

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE ELEMENTOS DISCRETOS,  
FORMADO POR PARTÍCULAS, UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE UMA  
USINA DE ASFALTO

por

Mateus Vagner Guedes de Almeida

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE ELEMENTOS DISCRETOS,  
FORMADO POR PARTÍCULAS, UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE UMA  
USINA DE ASFALTO

por

Mateus Vagner Guedes de Almeida

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Professora Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Ignácio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, 1º de Dezembro de 2014

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô João que sempre foi fonte de inspiração e um exemplo para toda a família e minha avó Leonida que sempre se mostrou uma guerreira em todos os momentos difíceis da vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Francisco e Rosane que sempre prestaram todo o apoio e suporte necessário para que eu chegasse até aqui, aos meus irmãos Cesar e Rosiane pela companhia e cumplicidade e a todos os meus familiares que direta e indiretamente contribuíram para meu sucesso. Agradeço também aos meus amigos Otávio e Guilherme por terem sido grandes irmãos nesses anos de graduação e convivência.

Agradeço, também, a toda equipe do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS pelo suporte prestado durante toda a minha graduação. Um agradecimento especial aos professores Juan Pablo Raggio Quintas e Adriane Prisco Petry por terem sido meus orientadores em trabalhos de iniciação científica durante a graduação e ao professor Ignácio Iturrioz por ter me orientado de forma excelente neste trabalho.

E, finalmente, à empresa Ciber Equipamentos Rodoviários e toda equipe de pesquisa e desenvolvimento pela estrutura disponibilizada e apoio para esse trabalho ser realizado, em especial ao colega Fellipe que mostrou grande disposição para auxiliar na execução dos testes realizados.

ALMEIDA, M. V. G. **Metodologia de calibração de um modelo de elementos discretos, formado por partículas, utilizado na simulação de processos de uma usina de asfalto.** 2014. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## RESUMO

A demanda crescente de estradas exige a otimização do processo de produção de asfalto com qualidade superior. A compreensão do comportamento do material particulado dentro dos subsistemas de uma usina de asfalto é muitas vezes muito difícil devido às dificuldades de visualização ou medição. Nesse caso, métodos numéricos podem ser utilizados para obter uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos no comportamento do material particulado em uma usina. Em vista disso, esse trabalho tem como objetivo a apresentação de uma metodologia de calibração, utilizando elementos discretos, de um conjunto de pedras de granito que são usadas no processo de produção de mistura de asfáltica. Para isso, fez-se o uso do método de experimentos planejados para melhor compreensão do efeito das propriedades micro mecânicas do granito no comportamento macro mecânico do conjunto de partículas. Regressões lineares foram obtidas a partir dos experimentos planejados como ferramentas auxiliares para o processo de calibração. Os resultados dos experimentos planejados mostram que a densidade do material é a propriedade microscópica mais influente na densidade aparente do material, enquanto os coeficientes de atrito tem maior influência no ângulo de repouso de uma pilha de material. O modelo calibrado foi então testado na simulação da descarga de um silo onde se obteve uma boa representação dentro de um intervalo de tempo intermediário do processo de simulação. Finalmente, é possível observar que a metodologia empregada se apresenta consistente e poderia ser utilizada para calibrar os modelos a serem empregados na simulação de problemas mais complexos como o da simulação dos processos de uma usina de asfalto.

**PALAVRAS-CHAVE:** elementos discretos, calibração, granito, asfalto.

ALMEIDA, M. V. G. **Method of calibrating a model of discrete elements formed by particles used on simulation of asphalt plant processes.** 2014. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## ABSTRACT

The growing demand for roads requires the optimization of the production of asphalt mix with high quality. Understanding the bulk behavior of particles within an asphalt plant's subsystems is often very difficult due to the difficulties on visualization or measurement. In this case, numerical methods can be used to get a better understanding of the phenomena involved in the bulk behavior on an asphalt plant. Considering that, this work aims to present a methodology for the calibration using discrete elements of a set of granite rocks that are used in the process of asphalt mix production. Therefore, the design of experiment (DOE) was used to better understand the effect of granite's micro mechanical properties in macro mechanical behavior. Linear regressions were obtained from DOE as assist tool to the process of calibration. The results of the DOE show that the density of the material is the most influential microscopic property in the apparent density of the material, while the coefficients of friction have a greater influence on the angle of repose during the pile formation. The calibrated model was then tested in the simulation of a silo discharge which revealed a good representation within a time interval. Finally, it is observed that the methodology here used was consistent and could be used to calibrate models used in simulations of more complex problems as the simulation of an asphalt plant process.

**KEYWORDS:** Discrete elements, calibration, granite, asphalt.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	1
2.1. O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS .....	1
2.2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO (DOE).....	4
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	6
<b>5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	8
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	8
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	11
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	14
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	15
<b>APÊNDICE I</b> .....	16
<b>APÊNDICE II</b> .....	17
<b>APÊNDICE III</b> .....	18
<b>APÊNDICE IV</b> .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

O método dos elementos discretos (*Discrete element method* - DEM) é um método que vem ganhando destaque no cálculo de fluxos granulares e sua interação com o meio. A precisão do modelamento usando DEM depende fortemente da correta definição dos parâmetros micro mecânicos introduzidos nos modelos utilizados. A determinação desses parâmetros é o desafio principal nessa metodologia, tendo em vista a grande dificuldade de avaliar corretamente o comportamento de um fluxo granular. Os parâmetros micro mecânicos são calibrados a partir da compreensão do comportamento macro mecânicos do material. Segundo Montellano et al, 2011, o DEM pode ser usado para determinar o comportamento do material granulado em silos e tremonas. É usado, também, na indústria farmacêutica, indústria de alimentos, mineração, assim como no desenho de construções, terraplanagem e máquinas agrícolas. Com isso, é possível afirmar que esse método tem uma grande gama de aplicações. O uso dos elementos discretos no cálculo de fluxos granulares também pode ser justificado pelo fato de ele superar algumas dificuldades encontradas no método dos elementos finitos, pois a complexidade da geometria não acrescenta custo computacional à simulação. Na indústria de produção de asfalto o uso do DEM vem crescendo e sendo largamente utilizado.

Atualmente a necessidade de estradas é cada vez maior devido ao crescimento da população mundial e das cidades. Em países em desenvolvimento onde ainda há muitas estradas sem pavimentação, a demanda de asfalto é ainda maior. A correta dosagem dos diferentes tipos de agregados é muito importante para garantir a qualidade do asfalto produzido. Por isso, o método dos elementos discretos tem um papel importante nessa indústria, ele possibilita a previsão do comportamento do agregado nos subsistemas de uma usina de asfalto, como por exemplo, secadores rotatórios, misturadores de asfalto e correias transportadoras. Com esse método as mudanças nos subsistemas, necessárias para garantir um correto funcionamento, podem ser feitas ainda na fase de projeto, o que diminui custos de produção.

Esse trabalho tem como objetivo aplicar uma metodologia para calibração de um modelo de contato utilizando elementos discretos, em específico a calibração de britas de granito de 3/4" e 3/8" que são utilizadas na produção de asfalto.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. O método dos elementos discretos

Este método foi desenvolvido por Cundall e Stack, 1979, e é baseado em um esquema numérico explícito onde cada interação entre partícula é monitorada individualmente. Para cada contato o movimento é modelado usando leis de movimento. Os movimentos são resultados de perturbações causadas por objetos geométricos (paredes), pelo movimento das próprias partículas que colidem entre si e também por forças de corpo. As perturbações propagam-se pelo sistema de partículas e a taxa de propagação depende das propriedades físicas associadas às partículas e as paredes. Cada partícula pode ser tratada como um elemento rígido ou deformável que interagem entre si por meios de forças de contato normais ou cisalhantes.

O cálculo do comportamento das partículas se dá em dois estágios. O primeiro é através da escolha de um modelo de contato usado para determinar as forças de contato. A segunda etapa consiste na modelagem do movimento das partículas com a resolução da equação do movimento da segunda lei de Newton através de integração numérica. A equação do movimento liga o movimento de cada elemento com a soma das forças aplicadas ao comportamento dinâmico deste elemento, considerando que a velocidade e a aceleração são constantes em cada intervalo de tempo. Isto é feito através de método de diferenças finitas, sendo que o intervalo de tempo deve ser suficientemente pequeno para

que a perturbação induzida se propague entre um elemento e seus vizinhos. A cada intervalo de tempo calcula-se o equilíbrio de forças para cada elemento individualmente levando-se em consideração todas as forças agindo sobre esse elemento. A Figura 2.1 mostra o fluxo de funcionamento do DEM.



Figura 2.1 - Ciclo de cálculo do método dos elementos discretos.

