



**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS
DOS ELEMENTOS DISCRETOS ASSOCIADO A
MODELOS REDUZIDOS EM FUNDAÇÕES**

JÉSSICA SOARES DA ROCHA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS
DOS ELEMENTOS DISCRETOS ASSOCIADO A
MODELOS REDUZIDOS EM FUNDAÇÕES**

JÉSSICA SOARES DA ROCHA

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-338/19

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO DE 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS DOS
ELEMENTOS DISCRETOS ASSOCIADO A MODELOS
REDUZIDOS EM FUNDAÇÕES**

JÉSSICA SOARES DA ROCHA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

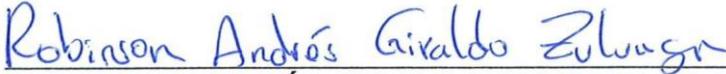
APROVADA POR:



MARCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)



LEANDRO LIMA RASMUSSEN, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



ROBINSON ANDRÉS GIRALDO ZULUAGA., D.Sc. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE DEZEMBRO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

ROCHA, DA SOARES JÉSSICA

Avaliação da Utilização dos Métodos dos Elementos Discretos associado a Modelos Reduzidos em Fundações

xiv 120 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2019)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Micromecânica

2. Fundações

3. Elementos discretos

4. Partículas

5. Modelos Reduzidos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROCHA, J.S. (2019). Avaliação da Utilização dos Métodos dos Elementos Discretos associado a Modelos Reduzidos em Fundações. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-338/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jéssica Soares da Rocha

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da Utilização dos Métodos dos Elementos Discretos associado a Modelos Reduzidos em Fundações.

GRAU / ANO: Mestre / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jéssica Soares da Rocha

jessicasoaresbr29@gmail.com

DEDICATÓRIA

*“Para os crentes, Deus está no princípio das coisas. Para os cientistas, no final de toda
reflexão.”*

Max Planck

Aos meus pais e ao meu amoroso esposo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me dado força para continuar nessa jornada e ter me agraciado com pessoas tão maravilhosas pelo caminho.

Agradeço ao meu orientador, professor Márcio Muniz, por todos os ensinamentos ao longo dessa jornada.

Agradeço ao meu amigo Bernardo Cascão por toda a paciência e disponibilidade ao me ensinar uma nova linguagem de programação e pelos intermináveis plantões de dúvida via *WhatsApp* acerca das funções do *YADE*.

Agradeço aos meus colegas do *Infralab* pela companhia e pelo incentivo durante essa jornada.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, por toda a compreensão quando precisei me ausentar para cumprir minhas atividades acadêmicas, em especial à minha amiga Daniele, pelo suporte emocional.

Aos amigos que fiz no programa e que levarei pela vida inteira, Stephanie e Márcio, obrigada pelo suporte emocional.

Ao programa de pós-graduação em Geotecnia, agradeço pela oportunidade.

E, em especial, à minha família, que sempre esteve ao meu lado me fazendo acreditar que era possível. Ao meu compreensivo e amoroso esposo, pela cumplicidade, pelo apoio e pelo amor ao longo dessa jornada.

RESUMO

A utilização do Método dos Elementos Discretos (DEM) aplicada a problemas de contorno geotécnicos ainda esbarra na capacidade computacional devido à grande quantidade de partículas necessárias a representação do fenômeno em tamanho real. Uma abordagem intermediária que viabilizaria a utilização do DEM é sua aplicação aos modelos reduzidos. Os modelos reduzidos permitem o controle de todas as variáveis envolvidas em obras geotécnicas, no entanto, apresentam como limitação a necessidade de definição de um fenômeno principal a ser estudado. Os modelos físicos, em escala real e reduzida, são bastante utilizados para o estudo dos mecanismos de ruptura das fundações devido ao empiricismo envolvido no seu dimensionamento bem como na obtenção de parâmetros de resistência. Dessa forma, essa pesquisa avaliou a potencialidade da utilização do Método dos Elementos Discretos (DEM) combinado a modelos reduzidos bidimensionais em fundações. Inicialmente, foi realizada a calibração dos parâmetros das partículas (mesoscópicos) e de contato (microscópicos) a fim de replicar o fenômeno macroscópico obtido no ensaio biaxial pelo método da tentativa e erro.

O ensaio biaxial foi performedo com aproximadamente 1.900 partículas por meio do software *YADE - Yet Another Dynamic Engine*. Este ensaio permitiu avaliar a influência dos parâmetros em nível de partícula (coeficiente de *Poisson* da partícula; módulo de Young da partícula; e coeficiente de atrito) no comportamento macroscópico da amostra. Após a calibração dos parâmetros da partícula, foi realizada a etapa de validação dos parâmetros por meio da simulação de uma prova de carga, inicialmente em um bloco de fundação, e posteriormente em um radier estaqueado com estacas curtas e longas no mesmo *software*. Este ensaio resultou em uma amostra com aproximadamente 37.000 partículas. A validação permitiu comparar se o comportamento mecânico numérico foi similar ao encontrado nos modelos reduzidos, considerando os parâmetros calibrados, bem como quais parâmetros mesoscópicos e microscópicos mais influenciaram o comportamento mecânico da prova de carga estudada. Além disso, foi possível comparar as superfícies e cargas de ruptura obtidas a partir da utilização do DEM com as superfícies considerando a solução proposta pela teoria da plasticidade por meio da resolução Teorema de Análise Limite por meio do *software* OptumG2.

Conclui-se que o ângulo de atrito foi responsável por governar a ruptura e a porção final do comportamento elástico-linear da curva. O módulo de Young, no entanto, afetou mais o trecho inicial do comportamento elástico linear. Essa metodologia apresentou-se como uma ferramenta eficiente para prever as superfícies de ruptura, que são bastante similares às propostas de forma analítica e pelo Teorema de Análise Limite. No entanto, em termos quantitativos, a falta de absoluta similaridade geométrica entre o experimento físico e o ensaio numérico introduziu limitações na hora de comparar as cargas de ruptura.

Palavras-chave: Método dos Elementos Discretos. Modelos Reduzidos. Fundações.

ABSTRACT

The use of the Discrete Element Method (DEM) applied to geotechnical contour problems still bumps into computational capacity due to the large number of particles to represent the phenomena. An intermediate approach that enables the use of DEM is its application to reduced models. The reduced models controls all selected variables in geotechnical works, however, have as limitation the need to define a main phenomenon to be studied. The physical models, in real scale and reduced, are widely used for the study of mechanisms of rupture of foundations due to the empiricism involved in its dimensioning, as well as in the parameters of resistance. Thus, this research evaluated the potential use of the Discrete Element Method (DEM) combined with two-dimensional reduced models in foundations. Initially, the particles (mesoscopic) and contact (microscopic) parameters were calibrated at the end of a replication or macroscopic phenomenon that occur in biaxial test by trial and error method.

The biaxial test was performed with approximately 1,900 particles using YADE - Yet Another Dynamic Engine software. This biaxial test allowed to evaluate the influence of the particle level parameters (particle Poisson's ratio; particle Young's modulus; and friction coefficient) on the macroscopic behavior of the sample. After calibration of the particle parameters, the parameter validation step was performed by simulating a load test, initially in a shallow foundation, and later in a radier with short and long piles in the same software. This sample resulted in approximately 37,000 particles. The validation allowed comparing if the numerical mechanical behavior was similar to that found in the reduced models, considering the calibrated parameters, as well as which mesoscopic and microscopic parameters most influenced the mechanical behavior of the load test studied. Moreover, it was possible to compare the rupture surfaces obtained from the use of DEM with the surfaces considering the solution proposed by the plasticity theory through the Limit Analysis Theorem, to obtain these surfaces the OptumG2 software was used.

It was concluded that the friction angle was responsible for governing the rupture and the final portion of the elastic-linear behavior of the curve. Young's modulus, however, most affected the initial stretch of linear elastic behavior. This methodology has been presented as an efficient tool for predicting the rupture surfaces, which are very similar to those proposed analytically and by the Limit Analysis Theorem. However, in quantitative terms, the lack of absolute geometric similarity between the physical experiment and the numerical test introduced limitations in comparing the ultimate loads.

Keywords: Discrete Element Method. Reduced models. Foundations.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	OBJETIVO.....	3
1.3	METODOLOGIA ADOTADA.....	3
1.4	ESCOPO DO TRABALHO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	MODELAGEM FÍSICA REDUZIDA	5
2.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	9
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
3.1	FUNDAÇÕES	19
3.1.1.	FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS.....	19
3.1.2.	FUNDAÇÕES PROFUNDAS	20
3.1.3.	CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS ISOLADAS	20
3.2	FORMULAÇÃO DE ANÁLISE LIMITE.....	22
3.2.1.	TEOREMA DA ANÁLISE LIMITE SUPERIOR (CINEMÁTICO)	22
3.2.2.	TEOREMA DA ANÁLISE LIMITE INFERIOR (ESTÁTICO).....	23
3.2.3.	ANÁLISE LIMITE E O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	24
3.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	24
3.3.1.	VISÃO GERAL SOBRE O MÉTODO.....	26
3.3.2.	CONTATOS ENTRE AS PARTÍCULAS	27
3.3.2.1.	FORMA DAS PARTÍCULAS.....	27
3.3.2.2.	DETECÇÃO DOS CONTATOS	28
3.3.3.	CÁLCULO DAS FORÇAS-DESLOCAMENTOS	29
3.3.3.1	MODELO DE CONTATO CUNDALL & STRACK	29
3.3.4.	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	31
3.3.5.	INTEGRAÇÃO NÚMERICA.....	34
3.3.6.	AMORTECIMENTO NUMÉRICO.....	35
3.3.7.	PASSO DE TEMPO.....	36
4	METODOLOGIA	37
4.1	MATERIAL ESTUDADO.....	37
4.2	SIMULAÇÃO NÚMERICA.....	39
4.2.1.	SOFTWARES UTILIZADOS	39
4.2.2.	MODELO DE CONTATO	40
4.2.3.	GERAÇÃO DE AMOSTRA ENSAIO BIAXIAL.....	41
4.2.4.	ENSAIO BIAXIAL.....	44
4.2.5.	GERAÇÃO DO MACIÇO DA FUNDAÇÃO.....	46

