

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

## Estudo do aumento espontâneo na velocidade de partículas em transportadores de correia

Abraão Marques Tavares<sup>1</sup>

Programa de Pós Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG

Allbens Atman Picardi Faria<sup>2</sup>

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Sistemas Complexos

Departamento de Física e Matemática, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG

**Resumo.** Investigamos algumas propriedades do material granular que influenciam no fenômeno observado de aumento espontâneo da componente horizontal da velocidade das partículas. Foram realizadas simulações computacionais onde se percebe a variação da velocidade, considerando o atrito entre grãos, a vazão do fluxo granular e a coesão entre os grãos. Mostramos que o atrito entre grãos aproxima o escoamento do comportamento de um sólido granular.

**Palavras-chave.** Dinâmica molecular, transportador de correia, simulação, Rocky@.

### 1 Introdução

Os materiais granulares ocupam um lugar de destaque em nossa cultura, o processamento destes materiais consome aproximadamente 10% de toda a energia produzida no mundo[2]. Compreender o comportamento mecânico destes materiais contribui diretamente na engenharia de equipamentos e processos mais eficientes para transporte e armazenagem.

Um transportador de correia é um equipamento típico para transporte de materiais granulares em várias indústrias tais como mineração, alimentícia e agrícola[1]. Este consiste basicamente em uma correia de borracha esticada sobre um conjunto de polias formando uma esteira geralmente horizontal (inclinações usuais estão entre  $-15^\circ$  e  $+15^\circ$ , medidos em relação a horizontal), uma ou mais polias motoras transferem o movimento para a correia de borracha. O material granular depositado sobre a correia é então transportado até o ponto de descarga, onde cai em queda livre.

Neste artigo apresentamos resultados de simulações computacionais por D.E.M (Método de Elementos Discretos) que investigam o problema do transporte de grãos em

---

<sup>1</sup> abraaomt@gmail.com

<sup>2</sup> atman@dppg.cefetmg.br

transportadores, atentando para a dinâmica de velocidades ao longo do transporte. Em simulações de um típico transportador de correia observou-se um aumento espontâneo na componente horizontal) da velocidade das partículas (onde o eixo horizontal X coincide com o sentido do transporte de material), que ocorre no ponto de saída do transportador (e início da queda livre). Neste trabalho chamaremos essa componente de  $V_x$ .

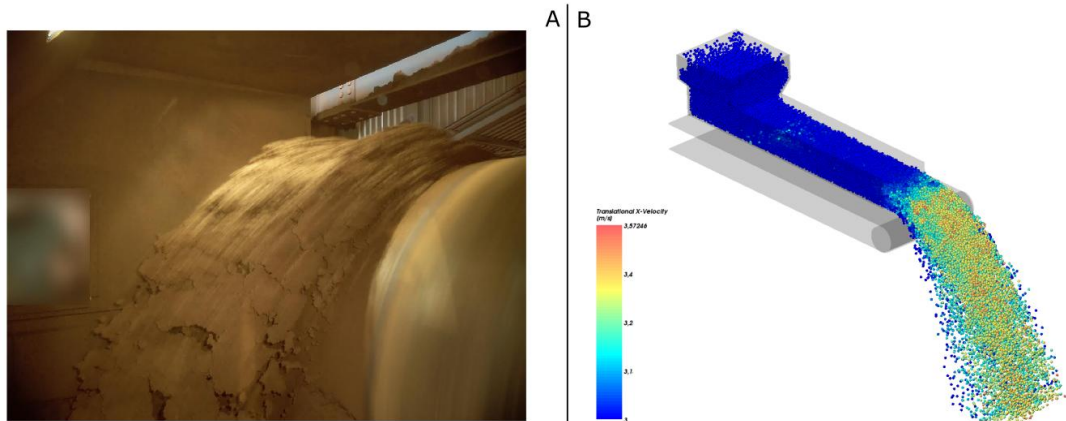


Figura 1-1 – (A) Foto de um fluxo de minério de ferro (crédito: Abraão M. Tavares) e (B) simulação computacional de uma situação semelhante em um dos experimentos deste artigo.