**Lei Força – Deslocamento:** Esta lei estabelece a relação entre forças de contato que atuam em duas partículas em movimento relativo. O contato pode ser entre duas partículas ou entre partícula e uma parede, por exemplo. A Figura 2.2 mostra um desenho esquemático do contato.

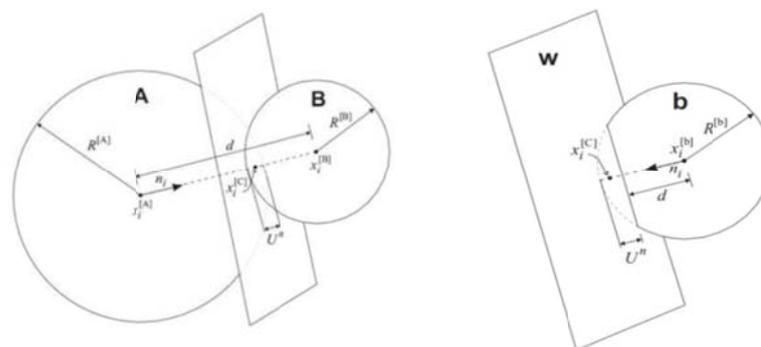


Figura 2.2 - Esquema do contato partícula-partícula e partícula-parede. Fonte: Itasca (2004)

O ponto de contato é representado por  $x_i^{[C]}$  em um plano definido pelo vetor normal  $n_i$ . Esse vetor é definido pela reta que une o centro das duas partículas em contato e é calculado pela Equação 2.1

$$n_i = \frac{x_i^{[A]} - x_i^{[B]}}{d} \quad (2.1)$$

onde  $d$  é a distância entre os centros das partículas. Os índices [A] e [B] indica a partícula e  $i$  indica a direção do vetor. O valor de  $d$  pode ser determinado pela Equação 2.2.

$$d = |x_i^{[A]} - x_i^{[B]}| \quad (2.2)$$

Se o contato for entre partícula e uma parede, o vetor normal  $n_i$  terá a direção da reta de menor distância entre o centro da partícula e a parede. A Figura 2.2 mostra um esquema do contato entre partícula e parede.

Em ambos os casos a sobreposição (ou interpenetração) é representada por  $U^n$ . A sobreposição é definida como o deslocamento relativo entre os contatos na direção normal, e é dada pela Equação 2.3.

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + R^{[B]} - d & (\text{partícula} - \text{partícula}) \\ R^{[b]} - d & (\text{partícula} - \text{parede}) \end{cases} \quad (2.3)$$

sendo  $R$  o raio da partícula, os índices [A] e [B] indicam as partículas em contato entre si e [b] a partícula em contato com a parede. Assim, a posição do contato é determinada pela Equação 2.4

$$x_i^{[c]} = \begin{cases} x_i^{[A]} + \left(R^{[A]} - \frac{1}{2}U^n\right)n_i & (\text{partícula} - \text{partícula}) \\ x_i^{[b]} + \left(R^{[b]} - \frac{1}{2}U^n\right)n_i & (\text{partícula} - \text{parede}) \end{cases} \quad (2.4)$$

O vetor força de contato  $F_i$  (que representa a ação entre as esferas entre si e as esferas e parede) gerada no contato é baseado na superposição de partículas. Esse vetor é decomposto no sentido normal e tangencial em respeito ao plano de contato como mostra a Equação 2.5.

$$F_i = F_i^n + F_i^t \quad (2.5)$$

onde,  $F_i^n$  e  $F_i^t$  são as forças normal e tangencial respectivamente. Tais forças são calculadas a partir de modelos de contato.

**Lei do Movimento:** Após o cálculo da força do contato e a sua contribuição para cada partícula, o movimento das partículas pode ser determinado, pois o movimento de uma única partícula é determinado por meio dos vetores de força e momento resultantes atuantes sobre a mesma. O movimento pode ser descrito em termos de movimento translacional e rotacional. A equação para o movimento translacional pode ser escrita de forma vetorial (Equação 2.6).

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (2.6)$$

onde  $m$  é a massa da partícula,  $\ddot{x}_i$  a aceleração translacional e  $g_i$  a aceleração da gravidade. O movimento rotacional é dado pela Equação 2.7

$$M_i = \dot{H}_i \quad (2.7)$$

onde  $M_i$  é o momento resultante atuando na partícula e  $\dot{H}_i$  é o momento angular da partícula. As equações de movimento são integradas utilizando-se um esquema de diferenças centrais envolvendo um passo de tempo  $\Delta t$ . As Equações 2.8 e 2.9 descrevem as acelerações translacional e angular no tempo,  $t$ .

$$\ddot{x}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} \left( \dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} - \dot{x}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} \right) \quad (2.8)$$

$$\dot{\omega}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} \left( \omega_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} - \omega_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} \right) \quad (2.9)$$

onde  $\omega_i$  é a velocidade angular usada no cálculo do momento angular da partícula. Inserindo essas expressões nas Equações 2.10 e 2.11 e resolvendo para as velocidades no tempo  $t + \frac{\Delta t}{2}$  chega-se a:

$$\dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{x}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left( \frac{F_i}{m} + g_i \right) \Delta t \quad (2.10)$$

$$\omega_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \omega_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left( \frac{M_i^{(t)}}{I} \right) \Delta t \quad (2.11)$$

Assim, as velocidades translacionais na Equação 2.12 podem ser usadas para atualizar a posição do centro da partícula.

$$x_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} \Delta t \quad (2.12)$$

## 2.2. Planejamento do Experimento (*Design of experiments* - DOE)

Muitos dos experimentos para a caracterização do comportamento macro mecânico do material são mensurados de forma qualitativa e aqueles quantitativos são mensurados com pouca precisão de forma aproximada. A calibração dos parâmetros micro mecânicos nesse método é feita normalmente com tentativas e erros. Uma série de simulações é executada, com diferentes valores dos parâmetros micro mecânicos, até que se consiga representar aproximadamente o comportamento do material apresentado nos experimentos realizados. Para reduzir o número de simulações executadas e o número de “chutes”, faz-se o uso do método de planejamento do experimento.

Esse método possibilita determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo. O procedimento consiste em alterações propositalmente nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta. No presente trabalho faz-se o uso do chamado Experimento Fatorial  $2^K$ , com o intuito de estudar o efeito conjunto de vários fatores sobre uma resposta. Nesse experimento atribui-se dois níveis para cada fator, por exemplo, valores máximo e mínimo das variáveis a serem calibradas. O índice K indica o número de fatores a serem analisados. Nesse caso, se três fatores são utilizados, haveria oito cenários a serem avaliados. Aumentando-se o número de fatores o número de combinações também aumenta significativamente. Para reduzir o número de combinações, experimentos fracionados podem ser usados. Nesse caso a estrutura básica fatorial é mantida. Em um experimento de três fatores, segundo Vining, 1998, pode-se assumir que o efeito dos três fatores é menos significativo que o efeito da combinação de dois fatores e a combinação de dois fatores é menos significativo que um único fator. Nesse caso, pode-se atribuir um quarto fator na combinação dos três fatores mantendo o mesmo número de experimentos. A Tabela 2.1 mostra como podem ser organizados os experimentos. Mais informações sobre os métodos particulares aqui aplicados e sobre a teoria de planejamento de experimentos pode ser encontrado em Vinning, 1998, e Del Vecchio, 1997.

Tabela 2.1 – Exemplo de organização dos experimentos com os dois níveis de fatores e resposta do sistema.

Teste	A	B	C	AB	AC	BC	D(=ABC)	Y
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y1
2	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y2
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y3
4	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y4
5	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y5
6	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y6
7	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y7
8	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y8

As letras A, B, e C são os fatores básicos e D o quarto fator atribuído à combinação dos outros três. Os valores -1 e +1 representam os níveis (nesse caso, valor menor e maior testados) de cada fator e  $y_i$  a resposta de cada experimento. O efeito do fator A, por exemplo, pode ser calculado usando a Equação 2.13.

$$\text{Efeito de A} = \frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8}{4} \quad (2.13)$$

No presente trabalho, os fatores são os parâmetros micro mecânicos que serão calibrados, como coeficientes de atrito, coeficientes de restituição, assim como a densidade das partículas. Enquanto os valores  $y$  são as respostas do sistema para diferentes valores dos parâmetros micro mecânicos.

A relação entre fatores e efeitos é calculada através de uma regressão linear dos valores obtidos do experimento planejado e pode ser calculado pela Equação 2.14.