4.2.6.	ENSAIO PROVA DE CARGA NO MODELO REDUZIDO	49
4.2.7.	ENSAIO OPTUM G2	51
5	RESULTADOS NUMÉRICOS	52
5.1	CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	52
5.1.1.	AMORTECIMENTO	52
5.1.2.	TAXA DE CARREGAMENTO	54
5.1.2.1.	ENSAIO BIAXIAL	54
5.1.2.2.	PROVA DE CARGA	55
5.1.3.	FATOR DE SEGURANÇA DO PASSO DE TEMPO	56
5.1.4.	VELOCIDADE DE INSERÇÃO DAS ESTACAS CRAVADAS	57
5.2	GERAÇÃO DA AMOSTRA E DO MACIÇO	58
5.3	ENSAIO BIAXIAL	62
5.4	ENSAIO DE PROVA DE CARGA	67
6	CONCLUSÕES	76
6.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	77
APÊNDICE	84	
A.1. –	GERAÇÃO DE AMOSTRA PARA ENSAIO BIAXIAL	84
A.2. –	GERAÇÃO DE AMOSTRA: PROVA DE CARGA - BLOCOS E ESTACAS ESCAVADAS	88
A.3. –	ENSAIO BIAXIAL	99
A.4. –	PROVA DE CARGA BLOCO	104
A.5. –	PROVA DE CARGA ESTACA ESCAVADA	109
A.5. –	PROVA DE CARGA ESTACA CRAVADA	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fatores de Escala (Avanzi e Bernardes, 2005).....	7
Tabela 3.1 – Método de Geração da Amostra (adaptado de Albuquerque, 2016)	33
Tabela 4.1 – Parâmetros dos materiais utilizados no Modelo Reduzido.....	38
Tabela 4.2 – Parâmetros iniciais de resistência macroscópicos da amostra biaxial.....	42
Tabela 4.3 – Dimensão das Amostras	42
Tabela 4.4 – Parâmetros para geração da Amostra para o ensaio biaxial	44
Tabela 4.5 – Intervalo de calibração dos parâmetros da Amostra.....	45
Tabela 4.6 – Parâmetros para geração da Amostra	47
Tabela 4.7 – Massa específica corrigida	48
Tabela 5.1 – Parâmetros mesoscópicos e microscópicos calibrados no ensaio biaxial	66
Tabela 5.2 – Carga de ruptura DEM versus Análise Limite	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução do número de artigos utilizando o DEM ao longo dos anos (modificado O’Sullivan, 2014 - Gráfico atualizado por meio de pesquisa no periódico da CAPES, baseado nas palavras-chave: <i>Discrete Element Method</i> (DEM) e <i>geotechnical</i>)	2
Figura 1.2 – Metodologia para o desenvolvimento da pesquisa	4
Figura 2.1 – Modelo físico tridimensional reduzido de uma escotilha (Chevalier <i>et al.</i> , 2012)	13
Figura 2.2 – (a) Talude sujeito à compressão de montante (Khanal <i>et al.</i> 2017).....	14
Figura 2.3 – Modelo físico tridimensional reduzido de uma fundação superficial em um talude granular (Gabrieli <i>et al.</i> 2009)	15
Figura 2.4 – (a) Ensaio Biaxial para calibrar o DEM (b) Amostra de solo idealizado constituída por partículas de alumínio (Fu <i>et al.</i> 2016).....	17
Figura 3.1 – Ruptura do maciço sujeito ao carregamento de um bloco de fundação	19
Figura 3.2 – Esquema de uma estaca submetida à compressão	21
Figura 3.3 – Procedimento do Método dos Elementos Discretos (Sadd <i>et al.</i> , 2000)	26
Figura 3.4 – Contato entre elementos esféricos (Luding, 2009)	27
Figura 3.5 – Mapeamento usado para a determinação dos contatos em um problema 2D (O’Sullivan, 2011).....	28
Figura 3.6 – Compressão de dois discos entre duas paredes rígidas; (a) $t = t_0$; (b) $t = t_1 = t_0 + \Delta t$; (c) $t = t_0 + 2\Delta t$ (Cundall & Strack, 1979).....	30
Figura 3.7 – Contornos Periódicos (O’Sullivan, 2011).....	32
Figura 4.1 – (a) Montagem do maciço de Fundação (b) Prova de carga instrumentada (c) prova de carga bloco de fundação (d) Prova de carga das estacas curtas (Kurosaki, 2004)	37
Figura 4.2 – (a) Hastes de alumínio (b) Experimento biaxial adaptado (Nakai, 2013)	38
Figura 4.3 – Geração de Amostra pelo Método de Compactação.....	41
Figura 4.4 – Resultados da simulação do Ensaio Biaxial com diferentes números de partículas	43
Figura 4.5 – Distribuição dos raios na geração da Amostra para o ensaio biaxial	44
Figura 4.6 – Ensaio biaxial (a) Amostra no estágio Inicial (b) Amostra a 8% de Deformação	45
Figura 4.7 – Dimensões da Caixa para geração do maciço.....	46
Figura 4.8 – Dimensões dos Blocos e Estacas	46
Figura 4.9 – Prova de Carga do Bloco de Fundação (a) Início do ensaio (b) Amostra estabilizada sob peso próprio (c) Ensaio finalizado	49

Figura 4.10 – Prova de Carga Estaca Curta (a) Início do Ensaio (b) Amostra estabilizada ao Peso próprio (c) Amostra Rompida.....	50
Figura 4.11 – (a) Malha para radiers com estaca longa (b) Malha para radiers com estaca curta.....	51
Figura 5.1 – Avaliação do <i>damping</i> não-viscoso	53
Figura 5.2 – Avaliação do amortecimento na aplicação de tensão	53
Figura 5.3 – Avaliação do amortecimento na aplicação de deslocamento	54
Figura 5.4 – Taxa de Carregamento	55
Figura 5.5 – Taxa de Carregamento	56
Figura 5.6 – Fator de Segurança Passo de tempo.....	57
Figura 5.7 – Perturbação da Amostra durante o processo de cravação.....	58
Figura 5.8 – Distribuição da porosidade na Amostra do Ensaio Biaxial	60
Figura 5.9 – Variação da porosidade na Amostra	60
Figura 5.10 – Distribuição da porosidade no maciço de fundação	61
Figura 5.11 – Variação do Coeficiente de Poisson da partícula (ν_p) no ensaio biaxial	62
Figura 5.12 – Deformação volumétrica versus deformação axial para Poisson da partícula (ν_p) igual a 0,20	63
Figura 5.13 – Variação do Módulo de Young da partícula (E_p) no ensaio biaxial	64
Figura 5.14 – Variação do ângulo de atrito entre as partículas (ϕ_p) no ensaio biaxial	64
Figura 5.15 – Regressão Hiperbólica para o ângulo de atrito entre as partículas (ϕ_p) no ensaio biaxial	66
Figura 5.16 – Magnitude do vetor de velocidades na ruptura dos blocos.....	67
Figura 5.17 – Curva de Força versus Deslocamento do Bloco rígido	68
Figura 5.18 – Magnitude do vetor de velocidade na ruptura considerando $\phi_p = 7,5$ graus	69
Figura 5.19 Magnitude do vetor de velocidade na ruptura considerando $\phi_p = 11$ graus	70
Figura 5.20 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas curtas cravadas	70
Figura 5.21 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas curtas escavadas	71
Figura 5.22 Magnitude do vetor de velocidade na ruptura das estacas curtas cravadas	71
Figura 5.23 Magnitude do vetor de velocidade na ruptura das estacas curtas escavadas	72
Figura 5.24 – Módulo dos vetores deslocamento na ruptura das estacas curtas	72
Figura 5.25 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas longas cravadas	73

Figura 5.26 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas longas escavadas	73
Figura 5.27 – Magnitude do vetor de velocidade das estacas longas cravadas.....	74
Figura 5.28 – Magnitude do vetor de velocidade na ruptura das estacas longas escavadas ...	74
Figura 5.29 – Módulo dos vetores deslocamento na ruptura das estacas longas	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

DEM	Método dos Elementos Discretos (<i>Discrete Element Method</i>)
FEM	Método dos Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
MR	Modelo Reduzido
YADE	Yet Another Dynamic Engine

SÍMBOLOS

Letras Arábicas

lg	Modelo submetido à ação da gravidade terrestre
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
a^t	Aceleração no tempo atual
B	Base
\vec{b}	Forças de massa
c	Coesão
D	Energia dissipada por unidade de volume
D	Diâmetro da estaca
d_b	Diâmetro da base
d_{50}	Diâmetro correspondente ao percentual de 50% passante na peneira
e	Índice de vazios
E_p	Módulo de Young da partícula
E_m	Módulo de Young macroscópico
F	Força
H	Altura
I	Momento de Inércia
K	Rigidez da mola
K_o	Coefficiente de empuxo
k_{eq}	Rigidez normal equivalente
k_n	Rigidez normal

k_s	Rigidez cisalhante
k_{seq}	Rigidez cisalhante equivalente
L	Largura
L	Comprimento da estaca
M	Momento
m	Massa da partícula
\vec{n}	Vetor associado
n	Porosidade
N	Fator de escala geométrico
N_c	Fator de capacidade suporte relacionado à coesão
N_q	Fator de capacidade suporte relacionado à sobrecarga
N_γ	Fator de capacidade suporte relacionado ao peso próprio de Terzaghi
Q	Resistência total da estaca
Qt	Capacidade de carga do grupo de estacas
q_r	Capacidade de resistência da estaca
q_b	Resistência unitária mobilizada na base da estaca
q_s	Resistência unitária mobilizada na lateral da estaca
R	Raio da partícula
S_c	Fator de forma relacionado à coesão
S_q	Fator de forma relacionado à sobrecarga
S_γ	Fator de forma relacionado ao peso próprio
\vec{t}	Forças externas
\vec{u}^*	Deslocamento virtual
W_e	Trabalho das forças externas
W_i	Trabalho interno

Letras Gregas

α	Multiplicador plástico
α_t	Aceleração angular
γ	Peso específico
Γ	Fronteira estática
∇^t	Divergente

δ	Compressão mútua
ε	Deformação
n	Fator de eficiência
λ	Fator de colapso
λ	Coefficiente de compressão de adensamento da curva virgem
λd	Coefficiente de amortecimento
μ	Coefficiente de Atrito
ν_p	Coefficiente de Poisson da partícula
ν_M	Coefficiente de Poisson macroscópico
σ	Tensão
ϕ_p	Ângulo de atrito do contato
ϕ_m	Ângulo de atrito macroscópico
ω	Velocidade angular
Ω	Domínio do corpo

1 INTRODUÇÃO

A utilização de modelos físicos em escala real, de maneira geral, é uma das principais ferramentas para prever o comportamento de obras e estruturas de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica. Com o aumento dos custos da construção dos modelos, em parte devido ao elevado preço da instrumentação, que se tornava cada vez mais sofisticada e precisa, os modelos físicos foram gradativamente sendo menos utilizados. Além disso, existe a dificuldade de extrapolar os resultados dos modelos reduzidos em termos quantitativos. Em contrapartida, ocorreu o desenvolvimento computacional, que propiciou uma maior utilização de métodos numéricos (Randolph, 2001).

Muitos métodos numéricos foram fundamentados na mecânica do meio contínuo para o estudo de problemas geotécnicos, sendo o Método dos Elementos Finitos (FEM) o de maior impacto prático nas últimas décadas. No entanto, é necessário avaliar se estes modelos numéricos são suficientes para prever o comportamento do problema em estudo, pois, ao abordar o comportamento do solo como um material contínuo, impõem-se restrições nas análises realizadas. Essa hipótese implica na necessidade de formulação de modelos constitutivos fenomenológicos, que estudam o comportamento dos materiais de maneira macroscópica (Zuluaga, 2016). A visão macroscópica, por sua vez, não considera as características do solo na escala de grão (mesoescala), o que poderá resultar em uma compreensão incompleta de seu comportamento ou em uma aproximação pouco razoável para solos granulares e meios muito fraturados (Nakai, 2013).

Em uma tentativa de melhorar essa lacuna, uma nova abordagem numérica que considera os aspectos da mesoescala no modelo mecânico dos solos foi desenvolvida. Esse método numérico é denominado Método dos Elementos Discretos (DEM), e utiliza a discretização do meio para a modelagem e resolução do problema (Bono & McDowell, 2014). Segundo Queteschiner *et al.* (2018), com o crescimento da capacidade computacional, a utilização do DEM começou a ter um aumento do seu uso dentro da comunidade geotécnica (ver Figura 1.1). O DEM, no entanto, ainda esbarra na capacidade computacional. As simulações avançaram para ordem de grandeza com 10-50 mil partículas, no entanto, um problema real ainda possui a ordem de milhões de partículas. Desta forma, o DEM pode ser usado para problemas em escala de poucas partículas, sem esbarrar no custo computacional. A aplicação do DEM a problemas de contorno em escala reduzida é uma opção intermediária para avaliar os mecanismos de funcionamento de problemas geotécnicos. Assim, os modelos

reduzidos, devidamente instrumentados e aliados a simulações numéricas discretas podem ser uma ferramenta com muito potencial para a predição qualitativa e quantitativa de obras geotécnicas.