Não foram encontradas referências ou descrições deste fenômeno na literatura científica ou manuais difundidos na indústria.

Existem indícios de que este fenômeno ocorra na realidade, em fotos de fluxos de material reais (Figura 1-1A) observa-se que partículas das camadas mais elevadas aparecem desfocadas, em um efeito típico de alta velocidade em fotografias, enquanto as camadas inferiores do material aparecem mais definidas, indicando velocidade menor. Ainda é possível perceber o material formando blocos durante a queda, indicando o comportamento típico de sólidos granulares que será citado adiante neste trabalho, na seção 4.2.

Este estudo busca investigar alguns dos fatores que influenciam neste aumento de velocidade como base para uma compreensão do mecanismo responsável pelo fenômeno. A investigação foi realizada através de um conjunto de simulações computacionais do sistema descrito, variando-se parâmetros previamente escolhidos, para as quais eram observados a média de  $V_x$  de um conjunto de partículas, medida em uma região do espaço de simulação imediatamente após o ponto de saída do transportador.

Estes experimentos foram planejados e seus resultados analisados segundo a técnica estatística de planejamento e análise de experimentos chamada Planejamento Fatorial 2k [3].

Na seção “Métodos” mostraremos como foram feitas as simulações e o método estatístico utilizado no planejamento e análise dos experimentos. Na seção seguinte, mostraremos os resultados medidos a partir das simulações e na “Discussão dos Resultados” avaliaremos o significado dos valores encontrados e hipóteses para explicá-los. Finalizaremos o artigo com nossas conclusões e perspectivas.

## 2 Métodos

O sistema aqui estudado é um transportador genérico simples, horizontal, como mostrado na Figura 2-1A, utilizado tipicamente na indústria de mineração.

Todas as simulações foram realizadas com o software comercial Rocky®[3] (versão 3.4.2). O software nos permite definir um volume de controle retangular no espaço e extrair as propriedades das partículas contidas neste volume, para qualquer instante de tempo simulado. Foi então definido um volume de 1 metro de comprimento por 2,5 metros de largura e 3 metros de altura (o suficiente para englobar todo o fluxo de partículas dentro de uma seção de 1 metro, como mostra a Figura 2-1B

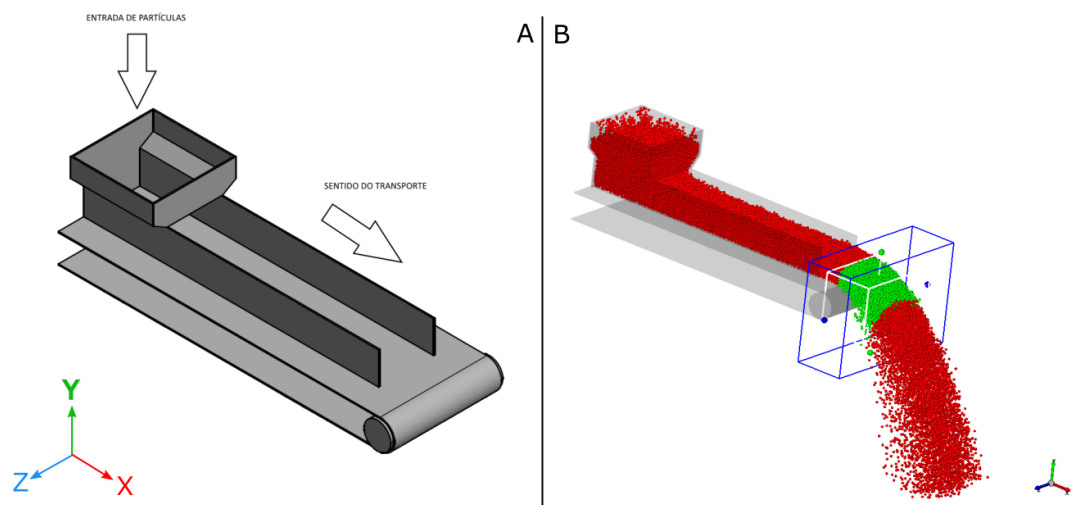


Figura 2-1 – (A) Diagrama geral do transportador simulado e (B) posição do volume de controle com as partículas contidas nele mostradas em verde, das quais são extraídas as informações de velocidade.