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (2.14)$$

Onde,  $Y$  é um vetor cujos componentes correspondem às respostas [ $y_1, y_2, \dots$ ],  $X$  é a matriz com a combinação dos fatores denominada matriz do modelo,  $\epsilon$  é um vetor cujos componentes são os erros e  $\beta$  é um vetor cujos elementos são os coeficientes de regressão. Desta forma é possível chegar a uma equação que permita definir a resposta esperada frente aos fatores fornecidos. Para este trabalho a matriz  $X$  será a combinação das propriedades microscópicas a serem calibradas enquanto o vetor  $Y$  é a resposta das propriedades macroscópicas como, por exemplo, a massa contida em um volume conhecido ou o ângulo de repouso do material. A regressão linear é importante para fazer uma previsão do comportamento macro mecânico do material antes mesmo da simulação. Com isso a quantidade de simulações executadas pode ser reduzida.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos são os métodos empregados para a calibração do modelo de contato utilizado quando se utiliza o método dos elementos discretos.

Coetzee e Els, 2009a, utilizam o método dos elementos discretos para simular a descarga de um silo e o enchimento de uma concha utilizando milho como material granular. Durante a calibração foram utilizadas técnicas ensaios na chamada caixa de corte ("*scale shear box*"), na qual um conjunto de partículas se fecha em duas caixas metálicas aplicando entre elas esforços de corte simples. Este teste pode ser utilizado para a caracterização do módulo de Young aparente (comportamento macro mecânico) do material e ângulo interno de atrito. Outro teste realizado foi o de compressão confinada utilizado na caracterização da rigidez macro do material. Os resultados da caixa de corte mostraram que os parâmetros micro mecânicos coeficiente de atrito partícula e rigidez da partícula exercem muita influência no parâmetro macro mecânico ângulo interno de atrito enquanto os resultados do teste de compressão confinado mostram que a rigidez macro tem muita dependência do parâmetro micro mecânico rigidez da partícula. Em um trabalho posterior Coetzee e Els, 2009b, utilizaram as mesmas técnicas de calibração para a modelagem de uma lâmina em movimento através de um material granular.

Johnstone, 2010, em seu trabalho foca no desenvolvimento de dois equipamentos para o auxílio da calibração de modelos de contato. O primeiro deles, um tambor rotativo que consiste em um tambor cilíndrico preenchido parcialmente girando em diferentes regimes de rotação. São medidos então diferentes ângulos dinâmicos de reposta. Esse ângulo é o ângulo que o material forma dentro do tambor enquanto o mesmo gira. É visto que o formato das partículas tem grande influência nesse tipo de experimento. Durante a simulação numérica concluiu-se que, nesse teste, o coeficiente de atrito entre partícula e parede frontal e traseira não exerce grande influência no ângulo dinâmico de resposta,

enquanto que o atrito com as paredes laterais tem relação direta com o ângulo dinâmico de resposta. Além disso, observou-se também que o coeficiente de atrito de rolagem pode ser negligenciado nesse caso devido a não exercer grande influência no ângulo dinâmico de resposta do material. O segundo tipo de teste avaliado foi o teste de compressão confinada semelhante ao de Coetzee e Els, 2009a. Esse teste mostrou que aumentando-se o coeficiente de atrito de rolagem entre partícula e parede há um decréscimo na rigidez macro do material. Além disso, concluiu-se que a rigidez macro do material é influenciada também pela porosidade inicial no teste de compressão confinada.

Grima e Wypych, 2011a, apresentam duas técnicas para a calibração do modelo de contato através da formação de uma pilha de pedras para medição quantitativa do ângulo de repouso. O primeiro método é chamado teste do cilindro com abertura diametral ("*swing-arm slump test*"), que consiste no preenchimento de um tubo pelas pedras que quando deslocado para cima abre no sentido circunferencial permitindo a formação de uma pilha de partículas. As laterais do tubo são então removidas com uma velocidade angular suficiente para evitar que, no movimento, as laterais do tubo não exerçam influência enquanto o material escoar. A segunda técnica é chamada de teste do cilindro deslizante ("*translating tube slump test*"), que nada mais é que o preenchimento com as partículas a serem calibradas num tubo que é então removido verticalmente deixando o material escoar pelo cilindro. Os resultados mostram que a velocidade translacional do segundo teste influencia na formação da pilha de material, gerando menores ângulos de repouso para maiores velocidades. Na aplicação deste ensaio concluiu-se também que, durante a simulação, o coeficiente de atrito estático e a rolagem e a representação do formato da partícula têm muita influência no fluxo granular durante a formação da pilha.

Grima e Wypych, 2011b, realizaram a simulação em escala aumentada da interação entre partícula e estrutura em condição de impacto. As técnicas de calibração foram as mesmas utilizadas no trabalho de Grima e Wypych, 2011a. Os resultados da simulação e modelos analíticos foram comparados com valores retirados de experimentos feitos com uma correia transportadora com diferentes velocidades de funcionamento. Ambos os modelos numéricos e analíticos mostraram boa aproximação dos resultados comparados com o experimento.

Horn, 2012, apresenta em seu trabalho o desenvolvimento do teste da caixa de corte e compressão confinada. Nesse trabalho também foram mensurados o ângulo de repouso do material utilizando um procedimento similar ao do teste do cilindro deslizante feito por Grima e Wypych, 2011a. Além disso, E. Horn, 2012, utilizou também o método de planejamento do experimento para determinar o quão sensível o processo de calibração é para os valores dos parâmetros de entrada no DEM.

Coetzee e Nel, 2014, usou o DEM para modelamento de camas de rochas para produção de energia ("*Packed rock bed thermal storage in power plants*"). A metodologia de calibração nesse trabalho foram as mesmas utilizadas em Coetzee e Els, 2009a, e Horn, 2012. Foram realizados testes com diferentes tipos de representação da partícula, utilizando diferentes quantidades de esferas para gerar o volume da partícula. Concluiu-se que aumentando o número de esferas na representação da partícula diminui-se o erro entre o volume real da partícula e volume representado por esferas, porém o aumento excessivo no número de esferas representa um aumento no custo computacional. Optou-se, portanto, o uso da menor quantidade de esferas com um erro aceitável na diferença de volumes. O modelo calibrado foi então validado fazendo a simulação da descarga de um silo para diferentes áreas de abertura.

O APÊNDICE I mostra melhor detalhes sobre os testes mencionados anteriormente para a caracterização do comportamento macro de partículas.

#### **4. METODOLOGIA**

A correta representação de um conjunto de partículas depende fortemente da caracterização prévia do material a ser simulado. Por isso, o primeiro passo para a

simulação de materiais particulados é a correta calibração das propriedades do material. Para a calibração, as propriedades em macro escala do material são. Essas propriedades tem relação direta com as propriedades em micro escala do material, que são os fatores de entrada na simulação.

**Modelos de contato:** Atualmente existem diversos modelos de contatos para diferentes tipos de partículas e situações simuladas. Os modelos mais comuns utilizados são o modelo de mola linear (“*Linear spring*”), proposto por Cundall e Stack, 1979, e o modelo Hertz Mindlin (“*no slip*”) que é baseado no trabalho de Mindlin, 1949. Ambos os modelos tratam a partícula como um corpo deformável. A Figura 4.1 mostra um modelo esquemático dos modelos de contato previamente mencionados.

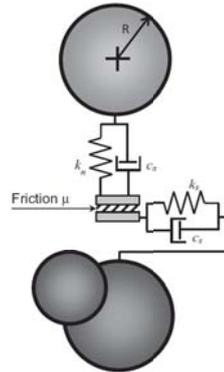


Figura 4.1 - Desenho esquemático dos modelos de contatos mencionados.

**Mola Linear:** Esse modelo é baseado no trabalho der Cundall e Stack, 1979. Usando a hipótese de partícula como um corpo deformável, cada contato é modelado com uma mola linear em paralelo com um amortecedor na direção normal de contato e uma mola linear em paralelo com um amortecedor na direção tangencial de contato (Figura 4.1).

Esse modelo também leva em consideração o deslizamento das partículas entre si com um coeficiente de atrito estático  $\mu_s$ .

A força normal que atua entre as partículas é dada pela Equação 4.1.

$$F^n = k_n U^n + c_n \dot{U}^n \quad (4.1)$$

onde,  $k_n$  é a rigidez da mola na direção normal de contato,  $c_n$  é o coeficiente de amortecimento,  $U^n$  é a sobreposição das partículas e  $\dot{U}^n$  é a velocidade da sobreposição.

