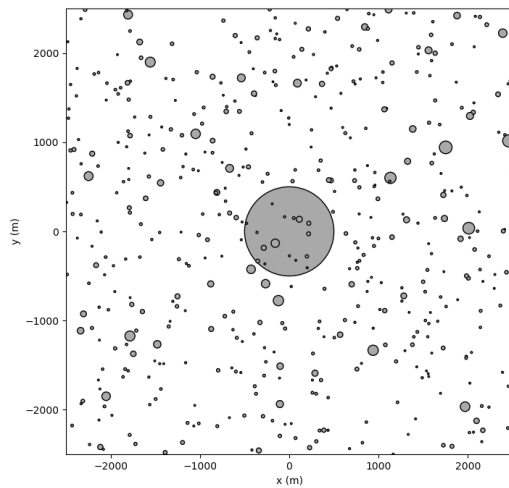
(c) Instante inicial - modelo *ii*



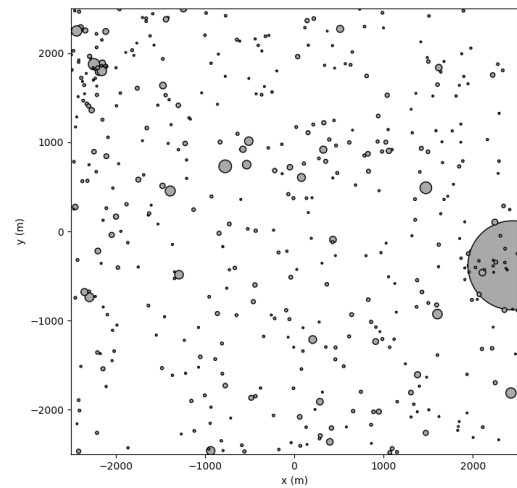
(d) Instante final - modelo *ii*

fonte: Produção do próprio autor.

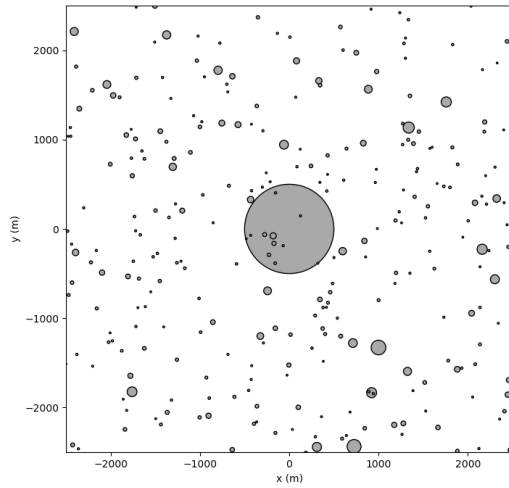
Figura 18 – Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel com 5 km contido por uma protolua de 500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