### 2.1 O planejamento 2k

Os experimentos seguiram um planejamento fatorial 2k [5]. Escolhemos por motivo de praticidade  $k = 3$ . Ou seja, três fatores (A, B e C) estudados com 2 níveis (chamados de *baixo* e *alto*) cada um. Os nomes dos experimentos indicam qual dos fatores possui nível alto naquele experimento, de modo que o experimento “ab”, por exemplo, tem o fator A com nível *alto*, B com nível *alto* e C com nível *baixo*.

Diversos fatores podem alterar o comportamento dos materiais granulares transportados tais como atrito (entre partículas, partícula com objetos), força de adesão (entre partículas, partículas com objetos), formato das partículas, velocidade da correia, quantidade de material, dentre outros. Neste estudo foram escolhidos 3 fatores a terem sua influência analisada:

- (A) Vazão de material. Para um mesmo tamanho de transportador e velocidade

de correia, aumentar ou diminuir a vazão implica diretamente em aumentar ou diminuir, respectivamente, a altura de material sobre a correia.

- (B) Atrito entre partículas (aqui os atritos dinâmico e estático terão o mesmo valor)
- (C) Força de adesão entre partículas (definida como fração do peso da partícula)

Sendo os níveis, baixo e alto, definidos da seguinte forma:

- Vazão de material: 4000 e 8000 toneladas por hora (1111,1 kg/s e 2222,2 kg/s).
- Atrito entre partículas: 0 e 1, adimensional.
- Força de adesão entre partículas: 0 e 1, adimensional. Força 1 significa que a força de adesão é igual ao peso da partícula.

Sendo estes fatores e níveis escolhidos, foram feitas 8 simulações de 7 segundos nas quais partículas esféricas com diâmetro único de 50mm eram criadas a 1,5m de altura da correia (Figura 2-1A), na taxa descrita pelo parâmetro “Vazão de material” e deixadas livres para serem transportadas e lançadas em queda livre, sem resistência do ar. O material simulado tem a densidade aparente de 1600kg/m<sup>3</sup>, um valor típico de materiais da indústria de mineração. A correia possuía uma velocidade constante de 3m/s e a fim de isolar os efeitos dos fatores analisados, não havia atrito entre as partículas e as guias laterais que mantêm as partículas na correia. O fator de atrito estático e dinâmico entre as partículas e a correia foi definido como 0,3.

De cada um dos experimentos mostrados, será medida velocidade média das partículas no volume de controle mostrado na Figura 2-1B, para avaliarmos o impacto de cada um dos fatores escolhidos na componente horizontal da velocidade durante a queda das partículas no volume considerado.

### 3 Resultados

#### 3.1 Velocidade média

Para cada uma das 8 simulações foi extraída a  $V_x(t)$  média das partículas no volume descrito na Figura 2-1, para cada instante  $t$  da simulação. A fim de filtrar eventuais ruídos nos resultados, tomou-se a média da velocidade medida durante 10 instantes, escolhidos após o tempo de 5 segundos. Estes valores são vistos na Tabela 1.

O tempo de 5s como instante inicial para a coleta dos dados foi determinado a posteriori pois percebeu-se através dos gráficos que, a partir deste tempo, o sistema entra em regime estacionário até o fim da simulação, Figura 0-1. No gráfico da Figura 3-1 percebemos que a  $V_x$  média das partículas em regime permanente (a partir do instante 3s) é significativamente maior que a velocidade da correia de 3,0m/s nos experimentos AB e BC e menor que 3,0m/s no experimento (1).

A análise 2k contempla uma estimativa numérica dos efeitos dos fatores estudados bem como os efeitos das interações entre fatores. O efeito de um dado fator é calculado como a média dos valores da  $V_x$  média nos experimentos nos quais este fator tem nível alto menos a média dos valores da  $V_x$  média nos experimentos nos quais este fator tem

nível baixo. Uma descrição mais detalhada do cálculo destes efeitos foge do escopo deste artigo e pode ser encontrada em[5].