A rigidez da mola pode ser estimada pela Equação 4.2.

$$k_n = \frac{16}{15} R^{*\frac{1}{2}} E^* \left( \frac{15 m^* V^2}{16 R^{*\frac{1}{2}} E^*} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (4.2)$$

onde,  $V$  é a velocidade de contato e  $m^*$ ,  $R^*$  e  $1/E^*$  são, respectivamente, a massa efetiva, o raio efetivo e modulo de Young efetivo dados pelas Equações 4.3, 4.4 e 4.5 respectivamente.

$$m^* = \left( \frac{1}{m^{[A]}} + \frac{1}{m^{[B]}} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

$$R^* = \left( \frac{1}{R^{[A]}} + \frac{1}{R^{[B]}} \right)^{-1} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu^{[A]})^2}{E^{[A]}} + \frac{(1 - \nu^{[B]})^2}{E^{[B]}} \quad (4.5)$$

onde,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. O coeficiente de amortecimento é relacionado ao coeficiente de restituição da partícula e é dado pela Equação 4.6.

$$c_n = \frac{4m^*k_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \quad (4.6)$$

onde,  $e$  é o coeficiente de restituição e é obtido experimentalmente ou por calibração.

O coeficiente de rigidez na direção tangencial é comumente estimado como uma relação do coeficiente de rigidez na direção normal. Nesse caso a força tangencial entre as partículas é dada pela Equação 4.7.

$$F^t = \min(k_t U^n + c_t \dot{U}^n, \mu_s F^n) \quad (4.7)$$

onde,  $k_t$  e  $c_t$  são coeficientes de rigidez e amortecimento na direção tangencial respectivamente e  $\mu_s$  é o coeficiente de atrito estático. É comum, no entanto, assumir como iguais os coeficientes de rigidez normal e tangencial, assim como os de amortecimento normal e tangencial.

Para modelar de forma adequada o movimento rotacional de uma partícula e representar as características não esféricas de materiais reais, um modelo de resistência de rolagem é adicionado. De acordo com Zhou et al, 1999, e Grima e Wypych, 2011b, pode-se então considerar um torque de rolagem oposto a rotação entre partículas, dado pela Equação 4.8.

$$\tau^{[C]} = -\mu_r F^n d^{[C]} \omega^{[C]} \quad (4.8)$$

onde,  $\mu_r$  o coeficiente de atrito de rolagem,  $d^{[C]}$  a distância do ponto de contato com o centro de massa da partícula e  $\omega^{[C]}$  o vetor unitário da velocidade angular da partícula no ponto de contato.

O intervalo de tempo entre cada cálculo é normalmente a porcentagem do tempo de duração de contato entre duas partículas. O intervalo de tempo é dado pela Equação 4.9.

$$t_c = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{k}{m^*} \left( \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \right)}} \quad (4.9)$$

Onde,  $\beta = \pi/(\ln e)$ .

## 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No método dos elementos discretos as propriedades micro do material são valores de entrada. Porém, muitas vezes, propriedades como coeficiente de restituição, coeficiente de atrito, módulo de Young e módulo de elasticidade, são difíceis de medir. Por isso, deve-se obter o máximo de informação possível sobre o material simulado. No presente trabalho dois tamanhos de pedras serão caracterizados e calibrados (de 3/8" e 3/4"). Esses dois tamanhos de pedras são as mais utilizadas na produção de asfalto e tem maior contribuição nos esforços dentro de cada subsistema de uma usina de asfalto.

### 5.1. Caracterização do material

Algumas propriedades micro e macro das partículas são de fácil obtenção e servem de base para a correta calibração do modelo. A seguir algumas propriedades medidas são apresentadas. Todos os experimentos foram realizados pelo autor na empresa Ciber Equipamentos Rodoviários.

**Propriedades mecânicas do Granito:** As pedras a serem calibradas são de granito. Os experimentos para a obtenção do módulo de Young, coeficiente de Poisson e módulo de

cisalhamento, são de difícil execução. Nesse caso, esses valores são obtidos de trabalhos já realizados anteriormente.

Em uma publicação retirada de Mirarco Mining Innovation mostra que o módulo de Young do granito é de aproximadamente 54 GPa enquanto no Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (Documento referência R-06-15) o valor indicado para o módulo é de 70 GPa. No presente trabalho assumiu-se esse valor como 60 GPa como um valor intermediário dos valores encontrados nos diversos trabalhos. O coeficiente de Poisson, segundo os experimentos de Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, tem um valor frequente de 0,19. Segundo Gere, 2003, o coeficiente de Poisson está em uma faixa de 0,2 a 0,3. Para o presente trabalho assumiu-se um valor de 0,2. O módulo de cisalhamento foi então calculado a partir dos valores do módulo de Young (60 GPa) e coeficiente de Poisson (0,2) estipulado. Nesse caso o valor é de 25 GPa.

**Densidade da partícula e densidade aparente do material:** A densidade da partícula pode ser calculada através da Equação 5.1 com os valores obtidos de um experimento com proveta.

$$\rho = \frac{m}{Vol} \quad (5.1)$$

onde,  $m$  é a massa, em kg, da amostra medida previamente em kg e  $Vol$  é o volume de água deslocada, em  $m^3$ , pela mesma amostra quando mergulhada em uma proveta com água. A Figura 5.1 mostram os experimentos para a medição da densidade das pedras e densidade aparente respectivamente. A Tabela 5.1 mostra os valores experimentais obtidos para as densidades.



Figura 5.1 – Procedimento para cálculo da densidade do material. (a) pesagem da amostra; (b) volume inicial adicionado à proveta; (c) imersão da amostra no volume. Pesagem de diferentes amostras de agregados. (d) amostra 1 do agregado maior; (e) amostra 2 do agregado maior; (f) amostra 1 do agregado menor; (g) amostra 2 do agregado menor.

Tabela 5.1 – Densidade da partícula e aparente calculada experimentalmente.

Densidade da partícula					
Peso da amostra	Volume inicial	Volume final	Diferença	Diferença [SI]	Densidade
0,280 kg	310 ml	415 ml	105 ml	0,000105 m <sup>3</sup>	<b>2667 kg/m<sup>3</sup></b>
Densidade aparente					
Agregado	Massa Medida		Volume		Densidade
3/4"	10,655 kg		0,008 m <sup>3</sup>		<b>1290 kg/m<sup>3</sup></b>
3/8"	5,125 kg		0,005 m <sup>3</sup>		<b>1393 kg/m<sup>3</sup></b>

A densidade aparente de um volume de partículas é diferente da de uma partícula única devido ao formato das pedras, que geram volumes vazios. Para medir a densidade aparente preenche-se um volume conhecido do material em estudo e mede-se sua massa. A densidade é calculada utilizando a Equação 5.1, utilizando o volume conhecido que foi preenchido e a massa medida do material contida nesse volume.

**Formato das partículas:** Para o agregado de menor dimensão retirou-se uma amostra aleatória de 20 pedras para a caracterização, foram medidas as duas principais dimensões de cada pedra e fez-se uma média para representação da pedra através de uma única esfera. A dimensão média aproximada calculada foi de 19 mm que será então utilizada no diâmetro das esferas.

Para o agregado de maior granulometria optou-se por representá-lo através de quatro tipos diferentes de partículas devido sua forma variada. A Figura 5.2(a) apresenta as amostras de pedras utilizadas para representação das pedras tanto as grandes como as pequenas.

No caso das pedras maiores (Figura 5.2 (b)), a grande parte das pedras é de formato achatado. Nesse caso optou-se por medir a sua espessura e através dela utilizar uma combinação de esferas com o mesmo diâmetro para a representação das partículas, como pode ser visto na Figura 5.2(b). Essa metodologia é similar à utilizada por Horn, 2012.

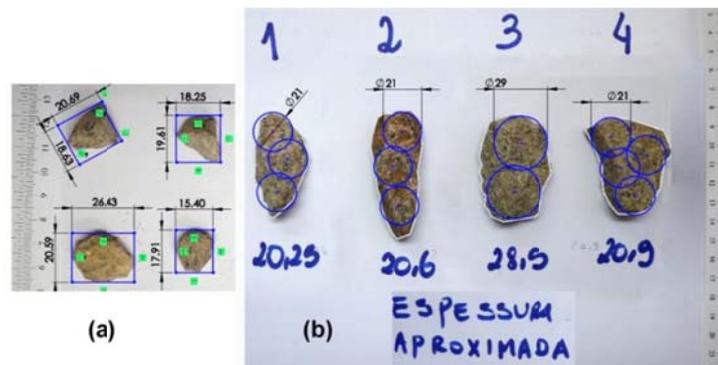


Figura 5.2 – Amostra do formato das partículas. (a) Parte da amostra utilizada para caracterização do agregado de menor granulometria. (b) Quatro pedras utilizadas para representar todo o conjunto de agregado de maior granulometria.

**Coefficiente de atrito estático entre partícula e parede:** O coeficiente de atrito estático entre partícula e parede é calculado através da inclinação de um plano até que a partícula comece a escorregar. A Figura 5.3(a) mostra uma fotografia durante a realização do ensaio.