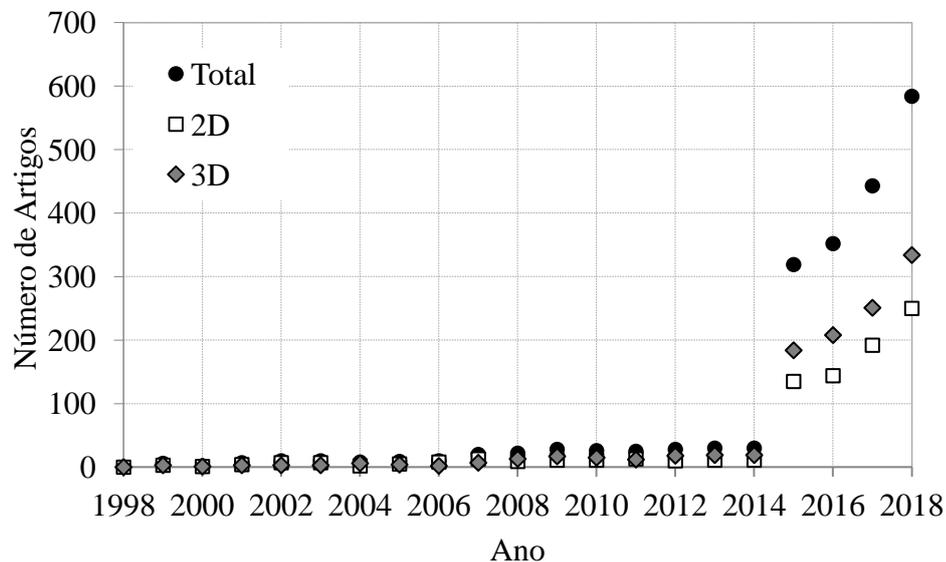


Figura 1.1 – Evolução do número de artigos utilizando o DEM ao longo dos anos (modificado O’Sullivan, 2014 - Gráfico atualizado por meio de pesquisa no periódico da CAPES, baseado nas palavras-chave: *Discrete Element Method (DEM)* e *geotechnical*)

A utilização dos modelos físicos, em escala real e reduzida, é uma boa ferramenta para o estudo do comportamento de fundações, uma vez que, se trata de área que ainda envolve muito empiricismo na determinação dos parâmetros de resistência e no seu dimensionamento, pois os mecanismos de ruptura não estão completamente entendidos. Dessa forma, o entendimento dos micro-mecanismos é essencial para interpretar os gatilhos que conduzem ao comportamento macromecânico dos problemas geotécnicos.

1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação desta pesquisa consistiu na possibilidade de melhorar o entendimento do comportamento de fundações, utilizando o Método dos Elementos Discretos para realizar simulações de modelos físicos reduzidos, pois atualmente os modelos utilizados para prever esse comportamento, consideram as hipóteses da mecânica do meio contínuo o que impede a observação da movimentação das partículas. Essa hipótese retrata o comportamento mecânico do solo por meio de um valor médio.

A adoção de valores médios, bem como as incertezas envolvidas na determinação dos parâmetros, leva à utilização de fatores de segurança altos. Portanto, uma melhora do

entendimento do comportamento mecânico da interação da estrutura-solo em nível de partículas é essencial para interpretar o processo de inicialização dos fenômenos macromecânicos em meios granulares de problemas geotécnicos.

1.2 OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo geral aprimorar o entendimento dos mecanismos de funcionamento para fundações, utilizando dados de modelos físicos reduzidos e modelos numéricos que discretizam a influência da mesoescala no comportamento macroscópico do conjunto. Além disso, os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- a) Avaliar a influência das características da mesoescala na resposta do problema geotécnico;
- b) Identificar as características que dominam os diferentes mecanismos do sistema de fundação.

1.3 METODOLOGIA ADOTADA

Para alcançar os objetivos desse trabalho, a metodologia foi dividida em duas etapas, uma de calibração dos parâmetros do contato e de resistência das partículas do solo por meio do método de tentativa e erro. Já a segunda, constitui-se da validação dos parâmetros calibrados por meio da simulação dos modelos de contorno utilizando o Método dos Elementos Discretos. Além disso, comparou-se os resultados obtidos via DEM com os mecanismos e cargas obtidas na ruptura de sistemas de fundações considerando a Teoria da Análise Limite que se baseia nas hipóteses da teoria da plasticidade. As primeiras duas etapas da metodologia se encontram ilustradas na Figura 1.2 e foram melhores detalhadas nos capítulos seguintes.

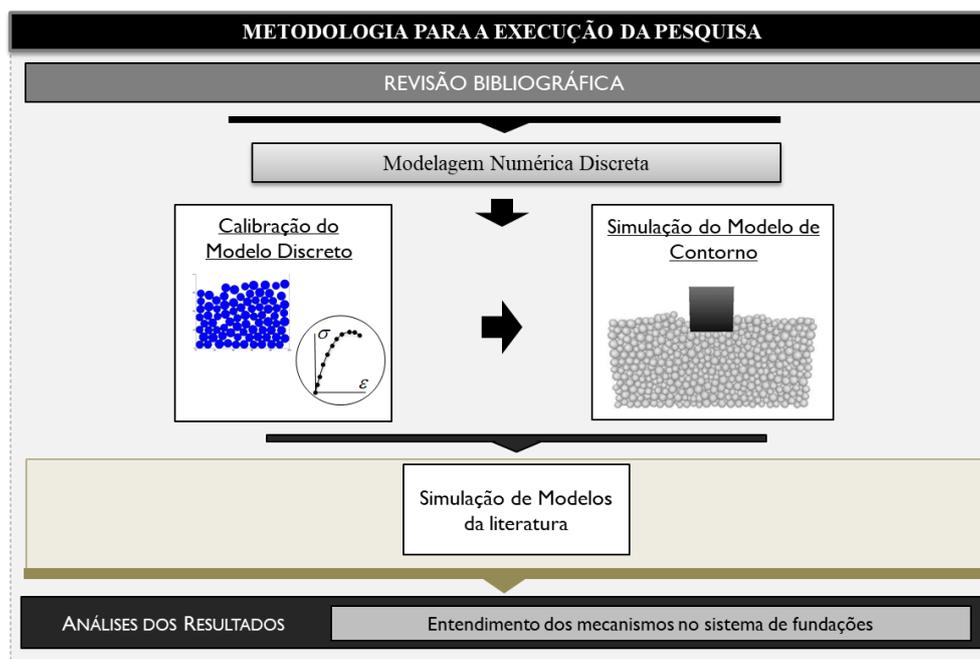


Figura 1.2 – Metodologia para o desenvolvimento da pesquisa

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho é composto de seis capítulos e um apêndice. No presente capítulo são apresentados a motivação, os objetivos e um resumo da metodologia empregada na pesquisa.

No **Capítulo 2** apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre modelagem física reduzida e sobre a utilização do DEM aplicada a problemas de contornos geotécnicos e em fundações.

O **Capítulo 3** apresenta a fundamentação teórica necessária para compreender o Método dos Elementos Discretos, bem como conceitos básicos sobre o comportamento de fundações superficiais e profundas utilizados para comparar o mecanismo de ruptura previstos pela teoria da plasticidade.

No **Capítulo 4** foi discutida toda a metodologia para consecução da pesquisa, apresentando o material estudado, bem como os parâmetros necessários ao modelo computacional do ensaio biaxial e ao Modelo Reduzido.

No **Capítulo 5** foram apresentados os resultados e as análises resultantes das simulações, bem como suas respectivas análises.

No **Capítulo 6** foram apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

O **Apêndice** apresenta os *scripts* para geração de amostra e para a simulação da prova de carga e do ensaio biaxial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica se divide em duas seções. Na primeira seção são apresentadas as pesquisas mais recentes sobre a utilização de Modelos Físicos Reduzidos para o estudo de obras geotécnicas. Na segunda seção apresenta-se o estado da arte do Método dos Elementos Discretos aplicados em pesquisas geotécnicas, priorizando suas aplicações a problemas de contorno geotécnicos, em especial de fundações.

2.1 MODELAGEM FÍSICA REDUZIDA

De acordo com Cordeiro (2017), os Modelos Físicos Reduzidos (MR) têm como principal objetivo a otimização dos projetos, possibilitando a redução dos custos e o aumento de segurança. Além disso os MRs são utilizados para calibrar modelos matemáticos, como no caso de estudos do comportamento da interação solo-estrutura abordados nesta dissertação. Portanto, os Modelos Físicos Reduzidos auxiliam no entendimento do comportamento real solo-estrutura, produzindo projetos mais adequados, mais seguros e menos suscetíveis a patologias.

Segundo Wood (2004), o principal desafio dos Modelos Físicos Reduzidos consiste em estabelecer regras de similitude que não alterem significativamente o fenômeno básico, e conservem uma extrapolação segura do modelo físico em tamanho real. Desta forma, de acordo com as hipóteses adotadas, os Modelos Físicos Reduzidos são classificados em:

- a) Modelos absolutos ou de Similitude Completa: simulação plena de todas as grandezas intervenientes no fenômeno analisado;
- b) Modelos Relativos ou de Similitude Restrita: simulação apenas das grandezas mais relevantes ao fenômeno analisado. Esses modelos podem ser subdivididos em:
 - Modelos com mesmo material do protótipo e em condições similares (modelos de similitude imperfeita);
 - Modelos com mesmo material do protótipo e em diferentes estados físicos iniciais (índice de vazios, curva granulométrica);
 - Modelos com material equivalente ao usado no protótipo;
 - Modelos de simulação do campo gravitacional. Dentro da modelagem do campo gravitacional, os modelos são classificados em centrífugos ou 1g. Os modelos físicos 1g são submetidos à ação da gravidade natural, o que,

no geral, impõe pequenos níveis de tensão ao solo. Os modelos centrífugos são modelos nos quais o solo é submetido a uma aceleração radial que, muitas vezes, simula o campo gravitacional terrestre ou até mesmo gravidades maiores, facilitando a obtenção das tensões iniciais necessárias à representação dos fenômenos em estudo;

- c) Modelos Distorcidos: simulação obtida por intermédio da adoção de diferentes escalas para grandezas de mesma base dimensional;
- d) Modelos Analógicos: simulação obtida mediante a correlação entre fenômenos qualitativamente distintos, mas regidos por equações de mesma estrutura formal.

A criação de modelos absolutos de similitude possui restrições práticas, logo, a maior parte dos modelos é de similitude parcial, em que se define o fenômeno que se deseja estudar. A principal vantagem da utilização de modelos reduzidos é o controle de todas as variáveis envolvidas no processo. No entanto, deve-se observar que os resultados obtidos apresentam algumas limitações.

Segundo Reinhorn (2008), a sequência executiva da construção de um Modelo Reduzido deve ser criteriosa e minuciosa, pois se trata de um pequeno projeto de engenharia. Desta forma, o autor sugeriu que sejam seguidos os seguintes passos na construção de um Modelo Reduzido:

- a) Definição do objetivo dos testes experimentais em função da variável de análise relevante: deslocamentos, mecanismos de falha etc.;
- b) Seleção da escala: normalmente regida pelos recursos de laboratório referidos a espaço, dispositivos de carregamento etc.;
- c) Seleção do tipo de material para trabalho no modelo para o solo e dos demais elementos;
- d) Determinação ou avaliação das condições de semelhança (o modelo pode não obedecer a um modelo real);
- e) Dimensionamento do modelo: plano de fabricação;
- f) Fabricação do modelo;
- g) Instalação de sensores para medir a resposta;
- h) Obtenção e armazenagem de dados experimentais (aquisição de dados);
- i) Análise de dados com base na resposta do modelo.