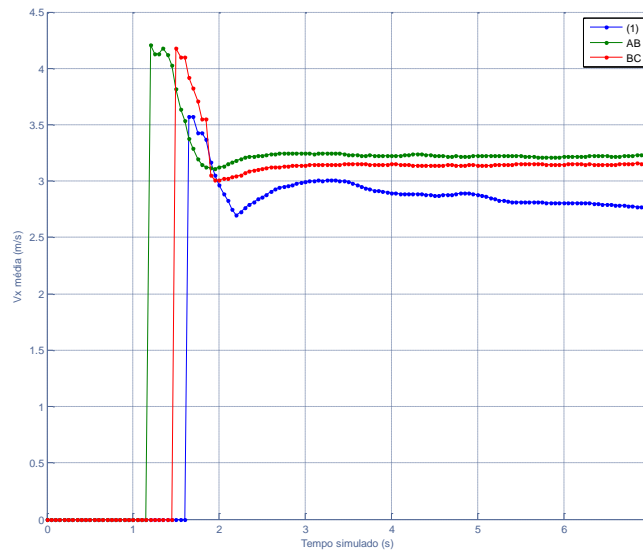


Figura 0-1 – Gráfico da  $V_x(t)$  média dentro do volume de controle (ver Figura 2-1) ao longo de 7 segundos simulados do experimento AB

Tabela 1- Parâmetros e resultados dos experimentos

Experimento	Parâmetros			Resultados	
	A (Vazão)	B (Atrito)	C (Adesão)	$V_x$ (m/s)	Efeito do fator
(1)	4000	0	0	2,7810	
a	8000	0	0	3,2724	0,2717
b	4000	1	0	3,1509	0,1611
ab	8000	1	0	3,2257	-1,8105
c	4000	0	1	2,7919	-0,0052
ac	8000	0	1	3,2522	-0,0113
bc	4000	1	1	3,1524	-0,0005
abc	8000	1	1	3,2128	0,0042

#### 4 Discussão dos resultados

Era esperado que uma vez fora do transportador e assim sem influência da correia ou outra força qualquer além da gravidade, as partículas mantivessem  $V_x$  constante e, no limite, igual à velocidade da correia transportadora (3,0m/s). No entanto observa-se um aumento de  $V_x$  na maioria dos experimentos, chegando a um máximo de 9% (Tabela 1, experimento “a”) e em dois casos (experimentos “ (1) ” e “c”) observou-se uma diminuição nos valores medidos de  $V_x$  em relação à velocidade da correia.

Através dos efeitos calculados (Tabela 1) observa-se que a maior influência nos resultados se dá pela combinação de fatores “vazão de material” e “atrito entre partículas” (A e B).

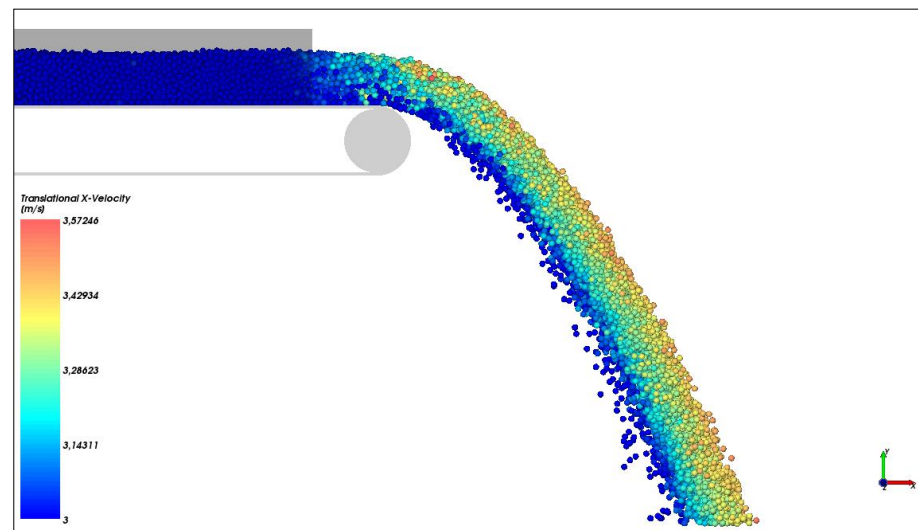


Figura 4-1 - As partículas têm sua  $V_x$  aumentada espontaneamente ao saírem do transportador. Imagem representa os resultados do experimento AB.