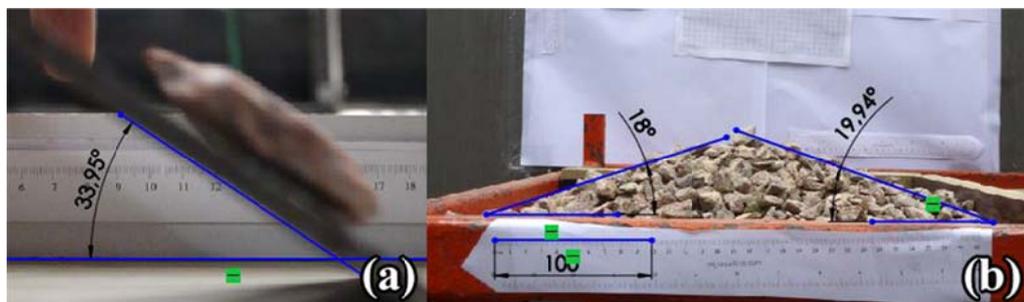


Figura 5.2 - (a) Experimento para o cálculo do coeficiente de atrito. (b) Ângulo de repouso do material de menor granulometria.

Essa metodologia é apresentada por Coetzee e Els, 2009a, Grima e Wypych, 2011a, e Horn, 2012. Foram feitos 20 testes para o ângulo de inclinação. A média dos ângulos obtidos foi de aproximadamente 33°.

O coeficiente de atrito estático entre partícula e parede é então calculado pela Equação 5.2 a seguir.

$$\mu_{s\ p-w} = \tan(\theta) \quad (5.2)$$

onde,  $\theta$  é o ângulo do plano. Obteve-se então um coeficiente de atrito estático de 0,66. O índice  $s$  representa “static” enquanto os índices  $p$  e  $w$  representam “particle” e “wall” respectivamente.

**Coeficiente de restituição:** Para o coeficiente de restituição entre partículas de granito utilizou-se uma média dos valores encontrados nos trabalhos de Imre et al.,2008, que foi de 0.8447 e de Durda et al.,2010, que foi de 0.83. Nesse caso utilizou-se um valor de 0.837. O coeficiente de restituição entre partícula de granito e aço utilizado foi o mesmo encontrado por Imre et al., 2008 que foi de 0.809.

**Ângulo de repouso do material:** Esse parâmetro é uma propriedade macro do material utilizado na calibração. O ângulo de repouso muda devido ao formato das partículas e também com o modo em que ele é executado. Esse teste foi executado de conforme o teste do cilindro deslizante apresentado por Grima e Wypych, 2011a. Foram executados três testes para cada granulometria de agregado. A Figura 5.2(b) mostra um dos testes executados. A Tabela 5.2 mostra os valores dos ângulos de repouso obtidos para ambos agregados.

Tabela 5.2 - Tabela de valores médios dos ângulos de repouso.

Granulometria	Ângulo médio
3/8"	19 °
3/4"	23°

**Propriedades micro a serem calibradas:** Os coeficientes microscópicos que não foram possíveis de se obter, experimentalmente ou através da bibliografia, foram os coeficiente de atrito de rolagem entre partícula e parede ( $\mu_{r\ p-w}$ ), coeficientes de atrito de rolagem entre partículas ( $\mu_{r\ p-p}$ ) e coeficiente de atrito estático entre partículas( $\mu_{s\ p-p}$ ). Além disso, deve-se também calibrar a densidade da partícula ( $\rho_p$ ) utilizada na simulação, pois essas não apresentam o mesmo formato das pedras o que gera diferença de volume e, conseqüentemente, de massa.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente fez-se a análise dos efeitos de cada fator desconhecido nas respostas do sistema. Neste caso, será avaliada a resposta em termos da massa contida no volume conhecido usado para calcular a densidade aparente e o ângulo de repouso obtido no ensaio realizado no teste do cilindro deslizante. As tabelas com os fatores testados e suas combinações, assim como a resposta do sistema para cada caso analisado são apresentadas no APÊNDICE II.

**Massa dentro do volume conhecido:** A densidade da partícula modelada não deve ser a mesma que a medida na partícula real devido a sua diferença de formato. O valor do efeito na massa de cada parâmetro a ser calibrado para os agregados de menor e maior granulometria é mostrado na Figura 6.1(a)

Pode-se observar que a densidade da partícula (fator D) é o que tem maior efeito sobre a densidade aparente do material. Esse fato é visto também nos cálculos de Horn, 2012. Por isso, deve-se ter mais atenção à mudança da densidade das partículas para esse caso. Os efeitos para o caso de maior granulometria foram mais acentuados. Isso pode ser explicado devido a maior ordem de grandeza das partículas. Outro fato é a necessidade de uma maior compensação na densidade das partículas no caso de granulometria maior, pois

as esferas adotadas não preenchem completamente o volume das pedras reais, necessitando assim um aumento na densidade da partícula para atingir-se o mesmo peso.

O resultado da regressão linear para as partículas, de 3/8" e 3/4" respectivamente, é dado pelas Equações 6.1 e 6.2.

$$m_{3/8"} = 0,4111\mu_{r p-w} + 0,06561\mu_{s p-p} + 0,5605\mu_{r p-p} - 0,3939\mu_{r p-w}\mu_{s p-p} - 0,5163\mu_{r p-w}\mu_{r p-p} - 1,1\mu_{s p-p}\mu_{r p-p} + 0,00171\rho_p + 0,0805 \quad (6.1)$$

$$m_{3/4"} = 1,4910\mu_{r p-w} - 0,1012\mu_{s p-p} - 1,3474\mu_{r p-p} - 2,6458\mu_{r p-w}\mu_{s p-p} - 0,8486\mu_{r p-w}\mu_{r p-p} + 0,4542\mu_{s p-p}\mu_{r p-p} + 0,0030\rho_p + 0,8200 \quad (6.2)$$

**Ângulo de repouso:** O mesmo procedimento foi realizado para avaliar o efeito dos fatores no ângulo de repouso do material. A Figura 6.1(b) mostra os efeitos encontrados.

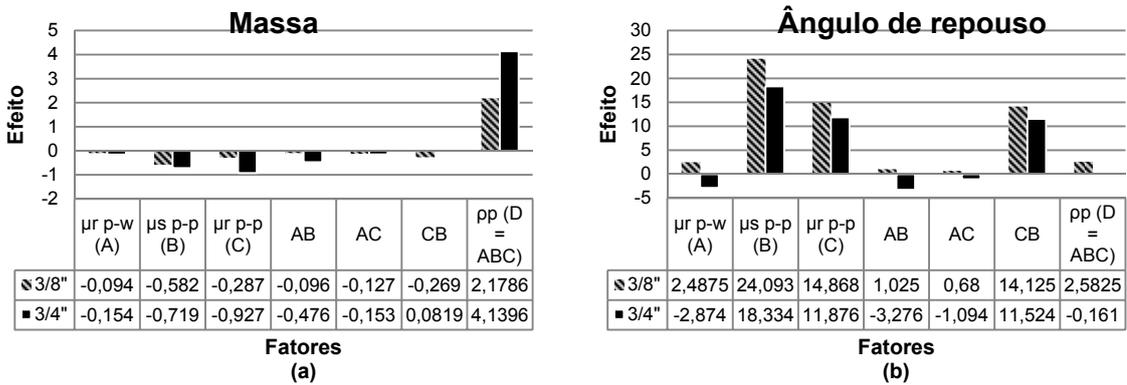


Figura 6.1 – (a) Efeito dos fatores na massa. (b) Efeito dos fatores no ângulo de repouso do material.

É possível observar que os coeficientes de atrito estático (fatores B e C) são mais influentes para o agregado de menor granulometria em relação ao de maior granulometria. Isso pode ser explicado devido ao formato de partículas adotado para o agregado de maior granulometria. As partículas maiores tem um formato mais achatado, diferente da esfera única adotada no primeiro caso. Nesse caso, ao adicionar uma geometria não regular à partícula, a necessidade de uma compensação com coeficientes devido ao formato simplificado é menor.

O resultado da regressão linear para as partículas de menor e maior granulometria são dados pelas Equações 6.3 e 6.4 respectivamente.

$$\alpha_{3/8"} = -0,6342\mu_{r p-w} - 2,6964\mu_{s p-p} - 15,0301\mu_{r p-p} + 4,1939\mu_{r p-w}\mu_{s p-p} + 2,7857\mu_{r p-w}\mu_{r p-p} + 57,6633\mu_{s p-p}\mu_{r p-p} + 0,0020\rho_p + 11,2965 \quad (6.3)$$

$$\alpha_{3/4"} = 7,3514\mu_{r p-w} + 7,6513\mu_{s p-p} - 9,1764\mu_{r p-p} - 18,2083\mu_{r p-w}\mu_{s p-p} - 6,0694\mu_{r p-w}\mu_{r p-p} + 64,0139\mu_{s p-p}\mu_{r p-p} + 0,0011\rho_p + 18,9429 \quad (6.4)$$

**Modelo calibrado:** A partir da regressão linear podem-se testar combinações de fatores que geram as respostas desejadas, nesse caso, aquelas mensuradas na caracterização do material. Essas combinações podem ser então simuladas com DEM para verificação das respostas. Uma avaliação mais detalhada da precisão das regressões lineares obtidas é apresentada no APÊDICE III.

