



Adriano José Aguiar Marçal

**Um Modelo de Células Dinâmicas Aplicado ao Gás
Granular na Presença de Aglomerados**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós Graduação em Física do Departamento de Física da PUC-Rio.

Orientador: Welles Antonio Martinez Morgado

Rio de Janeiro
Dezembro de 2004



Adriano José Aguiar Marçal

Um Modelo de Células Dinâmicas Aplicado ao Gás Granular na Presença de Aglomerados

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Welles Antonio Martinez Morgado

Orientador

Departamento de Física – PUC-Rio

Rosane Rieira Freire

Dept. de Física - PUC-Rio

Silvia Martins dos Santos

Faculdade de Física - UFU

José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de agosto de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Adriano José Aguiar Marçal

Graduou-se em licenciatura em física na UFRRJ (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro) em 2002.

Ficha Catalográfica

Marçal, Adriano

Um modelo de células dinâmicas aplicado ao gás granular na presença de aglomerados/ Adriano José Aguiar Marçal; orientador: Welles Antonio Martinez Morgado. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Física, 2004.

[11], 64 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física - Teses. 2. Sistemas granulares. 3. Hidrodinâmica. 4. Inelasticidade. 5. Vórtice. 6. Aglomerados. I. Morgado, Welles Antonio Martinez. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física. III. Título.

CDD: 530

A minha família.

Agradecimentos

A Deus, mestre dos mestres.

Ao meu orientador, prof. Welles, pela paciência e pela amizade.

Ao pessoal técnico administrativo pelo suporte necessário, sobretudo à secretária Márcia pelo apoio indispensável na edição deste trabalho.

Aos meus colegas de sala Laercio, Ney, Marcelo, Luís e André que muito contribuíram para o bom andamento dos trabalhos. Especialmente aos colegas Felipo, pelas boas dicas, e Edson pelos inumeráveis esclarecimentos.

A todos o demais colegas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Thiago e Atahualpa que dividiram casa comigo durante este período e muito me auxiliaram.

A minha namorada Juliana.

À CAPES e a esta universidade pelo apoio financeiro através das bolsas concedidas.

Resumo

Vernek, Edson; Morgado, Welles Antônio Martinez. Rio de Janeiro, 2004. 72p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho estudamos o comportamento dinâmico de um gás granular a baixa densidade do ponto de vista hidrodinâmico. Fazemos também uma análise de instabilidade linear das equações de Navier-Stokes para tais sistemas. Finalmente, construímos um modelo de sistema de células dinâmicas para simular computacionalmente esses sistemas e o aplicamos a um gás granular, a fim de entender um pouco mais sobre seus comportamentos dinâmicos, inclusive a formação de aglomerados, sob as mais variadas condições de contorno.

Palavras-chave

Sistemas Granulares, Hidrodinâmica, Inelasticidade, Vórtice, Aglomerados.

Abstract

Marçal, A. J. A.; Morgado, W. A. M. Rio de Janeiro, 2004. 72p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work we study the dynamic behavior of a granular gas at low density from the hydrodynamic point of view. We also perform a linear instability analysis of the Navier-Stokes for such systems. Finally, we construct a cell dynamic systems model to simulate computationally these systems and apply it for a granular gas in order to understand a little more about its dynamic behavior, enclose formation of clusters, under several boundary conditions.

Keywords

Granular Systems, Hydrodynamics, Inelasticity, Vortex, Clusters.

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Os Sistemas Granulares (SG)	12
1.2	O Gás Granular	14
1.3	Objetivo	17
2	Hidrodinâmica do Gás Granular	20
2.1	Hidrodinâmica	20
2.2	O efeito das Colisões	22
2.3	A Colisão Granular	22
2.4	Equações Hidrodinâmicas	26
2.5	O Método de Chapman-Enskog	29
2.6	Evolução da Temperatura Granular	29
2.7	Os coeficientes de Transporte	33
3	O Estado de Resfriamento Homogêneo e a Formação de Aglomerados	35
3.1	Lei de Haff	35
3.2	Formação de Aglomerados	36
3.3	Análise de Instabilidades	39
4	O Modelo CDS	45
4.1	Descrição	45
4.1.1	Exemplo de Discretização	47
4.1.2	A Matriz K	48
4.1.3	A Introdução dos Aglomerados no Modelo	50
4.2	Vantagens do Modelo para o Tratamento de Aglomerados	50
4.2.1	Relações entre valores computacionais e valores físicos reais	51
4.2.2	Escalas Físicas	52
4.3	As Equações do CDS	52
4.3.1	Limite contínuo	53
5	Resultados Numéricos e discussões	57
5.1	Descrição do sistema	57
5.1.1	Configuração inicial dos parâmetros	57
5.2	Gás Infinito	58