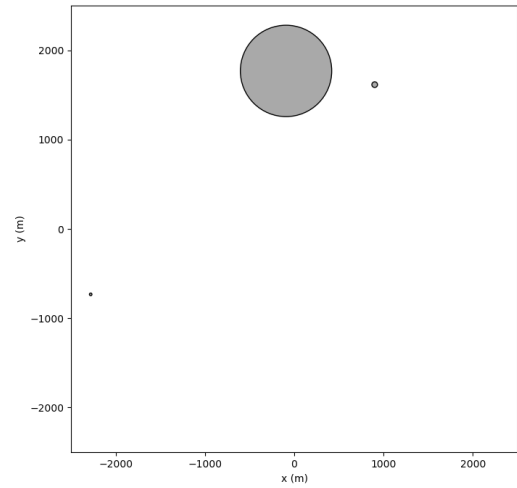
(a) Instante inicial - modelo IV



(b) Instante final - modelo IV



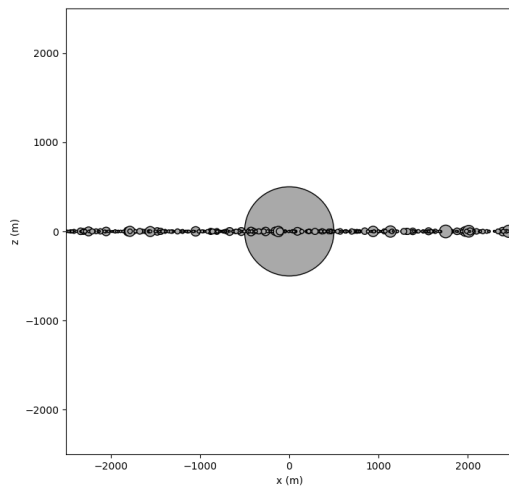
(c) Instante inicial - modelo *iv*



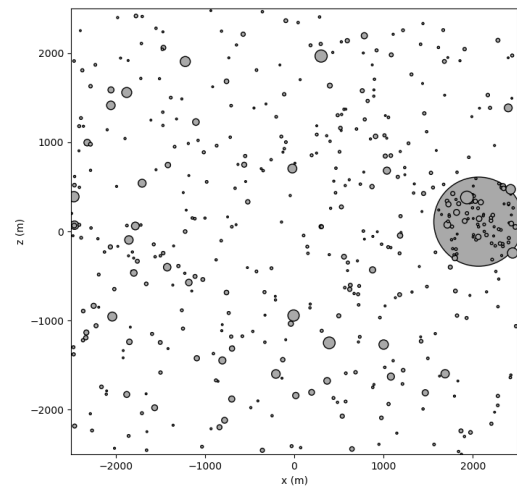
(d) Instante final - modelo *iv*

fonte: Produção do próprio autor.

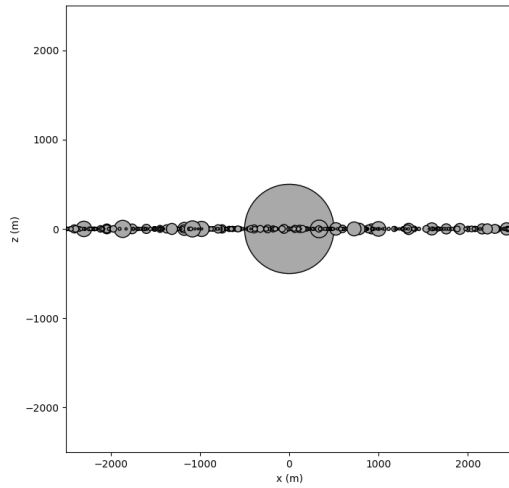
Figura 19 – Diagrama das posições iniciais e finais no plano xz de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel de 5 km contido por uma protolua de 500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