A regressão linear é uma aproximação que possibilita estimar os fatores de uma forma mais controlada reduzindo o retrabalho da tentativa e erro, o que poderia gerar grande custo computacional. Após uma série de simulações chegou-se às propriedades micro que melhor representaram o comportamento macro do material nas simulações. A Tabela 6.1 mostra em resumo os valores obtidos para os coeficientes micro, bem como os valores das

respostas do sistema com esses coeficientes, como a massa contida em um volume e ângulo de repouso.

Tabela 6.1 - Resumo dos coeficientes microscópicos calibrados e a resposta macro do sistema para esses coeficientes.

Granulometrias	$\mu_{r\ p-w}$	$\mu_{s\ p-p}$	$\mu_{r\ p-p}$	$\rho_p$	Massa no volume (Tab 5.1)	Massa DEM	Erro do Modelo	Ângulo de Repouso Medido (Tab. 5.2)	Ângulo de Repouso DEM	Erro do modelo
3/8"	0.40	0.30	0.38	2900 kg/m <sup>3</sup>	5.125 kg	5.374 kg	5%	19°	19°	1%
3/4"	0.40	0.22	0.20	3050 kg/m <sup>3</sup>	10.655 kg	10.501 kg	1%	23°	22°	4%

**Validação do modelo calibrado:** Para validação do modelo usou-se a descarga de um silo em escala. Devido a falta de aparelhos adequados fez-se apenas a validação do modelo para o agregado 3/8". A parte cônica do silo é preenchida de agregado com aproximadamente 10 kg de agregado e então abre-se a abertura inferior para que o material escoe. Como parâmetro de comparação mediu-se a quantidade de massa que sai do silo em função do tempo. A Figura 6.2(a) mostra os resultados obtidos. A Figura 6.2(b) mostra o experimento sendo executado e a Figura 6.2(c) a execução da simulação. Detalhes do experimento podem ser vistos no APÊNDICE IV.

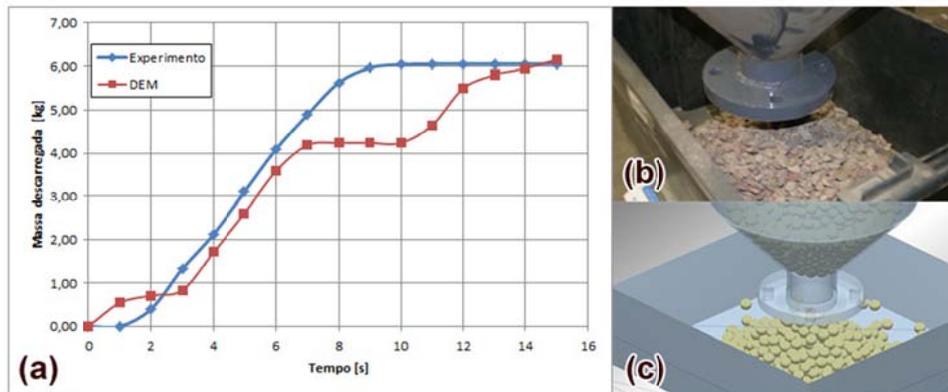


Figura 6.2 - (a) Comparação de resultados. (b) Execução do experimento. (c) Execução da simulação.

É possível observar um comportamento diferente do material a partir dos 7 segundos aproximadamente. Esse fato pode ser devido ao coeficiente de atrito de rolamento entre partícula e parede ( $\mu_{r\ p-w}$ ) que possivelmente não foi corretamente calibrado. Pois, em ambos os testes de densidade aparente e ângulo de repouso sua influência não era relevante. Uma solução para isso seria a execução de uma série de simulações da descarga do silo alterando apenas o coeficiente de rolamento até se chegar a uma resposta mais adequada.

**Aplicações do modelo calibrado:** Após a validação correta do modelo, a simulação de subsistemas pode ser executada com a segurança de uma boa representação. A Figura 6.3 mostra uma usina de asfalto.



Figura 6.3 - Usina de asfalto iNova1200. Imagem cedida por Ciber Equipamentos Rodoviários.

A Figura 6.4 mostra alguns exemplos da aplicação do DEM na simulação de subsistemas de uma usina.

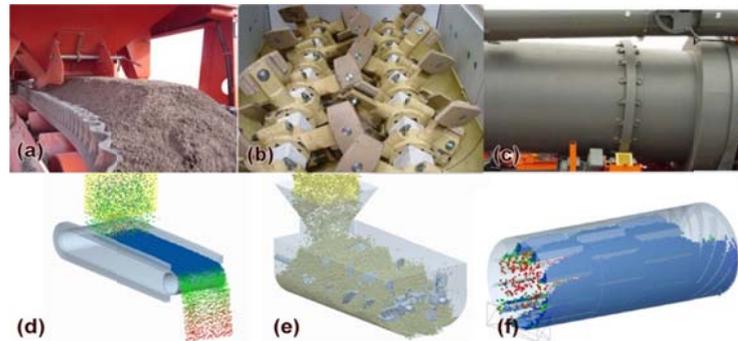


Figura 6.4 – (a) Correia dosadora em uma máquina real. (b) Vista interna de um misturador. (c) Secador de agregados. (d) Simulação representativa de uma correia dosadora. (e) Simulação do material dentro do misturador. (f) Simulação do cascadeamento de material dentro do secador.

## 7. CONCLUSÃO

No presente trabalho aplicou-se uma metodologia baseada em planejamento de experimentos para calibrar os parâmetros micro mecânicos de um modelo de pedras de granito em um programa baseado no método dos elementos discretos. Ensaios foram realizados tanto para medir a densidade do granito e densidade aparente do agregado, para definir as formas e tamanhos das partículas e para definir o ângulo de repouso que o conjunto de pedras forma quando elas são despejadas utilizando um dos testes padrões recomendados pela bibliografia. Após o ajuste dos parâmetros micro mecânicos foi realizada a verificação do modelo simulando outro tipo de ensaio.

Durante o transcurso do trabalho foi possível obter as seguintes conclusões:

- Os parâmetros micro mecânicos definidos foram o coeficiente de atrito de rolagem entre partículas ( $\mu_{r\ p-p}$ ), coeficiente de atrito de rolagem entre partícula e parede ( $\mu_{r\ p-w}$ ) e coeficiente de atrito estático entre partículas ( $\mu_{s\ p-p}$ ). Além disso, deve-se também calibrar a densidade da partícula ( $\rho_p$ ), e os macro parâmetros foram densidade aparente e ângulo de repouso obtido realizando o teste do cilindro deslizante.

- Os cálculos dos efeitos mostraram que, para o caso da massa contida em um volume, o fator que exerce maior influência é a densidade da partícula. Fato esse, observado para ambas granulometrias testadas.

- Na análise do efeito dos fatores no ângulo de repouso, os que se mostraram mais influentes foram os coeficientes de atrito estático e de rolagem entre partículas.

- Observou-se também, que no caso de partículas de 3/4" a influência desses dois coeficientes é atenuada devido ao formato das partículas adotados. O formato mais achatado adiciona uma geometria não regular à partícula, com isso, a necessidade de uma compensação com coeficientes devido ao formato simplificado é menor.

- O fator menos influente para os dois experimentos foi o coeficiente de atrito de rolagem entre partículas e parede. Esse fator deve ser melhor avaliado em um outro possível teste que possibilite uma maior liberdade de rolagem das partículas.

- Durante a avaliação da precisão das regressões lineares pode-se observar que as mesmas em alguns casos apresentam erros grosseiros quando testadas com valores intermediários diferentes daqueles usados na construção da regressão.

- A regressão para a massa contida em um volume definido mostrou boa precisão para o caso de partículas com dimensões de 3/8".

- O caso com granulometria de 3/4" a regressão para massa não se mostrou tão precisa. Isso pode ocorrer devido a menor linearidade imposta pelos coeficientes de atrito, que, no caso de ter partículas de dimensões maiores, exercem maior influência na massa em relação ao caso de granulometria menor. Para o ângulo de repouso, em ambos os casos

testados, a regressão linear se mostrou precisa somente quando os fatores testados eram próximos àqueles usados na construção das equações de regressão.

- Com a validação foi possível observar que o modelo não representou completamente o comportamento do material. Nesse caso, faz-se necessário mais alguns testes controlados para ser possível uma melhor calibração dos micro parâmetros.

