

André Luiz Ferreira Pinto

**Algoritmo para geração de arranjos de
partículas para utilização no método dos
elementos discretos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Deane de Mesquita Roehl

Rio de Janeiro
Agosto de 2009

André Luiz Ferreira Pinto

**Algoritmo para geração de arranjos de
partículas para utilização no método dos
elementos discretos**

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

Prof. Deane de Mesquita Roehl

Orientador

Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

Prof. Elisa D. Sotelino

Virginia Polytechnic Institute and State University

Prof. Waldemar Celes Filho

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Celso Romanel

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Agosto de 2009

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

André Luiz Ferreira Pinto

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 2007. No mesmo ano iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Civil na PUC-Rio, na área de concentração de Estruturas, atuando na linha de pesquisa do Método dos Elementos Discretos, sendo bolsista CNPq durante esse período.

Ficha Catalográfica

Pinto, André Luiz Ferreira

Algoritmo para geração de arranjos de partículas para utilização no método dos elementos discretos : / André Luiz Ferreira Pinto; orientador: Deane de Mesquita Roehl. — 2009.

77 f.: il.(color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Método dos elementos discretos. 3. Otimização. 4. Algoritmo genético. 5. Material com gradação funcional. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, amigos, colegas e professores, e em especial:

Aos meus pais, Luiz Alberto e Heloisa Helena, pelo apoio em todas as horas, pelo tempo que puderam: a educação esteve sempre em destaque. Por todo o carinho e incentivo, assim como o de meus irmãos — Carolina, Marcelo, Mariana e Bruno.

À professora Deane de Mesquita Roehl pela amizade, orientação e oportunidade de aprender e crescer mais. Pelo desafio sempre constante para me esforçar ainda mais.

À minha namorada Fernanda Lins Gonçalves Pereira, pelo apoio dado durante a realização deste trabalho, pela amizade, compreensão e paciência, e por todo o caminho que percorremos e percorreremos juntos.

À minha amiga Monique Cordeiro Rodrigues, pela estimada amizade desde a faculdade. Um pouco mais distantes no Mestrado, porém reunidos novamente no Doutorado.

Ao CNPq, à PUC-Rio e à Petrobras, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio e UERJ pela amizade e por sempre me mostrarem coisas boas da vida.

E a todos aqueles que não foram citados, mas que com certeza influenciaram meu caminho até aqui.

Resumo

Pinto, André Luiz Ferreira; Roehl, Deane de Mesquita (Orientador). **Algoritmo para geração de arranjos de partículas para utilização no método dos elementos discretos**. Rio de Janeiro, 2009. 77p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O método dos elementos discretos (MED), desenvolvido na década de 70, tem despertado, com o aumento da capacidade de processamento e o desenvolvimento de técnicas de computação de alto desempenho, crescente interesse de diversos pesquisadores como ferramenta de estudo de problemas de engenharia. Um campo de estudo de grande apelo é a modelagem de fenômenos associados a materiais granulares, dentre eles a compactação de pacotes granulares — como por exemplo em pós metálicos na indústria siderúrgica —, a produção de areia e a produção de material de sustentação de fraturas estimuladas hidraulicamente na indústria do petróleo, motivação deste trabalho. A aplicação do método requer em sua primeira etapa a geração da configuração inicial das partículas ou o preenchimento de domínios com as mesmas. Alguns estudos têm se voltado para o desenvolvimento de algoritmos de geração de arranjos densos de partículas. Neste trabalho apresenta-se um algoritmo geométrico de geração de arranjos densos de partículas que correspondam a uma dada curva granulométrica e estejam de acordo com outros parâmetros definidos para o pacote granular. No presente trabalho é dada atenção especial a geração de arranjos bidimensionais de discos para modelar o fenômeno de preenchimento de fraturas em poços estimulados por fraturamento hidráulico. O refluxo desse material com o bombeamento de óleo é uma das principais causas de declínio de produção de petróleo em poços fraturados, além de causar danos ao equipamento. O algoritmo proposto foi implementado em linguagem Java e a otimização dos arranjos segundo a porosidade foi realizada através da aplicação de algoritmos genéticos. Aplicações do algoritmo a alguns arranjos de partículas e ao problema de preenchimento de fraturas são apresentados.

