

4

Discussão dos Resultados

Estudamos a estabilidade de longo prazo de sistemas granulares não-forçados, nos quais aglomerados são formados. O modelo microscópico e qualitativo desenvolvido tornou possível observar os aglomerados em tempos extremamente longos, ainda não disponíveis às simulações computacionais.

Assumimos uma forma geral para o coeficiente de restituição que inclui os modelos independente da velocidade ($m = 0$) e viscoelástico ($m = 1/5$) como casos particulares:

$$r = 1 - A \left(\frac{g}{g_0} \right)^m, \quad (4.1)$$

onde $0 \leq A < 1$, g é a velocidade relativa, g_0 é uma constante referente à escala de dissipação e $m \geq 0$.

A partir daí, podemos resumir os resultados da seguinte forma:

Coeficiente de Restituição (m)	Situação
$m = 0$	COLAPSO
$m > 0$	GÁS

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

O interesse por trás desse estudo tem duas razões fundamentais. A primeira é que o comportamento de longo prazo de um aglomerado granular depende do parâmetro de inelasticidade (que pode ser definido aqui como $q = \frac{1-r}{2}$). De acordo com nosso modelo, se o coeficiente de restituição se tornar igual a 1, à medida que a velocidade relativa tende a zero, como a maioria dos sistemas reais, então o aglomerado de esferas rígidas e lisas será instável para sistemas com gravidade zero. Isso sugere um comportamento dinâmico para o gás granular que compreende uma fase inicial homogênea, na qual a Lei de Haff prediz a evolução da temperatura granular média. O sistema entra na fase de separação após um tempo transiente e a energia cinética global varia com uma potência diferente do tempo [32]. Após um tempo muito longo, a pressão

externa do gás granular já não é mais suficiente para manter as partículas do gás unidas, dessa forma o aglomerado se dissolve num gás granular homogêneo de velocidade interna muito baixa. A Lei de Haff será então, mais uma vez, aplicada a esse gás (uma vez que $m \neq 0$). Isso não representa uma contradição com os resultados obtidos em [39], uma vez que tais resultados aplicam-se a sistemas com coeficientes de restituição independentes do tempo ($m = 0$).

A segunda razão é que, para coeficientes de restituição dependentes da velocidade, os aglomerados não colapsam realmente, mas se comportam como fluidos muito densos (sem atrito superficial e com gravidade zero). De fato, poderíamos pensar na fase de coexistência entre gás e aglomerado como uma separação suave entre ambos, sem um contorno singular, exceto para o caso do coeficiente de restituição constante ($m = 0$). Um tratamento hidrodinâmico contínuo para esse caso deve ser mais apropriado.

Nosso modelo mostrou que é possível tratar o aglomerado como uma fase densa, quando $m > 0$. Isso permitiu o tratamento analítico com equações para as variáveis do aglomerado. Este tratamento partiu das equações fundamentais do sistema, ao contrário de modelos fenomenológicos, como em [9].

Algumas questões surgem a respeito da dissolução de longo prazo dos aglomerados granulares: eles obedecerão às mesmas equações que aquelas encontradas para a fase de colapso? Uma vez que a irreversibilidade da dinâmica granular impede a reversão temporal, as equações de dissolução devem ser diferentes daquelas do colapso. Uma possível extensão para o nosso modelo é a descrição do comportamento transiente, que ocorre entre $t = t_0^*$ e $t = t_0$, conforma a figura (3.3), com equações para a formação do aglomerado.

Nesta tese, estudamos sistemas na ausência de gravidade de modo a isolar o efeito, na estabilidade do aglomerado, da dependência da velocidade na dissipação. A presença de gravidade induz uma quebra de simetria direcional e introduz a necessidade de realização de trabalho externo para a quebra do aglomerado. Em nosso modelo, a quantidade de trabalho requerida para tanto é nula. Em suma, a gravidade é equivalente a uma pressão externa e só pode ser vencida dada a utilização de trabalho externo, enquanto que procuramos apenas entender os efeitos dinâmicos internos na estabilidade do sistema.