- Finalmente, é possível observar que a metodologia empregada se apresenta como consistente e poderia ser utilizada para calibrar os modelos a serem empregados na simulação de subsistemas de uma usina de asfalto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coetzee, C.J. Els, D.N.J. **“Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling”**, Computers and Electronics in Agriculture Vol. 65, pages 198–212, 2009a.

Coetzee, C.J. Els, D.N.J. **“Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade–granular material interaction”**, Journal of Terramechanics Vol. 46, pages 15–26, 2009b.

Coetzee, C.J. Nel, R.G. **“Calibration of discrete element properties and the modelling of packed rock beds”**, Powder Technology Vol. 264, pages 332–342, 2014.

Cundall, P.A. Strack, O.D.L. **“A discrete numerical model for granular assemblies”**, Géotechnique, Vol. 29, Issue 1, pages 47 –65, 1979.

Del Vecchio, R.J. 1997. **“Understanding Design of Experiments”**, Munich: Hanser Gardner Publications

Durda, D. Movshovitz, D. N. Richardson, D. C. Asphaug, E. Morgan, A. Rawlings, A. R. Vest, C. **“Experimental determination of the coefficient of restitution for meter-scale granite spheres”**, Icarus, Vol. 211, pages 849–855, 2011.

Gere, M. J. **“Mechanics of Materials”**, Thomson-Engineering, 6th edition, 2003.

Grima, A.P. Wypych, P.W. **“Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle–structure interactions under impact conditions”**, Powder Technology, Vol. 212, pages 198–209, 2011a.

Grima, A. P. Wypych, P. W. **“Discrete element simulations of granular pile formation”**, Engineering Computations, Vol. 28, Issue 3, pages 314–339, 2011b.

Horn, E. **“The calibration of material properties for use in discrete element models”**, Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree Master of Science in Engineering (Mechanical) at the University of Stellenbosch, March 2012.

Imre, B. Råbsamen, S. Springman, S.M. **“A coefficient of restitution of rock materials”**, Computers & Geosciences, Vol. 34, pages 339–350, 2008.

ITASCA. PFC2D. **“Particle Flow Code in 2 Dimensions (Online Manual Table of Contents, Version 3.1)”**, Itasca Consulting Group, 2014.

Johnstone, M. W. **“Calibration of DEM models for granular materials using bulk physical tests”**, Ph.d. thesis, The University of Edinburgh, June 2010.

Mindlin, R.D. **“Compliance of elastic bodies in contact”**, Journal of Applied Mechanics, Vol. 71, pages 259-268, 1949.

Mirarco Mining Innovation. **“Strength and elastic properties of the soultz granite”**, <http://www.mirarco.org/>, acessado em 15/08/2014.

Montellano, C. Ramirez, À. Gallego, E. Ayuga, F. **“Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos”**, Chemical Engineering Science Vol. 66, Issue 21, pages 5116–5126, 2011.

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. **“Rock mechanics modelling of rock mass properties”**, <http://www.skb.se/>, acessado em 15/08/2014.

Vining, G.G. **“Statistical Methods for Engineers”**, United States of America, Duxbury Press, 1998. (ISBN 0534237061).

Zhou, Y.C. Wright, B.D. Yang, R.Y. Xu, B.H. Yu, A.B. **“Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation”**, Physica, Vol 269, pages 536–553, 1999.

## APÊNDICE I

Alguns testes usados para calibração das propriedades micro são apresentados a seguir.

### Caixa de corte (“scale shear box”)

Um ensaio de cisalhamento é geralmente constituído por uma amostra de material particulado que está contido dentro de uma. A caixa de corte é construída tipicamente em duas metades, uma parte superior e uma metade inferior. Esta caixa de cisalhamento pode ser cilíndrica, quadrado ou retangular. A Figura I 1 mostra um esquemático da construção desse teste.

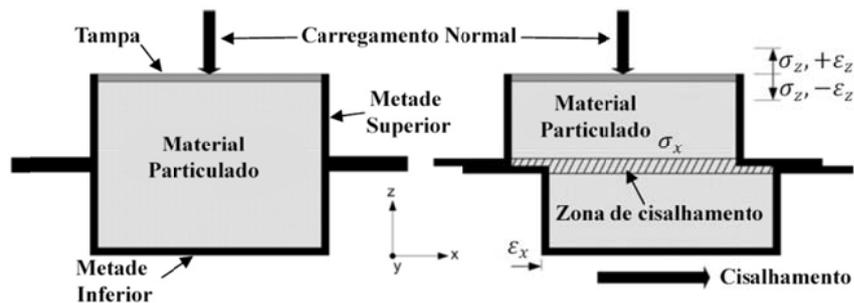


Figura I 1 - Esquema de montagem do teste de caixa de corte. Imagem de Horn, 2012.

A amostra é cisalhada lateralmente movendo um plano em relação ao outro enquanto uma carga normal é aplicada simultaneamente. A tensão normal e de cisalhamento média agindo no plano horizontal são calculadas a partir das cargas normais e de cisalhamento medidos e posteriormente utilizadas para determinar as propriedades macro, como o ângulo de atrito interno.

### Compressão confinada

Um teste de compressão confinada típico consiste de uma amostra de material granulado que está contido em um recipiente cilíndrico. Uma tampa é então colocada no topo da amostra no recipiente para aplicar uma carga normal sobre ela, na direção vertical. O esquema do teste é mostrado na Figura I 2

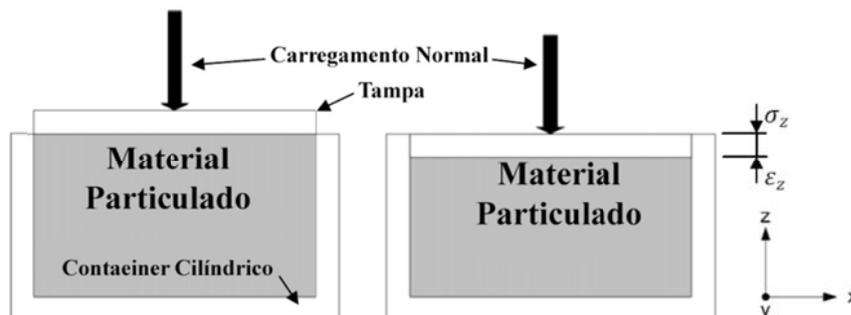


Figura I 2 – Esquema de montagem do teste de compressão confinada. Imagem de Horn, 2012.

A rigidez macro (ou elasticidade aparente) é a característica de um conjunto de partículas pode ser obtido na forma dos Modulos de Young confinado que é derivado a partir dos resultados do teste de compressão confinado.

### Cilindro com abertura diametral (“swing-arm slump test”) e Cilindro deslizante (“Translating tube slump test”)

O teste do cilindro com abertura diametral consiste em um tubo de dividido longitudinalmente, que está ligado a um mecanismo de braço, enquanto fechado o cilindro segura o material até que o mecanismo de braço abre-se para permitir que o material flua. O

teste é composto por vários tubos divididos de tamanhos diferentes para acomodar uma variedade de tamanhos de partículas e quantidade de material.

O teste do cilindro deslizante constitui de um tubo que confina o material particulado. O tubo é transladado verticalmente a uma taxa constante de velocidade que pode ser variada para examinar os efeitos de taxas de fluxo de partículas sobre o comportamento de formação de pilha. À medida que o tubo se desloca gradualmente, a folga entre o tubo e a base inevitavelmente afeta o aumento da taxa de fluxo das partículas e as características da pilha formada. A Figura I 3 mostra um esquema da construção desses testes.

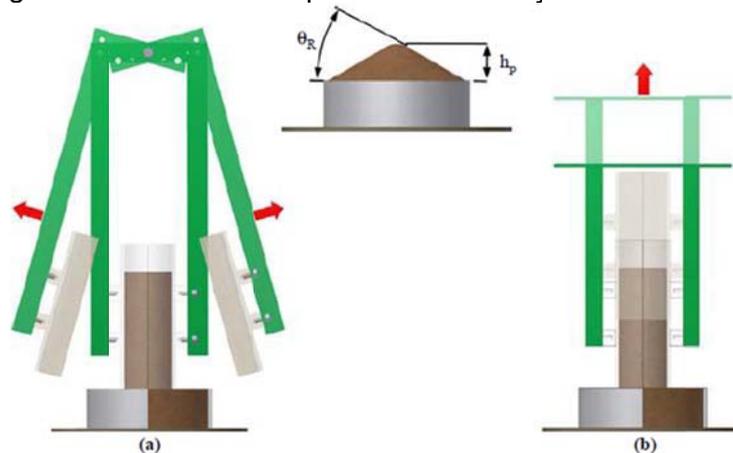


Figura I 3 – (a) Cilindro com abertura diametral. (b) Cilindro deslizante. Imagen de Grima e Wypych, 2011a.