Avanzi e Bernardes (2005) utilizaram os modelos reduzidos para estudar cortinas grampeadas. Ao longo do seu trabalho, definiram regras de similitude do protótipo com base

em aspectos dinâmicos, cinéticos e geométricos propostos por Cargill e Ko (1983). Segundo os autores, os fatores de escala cinéticos são utilizados para ensaios no qual a aceleração é induzida e diferente da terrestre. Para os demais ensaios, esse fator é considerado igual a 1. O fator de escala geométrico pode ser definido de acordo com a fórmula:

$$N = \frac{L_p}{L_m} \quad (2-1)$$

Na fórmula, L_p é a largura do projeto e L_m é largura do modelo. Dessa forma, Avanzi e Bernardes (2005) propuseram fatores de similitude geométrica para o estudo de problemas de muros grampeados, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fatores de Escala (Avanzi e Bernardes, 2005)

Grandeza	Fator de Escala (protótipo/modelo)	Grandeza	Fator de Escala (protótipo/modelo)
Aceleração	1	Densidade	1
Comprimento	N	Massa	N ³
Área	N ²	Peso Específico	1
Volume	N ³	Tensão	N
Força	N ³		

Hartmann (2012) utilizou os modelos reduzidos em centrífugas para estudar os efeitos de aterros estruturados com reforço em geossintéticos em solos moles. O autor conduziu sua pesquisa a fim de avaliar o efeito dos mecanismos de transferência de carga. O solo foi submetido a uma aceleração equivalente a 20g, sendo g é a aceleração da gravidade terrestre, e a utilização de modelos reduzidos centrífugos possibilitou a redução do efeito de escala que inviabilizava a representação de determinados fenômenos na modelagem 1g. O autor comparou seus resultados com o modelo teórico para previsão de recalques e concluiu que, para o problema estudado, o modelo em centrífuga não conseguiu prever um bom comportamento para o solo.

Nakai (2013) também utilizou os modelos reduzidos para estudar problemas geotécnicos de túneis, cortinas grampeadas e fundações. O solo foi reproduzido por meio de barras de alumínio para modelos bidimensionais e de esferas de alumínio para modelos tridimensionais.

A obtenção de parâmetros desse material foi obtida por meio de uma campanha de ensaios adaptada, que possibilitou uma validação do modelo teórico proposto baseado nos métodos contínuos. Destaca-se da pesquisa de Nakai (2013) a utilização dos modelos

reduzidos para avaliação de fundações profundas e superficiais. Foram estudados tanto o comportamento das fundações superficiais, bem como o das fundações profundas. As fundações foram submetidas a carregamentos centrados e excêntricos, avaliando-se a sua capacidade de carga, as deformações e os modos de ruptura. Nas fundações profundas ainda foi avaliada a possibilidade de utilização de estacas curtas e longas. A escala utilizada para conservar o fenômeno foi de 1:100. O autor concluiu que os MRs foram bastante eficientes na representação dos mecanismos de ruptura das estacas, e conseguiu validar a proposição do seu modelo numérico.

Posteriormente, Shahin *et al.* (2014) utilizaram os modelos reduzidos para avaliação de cortinas grampeadas em uma tentativa de avaliar os mecanismos que geram as deformações e as tensões, considerando que há um crescimento da utilização desse tipo de estrutura e que o processo de dimensionamento, atualmente, é empírico. Os autores concluíram que a utilização dos modelos reduzidos associados a métodos numéricos para as curvas tensão *versus* deformação foi satisfatória tanto em termos quantitativos, quanto em termos qualitativos.

Noreña (2015) utilizou a modelagem física centrífuga a fim de simular o comportamento da interação solo-riser na *zona touchdown point* em argilas, ou seja, a centrífuga foi utilizada a fim de avaliar as movimentações horizontais da tubulação petrolífera no leito argiloso. O autor ainda relata que a utilização de centrífugas na COPPE teve início nos anos 90, quando foram conduzidos diversos estudos na área de óleo e gás. Na área geotécnica destaca-se o estudo sobre estabilidades de talude (Calle, 2007). Noreña (2015) concluiu que a modelagem reduzida em centrífugas foi uma ferramenta eficiente para avaliação das forças verticais e laterais em ensaios cíclicos.

Rincon (2016) utilizou modelos reduzidos submetidos a diferentes valores de aceleração da gravidade em centrífuga para estudar o efeito do uso de radiers estaqueados em solos moles sob o efeito de adensamento. O autor concluiu que os resultados apresentados foram satisfatórios, mas que a similitude completa do comportamento real não é possível por meio do Modelo Reduzido, portanto, deve-se reduzir o modelo a partir do fenômeno escolhido para o estudo.

Cordeiro (2017) conduziu uma pesquisa utilizando modelos reduzidos para radiers estaqueados assentes em areia e concluiu sobre a necessidade do controle dos parâmetros necessários a um bom projeto de Modelo Reduzido. Ele ainda ressaltou a dificuldade de garantir o comportamento do fenômeno em estudo devido à pouca quantidade de estudos

sobre regras de similitude, mas garantiu que os modelos reduzidos conduziram uma boa pesquisa qualitativa sobre o comportamento das fundações.

Pereira (2018) utilizou os modelos centrífugos reduzidos para avaliar a substituição de camadas de solo lateríticos espessas e compactadas por colunas do mesmo solo, permitindo o controle de solos colapsíveis e a construção de fundações diretas. A autora ressaltou a importância das centrífugas para reproduzir as condições de tensão inicial do campo por meio da indução de uma gravidade maior que a terrestre.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O Método dos Elementos Discretos é um método numérico que consiste na discretização das partículas para resolução e solução de problemas em meios fraturados ou granulares. Com o aumento da capacidade de processamento computacional, o DEM vem sendo cada vez mais utilizado dentro das pesquisas geotécnicas, principalmente na tentativa de representar experimentos laboratoriais. O'Sullivan (2008) utilizou o Método dos Elementos Discretos para prever o comportamento de materiais granulares sujeitos a carregamento cíclicos em ensaios triaxiais. A autora conduziu essa pesquisa a fim de avaliar a potencialidade da utilização desse método, pois os solos expostos a esse tipo de carregamento apresentam comportamento complexo e resposta não-linear.

A pesquisa consistiu na realização de ensaios triaxiais monotônicos em um solo constituído por partículas idealizadas. Esse solo foi representado por meio de partículas de alumínio sujeitas a um elevado grau de controle na fabricação. Esses ensaios estáticos foram replicados no código numérico e permitiram calibrar os parâmetros de resistência e deformabilidade (coeficiente de atrito, módulo de Young e coeficiente de Poisson) das partículas. O modelo utilizado para representação do contato entre as partículas foi o modelo Hertz-Mindlin sem deslizamento tangencial. Após a calibração, foi possível conduzir ensaios triaxiais cíclicos laboratoriais e numéricos.

A autora conseguiu demonstrar quantitativamente uma boa aproximação entre os ensaios laboratoriais e os numéricos, sendo que algumas divergências de resultados foram justificadas devido ao modelo de contato, bem como ao fato de, durante o ensaio físico, as partículas terem danificado sua superfície. Desta forma, a autora concluiu que o modelo numérico pode ser estendido com mais confiança para análise de partículas mais realistas.

Ainda considerando o histórico de evolução do DEM no estudo de problemas geotécnicos, Ng (2009) utilizou o Método dos Elementos Discretos para simular ensaios

triaxiais verdadeiros (cúbicos). Por meio desse laboratório virtual foi possível estudar os materiais granulares no estado crítico. O processo de calibração apresentado na pesquisa é bastante similar ao apresentado anteriormente, no qual se calibra os parâmetros da partícula e do contato por meio da simulação numérica do experimento laboratorial. Ng (2009) avaliou a influência dos parâmetros mesoscópicos (orientação do vetor velocidade e força normal dos contatos) da partícula no comportamento macroscópico da amostra no estado crítico e concluiu que, ainda que as amostras fossem submetidas a tensões de confinamento distintas, o que resultava em parâmetros meso e macro distintos, o estado crítico era atingido em aproximadamente 40% de deformação axial.

Suzuki & Kuhn (2014) também conduziram uma pesquisa utilizando o DEM para avaliar ensaios biaxiais de cisalhamentos. Eles concluíram que os seguintes parâmetros devem ser cuidadosamente selecionados para que os resultados numéricos se aproximem dos resultados físicos:

- A taxa de deformação; e
- A taxa de amortecimento (*damping*).

Fleischmann *et. al* (2014) utilizaram o DEM para avaliar superfícies de plastificação de materiais não coesivos sujeitos a carregamentos isotrópicos. Os autores compararam os resultados obtidos com as superfícies proposta por: Lade-Duncan, Mohr-Coulomb, Drucker-Pradger e Matsuoka-Nakai. Todos os autores citados consideram, na construção de sua superfície de plastificação, a hipótese do meio contínuo. Os autores focaram suas simulações numéricas na variação dos seguintes parâmetros:

- Coeficiente de atrito entre as partículas;
- Taxa de deformação das partículas; e
- Rotação das partículas;

Por meio dessas simulações foi possível obter correlações entre o ângulo de atrito entre as partículas e o ângulo de atrito macroscópico do solo pós-pico, observando uma dispersão máxima de 8%. Além disso, a taxa média de trabalho de atrito dentro das amostras pode apresentar uma variabilidade maior do que 50% sem alterar significativamente o ângulo de atrito do material. Ambas as taxas são capazes de influenciar o equilíbrio de forças realizadas durante a integração numérica do modelo, podendo gerar instabilidades. As análises mais representativas do DEM consideram o modelo numérico quase-estático durante o intervalo de integração escolhido.

Trabalhos mais recentes foram realizados no programa de Geotecnia utilizando o DEM para representação de solos granulares ou meios muito fraturados em ensaios laboratoriais. Neves (2009) utilizou o programa PFC em ensaios biaxiais bidimensionais e estudou a influência do atrito entre as partículas, formato dos grãos e da tensão confinante em uma amostra densa e solta de solo, propondo em seu trabalho correlações entre o ângulo de atrito macroscópico e o ângulo de atrito da partícula. Zuluaga (2016) estudou experimentalmente como as características mesoscópicas do solo – tamanho das partículas, granulometria – afetam sua capacidade geomecânica, concluindo que a má graduação granulométrica do material afeta a sua quebra.

Albuquerque (2016) avaliou a influência do ângulo de atrito entre partículas na resistência do meio macroscópico para um estudo em estado plano de deformações utilizando o programa YADE. O autor concluiu que o ângulo de atrito influencia no trecho elástico linear da curva e deve ser o último parâmetro a ser calibrado. Tedesco (2016) também utilizou o mesmo *software* para simulação de ensaios nos enrocamentos a fim de avaliar fenômenos como quebra dos grãos, módulo de Young e atrito entre as partículas. A autora concluiu que o principal parâmetro, que controla o comportamento dos ensaios de compressão e cisalhamento, é o módulo de Young da partícula.

Medina (2017) utilizou o DEM para avaliar a capacidade de resistência e a deformabilidade de rochas sãs, utilizando o programa STAR-CCM+, no qual foram reproduzidos ensaios de tração por compressão diametral e ensaios triaxiais convencionais. O autor utilizou o modelo BPM (*bounded particle model*) para representar a cimentação entre as partículas e concluiu que, apesar de ter sido capaz de prever os mecanismos de ruptura, os valores de resistência à tração foram superestimados pelo método. Além disso, avaliou-se parametricamente a influência da rigidez da partícula no comportamento macroscópico e concluiu-se que, quanto maior a rigidez, maior a resistência à compressão e menor a deformação da amostra.

