

**Leonardo Seperuelo Duarte**

**Simulação de Grãos em GPU.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**

**Programa de Pós-graduação em Informática**

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2009



**Leonardo Seperuelo Duarte**

**Simulação de Grãos em GPU.**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio

Orientador: Prof. Waldemar Celes Filho

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2009



**Leonardo Seperuelo Duarte**

**Simulação de Grãos em GPU.**

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

**Prof. Waldemar Celes Filho**

Orientador  
Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Marcelo Gattass**

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Eurípedes A. Vargas Jr**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Ivan Fábio Mota de Menezes**

TecGraf – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Dezembro de 2009

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

### Leonardo Seperuelo Duarte

Leonardo Seperuelo Duarte graduou-se em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro [2005].

#### Ficha Catalográfica

Duarte, Leonardo Seperuelo

Simulação de Grãos em GPU. / Leonardo Seperuelo Duarte; orientador: Waldemar Celes Filho. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Informática, 2009.

v., 60 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Tese. 2. Simulação de Grãos. 3. Programação Genérica em Placa Gráfica (GPGPU). 4. Método dos Elementos Discretos. I. Celes, Waldemar Filho. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

À minha família por tudo.

À minha namorada Gracy Kelly de Abreu Almeida por estar sempre ao meu lado.

Ao meu orientador Professor Waldemar Celes Filho pelo apoio e orientação para a realização deste trabalho.

Ao meu coordenador de projeto Ivan Menezes por todo o incentivo para a realização da pesquisa.

Ao Professor Vargas, a Raquel Velloso e ao Luis Camones, do Departamento de Engenharia Civil, por todo esclarecimento e ajuda com o *PFC3D*.

Aos meus amigos da PUC-Rio e do TecGraf.

A PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

## Resumo

Duarte, Leonardo Seperuelo; Celes, Waldemar Filho. **Simulação de Grãos em GPU**. Rio de Janeiro, 2009. 60p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A proposta deste trabalho é viabilizar e acelerar a simulação de um sistema de grãos implementado inteiramente na GPU, utilizando o Método dos Elementos Discretos (MED). O objetivo de implementar todo o sistema na GPU é evitar o custo de transferência de informações entre a placa gráfica e a CPU. O sistema proposto simula partículas de diferentes diâmetros, com tratamento de colisão entre partículas e entre partículas e o ambiente. Com o Método dos Elementos Discretos são consideradas forças normais e forças tangenciais aplicadas sobre as partículas. Algoritmos paralelos foram desenvolvidos para construção e armazenamento do histórico de forças tangenciais existente em cada contato entre partículas. São comparadas duas propostas de construção de grade regular de células para realizar a detecção de contato. A primeira proposta é muito eficiente para partículas com raio fixo, enquanto que a segunda se mostra com maior escalabilidade para modelos com variação de raio. O sistema é composto por diversos algoritmos executados em *threads*, responsáveis por cada etapa da simulação. Os resultados da simulação foram validados com o programa comercial PFC3D. O sistema de partículas em GPU consegue ser até 10 vezes mais rápido do que o programa comercial.

## Palavras-chave

Simulação de Grãos; Programação Genérica em Placa Gráfica (GPGPU); Método dos Elementos Discretos;

## Abstract

Duarte, Leonardo Seperuelo; Celes, Waldemar Filho (Advisor). **Grains Simulation on GPU**. Rio de Janeiro, 2009. 60p. MSc Dissertation — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The purpose of this work is to make possible and speed up a grain system simulation implemented entirely on GPU, using the Discrete Element Method (DEM). The goal of implementing all the system on GPU is to avoid the cost of data transfer between the graphics hardware and the CPU. The proposed system simulate particles of different diameters, with collision treatment between particles and between particles and the environment. The Discrete Element Method consider normal forces and tangential forces applied on the particles. Parallel algorithms were designed to construct and storage the tangential forces history present in each contact between particles. Two ideas for the construction of the regular grid of cells are proposed and compared to perform the collision detection. The first one is very efficient to particles with fixed radius, while the second one shows more scalability in models with radius variation. The system consists of several algorithms running in threads, responsible for each step of the simulation. The results of the simulation were validated with the commercial program called PFC3D. The GPU particle system can be up to 10 times faster then the commercial program.

