



Eduardo Thiesen Magalhães Costa

**Estabilidade de aglomerados granulares:
influência do coeficiente de restituição**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção Do título de Doutor em Física

Orientador: Prof. Welles Antonio Martinez Morgado

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2008



Eduardo Thiesen Magalhães Costa

**Estabilidade de aglomerados granulares:
influência do coeficiente de restituição**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção Do título de Doutor em Física. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Welles Antonio Martinez Morgado

Orientador

Departamento de Física — PUC-Rio

Prof. Rosane Rieira Freire

Departamento de Física - PUC-Rio

Prof. Célia B. Anteneodo de Porto

Departamento de Física - PUC-Rio

Prof. Evaldo M. F. Curado

CBPF

Prof. Ladário da Silva

Escola Naval

Prof. Sergio G. Coutinho

UFPE

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Fevereiro de 2008

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

Eduardo Thiesen Magalhães Costa

Graduou-se em bacharelado e em licenciatura em física na Universidade do Estado do Rio de Janeiro, mestrou-se em física pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

Costa, Eduardo Thiesen Magalhães

Estabilidade de aglomerados granulares: influência do coeficiente de restituição / Eduardo Thiesen Magalhães Costa; orientador: Welles Antonio Martinez Morgado. — 2008.

v., 73 f: il. ; 30 cm

1. Tese (Doutorado em Física) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Física – Teses. 2. Gases Granulares. 3. Aglomerados. 4. Mecânica Estatística. I. Morgado, Welles Antonio Martinez. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 530

Agradecimentos

Ao meu orientador, Welles Morgado, pela dedicação e paciência em todas as fases do trabalho.

Aos meus colegas de sala e/ou amigos da PUC-Rio, Anderson, Edson, Laércio, Wilson, Lucas, Renato, Diogo, Anderson, Nei e Henrique, que muito contribuíram para o bom andamento dos trabalhos. A todos os demais colegas da PUC-Rio que, direta ou indiretamente, colaboraram para o desenvolvimento desta tese, bem como a todos os funcionários e professores do Departamento de Física. Aos amigos e também doutorandos da UFF que, envolvidos com pesquisas na mesma área, gentilmente me receberam em suas reuniões de debates sobre suas linhas de trabalho. Em especial ao Marcus, que tanto me incentivou e orientou, dentro e fora do meio acadêmico.

Às famílias Thiesen e Magalhães Costa por todo o suporte. À Tathiana, que me acompanhou e tanto me incentivou ao longo desses anos. E ao Felipe, por sua boa fé e preocupação com minha trajetória.

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

Resumo

Costa, Eduardo Thiesen Magalhães; Morgado, Welles Antonio Martinez. **Estabilidade de aglomerados granulares: influência do coeficiente de restituição**. Rio de Janeiro, 2008. 73p. Tese de Doutorado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese tem como objetivo estudar o comportamento de equilíbrio de um sistema granular unidimensional, composto por um aglomerado e um gás formado por um único grão. Analisamos o comportamento de longo prazo de variáveis do aglomerado, tais como a pressão, a velocidade média quadrática e o espaçamento entre os grãos, para uma variedade de coeficientes de restituição dependentes da velocidade relativa. Foi proposta uma forma para a dependência entre o coeficiente de restituição e a velocidade relativa entre os grãos, que possui como casos particulares modelos encontrados na literatura, como o visco-elástico e o caso em que o coeficiente independe da velocidade. Os resultados obtidos, dissolução do aglomerado quando há dependência entre o coeficiente e a velocidade, e a permanência do mesmo quando não há, estão de acordo com estudos hidrodinâmicos que apontam para a natureza transiente das instabilidades na densidade de gases granulares, cujo coeficiente de restituição depende da velocidade.

Palavras-chave

Gases Granulares. Aglomerados. Mecânica Estatística.

Abstract

Costa, Eduardo Thiesen Magalhães; Morgado, Welles Antonio Martinez. **Granular clusters stability: influence of the coefficient of restitution**. Rio de Janeiro, 2008. 73p. PhD Thesis — Department of Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis aims to study the behavior of a one-dimensional granular system, composed of a cluster and a gas formed by only one grain. We analyze the behavior of long-term variables of the cluster, such as a pressure, the RMS velocity and mean space between grains, for a variety of velocity dependent coefficients of restitution. We proposed a form for the dependence of the coefficient of restitution on the relative velocity between grains, which shows as particular cases important classes of models found in the literature, such as the visco-elastic and the coefficient of restitution independent of the velocity. The results obtained show the dissolution of the cluster when there is dependence between the coefficient and speed, and permanence of the cluster when the dependence exists, in accordance with the hydrodynamic studies pointing to the transient nature of the instabilities in the density of the granular gas, whose coefficient of restitution depends on the speed.