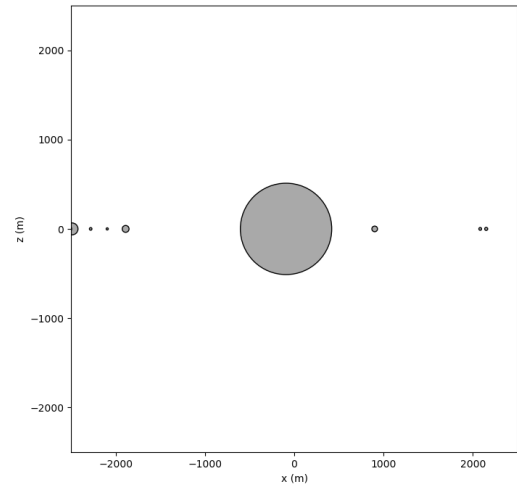
(a) Instante inicial - modelo IV



(b) Instante final - modelo IV



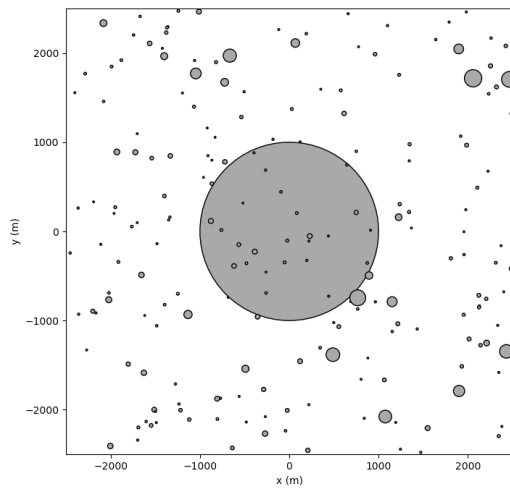
(c) Instante inicial - modelo *iv*



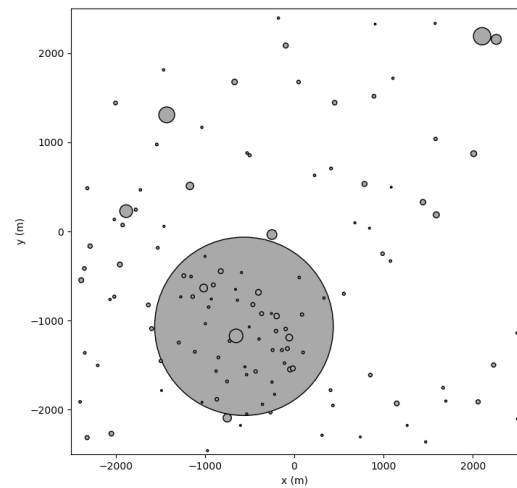
(d) Instante final - modelo *iv*

fonte: Produção do próprio autor.

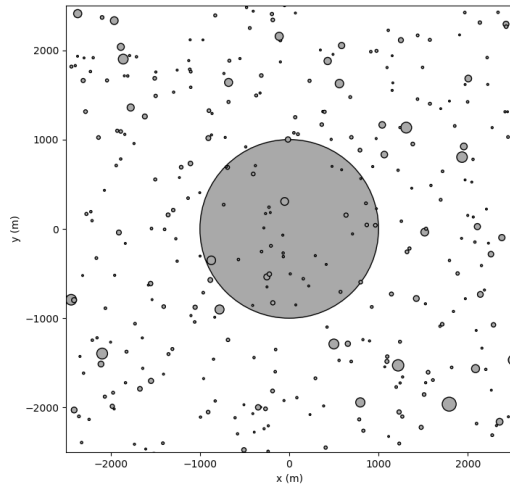
Figura 20 – Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel de 5 km contido por uma protolua de 1.000 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



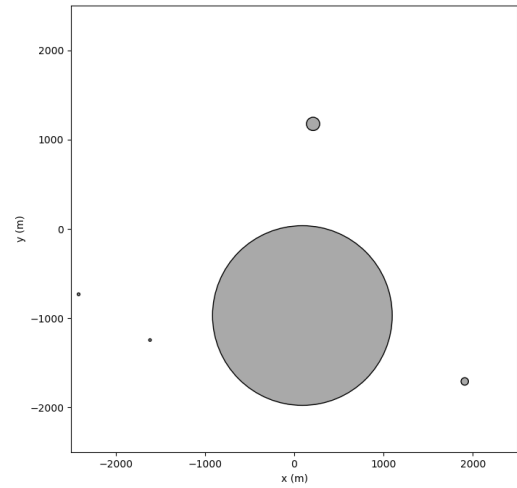
(a) Instante inicial - modelo VI



(b) Instante final - modelo VI



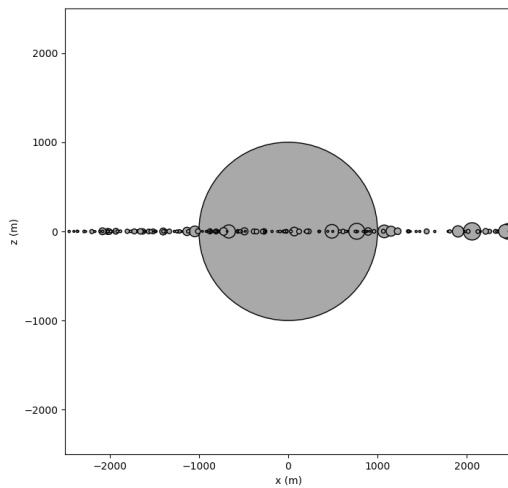
(c) Instante inicial - modelo *vi*



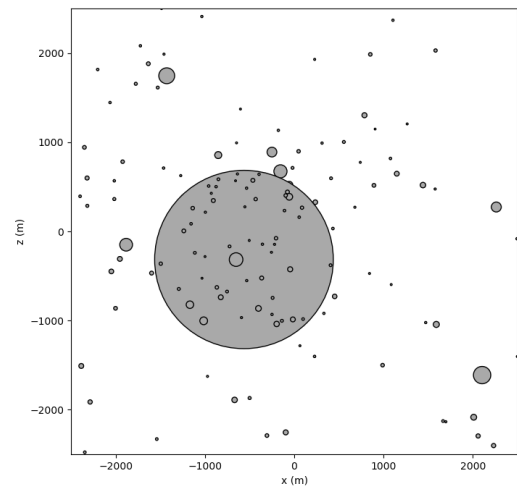
(d) Instante final - modelo *vi*

fonte: Produção do próprio autor.