Palavras-chave

Método dos elementos discretos; Otimização; Algoritmo genético; Material com gradação funcional;

Abstract

Pinto, André Luiz Ferreira; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor).
An algorithm for the generation of particle arrangements for application with the discrete element method. Rio de Janeiro, 2009. 77p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Discrete Element Method (DEM), developed in the 70's, has become more attractive with the increasing computer processing capacity and the development of high-performance computational techniques. This scenario induced growing interest of many researchers as a tool to study engineering problems. A very appealing field of study is the modeling of phenomena associated with granular materials, including the compaction of granular packages, such as metal powders in the steel industry, sand production and proppant flowback in the petroleum industry, which is motivation to this work. The application of the method in its first step requires the generation of the particles' initial configuration or the filling of domains with them. Some studies have focused on the development of algorithms to generate dense packing of particles. This work presents an algorithm to generate random dense packing of particles that correspond to a given granulometric curve and are consistent with other parameters set for the granular package. In the present work special attention is given to generation of two-dimensional packings of disks to model the phenomenon of fractures filling in wells stimulated by hydraulic fracturing. The proppant flowback generated by the oil pumping is a leading cause of production decline in fractured wells, besides causing damage to the production equipment. The proposed algorithm was implemented in Java language and the optimization of packings was performed according to the porosity using genetic algorithms. Applications of the algorithm to some packings of particles and the problem of filling of fractures are presented.

Keywords

Discrete element method; Optimization; Genetic algorithm; Functionally graded material;

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	Algoritmos de geração de arranjos	17
2.1	Algoritmos dinâmicos	17
2.2	Algoritmos quasi-estáticos	18
2.3	Algoritmos geométricos	19
3	Algoritmo proposto para a geração de arranjos	23
3.1	Otimização do desempenho do algoritmo	31
3.1.1	Quadrees	33
3.1.2	Escolha da quadtree	38
3.2	Validação do algoritmo	39
3.2.1	Comparação com algoritmos utilizados no programa PFC2D	39
3.2.2	Investigação do desempenho	47
3.3	Exemplos suplementares	48
4	Otimização de parâmetros dos arranjos gerados	54
4.1	Algoritmo genético	54
4.1.1	Representação	54
4.1.2	Avaliação	55
4.1.3	Operadores genéticos	56
4.1.4	Critérios de parada	59
4.1.5	Implementação do AG no projeto	60
4.2	Otimização do arranjo de partículas	60
4.2.1	Configuração do AG	60
4.3	Otimização de propriedades das partículas	61
4.3.1	Material com gradação funcional	62
4.3.2	Configuração do AG	64
4.4	Avaliação da otimização	65
4.4.1	Avaliação da otimização para aumento da porosidade	65
4.4.2	Avaliação da otimização de propriedades das partículas	68
5	Conclusão	71
5.1	Propostas para trabalhos futuros	71
	Referências Bibliográficas	73

Lista de figuras

1.1	Interpenetração entre partículas.	13
1.2	Exemplo de análise de estabilidade de taludes.	14
1.3	Exemplo de simulação de impacto de mísseis.	15
2.1	Contato durante assentamento segundo o método <i>random ballistic deposition</i> (RBD).	18
2.2	Método <i>hopper to mix</i> .	19
2.3	Algoritmo de Jodrey e Tory aplicado a um sistema de 4 discos.	19
2.4	Algoritmo <i>open form advancing front</i> .	20
2.5	Algoritmo <i>closed form advancing front</i> .	20
2.6	Algoritmo <i>inwards spiral method</i> .	21
2.7	Geração por triangulação, como proposto por Cui e O'Sullivan.	22
3.1	Representação do contorno por círculos.	24
3.2	Primeira frente — uma das partícula mais abaixo e aquela mais à esquerda.	25
3.3	Área de busca.	26
3.4	Halos das partículas próximas à primeira frente.	26
3.5	Posições candidatas a ser centróide da partícula sendo gerada para a primeira frente.	27
3.6	Descarte das posições impraticáveis do centróide da partícula a ser gerada para a primeira frente.	27
3.7	Segunda frente — uma das partícula mais abaixo e a segunda mais à esquerda.	28
3.8	Halos das partículas próximas à segunda frente.	28
3.9	Posições candidatas a ser centróide da partícula sendo gerada para a segunda frente.	29
3.10	Descarte das posições impraticáveis do centróide da partícula a ser gerada para a segunda frente.	29
3.11	Escolha da melhor entre as posições praticáveis do centróide da partícula a ser gerada para a segunda frente.	30
3.12	Geração de nova partícula na melhor posição do centróide para a segunda frente.	30
3.13	Inserção da nova partícula no topo da lista de frentes.	31
3.14	<i>Point quadtree</i> e os dados que ela representa.	34
3.15	Processo de inclusão de um ponto na <i>MX quadtree</i> .	35
3.16	<i>MX quadtree</i> e os dados que ela representa.	36
3.17	<i>PR quadtree</i> e os dados que ela representa.	37
3.18	<i>Bucket PR quadtree</i> para uma capacidade do balde igual a 2 e os dados que ela representa.	38
3.19	Curva granulométrica utilizada.	40
3.20	Geração através do algoritmo proposto.	41
3.21	Resultado da geração por tentativas no programa PFC2D.	43
3.22	Comparação da geração por tentativas no programa PFC2D para diferentes n_{max} .	44