Keywords

Granular Gas. Clusters. Statistical Mechanics.

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Objetivo	16
2	Tratamento para o Gás Granular	18
2.1	Métodos Contínuos	18
2.2	Dinâmica Molecular	30
2.3	Dinâmica Molecular Dirigida por Eventos	36
2.4	Limites da Abordagem Hidrodinâmica	38
3	Aglomerado Granular	40
3.1	Aglomerados em Sistemas Granulares	40
3.2	Premissas do Modelo	41
3.3	Equilíbrio Aglomerado-gás	44
3.4	Análise Adimensional	49
3.5	Comportamento de Longo Prazo	50
3.6	Outros Modelos na Literatura	53
3.7	Oscilações do Aglomerado	54
3.8	Conseqüências do Modelo	54
4	Discussão dos Resultados	56
A	Equações do Equilíbrio Aglomerado-gás	61
A.1	$m > 0$	61
A.2	$m = 0$	65
B	Dissipação da Energia do Aglomerado na Colisão Aglomerado-gás	67
B.1	$m > 0$	67
B.2	$m = 0$	69
C	Comportamento de Longo Prazo: Soluções Assintóticas	70

Lista de figuras

- 1.1 (a) Exemplo para uma distribuição de tamanhos diferentes de grãos, com os diâmetros dos mesmos medidos em μm . Abaixo, fotos tiradas com um microscópio em escalas de $500 \mu m$ (b) e de $10 \mu m$ (c). Figura reproduzida do artigo [1]. 11
- 1.2 Dois grãos cobertos por um filme de água. A tensão superficial encontrada aí gera forças de atração entre os grãos. 12
- 1.3 Experimento de Reynolds. O recipiente contém grãos e uma certa quantidade de água. Ao aplicarmos uma pressão na parede lateral, os grãos atingem uma configuração onde a água penetra nos espaços entre eles, fazendo com que o nível da água no recipiente diminua. 12
- 1.4 Sistema de disco de tamanhos idênticos com diferentes densidades: (a) $\rho = 0.5628$, (b) $\rho = 0.7394$ e (c) $\rho = 0.8681$. Figura reproduzida da referência [2]. 13
- 1.5 Aglomerado de grãos em uma ampulheta com a presença de um arco dentro dessa estrutura. 15

- 2.1 Duas esferas de diâmetro δ separadas por uma distância s . 22
- 2.2 Representação esquemática do cisalhamento entre duas camadas. 26

- 3.1 As N partículas do aglomerado e a partícula do gás. A distância média entre duas partículas consecutivas do aglomerado é ε (ausente na figura), o diâmetro de cada partícula é d e o comprimento total é $L + (N + 1)d$. 42
- 3.2 Forma geral do coeficiente de restituição para diferentes valores de m . 43
- 3.3 Escalas de tempo percorridas pelo sistema. Em $t = 0$, todas as partículas do sistema encontram-se igualmente espaçadas e com velocidades aproximadamente iguais. A partir de $t = t_0^*$, o aglomerado granular começa a se formar, próximo a parede inelástica. Finalmente, em $t = t_0$, a configuração inicial do nosso modelo está dada, com o aglomerado de um lado e o gás granular do outro. 44
- 3.4 Seqüência de colisões. 45
- 3.5 Coeficiente de restituição independente das velocidades. O único caso estável em todos os instantes de tempo. O espaçamento médio, ε , é medido em unidades de L/N . 51
- 3.6 Evolução temporal para alguns exemplos de coeficientes de restituição dependentes da velocidade. A linha pontilhada representa $m = 2$, a tracejada $m = 1$ e a cheia $m = 1/5$. 53
- 3.7 Valor não perturbado de ε menos o valor perturbado, como uma função do tempo, normalizado pelo próprio ε . 55

Lista de tabelas

- 4.1 Resumo dos resultados obtidos. Na coluna esquerda, o valor do coeficiente de restituição. Na coluna da direita, a situação correspondente do sistema.

56