Sumário	8
5.2.1 A inclusão da Matriz K	59
5.3 Resultados	60
5.3.1 Outra Forma de Injeção de Energia	62
6 Conclusões	67
Referências	68
A Apêndices	70
A.1 Discretização do laplaciano para o CDS	70
A.2 Inclusão da Matriz K nas Equações	72

Lista de Figuras

- 1.1 Sistema contendo grãos de mostarda (T. Shimbrot and F. J. Mozzio, Phys. Today **53**(3) (2000) 25-30). 13
- 1.2 Nas figuras (a) e (b) aglomerados de esferas de metal movidas eletrostaticamente. Em (c) e (d) aglomerados em um sistema sob vibração mecânica. Na coluna da esquerda aglomerados tridimensionais e a direita bidimensionais (M. V. Sapozhnirov, I. S. Aranson, J. S. Olafsen, cond-mat/0211089-2002). 17
- 1.3 Distribuição de velocidades. A linha contínua é a curva gaussiana e a tracejada é uma exponencial esticada do tipo $Ae^{-av_x^\alpha}$, com $\alpha = 1,41$. (Hans J. Herrmann, S. Luding and R. Cafiero, Physica A **295** (2001) 93-100). 18
- 2.1 O cilindro de colisão onde b é o parâmetro de impacto. 23
- 3.1 Sistema com 11 000 partículas em uma caixa com condições de contorno periódicas, alimentação de energia e coeficiente de restituição constante $r = 0,97$. A esquerda vemos a configuração inicial com as partículas homogeneamente distribuídas. A direita temos o sistema no estado estacionário, onde vemos as aglomerações de partículas.(Hans J. Herrmann, S. Luding and R. Cafiero, Physica A **295** (2001) 93-100). 37
- 3.2 Dinâmica molecular com 10^5 partículas viscoelásticas. Aglomerações surgem como estruturas transientes. As fotos são para 0, 200, 800, 7.500, 20.000, e 70.000 colisões por partícula(T. Pöschel, N. V. Brilliantov, C. Salueña, T. Schwager, cond-mat/o312616 -2003). 38
- 3.3 Evolução temporal típica das flutuações da densidade, obtida por integração numérica. 42
- 3.4 Evolução temporal de θ_k , relativo a flutuações na temperatura granular. 43
- 3.5 Evolução temporal das flutuações na componente paralela ao vetor de onda w_{par} . 43
- 3.6 Evolução temporal das flutuações obtidas por integração numérica, da componente perpendicular ao vetor de onda k . 44
- 4.1 Representação esquemática de um CDS. Os reticulados representam o conjuntos de células e os ψ s representam o conjunto de parâmetros que descreverão a dinâmica do sistema 46
- 4.2 Representação esquemática da divisão de uma barra em N células unitárias. As células $\{-1, 0, N + 1, N + 2\}$ são as células adicionais

Lista de Figuras	10
que facilitarão a implementação das condições de contorno.	47
4.3 Representação esquemática dos fluxos entre um sítio e seus primeiros vizinhos em uma rede bidimensional, onde as setas representam os fluxos de entrada e saída	50
4.4 Representação esquemática dos fluxos entre os sítos de uma rede idimensional, onde as setas representam os fluxos de entrada e saída	51
5.1 Estado do sistema em termos da evolução temporal da temperatura granular.	59
5.2 Distribuição de densidade para o sistema com injeção de energia uniforme.	61
5.3 Distribuição da temperatura granular para o sistema com injeção de energia uniforme.	62
5.4 Distribuição do campo de velocidades para o sistema com injeção de energia uniforme.	63
5.5 Distribuição do campo de velocidades para o sistema com injeção de energias nas bordas superior e inferior. No quadro (a) temos o instante do desligamento do fornecimento de energia.	64
5.6 Distribuição de densidade para o sistema com injeção de energias nas bordas superior e inferior.	65
5.7 Distribuição de temperatura granular para o sistema com injeção de energias nas bordas superior e inferior.	66