Até o presente momento, muitos autores avaliaram o potencial da utilização do DEM para prever comportamentos obtidos nos ensaios laboratoriais. Grima & Wypych (2011) utilizaram o DEM para análise de pilhas formadas por materiais granulares. O processo de calibração dos parâmetros micro e mesoscópico utilizado consiste em calibrar os parâmetros para um experimento laboratorial de pequenas dimensões como um corpo de prova e posteriormente validar esses parâmetros na simulação de um modelo reduzido. Nesta pesquisa, destaca-se que o solo foi representado por um material diferente do real. Os autores

utilizaram, para os ensaios laboratoriais, *pellets* de polietileno, e também se depararam com a necessidade de aumentar o tamanho dos grãos para reduzir o custo computacional do Método dos Elementos Discretos. Um dos objetivos alcançados na pesquisa foi avaliar a influência do aumento das partículas no comportamento do fenômeno estudado (formação das pilhas). Os principais parâmetros investigados foram:

- Densidade dos sólidos;
- Coeficiente de atrito estático; e
- Coeficiente de atrito dinâmico.

Os autores concluíram que os parâmetros mesoscópicos investigados foram os que mais afetaram o comportamento macroscópico da amostra, sendo, portanto, necessária uma caracterização acurada para que o modelo numérico reproduza um comportamento mais próximo do fenômeno real. Ressalta-se, ainda, que dentre os três fatores estudados, o coeficiente de atrito é o que mais influencia o comportamento macroscópico da amostra.

Com base nas pesquisas apresentadas, a magnificação das partículas demonstrou ser um método efetivo para reduzir o custo computacional nos procedimentos de calibração do modelo numérico. Os autores ressaltam que a representação de materiais reais pode ser obtida por meio do correto ajuste de parâmetros, como o coeficiente de atrito e as forças entre as partículas.

Salazar *et al.* (2015) utilizaram dessa técnica de magnificação das partículas para avaliar testes de cisalhamento direto em areias no DEM. As partículas foram magnificadas em duas e quatro vezes o seu diâmetro inicial. A amostra com tamanho idêntico ao experimento resultava em uma amostra com 70 mil partículas. Os autores reduziram os custos computacionais em aproximadamente 99% com a magnificação das partículas, ou seja, a simulação ocorreu 20 vezes mais rápido. Os autores ressaltaram que houve uma pequena perda de acurácia dos resultados na magnificação de duas vezes o diâmetro das partículas, e uma perda sensível na magnificação de quatro vezes, o que indica que duas vezes seria a escala máxima. A determinação da escala deve ser conduzida considerando a necessidade de racionalizar e recalibrar os parâmetros para, assim, tentar conservar o fenômeno que se deseja estudar.

Lin e Wu (2017) também utilizaram a técnica de magnificação das partículas para avaliar os efeitos das velocidades rotacionais em um ensaio biaxial servo-controlado. Os autores avaliaram a magnificação do diâmetro em $4d_{50}$, $8d_{50}$ e $12d_{50}$. Os autores observaram

que, qualitativamente, os resultados observados eram similares; no entanto, para fins quantitativos, foi concluído que, quando a relação entre o diâmetro do volume médio e a média do diâmetro do grão (d_{50}) era maior que dez vezes, a diferença das velocidades rotacionais médias não eram significativas. Esse resultado corroborou a conclusão da pesquisa anterior, de que a magnificação depende do fenômeno a ser estudado e precede de um estudo prévio para verificação da sensibilidade dos resultados a sua utilização.

Chevalier *et al.* (2012) também utilizaram o DEM aplicado a problemas de contorno geomecânicos, associado à construção de um Modelo Reduzido (Figura 2.2) para analisar o problema de escotilhas. Seu estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a influência de parâmetros friccionais macro-mecânicos. O autor compara os valores de coeficiente empuxo (K_0), deduzidos da teoria de Terzaghi, com os valores obtidos experimentalmente. O estudo é conduzido com dois materiais reais, apresentando uma curva granulométrica, o que caracterizaria um material mais fino e o outro mais pedregulhoso.

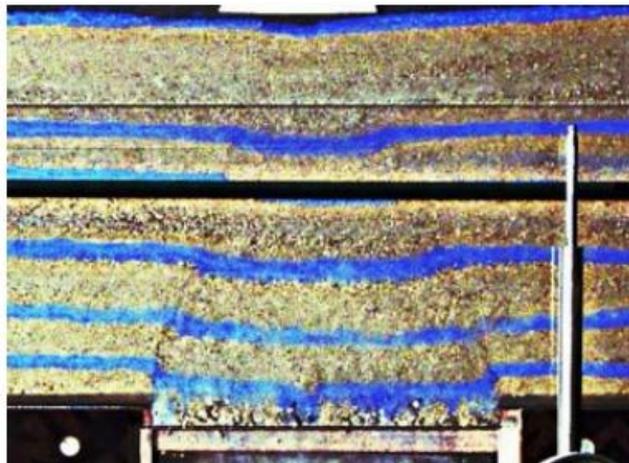


Figura 2.1 – Modelo físico tridimensional reduzido de uma escotilha (Chevalier *et al.*, 2012)

A utilização do DEM permitiu concluir que o formato das partículas tem uma grande influência sobre o comportamento macromecânico e, particularmente, sobre a resistência ao cisalhamento. Ou seja, o formato das partículas determina indiretamente a resposta da camada de solo estudada. No entanto, partículas com diferentes formas e com resistência ao cisalhamento similar apresentavam comportamentos parecidos durante os testes. Por fim, os testes numéricos apresentaram bons resultados em comparação aos testes físicos, mostrando que a utilização do DEM associado ao Modelo Reduzido obteve bons resultados.

Khanal *et al.* (2017) também avaliaram a potencialidade da utilização do DEM associado a um Modelo Reduzido (Figura 2.4) para o estudo de um talude sujeito à compressão na crista de montante. O Modelo Reduzido foi ensaiado com o solo real (areia).

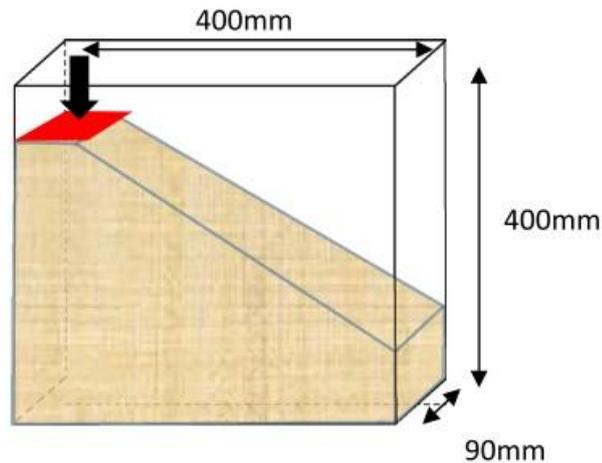


Figura 2.2 – (a) Talude sujeito à compressão de montante (Khanal *et al.* 2017)

As simulações numéricas utilizando o DEM foram realizadas com 23.716 *clumps* de partículas formados pela união de duas partículas circulares, e foram realizadas em um espaço bidimensional a fim de reduzir o custo computacional. O modelo numérico foi calibrado utilizando o mesmo método já apresentado em pesquisas anteriores e se mostrou muito sensível à taxa de carregamento.

Khanal *et al.* (2017) concluíram que, para condições de carregamento quase-estáticas, a simulação numérica foi capaz de prever o comportamento força-deslocamento e a ruptura do talude foi observada experimentalmente. Apesar de o Modelo Reduzido ser tridimensional, a análise numérica bidimensional demonstrou ser uma ferramenta de condução rápida de investigação de vários fenômenos físicos do sistema.

Na área de utilização do DEM associado aos mecanismos de ruptura das fundações, destaca-se os autores Gabrieli *et al.* (2009) conduziram uma pesquisa que avaliou o potencial da utilização do DEM associado à utilização de um Modelo Físico Reduzido aplicado a um problema de contorno geotécnico.

Gabrieli *et al.* (2009) investigaram fundações superficiais assentes em taludes granulares. Os dados físicos utilizados para avaliação do potencial do DEM foram obtidos por meio da instrumentação de um Modelo Reduzido tridimensional, conforme apresentado na Figura 2.3 – Modelo físico tridimensional reduzido de uma fundação superficial em um talude granular (. O Modelo Físico Reduzido foi devidamente instrumentado por meio dos convencionais transdutores de deslocamento (LVDTs) e das imagens capturadas via GeoPIV.

O GeoPIV consiste em uma técnica de avaliação dos dados da imagem, como a variação natural do formato e da cor dos grãos para rastrear sua trajetória, permitindo a medição dos deslocamentos e, conseqüentemente, da deformação do material em estudo. Essa técnica permitiu a visualização do mecanismo de ruptura e das bandas de cisalhamento por meio da coloração da areia, que funcionou com uma espécie de marcador.

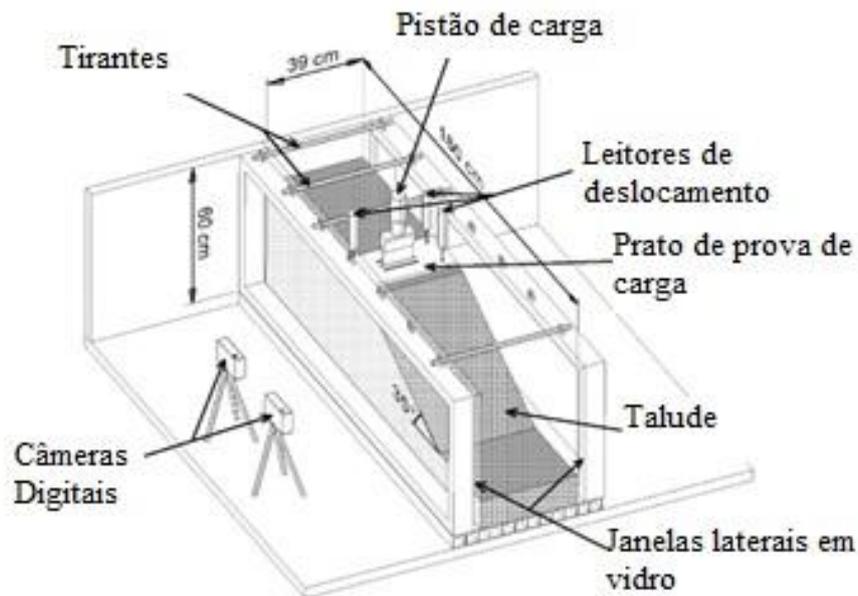


Figura 2.3 – Modelo físico tridimensional reduzido de uma fundação superficial em um talude granular (Gabrieli *et al.* 2009)

Gabrieli *et al.* (2009) calibraram o modelo numérico discreto por meio da realização de ensaios triaxiais e, para tanto, os parâmetros observados foram:

- O ângulo de atrito interno entre as partículas;
- Os coeficientes de rigidez normal e tangencial; e
- Porosidade.

Gabrieli *et al.* (2009) também observaram que, no estado crítico, não há uma redução do índice de vazios, conforme constatado nos ensaios físicos, tendo atribuído essa divergência à dificuldade encontrada, pois a abordagem tradicional do DEM não prevê o fenômeno de quebra dos grãos.

Após calibrar os parâmetros do modelo numérico, os autores, ao tentarem reproduzir o ensaio físico reduzido, se depararam com as limitações computacionais, pois o solo utilizado

estava em seu tamanho real (areia), logo as partículas apresentavam-se em um número muito elevado, o que implicaria em um alto custo computacional.