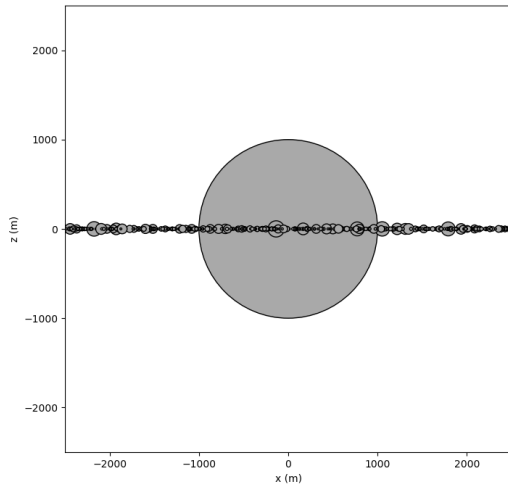
Figura 21 – Diagrama das posições iniciais e finais no plano xz de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel d 5 km contido por uma protolua de 1.000 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



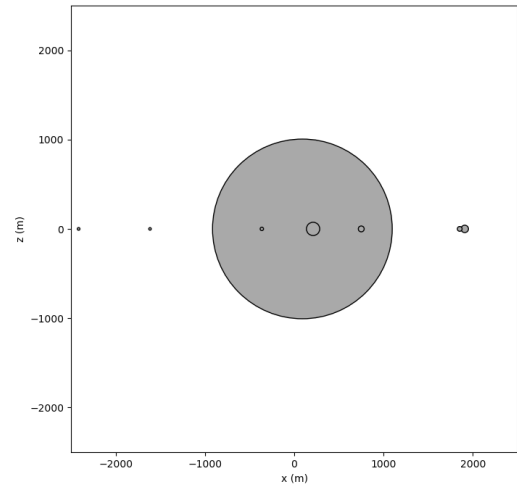
(a) Instante inicial modelo VI



(b) Instante final - modelo VI



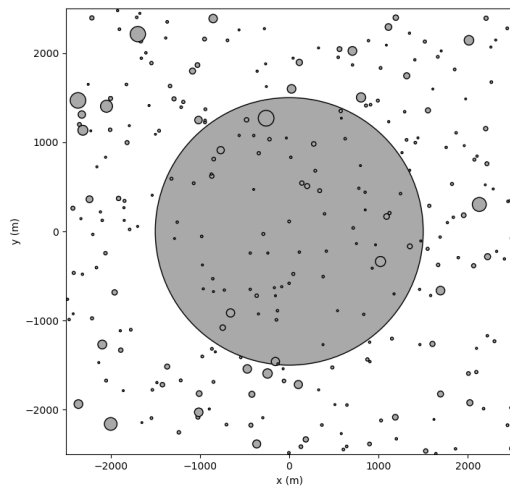
(c) Instante inicial - modelo *vi*



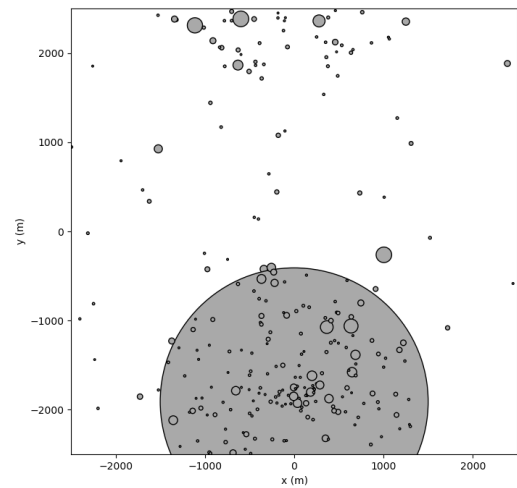
(d) Instante final - modelo *vi*

fonte: Produção do próprio autor.