Ao mesmo tempo observa-se graficamente, através da escala de cores atribuída às velocidades das partículas, que este aumento de velocidade varia em função da distância vertical da partícula à correia transportadora, medida no ponto de início da queda, de modo que partículas mais baixas, próximas da correia, ganham pouca velocidade, ou mesmo perdem, enquanto partículas mais altas, longe da correia, ganham mais velocidade.

É importante notar também que este aumento de velocidade ocorre somente em uma região de transição no início da curva de queda livre e durante todo o movimento seguinte  $V_x$  permanece constante.

A seguir são apresentadas algumas hipóteses para explicação deste fenômeno.

Enquanto as partículas se encontram sob a ação da correia, antes do início da queda, a compactação natural do material granular pela ação da gravidade gera uma pressão de confinamento nas partículas que é cessada no momento da transição para a queda livre.

Quando o fluxo de material começa a desmoronar ao fim do transportador, há um gradiente de pressão entre as partículas vindas do transportador e aquelas em queda livre à frente da região de transição de tal maneira que essa diferença de pressão é responsável pelo aumento de velocidade. Este efeito é maximizado no caso A, onde o aumento da vazão faz com que os grãos sem atrito escoem mais rapidamente.

As partículas mais próximas da correia continuam confinadas, pela exclusão de volume e atrito estático, explicando o gradiente de velocidades observado na Figura 4-1

Outra hipótese para o fenômeno é que enquanto as partículas estão em seu movimento retilíneo sob a ação da correia o material granular tende a se comportar como um sólido; no início da queda livre, este estado coesivo ainda permanece existe e, por conservação do momento angular as partículas mais distantes do centro de rotação adquirem uma velocidade linear maior, o que explicaria o gradiente de velocidades.

Porém ao mesmo tempo em que essa rotação se inicia, ocorre também a transição do comportamento sólido para o líquido do material, explicando porque este efeito só

ocorre naquela região de transição. Porém ao variarmos o parâmetro de coesão das partículas no software, o resultado não foi tão expressivo como esperávamos.

## 5 Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho deixam claro a existência do fenômeno de aceleração espontânea das partículas em simulações computacionais. A compreensão de um fenômeno nunca antes observado como este implica em mais um passo no entendimento geral da dinâmica de materiais granulares, bem como poderá impactar diretamente no projeto de equipamentos industriais para manuseio de grãos.

Um futuro trabalho relacionado é medir este efeito em um processo real e correlacionar os resultados medidos com os obtidos em simulações. Essa comprovação dará um passo importante na compreensão da dinâmica interna e do comportamento macroscópico de materiais granulares.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, pela possibilidade do desenvolvimento desta pesquisa. A empresa Koch-Tecnometal e à empresa Minerium Desenvolvimento, pela disponibilidade dos recursos de software e hardware para realização dos experimentos. Agradecemos à Prof. Dr. Elizabeth Wanner pelas valiosas discussões em particular no planejamento estatístico utilizado.

## Referências

- [1] M. J. Cordeiro, L. A. Pugnali, Dynamic transition in conveyor belt driven granular flow, *Powder Technology*, (2014), DOI:10.1016/j.powtec.2014.12.017
- [2] J. Duran, "Sands, Powders, and Grains," New York, Springer-Verlag, (2000), p. 3.
- [3] ESSS, Rocky - DEM Particle Simulator. Disponível em: <<http://rocky-dem.com>>. Acessado em 1 de Maio de 2015.
- [4] C.F.M. Magalhães, A.P.F. Atman, G. Combe and J. G. Moreira, Jamming transition in a two-dimensional open granular pile with rolling resistance, *Papers in Physics*, vol. 6, (2014), DOI:10.4279/PIP.060007
- [5] D. C. Montgomery, "The 2K factorial design," em *Design and Analysis of Experiments*, Tempe, John Wiley & Sons, Inc., (2013).