A fim de reduzir o custo computacional, Gabrieli *et al.* (2009) buscaram avaliar uma escala de grãos para que seu comportamento pudesse ser previsto de forma representativa, e ressaltam que vários autores estudaram a influência de aumentar as partículas do grão por meio da razão entre o raio das esferas (r) e o tamanho característico do problema examinado (L). Os autores concluíram que, a partir da escala 1:100, o efeito do raio torna-se insignificante, garantindo as seguintes hipóteses:

1. Invariância do coeficiente de rigidez: depende apenas da natureza do contato e das propriedades elásticas do material que constitui o grão dos solos;
2. Invariância do ângulo de atrito entre as partículas: independente da razão r/L quando o valor é inferior a 1/100;
3. Invariância da porosidade com o tamanho do grão: quando se tem um elevado número de elementos, e a forma da curva granulométrica é mantida, a porosidade é independente do fator de escala.

Por fim, Gabrieli *et al.* (2009) concluíram que os resultados obtidos pelo modelo numérico foram satisfatórios para previsão dos deslocamentos e da capacidade de carga de fundação, comparados aos resultados do Modelo Físico Reduzido, ficando evidente a influência do ângulo de atrito entre as partículas no modelo numérico. Além disso, os autores ressaltaram a necessidade de caracterizar bem os parâmetros do material para calibrar o modelo, bem como de representar adequadamente as condições de fronteira.

Fu *et al.* (2016) também utilizaram o Método dos Elementos Discretos bidimensional para avaliar o teste de carga em fundações superficiais. Para calibrar o modelo, assim como proposto nessa pesquisa, os autores utilizaram um teste biaxial em um material idealizado diferente do solo real. Foram utilizadas barras de alumínio visando avaliar a influência dos seguintes parâmetros no comportamento macroscópico:

- Coeficiente de atrito entre as partículas;
- Dimensões da placa adotada para o teste de carga;
- Rugosidade da placa; e
- Fatores de escala adotados para a placa.

As barras de alumínio foram escolhidas pois o seu peso específico (aproximadamente $2,69 \text{ g/cm}^3$) é similar ao das partículas granulares do solo (aproximadamente $2,65 \text{ g/cm}^3$).



Figura 2.4 – (a) Ensaio Biaxial para calibrar o DEM (b) Amostra de solo idealizado constituída por partículas de alumínio (Fu *et al.* 2016)

Após a calibração, os autores conduziram os estudos variando os parâmetros elencados e concluíram que os resultados obtidos foram satisfatórios, no entanto, ressaltaram a dificuldade de se reproduzir as condições reais tanto em modelos numéricos, quanto em ensaios físicos reduzidos. Apesar da dificuldade encontrada, o modelo numérico possibilitou um ganho qualitativo do entendimento do funcionamento a nível de grãos em comparação com o modelo físico.

Fu *et al.* (2016) também concluíram que o ângulo de atrito, conforme o esperado da formulação analítica clássica, é um dos parâmetros que mais influenciam o comportamento macroscópico do solo e a transmissão de forças entre partículas. Um aumento no coeficiente de atrito interparticular resulta em um aumento da sua capacidade de carga e em um maior módulo de deformação, que, conseqüentemente, traduz-se em uma menor zona perturbada.

Além do ângulo de atrito, outro parâmetro que também gerou resultados que merecem destaque foi o coeficiente de rugosidade adotado para placa. Esse coeficiente influenciou a capacidade de carga e o modo de ruptura do solo, pois quando se adotou uma maior rugosidade, o atrito foi capaz de reter as partículas abaixo da placa, gerando uma ruptura assimétrica.

Duan *et al.* (2018) utilizou o DEM para avaliar a diferença entre as estacas cravadas e escavadas por meio do programa PFC2D e ressaltou que as estacas cravadas obtiveram uma melhor performance em relação a carga devido ao processo de cravação e que os diferentes

tipos de estacas eram afetados diferentemente pelo atrito, à estaca escavada era afetada no início do processo de cravação e à estaca escavada só a partir de uma determinada profundidade.

Liu *et al.* (2019) utilizou o DEM para investigar o processo de cravação de estacas vazadas no solo. Os autores estudaram a influência do diâmetro das estacas no processo de formação da zona de cisalhamento do solo e concluíram que a zona de cisalhamento reduz à medida que se afasta da ponta da estaca. A zona de cisalhamento foi determinada pelo d_{50} do solo e da profundidade cravada tendo pouca influência do diâmetro da estaca.

Shi *et al.* (2019) utilizou o DEM para avaliar o processo de cravação de estacas helicoidais em solos granulares e conclui que o modelo proposto para o DEM consegue reproduzir efetivamente o comportamento esperado da literatura, ele ressalta que o fato do DEM ter sido calibrado com o modelo reduzido limita a obtenção das tensões observadas em solo. Além disso, são necessárias velocidades altas para cravação das estacas, pois há um rearranjo das partículas que dificulta a cravação da estaca.

Outros autores ainda utilizaram o DEM aplicado a problemas de contorno geotécnico, como Boon *et al.* (2015), que o aplicaram ao dimensionamento de reforço dos túneis. Yang *et al.* (2018) utilizaram o método para avaliar a interação entre solos coesivos e o concreto. Zhao *et al.* (2018) utilizaram o DEM associado ao Método dos Elementos Finitos (FEM) na tentativa de aliar os benefícios presentes nos dois métodos para o estudo de uma fundação típica de ponte, denominada *Caisson*. A utilização dos dois métodos acoplados permitiu a visualização do mecanismo de ruptura do ponto de vista meso e macroscópico. Rui *et al.* (2016) utilizaram o DEM para avaliar o efeito de arqueamento do solo proporcionado pela abertura de escotilhas em experimentos físicos bidimensionais.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 FUNDAÇÕES

3.1.1. FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

Segundo a NBR 6122:2019 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019), as fundações superficiais se caracterizam por transmitirem a carga ao terreno, predominantemente pelas pressões distribuídas por meio da base da fundação. Além disso, a profundidade do assentamento deve ser inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. A norma preconiza três principais formas para determinar a pressão admissível:

- a) Por meio da teoria desenvolvida na mecânica dos solos;
- b) Por meio do ensaio prova de carga sobre placa;
- c) Por meio de métodos semiempíricos; ou
- d) Por meio de métodos empíricos.

Das formas indicadas pela norma, destacam-se as formulações desenvolvidas na mecânica dos solos e propostas por Terzaghi (Equação 3-1), sendo, posteriormente, estendidas por Meyerhof (Equação 3-2). De acordo com a teoria proposta, a ruptura de fundações superficiais ocorre devido ao atrito da base com o solo, que se desloca verticalmente e lateralmente, formando uma cunha (zona I) e gerando duas zonas de cisalhamento, uma radial (zona II) e outra linear (zona III), conforme apresentado na Figura 3.1. Figura 3.1 – Ruptura do maciço sujeito ao carregamento de um bloco de fundação

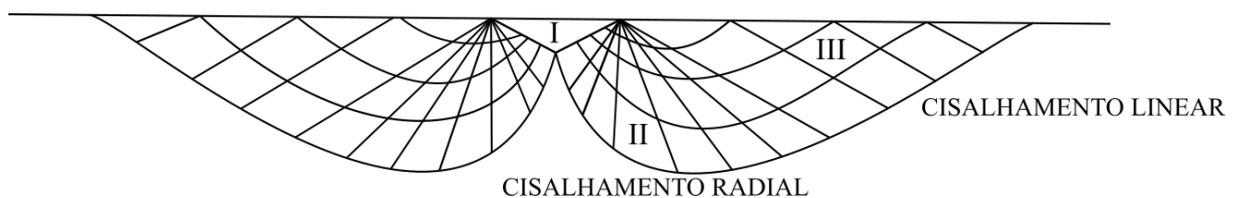


Figura 3.1 – Ruptura do maciço sujeito ao carregamento de um bloco de fundação

Desta forma, Terzaghi deduziu que a formulação de capacidade de carga de fundações superficiais para um solo homogêneo, com uma fundação corrida e superficial, pode ser expressa por:

$$P_{adm} = c.N_c + \gamma.b.N_\gamma + \gamma.h.N_q \quad (3-1)$$

onde:

P_{adm} : é a pressão admissível para a sapata;

c : corresponde à coesão do solo;

γ : corresponde ao peso específico do solo;

b : corresponde à base da fundação;

h : corresponde à altura de solo em que a fundação foi assentada; e

N_c, N_γ, N_q : correspondem, respectivamente, aos fatores de capacidade de suporte que são tabelados ou calculados em função do ângulo de atrito do solo.

Meyherof (1951) generalizou essa solução, permitindo aplicá-la a fundações de diferentes formatos, por meio da seguinte equação:

$$P_{adm} = S_c \cdot c \cdot N_c + S_\gamma \gamma \cdot b \cdot N_\gamma + S_q \gamma \cdot h \cdot N_q \quad (3-2)$$

onde:

S_c, S_γ, S_q : correspondem, respectivamente, a coeficientes de forma ligados às dimensões das fundações.

Na formulação teórica, é possível observar que a capacidade de carga de uma fundação superficial é composta por três parcelas: a primeira se deve à coesão do solo; a segunda ao atrito; e a terceira à sobrecarga.

3.1.2. FUNDAÇÕES PROFUNDAS

As fundações profundas são utilizadas desde a antiguidade, no entanto, o entendimento de seu mecanismo de funcionamento é bastante complexo, pois a formulação teórica de sua mecânica se sustenta em considerações fortemente empíricas (Tavares, 2012). A fim de melhor compreender esse comportamento, será feito uma breve revisão do mecanismo de funcionamento das estacas. As estacas submetidas a carregamentos verticais transferem sua carga ao solo adjacente por meio de sua ponta e de sua face lateral (fuste), ou seja, o comportamento de uma fundação estaqueada é baseado no atrito gerado pelo fuste e na capacidade de resistência à compressão criada na ponta da estaca.

3.1.3. CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS ISOLADAS

A capacidade de carga das estacas é estimada por meio de equilíbrio entre as cargas atuantes no sistema (peso próprio e sobrecarga) e da resistência do solo devido ao atrito gerado na interface do sistema, conforme apresentado na Figura 3.2.

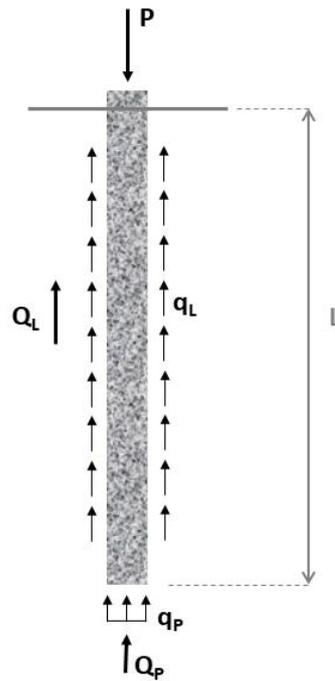


Figura 3.2 – Esquema de uma estaca submetida à compressão

O equilíbrio de uma estaca é expresso por meio da equação de equilíbrio entre as forças atuantes na estaca. Geralmente, o peso próprio das estacas é considerado desprezível diante das cargas suportadas pelo sistema, e sua resistência total pode ser descrita numericamente por:

$$Q = \int_0^L \pi \cdot d \cdot q_s(z) \cdot dz + q_b \cdot \frac{\pi d_b^2}{4} \quad (3-3)$$

onde:

q_r : capacidade de resistência da estaca;

q_b : resistência unitária mobilizada na base da estaca;

q_s : resistência unitária mobilizada ao longo da superfície lateral;

d_b : diâmetro da base;

d : diâmetro da estaca;

L : comprimento da estaca;

Q : resistência total da estaca.