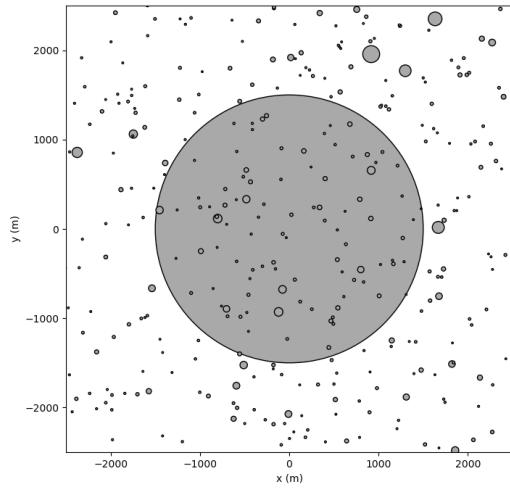
Figura 22 – Diagrama das posições iniciais e finais no plano xy de partículas com raio de 10 – 100 m em um trecho do anel de 5 km contido por uma protolua de 1.500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge*.



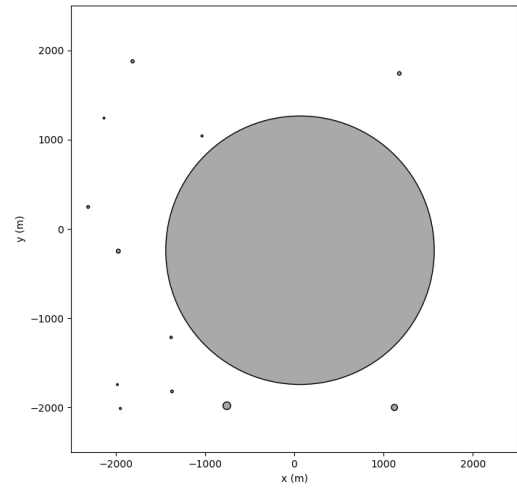
(a) Instante inicial - modelo VIII



(b) Instante final - modelo VIII



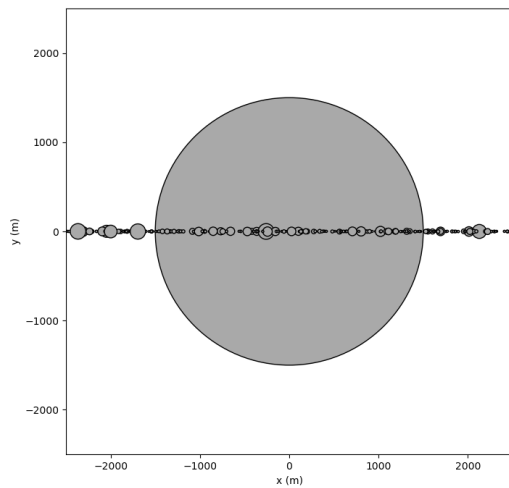
(c) Instante inicial - modelo *viii*



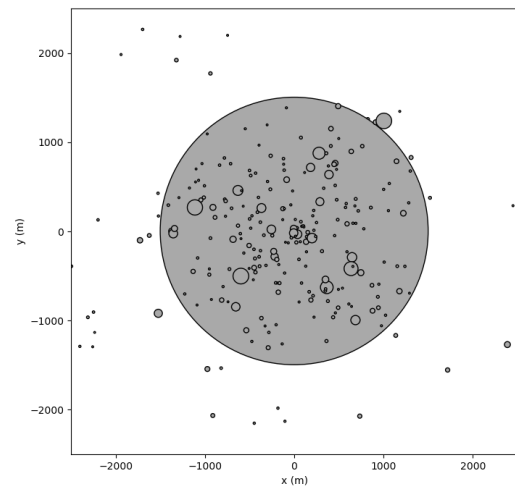
(d) Instante final - modelo *viii*

fonte: Produção do próprio autor.

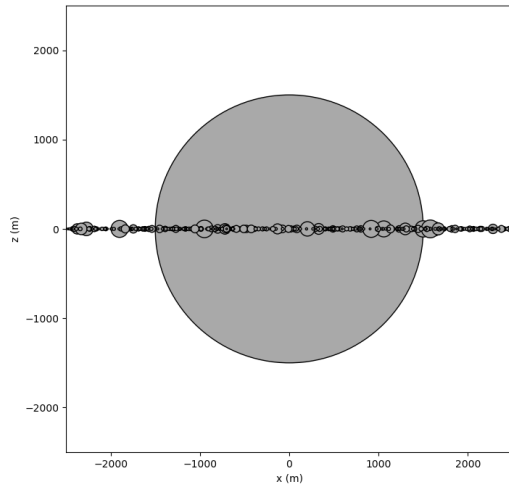
Figura 23 – Diagrama das posições x e y de partículas de raio 10 – 100 m em um trecho de 5 km do anel com adição de protolua de 1500 m para os tipos de colisão *hard-sphere* e *merge* no plano xz