## Keywords

Grains Simulation; General-Purpose Computation on Graphics Hardware (GPGPU); Discrete Element Method;

## Sumário

1	Introdução	<b>11</b>
2	Trabalhos Relacionados	<b>13</b>
3	Método dos Elementos Discretos - MED	<b>15</b>
3.1	Lei de Movimento	15
3.2	Amortecimento Mecânico	17
3.3	Lei Força-Deslocamento	17
4	Detecção de Contato	<b>22</b>
5	Simulação de Grãos na GPU	<b>24</b>
5.1	Grade Uniforme	25
5.2	Simulação Apenas com Força Normal	29
5.3	Simulação com Força Normal e Tangencial	31
6	Implementação e Resultados	<b>40</b>
6.1	Testes de Validação do Sistema	40
6.2	Testes de Desempenho do Sistema	45
6.3	Teste de Variação de Raio	50
6.4	Exemplo Superfície Livre	51
6.5	Exemplo Ângulo de Resposta	55
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	<b>57</b>
	Referências Bibliográficas	<b>58</b>

## Lista de figuras

3.1	Forças e momentos no contato entre duas partículas.	18
3.2	Atualização da força tangencial a cada novo ponto de contato.	19
4.1	Grade uniforme.	22
4.2	Vizinhança de $p_1$ .	23
5.1	Representação da grade uniforme formada pelo vetor de pares e o vetor de endereçamento.	25
5.2	Cálculo do id da célula que contém o centro geométrico de $p_1$ , em relação a origem da grade.	26
5.3	Resultado do Passo1 para o exemplo de 4 partículas.	27
5.4	Resultado do Passo2 com a grade ordenada do exemplo de 4 partículas.	27
5.5	Algoritmo para processar o endereço da célula de id 12 no vetor de endereçamento da grade uniforme.	28
5.6	Vetor de endereçamento da grade uniforme do exemplo de 4 partículas.	28
5.7	Fluxo de dados entre as etapas da simulação apenas com força normal.	29
5.8	Fluxo de grandezas que são calculadas em cada etapa da simulação com forças normais e tangenciais.	31
5.9	Etapas para contabilizar o contato entre $p_1$ e $p_2$ .	33
5.10	Total de contatos por partícula.	34
5.11	Contagem de contatos acumulada.	34
5.12	Lista de contatos com as estruturas de força tangencial e vetor normal do contato.	35
5.13	Lista de contatos com o histórico da força tangencial e do vetor normal do contato.	37
6.1	Simulação de colisão de 2 partículas sobre o plano	42
6.2	Resultado da partícula de teste na simulação apenas com forças normais.	42
6.3	Simulação com o modelo físico completo de 2 partículas sobre o plano.	44
6.4	Validação do modelo físico completo para duas partículas com colisão tangencial.	45
6.5	Simulação de superfície livre.	46
6.6	Tempo de cada frame das simulações de Venetillo e Celes e do GPU Grãos.	47
6.7	Simulação de uma partícula de teste em queda livre sobre 150K partículas acomodadas.	47
6.8	Formação inicial em formato de colmeia com 150K partículas.	48
6.9	Variação de velocidade durante acomodação de 150K partículas.	49
6.10	Resultado da partícula de teste caindo sobre 150k partículas acomodadas.	50

6.11	Simulação com variação de raio de 150K partículas.	51
6.12	Simulação de superfície livre com camadas de diferentes materiais.	52
6.13	Simulação de superfície livre com camadas de diferentes materiais.	53
6.14	Simulação de superfície livre com camadas de diferentes materiais.	54
6.15	Simulação de 2000 partículas caindo por um funil.	55
6.16	Simulação de pilha com partículas passando por um funil.	56
6.17	Partículas caindo lentamente por causa do atrito com as paredes do funil.	56

## Lista de tabelas

6.1	Propriedades das partículas e dados da simulação apenas com forças normais.	41
6.2	Propriedades das partículas e dados da simulação com o modelo físico completo.	43
6.3	Tempo de cada simulador para calcular 4s de simulação com 150K partículas.	49
6.4	Propriedades das partículas e dados da simulação de superfície livre.	51
6.5	Propriedades das partículas e dados da simulação de ângulo de resposta.	55