Segundo Cordeiro (2017), a resposta do grupo de estacas carregadas verticalmente é semelhante à resposta da estaca isolada. A transferência de cargas de um grupo de estaca também se dá por meio do atrito mobilizado lateralmente ou pela resistência da ponta. No entanto, o espaçamento entre as estacas pode afetar a eficiência com que o elemento é capaz

de transmitir as cargas ao solo. A capacidade de carga é determinada pelo somatório das capacidades de carga das estacas isoladas por um fator de eficiência:

$$\eta = \frac{Q_t}{\sum_{i=1}^n Q} \quad (3-4)$$

onde:

n : fator de eficiência;

Q_t : capacidade de carga do grupo de estacas; e

Q : capacidade de carga das estacas individuais no grupo.

3.2 FORMULAÇÃO DE ANÁLISE LIMITE

A análise limite é um método básico da teoria da plasticidade clássica que se baseia nas seguintes hipóteses, de acordo com Chen (1975):

- As variações de geometria são pequenas até o ponto de início do colapso plástico do material;
- Convexidade da superfície de escoamento;
- Associatividade do fluxo plástico;
- Material elasto-plástico ideal;

Segundo Salgueiro (2010), a análise limite está fundamentada em dois teoremas: o Teorema Cinemático ou do Limite Inferior e o Teorema Estático ou do Limite Superior. Esses teoremas apresentam um limite inferior e superior para carga de colapso, o que indica que o valor exato se situa entre esses dois limites. Caso os valores sejam iguais, foi encontrada a solução exata.

3.2.1. TEOREMA DA ANÁLISE LIMITE SUPERIOR (CINEMÁTICO)

O Teorema da Análise do Limite Superior enuncia que o colapso ocorre quando o trabalho das forças exteriores for igual ao trabalho das tensões internas, considerando um mecanismo virtual compatível. Portanto, é necessário calcular o trabalho virtual realizado pelas tensões internas e pelas forças exteriores para um incremento de deslocamento. O trabalho das tensões externas é dado por:

$$W_e = \int_{\Omega} \vec{b} \cdot \vec{u}^* d\Omega + \int_{\Gamma_{\sigma}} \vec{t} \vec{u}^* d\Gamma \quad (3-5)$$

onde:

W_e : é o trabalho das forças externas;

\vec{b} : forças de massa;

\vec{u}^* : deslocamento virtual;

\vec{t} : forças externas;

Γ : fronteira estática; e

Ω : domínio do corpo.

O trabalho das tensões internas é o trabalho dissipado pela deformação plástica no material, no campo de deslocamentos do mecanismo compatível, e é dado pela equação:

$$W_i = \int_{\Omega} D d\Omega \quad (3-6)$$

onde:

W_i : é o trabalho interno;

D : energia dissipada por unidade de volume, portanto $D = \varepsilon^P \cdot \sigma$.

Barros *et al.* (2014) expressaram a formulação do Teorema Cinemático em termos computacionais, que pode ser descrito por meio do multiplicador plástico (α):

$$\nabla^t u = \alpha \cdot \nabla^t f(\alpha) \quad (3-7)$$

onde:

$f(\alpha)$: é o critério de ruptura adotado.

3.2.2. TEOREMA DA ANÁLISE LIMITE INFERIOR (ESTÁTICO)

O Teorema da Análise Limite Inferior se baseia na condição de que, se um conjunto de forças exteriores está em equilíbrio com as tensões internas que em nenhum ponto violam o critério de ruptura, as forças exteriores aplicadas não causam o colapso (Salgueiro, 2010). Esse teorema pode ser descrito considerando o conjunto das seguintes equações de equilíbrio:

$$\nabla^t \sigma + \vec{b} = 0 \quad (3-8)$$

$$\vec{n}\sigma = \lambda \vec{t} \quad (3-9)$$

$$f(\sigma) \leq 0 \quad (3-10)$$

onde:

∇^t : é o divergente;

λ : é o fator de colapso;

\vec{n} : vetor associado ao plano no qual se avalia as tensões; e

σ : é o campo de tensões.

3.2.3. ANÁLISE LIMITE E O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A resolução da Teoria de Análise Limite se baseia em equações diferenciais de equilíbrio ou compatibilidade que devem ser satisfeitas para todos os pontos do domínio (Barros *et al.*, 2014). No entanto, essa resolução não é viável e, dessa forma, as equações são solucionadas na média (formulação fraca). Para tanto, é necessário escolher uma função de interpolação que sempre possuirá um erro associado. Com isso, a resolução via Análise Limite utiliza, de forma subsidiária, o Método dos Elementos Finitos para que seja possível obter os campos de tensão e deslocamento que satisfazem as condições de equilíbrio e compatibilidade (Silva, 2003).

3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O Método dos Elementos Discretos é o método numérico pelo qual o meio analisado é constituído por um conjunto de partículas com propriedades mecânicas e geométricas definidas. O DEM trabalha com variáveis físicas simples, como forças de contato, momentos, deslocamentos e rotações.

Esse método é adequado para o estudo de materiais particulados, já que considera explicitamente sua natureza discreta. O DEM permite avaliar o comportamento físico e mecânico de materiais granulares, mediante a compreensão das propriedades mecânicas na escala de partículas e da interação entre as mesmas.

O DEM foi criado por Cundall em 1971 a fim de solucionar problemas de mecânica das rochas, baseando-se na Segunda Lei de Newton, cujos fundamentos teóricos datam de

1697 (Albuquerque, 2016). O Método dos Elementos Discretos aplicado à modelagem de solos foi apresentado pela primeira vez em 1979, por Cundall & Strack.

Segundo O'Sullivan (2011), o DEM consiste em uma análise transiente que considera as interações dinâmicas entre um sistema de partículas. As partículas no DEM são consideradas corpos rígidos que interagem entre si por sistemas de molas, amortecedores e/ou blocos deslizantes que simulam os contatos. A cada passo de tempo considerado na análise transiente, as partículas se movem e novos contatos são criados e antigos contatos deixam de existir. Dessa forma, a rigidez global do sistema é alterada. Essa criação e extinção de interações nos contatos introduz uma não linearidade na resposta do sistema.

Os princípios básicos do DEM consistem em especificar a geometria do sistema; escolher o modelo de contato adequado ao problema em estudo; e definir o sequenciamento das forças ou dos deslocamentos impostos ao problema. O processo de cálculo é feito mediante uma análise transiente (ou dinâmica), tipicamente conhecida por especificar o número de incrementos de tempo.

Os incrementos de tempo precisam ser suficientemente pequenos para que permitam que as partículas só entrem em contato com as vizinhas. Dessa forma, as principais hipóteses usadas nesse método são:

- a) As partículas são elementos rígidos, que possuem inércia finita, descrita analiticamente;
- b) As partículas podem se mover livremente uma da outra, podendo girar e se deslocar;
- c) O contato entre duas partículas acontece unicamente sobre uma área infinitesimal;
- d) As partículas podem se sobrepor levemente nos contatos, sendo essa interpenetração uma analogia com as deformações superficiais da partícula (compressão). As interpenetrações são consideradas pequenas;
- e) As forças de compressão entre partículas podem ser calculadas a partir da interpenetração e as de tração (no caso de materiais cimentados), a partir da separação das partículas;
- f) O passo de tempo utilizado no esquema de integração de diferenças finitas, necessário para o cálculo do movimento, deve ser suficientemente pequeno para garantir a estabilidade. Isso se associa à hipótese feita pelo DEM com respeito ao incremento de tempo, a qual assume que o

incremento de tempo é suficientemente pequeno para garantir que, durante um único intervalo de tempo, as perturbações só se propagam para as partículas vizinhas (O’Sullivan, 2011).

O’Sullivan (2011) aborda também a utilização do DEM em modelos geomecânicos, ressaltando o ganho de entendimento na escala de grãos ao aplicar o Método dos Elementos Discretos a problemas geotécnicos.

3.3.1. VISÃO GERAL SOBRE O MÉTODO

Segundo Sadd *et al.* (2000), o conceito geral do método pode ser descrito considerando um conjunto de partículas bidimensionais, como na Figura 3.3. Isolando a partícula i e aplicando as leis de Newton, tem-se que:

$$\sum_{j=1}^N F^{ij} + F^i = m_i \ddot{x}_i \quad (3-11)$$

$$\sum_{j=1}^N M^{ij} + M^i = I_i \ddot{\theta}_i \quad (3-12)$$

onde:

F^{ij} : são as forças do contato j com a partícula i ;

F^i : representa qualquer força de corpo que atua na partícula i ;

M^{ij} : são os momentos resultantes (sobre o centro de massa da partícula) das forças de contato F ;

M^i : é o momento resultante de qualquer força de corpo;

m_i : é a massa da partícula; e

I_i : é o momento de inércia da partícula.

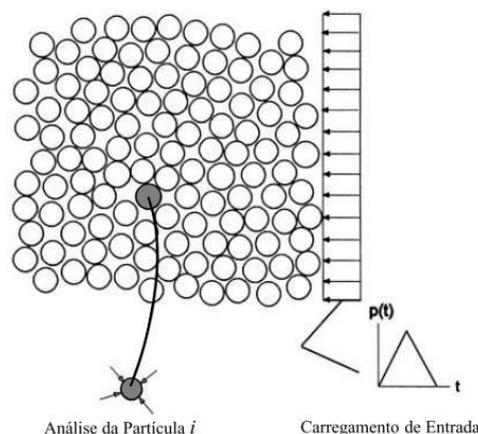


Figura 3.3 – Procedimento do Método dos Elementos Discretos (Sadd *et al.*, 2000)

A partir da obtenção da aceleração linear (\ddot{x}_i) e angular ($\ddot{\theta}_i$) para cada partícula, as velocidades e os deslocamentos podem ser obtidos via integração numérica com o uso de diferenças finitas. Assim, faltaria definir como se dá a resposta do contato entre duas partículas interagindo entre si. Para isto, são estabelecidas leis constitutivas do contato, as quais dependem do fenômeno micromecânico que se deseja simular (Zuluaga, 2016). Geralmente, esses modelos relacionam a velocidade, o deslocamento e a força no contato.

3.3.2. CONTATOS ENTRE AS PARTÍCULAS

Nesta seção, foram apresentadas as principais características das partículas que influenciam a determinação do contato, etapa mais custosa computacionalmente para a utilização do Método dos Elementos Discretos.

3.3.2.1. FORMA DAS PARTÍCULAS

A detecção dos contatos entre as partículas é realizada por diversos algoritmos que, além de dependerem da ferramenta utilizada, dependem também da forma da partícula. O DEM geralmente utiliza como geometria básica das partículas, elementos simples, como esferas e cilindros. Essa é uma forma de reduzir o custo computacional na detecção dos contatos, uma vez que, para verificar as detecções de partículas esféricas, é apenas necessário verificar se a distância entre os centros de duas partículas é menor que a soma dos seus raios (O’Sullivan, 2011), o que pode ser matematicamente descrito por:

$$\delta_{ij} \equiv r_i - r_j - |\vec{r}_i - \vec{r}_j| > 0 \quad (3-13)$$

onde:

δ_{ij} : é a denominada compressão mútua entre as partículas i e j;

R_i : é o raio da partícula;

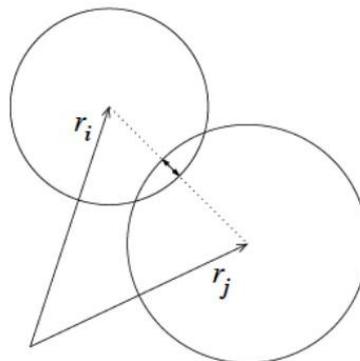


Figura 3.4 – Contato entre elementos esféricos (Luding, 2009)

No entanto, a representação de uma partícula por meio de uma esfera pode não reproduzir realisticamente o formato dos grãos. Em uma tentativa de melhor reproduzir o fenômeno, os grãos podem ser representados por *clumps*, que são agregações constituídas de uma ou mais esferas que se interpenetram, dando forma diferente aos grãos.