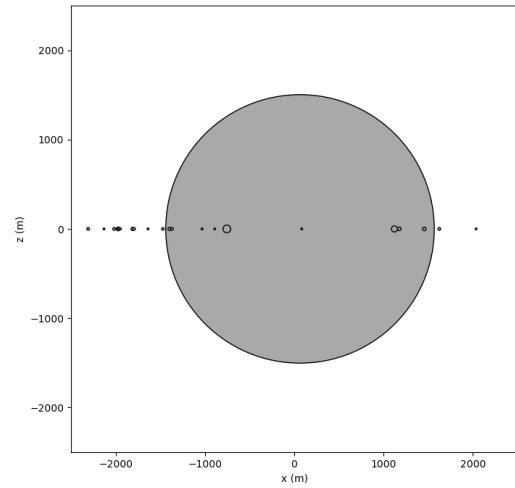
(a) Instante inicial - modelo VIII



(b) Instante final - modelo VIII



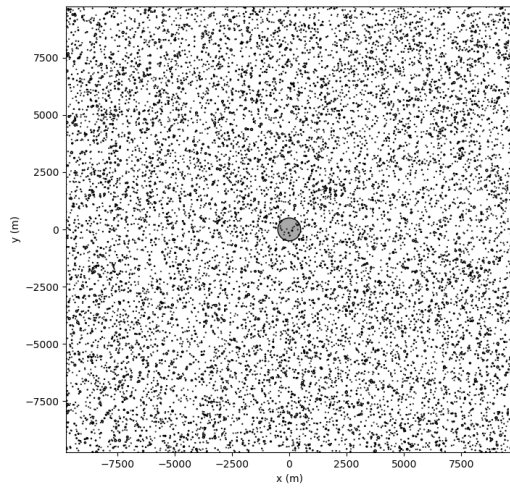
(c) Instante inicial - modelo *viii*



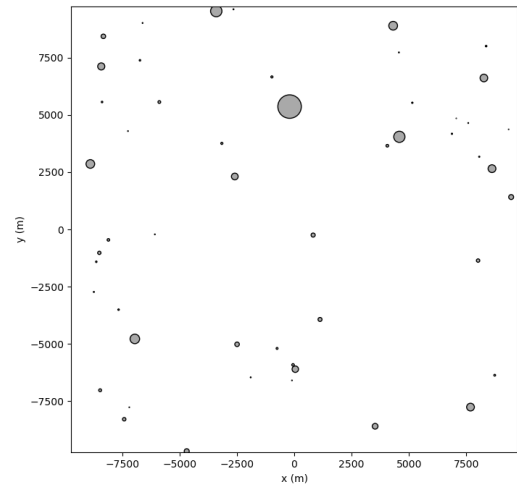
(d) Instante final - modelo *viii*

fonte: Produção do próprio autor.

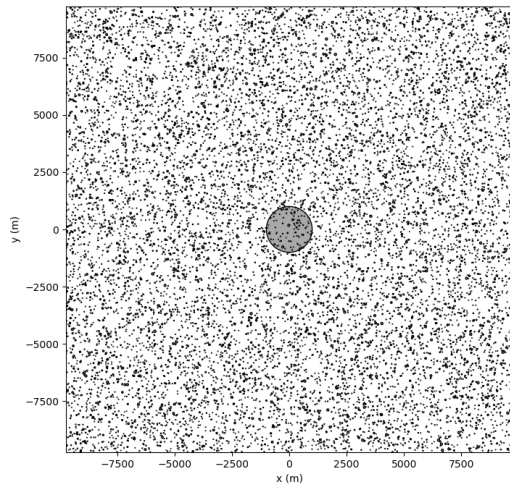
Figura 24 – Diagrama das posições xy das partículas de raio 10 – 50 m para os modelos com colisão tipo *merge* distribuídas em um *boxsize* de 19,47 km com protoluas de 500 m em (a) e (b), 1.000 m em (c) e (d) e 1.500 m em (e) e (f).



