

Edson Vernek

**Um Modelo de Células Dinâmicas Aplicado a
Sistemas Granulares**

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
Março de 2003

Edson Vernek

Um Modelo de Células Dinâmicas Aplicado a Sistemas Granulares

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

Welles Antonio Martinez Morgado

Orientador

Departamento de Física – PUC-Rio

Mônica Pereira Bahiana

Instituto de Física - UFRJ

Rosane Rieira Freire

Dept. de Física - PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de março de 2003

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

Edson Vernek

Graduou-se em licenciatura em física na UFRRJ (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro) em 2001.

Ficha Catalográfica

Vernek, Edson

Um modelo de células dinâmicas aplicado a sistemas granulares / Edson Vernek; orientador: Welles Antonio Martinez Morgado. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Física, 2003.

[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

Para meus pais, Joventino Vernek e Elza
Lourdes Vernek.

Agradecimentos

A Deus, dono de todo o conhecimento.

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 Jaime, Lourival, Marcelo, Luís, André, Saraí e Anivaldo, Filipo e Adriano que muito contribuíram para o bom andamento dos trabalhos.

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

À família Dias Lima pelo apoio.

À Cristina pelas correções e sugestões.

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

Resumo

Vernek, Edson; Morgado, Welles Antônio Martinez. Rio de Janeiro, 2003. 75p. 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, sob diversas condições de contorno externos.

Palavras-chave

Sistemas Granulares, Hidrodinâmica, Inelasticidade, Vórtice, Aglomerados.

Abstract

Vernek, E.; Morgado, M. A. M. Rio de Janeiro, 2003. 75p. 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, under several boundary conditions.

Keywords

Granular Systems, Hydrodynamics, Inelasticity, Vortex, Clusters.

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Os Sistemas Granulares (SG)	12
1.2	Objetivo	17
1.3	Futuras Aplicações	18
2	Da Descrição Microscópica de SG à Hidrodinâmica	19
2.1	O Problema Mecânico Estatístico	19
2.2	A dinâmica das Colisões	20
2.3	Formulação Canônica	23
2.4	Hidrodinâmica	26
2.5	Modelo Simples de Gás Granular	27
2.5.1	Solução Analítica	28
2.5.2	Resultados Numéricos	30
2.6	Análise de Instabilidades	33
3	O Modelo CDS	40
3.1	Descrição	40
3.2	Vantagens do Modelo	43
3.3	Relações entre valores computacionais e valores físicos reais	43
3.3.1	Escalas Físicas	44
3.4	As Equações do CDS	44
3.4.1	Limite contínuo	46
4	Resultados Numéricos e discussões	49
4.1	Grãos Dentro de Uma Caixa quadrada (2D)	49
4.1.1	Gás Infinito	49
4.1.2	Discussões	52
4.2	Fluxo de Grãos Através de um Tubo Retangular 2D	54
5	Conclusões	58
A	Apêndices	59
A.1	Discretização do laplaciano para o CDS	59
A.2	Código do Programa em Fortran	61

Lista de Figuras

- 1.1 Sistema contendo grãos de mostarda (Phys. Today). 13
- 1.2 a) Separação de impurezas dos grãos de feijão: observe os gravetos sobre o feijão. b) Separação de grãos de milho dos grãos de feijão. 15
- 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). 16
- 2.1 Representação esquemática de uma colisão entre dois grãos. 21
- 2.2 Representação esquemática de dois grãos no instante da colisão. 21
- 2.3 Gás granular separado em duas partes por um pistão massivo móvel. 28
- 2.4 Comportamento típico sem aglomeração. ($\gamma = 1,0, \beta = 0,3$): (a) $T_1(t)$; (b) $T_2(t)$; (c) $L - x(t)$. 31
- 2.5 Comportamento típico com aglomeração. ($\gamma = 1,0, \beta = 3,0$): (a) $T_1(t)$; (b) $T_2(t)$; (c) $L - x(t)$. 32
- 2.6 Evolução temporal das flutuações obtidas por integração numérica. Os gráficos ρ_k, θ_k , e os w_{kparal} e w_{kperp} estão associados às flutuações na densidade, temperatura granular e velocidade, respectivamente. 38
- 3.1 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 41
- 3.2 Representação esquemática da divisão de uma barra em N células unitárias. As células $\{-1, 0, N + 1, N + 2\}$ são as células adicionais que facilitarão a implementação das condições de contorno. 42
- 4.1 Estado do sistema em termos da evolução temporal da temperatura granular. 51
- 4.2 Dependência da temperatura granular média com o tempo. A função f (em vermelho) mostra o comportamento assintótico da lei de Haff. 52
- 4.3 Distribuição de densidade e Campo de velocidade escalado ($20\mathbf{u}^*/\sqrt{T_0^*(t)}$). Na fig. (a) e (b) temos a distribuição de densidade e o campo de velocidade respectivamente, no instante do desligamento da injeção de energia. As demais fig. mostram a evolução dos vórtices. As setas representam a velocidade de fluxo de uma célula. As velocidades são muito baixas, por isso os vórtices aparecem parados. 53

- 4.4 Mapa de distribuição de densidade (*a*) e temperatura granular (*b*). Os valores plotados são escalados como: n^*/n_0^* para a densidade e T_g^*/T_0^* para a temperatura granular. 54
- 4.5 Fluxo de um gás granular através de um tubo retangular 2D, com uma barreira quadrada de altura $50l$, aproximadamente. a) velocidade, b) densidade e c) temperatura granular. 56
- 4.6 Fluxo de um gás granular através de um tubo retangular 2D, com uma barreira tipo cunha de altura $198l$, aproximadamente. a) componente perpendicular da velocidade, b) densidade. 57