Ambos os testes são realizados para avaliar a resposta macro do ângulo de repouso do material.

## APÊNDICE II

A Tabela II 1 e Tabela II 2 mostram os valores dos fatores testados em duas unidades naturais e de nível de design, assim como os valores da resposta do sistema para cada caso analisado. Os fatores A, B, C e D correspondem, respectivamente, ao coeficiente de atrito de rolagem entre partícula e parede ( $\mu_{r p-w}$ ), coeficiente de atrito estático entre partículas ( $\mu_{s p-p}$ ), coeficiente de atrito rolagem entre partículas ( $\mu_{r p-p}$ ) e a densidade do material ( $\rho_p$ ).

Tabela II 1 - Valores dos parâmetros a serem calibrados para cada simulação feita com partículas de 3/8".

Teste	Unidade natural				Unidade de nível de design							Resposta		
	A	B	C	D	A	B	C	AB	AC	BC	D (ABC)	X Massa [kg]	Y Ângulo de repouso	
	$\mu_{r p-w}$	$\mu_{s p-p}$	$\mu_{r p-p}$	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]										
1	0000	0,25	0,25	0,25	1392,78	-1	-1	-1	1	1	1	-1	2,596	13,57°
2	0011	0,25	0,25	0,95	2666,67	-1	-1	1	1	-1	-1	1	4,884	16,21°
3	0101	0,25	0,95	0,25	2666,67	-1	1	-1	-1	1	-1	1	4,559	25,09°
4	1001	0,95	0,25	0,25	2666,67	1	-1	-1	-1	-1	1	1	4,903	16,93°
5	1010	0,95	0,25	0,95	1392,78	1	-1	1	-1	1	-1	-1	2,581	15,77°
6	1100	0,95	0,95	0,25	1392,78	1	1	-1	1	-1	-1	-1	2,316	25,34°
7	1111	0,95	0,95	0,95	2666,67	1	1	1	1	1	1	1	3,812	57,60°
8	0110	0,25	0,95	0,95	1392,78	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1,951	50,82°

Tabela II 2 - Valores dos parâmetros a serem calibrados para cada simulação feita com partículas de 3/4".

Teste	Unidade natural				Unidade de nível de design							Resposta		
	A	B	C	D	A	B	C	AB	AC	BC	D (ABC)	X	Y	
	$\mu_{r\ p-w}$	$\mu_{s\ p-p}$	$\mu_{r\ p-p}$	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]								Massa [kg]	Ângulo de repouso	
1	0000	0,20	0,20	0,20	1290,00	-1	-1	-1	1	1	1	-1	4,586	21,55°
2	0011	0,20	0,20	0,80	2666,67	-1	-1	1	1	-1	-1	1	7,870	22,84°
3	0101	0,20	0,80	0,20	2666,67	-1	1	-1	-1	1	-1	1	8,402	31,48°
4	1001	0,80	0,20	0,20	2666,67	1	-1	-1	-1	-1	1	1	9,201	22,89°
5	1010	0,80	0,20	0,80	1290,00	1	-1	1	-1	1	-1	-1	3,900	22,31°
6	1100	0,80	0,80	0,20	1290,00	1	1	-1	1	-1	-1	-1	3,785	26,58°
7	1111	0,80	0,80	0,80	2666,67	1	1	1	1	1	1	1	6,927	48,73°
8	0110	0,20	0,80	0,80	1290,00	-1	1	1	-1	-1	1	-1	3,570	56,13°

### APÊNDICE III

Para avaliar a precisão da regressão linear obtida, pode-se atribuir valores intermediários aos fatores e comparar sua resposta com os resultados obtidos através do DEM. A Tabela III 1 mostra algumas combinações testadas na simulação para a verificação dos resultados da regressão.

Tabela III 1 - Testes realizados para calibração a partir das regressões.

Granulometria	Teste	$\mu_{r\ p-w}$	$\mu_{s\ p-p}$	$\mu_{r\ p-p}$	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa [Kg]			Ângulo de repouso [°]		
						Regressão	DEM	Erro	Regressão	DEM	Erro
3/8"	1	0.80	0.32	0.42	2850	5.12 kg	5.32 kg	<b>3.85%</b>	19.15°	17.06°	<b>12.25%</b>
	2	0.60	0.43	0.25	2830	5.04 kg	5.29 kg	<b>4.69%</b>	19.43°	26.56°	<b>26.82%</b>
	3	0.50	0.22	0.24	2750	4.93 kg	4.97 kg	<b>0.70%</b>	19.21°	20.74°	<b>7.36%</b>
3/4"	1	0.50	0.25	0.40	3250	10.32 kg	11.77 kg	<b>12.32%</b>	23.40°	27.06°	<b>13.52%</b>
	2	0.40	0.30	0.24	3300	10.62 kg	11.94 kg	<b>11.08%</b>	23.44°	25.66°	<b>8.65%</b>
	3	0.60	0.28	0.26	3270	9.57 kg	9.70 kg	<b>1.38%</b>	22.42°	24.51°	<b>8.52%</b>

É possível observar que, em alguns casos, a regressão e os resultados obtidos a partir do DEM possuem grande discrepância. No caso da densidade para o agregado de 3/8", a regressão e os cálculos do DEM tiveram boa aproximação, ao contrário do caso da densidade na 3/4". Isso pode ocorrer devido a menor linearidade imposta pelos coeficientes de atrito, que, no caso do de maior granulometria, exercem maior influência na massa em relação ao caso de granulometria menor.

A regressão obtida para os ângulos de repouso geraram erros maiores, porém pode ainda ser usada para dar uma ideia dos principais parâmetros que devem ser alterados. Com algumas interações foi possível encontrar valores onde a regressão e a simulação tiveram resultados próximos.

Vale ressaltar também que a regressão linear foi obtida através de apenas dois níveis de fatores. Uma possível melhoria seria executar testes com valores intermediários (utilizando três níveis, por exemplo) para que se tenha uma regressão com maior fidelidade aos valores testados, porém isso geraria maiores custos computacionais devido a maior quantidade de simulações realizadas.

## APÊNDICE IV

Nesse apêndice é apresentado um desenho esquemático do experimento com silo realizado para a validação do modelo calibrado. A Figura I 4 mostra o desenho da montagem do experimento

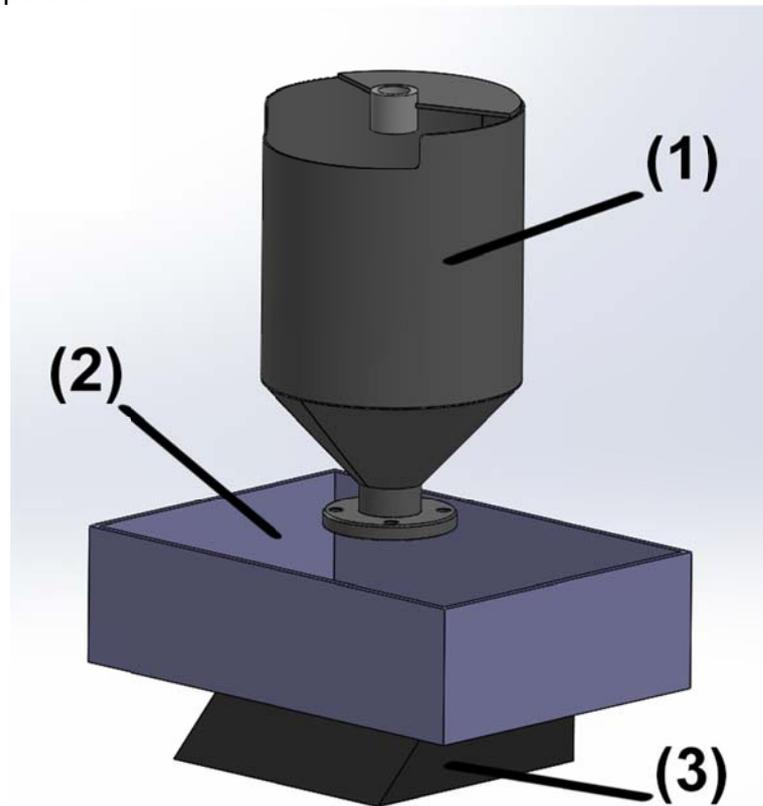


Figura I 4 - Desenho esquemático do experimento executado para a avaliação.

No desenho a posição (1) é o silo, (2) a caixa onde o material é despejado e (3) a balança usada para a medição da massa descarregada.

O silo é preenchido até o final de sua seção cônica e então se abre a abertura inferior para que o material escoar.

Durante a execução do experimento, houve uma grande dificuldade do material escoar naturalmente, necessitando, por isso, de uma primeira excitação para que o material começasse a escoar.