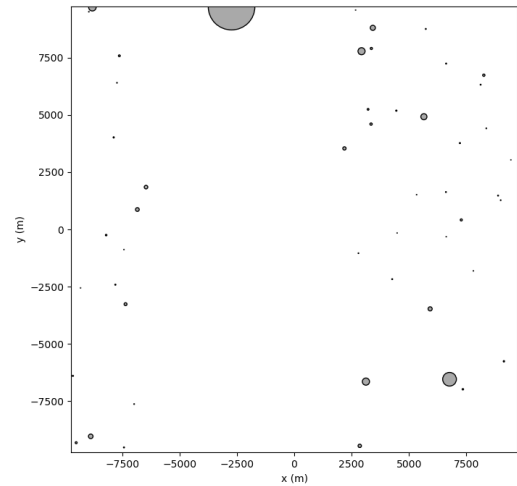
(a) Instante inicial - modelo *ix*



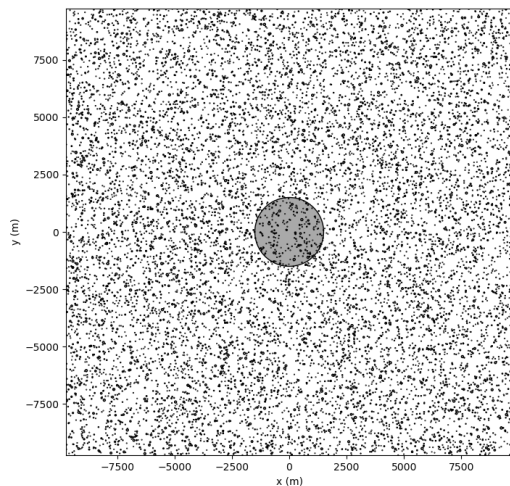
(b) Instante final - modelo *ix*



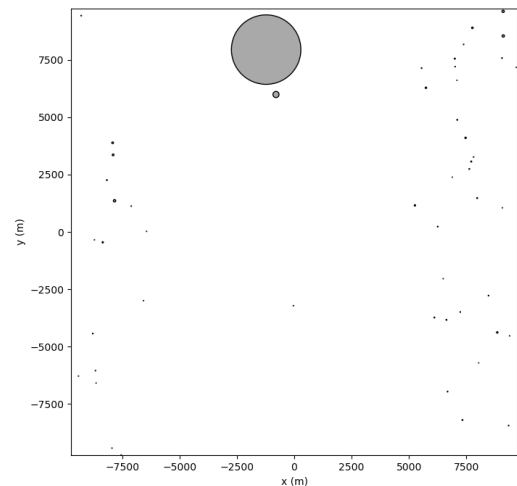
(c) Instante inicial - modelo *x*



(d) Instante final - modelo *x*



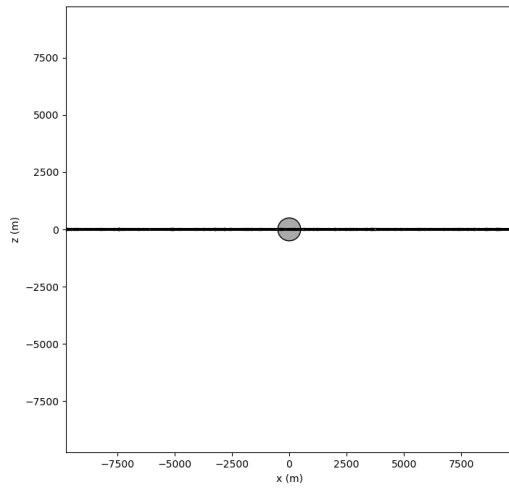
(e) Instante inicial - modelo *xi*



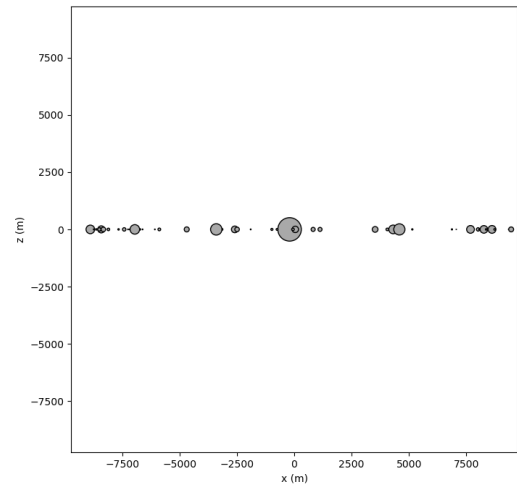
(f) Instante final - modelo *xi*

fonte: Produção do próprio autor.