3.23	Resultado da geração por expansão do raio no programa PFC2D — 338 partículas.	45
3.24	Resultado da geração por repulsão explosiva no programa PFC2D.	46
3.25	Taxa de geração de partículas.	49
3.26	Geometria do modelo de fratura adotada.	50
3.27	Geração de partículas em domínio trapezoidal com granulometria constante.	51
3.28	Geração de partículas em domínio trapezoidal com granulometria uniformemente distribuída.	51
3.29	Geração de partículas em domínio trapezoidal invertido com granulometria constante.	52
3.30	Geração de partículas em domínio trapezoidal invertido com granulometria uniformemente distribuída.	52
3.31	Geração de partículas em domínio circular com granulometria constante.	53
3.32	Geração de partículas em domínio circular com granulometria uniformemente distribuída.	53
4.1	Esquema de um algoritmo genético.	55
4.2	Exemplo de distribuição dos indivíduos em uma roleta.	56
4.3	Exemplo de crossover de um ponto.	58
4.4	Exemplo de crossover de dois pontos.	58
4.5	Exemplo de mutação.	58
4.6	Modelagem de concreto armado no método dos elementos discretos (MED).	62
4.7	Exemplos de diferentes tipos de microestruturas de gradação funcional.	63
4.8	Barreira de tratamento térmico.	64
4.9	materiais com gradação funcional (MGF) para utilização em implantes.	64
4.10	Teste AP-1 — granulometria constante igual a 1,2mm.	65
4.11	Teste AP-2 — granulometria uniformemente distribuída entre 1,2mm e 1,3mm.	66
4.12	Teste AP-3 — granulometria uniformemente distribuída entre 1,2mm e 2,4mm.	66
4.13	Teste AP-4 — granulometria uniformemente distribuída entre 1,2mm e 4,8mm.	67
4.14	Teste AP-5 — granulometria estabelecida segundo a tabela 4.1.	68
4.15	Teste MGF-1 — arranjo com uma propriedade.	68
4.16	Teste MGF-2 — arranjo com duas propriedades distribuídas em camadas sobrepostas.	69
4.17	Teste MGF-3 — arranjo com três propriedades distribuídas em camadas sobrepostas.	69

Lista de tabelas

3.1	Granulometria utilizada no <i>benchmark</i> .	32
3.2	<i>Benchmark</i> da implementação inicial do algoritmo.	32
3.3	<i>Benchmark</i> da implementação do algoritmo utilizando a <i>MX quad-tree</i> .	39
3.4	Dados granulométricos utilizados.	40
3.5	Resultado da geração através do algoritmo proposto.	41
3.6	Resultado da geração através do algoritmo proposto, sem otimização.	42
3.7	Resultado da geração por tentativas no programa PFC2D — 20.000 tentativas.	43
3.8	Resultado da geração por tentativas no programa PFC2D — 200.000 tentativas.	43
3.9	Resultado da geração por tentativas no programa PFC2D — 2.000.000 tentativas.	43
3.10	Resultado da geração por expansão do raio no programa PFC2D — 438 partículas.	45
3.11	Resultado da geração por expansão do raio no programa PFC2D — 338 partículas.	45
3.12	Resultado da geração por repulsão explosiva no programa PFC2D.	46
3.13	Resultado da geração de partículas em domínios quadrados.	48
3.14	Resultado da geração de partículas em grandes dimensões.	49
3.15	Dados de fraturas dos poços da Petrobras.	49
3.16	Resultado da geração de partículas em poços da Petrobras.	50
4.1	Granulometria utilizada no teste AP-5.	67
4.2	Resultados da otimização em um domínio de dimensões 20mm × 20mm para os testes AP-1 a AP-5.	67
4.3	Resultados da otimização em um domínio de dimensões 20mm × 20mm para os testes MGF-1 a MGF-3.	70

Lista de abreviaturas

ADD análise de deformação do descontínuo

AE algoritmos evolucionários

AG algoritmos genéticos

GPU Graphics Processing Unit, ou Unidade de Processamento Gráfico

IA inteligência artificial

MEC método dos elementos de contorno

MED método dos elementos discretos

MEF método dos elementos finitos

MGF materiais com gradação funcional

JAXA Japan Aerospace Exploration Agency

JGAP Java Genetic Algorithms Package

JIT compilador *just-in-time*

RBD *random ballistic deposition*

RLP *random loose packing*