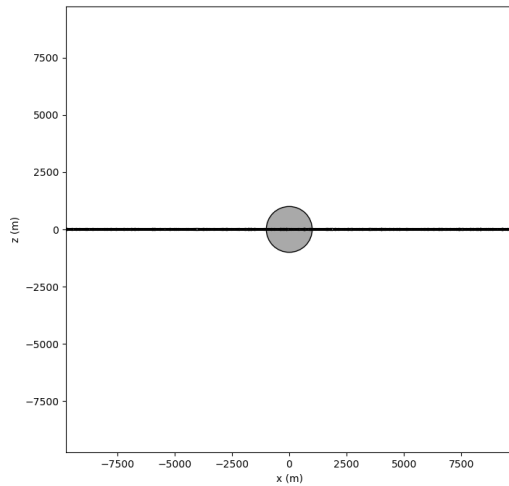
Figura 25 – Diagrama das posições xz das partículas de raio 10 – 50 m para os modelos com colisão tipo *merge* distribuídas em um *boxsize* de 19,47 km com protoluas de 500 m em (a) e (b), 1.000 m em (c) e (d) e 1.500 m em (e) e (f).



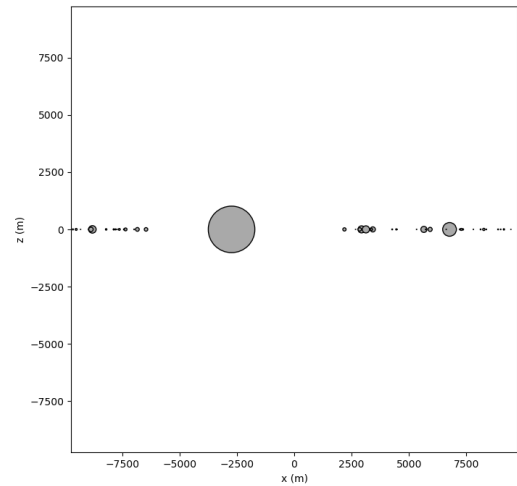
(a) Instante inicial - modelo ix



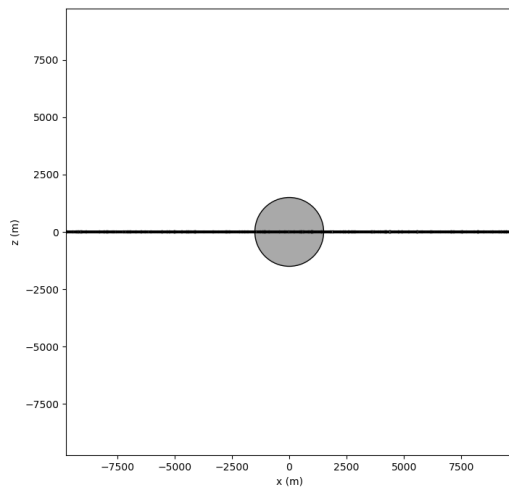
(b) Instante final - modelo ix



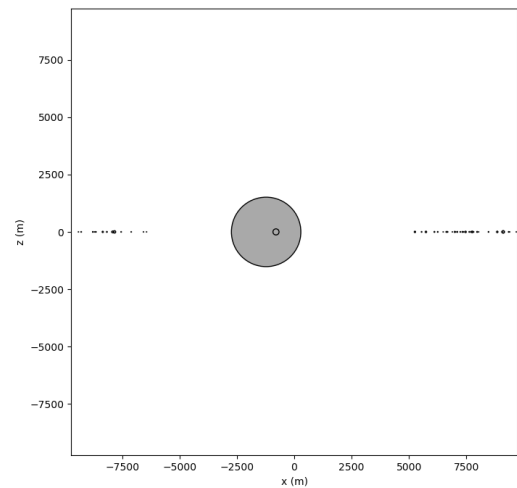
(c) Instante inicial - modelo x



(d) Instante final - modelo x



(e) Instante inicial - modelo xi



(f) Instante final - modelo xi

fonte: Produção do próprio autor.