3.3.2.2. DETECÇÃO DOS CONTATOS

Antes de descrever os modelos de contato, é necessário compreender como é realizada a determinação dos possíveis contatos. Esse processo demanda elevado custo computacional, uma vez que a cada passo de tempo, as possíveis colisões devem ser atualizadas pelas integrações das Leis de Movimento de Newton.

O processo de checagem dos contatos geralmente consiste em um gradeamento, conforme apresentado na Figura 3.5. A determinação do tamanho do gradeamento é proporcional ao tamanho das partículas, e, geralmente, a área verificada é de 3 a 5 vezes o tamanho da maior partícula.

Determinado o gradeamento, o processo de checagem é realizado por meio do algoritmo definido. Localizados os contatos, é possível definir as forças que, ao fim do passo de tempo, determinarão as novas posições das partículas por meio do processo de integração numérica das Leis de Movimento de Newton. Dessa forma, as posições das partículas são atualizadas e o processo de detecção de colisões é reiniciado (Tedesco, 2016).

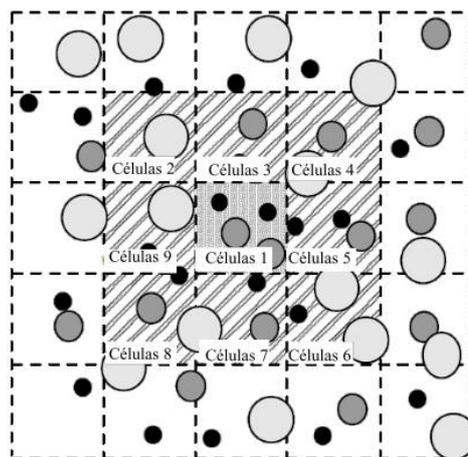


Figura 3.5 – Mapeamento usado para a determinação dos contatos em um problema 2D
(O’Sullivan, 2011)

A determinação das forças após a detecção do contato é realizada por meio de modelos de contato, que são desenvolvidos para representar tanto o comportamento na direção normal,

quanto tangencial entre os grãos. Dentre os modelos mais conhecidos, se encontram: os modelos propostos por Cundall & Strack (1979) e por Hertz (1882) para descrição do contato normal. Para o contato tangencial, o modelo mais conhecido é o modelo de Mindlin-Deresiewicz (1949). O comportamento força-deslocamento nesses contatos depende das propriedades das partículas, seus tamanhos e as condições das suas superfícies (Thornton, 2015).

Esses modelos podem, ainda, ser divididos em duas técnicas de colisão: os modelos de contato suaves e não suaves. O primeiro aborda a existência de penetração entre as partículas, enquanto o segundo as inibe. O método mais tradicional é o de contato suave. A solução do sistema é feita mediante um esquema numérico explícito, no qual cada partícula é tratada individualmente.

3.3.3. CÁLCULO DAS FORÇAS-DESLOCAMENTOS

O cálculo das forças-deslocamentos permite a determinação das novas posições e forças atuantes nas partículas, no entanto, é necessário definir modelos de contato. Neste item, apresenta-se a fundamentação teórica do modelo de contato utilizado nesta dissertação.

3.3.3.1 MODELO DE CONTATO CUNDALL & STRACK

O modelo de contato foi proposto por Cundall & Strack (1979), baseado na Segunda Lei de Newton e na relação força-deslocamento que obedece à lei de Hooke nos contatos. Este modelo é baseado na resolução das equações individuais dos contatos entre partículas, evitando a criação de um sistema global e reduzindo a necessidade computacional (O'Sullivan, 2018):

$$\Delta F_n = k_n \cdot \Delta n_{t1} \quad (3-14)$$

onde:

ΔF_n : é a força incremental normal;

k_n : é a rigidez normal;

Δn_{t1} : é o deslocamento sobreposto existente no primeiro passo de tempo (ver Figura 3.6).

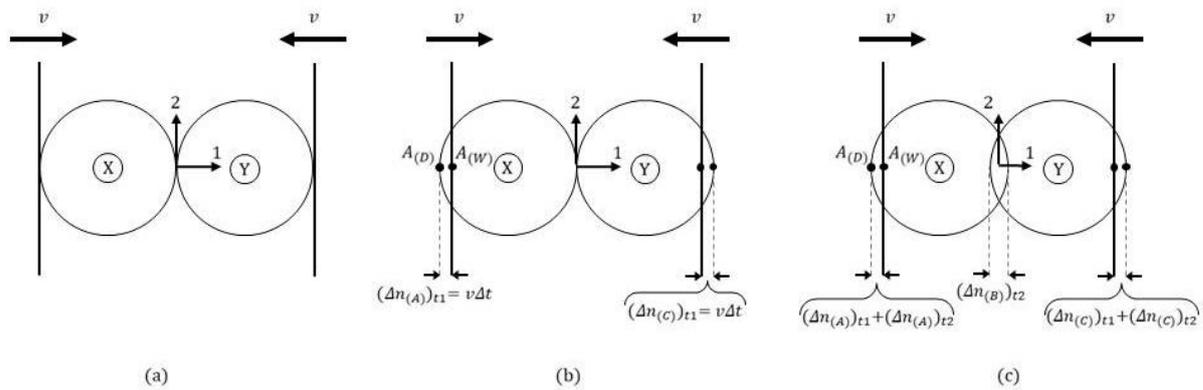


Figura 3.6 – Compressão de dois discos entre duas paredes rígidas; (a) $t = t_0$; (b) $t = t_1 = t_0 + \Delta t$; (c) $t = t_0 + 2\Delta t$ (Cundall & Strack, 1979)

Se duas esferas possuírem rigidezes distintas, então pode ser adotado o módulo de rigidez normal secante como:

$$k_{eq} = \frac{k_n^{[A]} \cdot k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad (3-15)$$

onde:

$k_n^{[A]}$: é a rigidez normal da partícula A;

$k_n^{[B]}$: é a rigidez normal da partícula B; e

k_{eq} : é a rigidez normal equivalente das duas partículas.

O modelo de Cundall & Strack (1979) possui uma formulação matemática simples para descrever a relação força-deslocamento, sendo aplicável a modelos estáticos e dinâmicos devido a sua alta estabilidade. Esse modelo é utilizado geralmente para descrever deformações elásticas e, geralmente, pequenas. Ainda que o solo não seja um material elástico, o modelo de Cundall & Strack (1979) é um modelo muito acurado para simular seu comportamento (Peng *et. al*, 2014). Na direção tangencial, a força de cisalhamento é um vetor cuja direção é oposta ao deslocamento:

$$\Delta \vec{F}_s = -k_s \cdot \Delta \vec{s} \quad (3-16)$$

Por similaridade, se duas esferas possuírem rigidez cisalhante distintas, então o módulo pode ser escrito como:

$$k_{seq} = \frac{k_s^{[A]} \cdot k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad (3-17)$$

onde:

$k_s^{[A]}$: é a rigidez ao cisalhamento da partícula A;

$k_s^{[B]}$: é a rigidez ao cisalhamento da partícula B; e

k_{seq} : é a rigidez ao cisalhamento equivalente das duas partículas.

É importante notar que, enquanto a força normal cresce com sobreposição das partículas, a força de cisalhamento é limitada pelo atrito:

$$F_s = \mu \cdot F_n \quad (3-18)$$

onde:

μ : é o coeficiente de atrito diretamente proporcional à tangente do ângulo de atrito.

3.3.4. CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Segundo O'Sullivan (2011), as condições iniciais e de contorno têm papel fundamental nos modelos que consideram o meio contínuo, bem como nos modelos discretos. Nos modelos discretos, as fronteiras precisam ser descritas de forma que as partículas sejam fixadas ou tenham suas posições indicadas. Existem quatro tipos de fronteiras mais comumente utilizadas no DEM, são elas: fronteiras rígidas, condições periódicas, membranas e limites axissimétricos.

As fronteiras rígidas são as mais utilizadas nos modelos discretos, pois são fáceis de descrever analiticamente. Elas não apresentam inércia, e as forças de contato entre a fronteira e as partículas são determinadas atualizando as coordenadas das partículas. Essas condições podem ser comparadas com as condições de contorno que impõem os deslocamentos no Método dos Elementos Finitos. As fronteiras rígidas podem ser do tipo plana ou curva.

As condições de contorno periódicas, também largamente utilizadas em simulações geomecânicas, permitem a simulação de um grande número de partículas, uma vez que só se considera um subdomínio selecionado, conforme ilustrado na Figura 3.7.

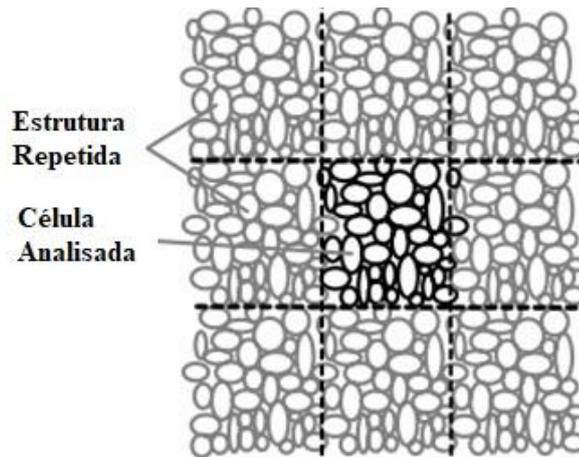


Figura 3.7 – Contornos Periódicos (O’Sullivan, 2011)

Os subdomínios são espaçados igualmente em todos os eixos, formando uma espécie de malha. É importante ressaltar que a determinação dos subdomínios considera o conceito de volume representativo. Em problemas geomecânicos, as condições iniciais têm enorme influência sobre o seu comportamento. A título de exemplo, pode-se observar a influência da granulometria e da porosidade na resistência do solo ensaiado (Albuquerque, 2016).

Segundo O’Sullivan (2011), a resposta de sistemas granulares é altamente dependente dos seguintes parâmetros: granulometria; estado inicial (densidade do empacotamento e níveis de tensões); anisotropia das partículas; e tensões e orientação das tensões principais.

Morfa *et al.* (2018) ressaltam vários métodos de cálculo de diâmetro equivalente para caracterização inicial das partículas que compõem a amostra a ser simulada. Os autores apresentam que as partículas reais, no geral, não possuem formato circular e precisam ser caracterizadas de forma simples por partículas mais simples, como esferas, que são identificadas apenas pelo raio. Assim, são propostas várias relações que conservam determinadas grandezas, como volume, área e perímetro, a fim de encontrar uma partícula com raio equivalente. Além disso, foi apresentado um novo método de avaliação da homogeneidade da amostra.

Portanto, como o DEM é baseado em um processo que utiliza o estado anterior para calcular o próximo, as condições iniciais devem ser bem definidas, sendo geralmente delimitadas durante a geração da amostra. Albuquerque (2016) apresenta os métodos estáticos e dinâmicos de geração da amostra e, conseqüentemente das condições iniciais mais utilizadas por meio da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Método de Geração da Amostra (adaptado de Albuquerque, 2016)

Método	Classe	Velocidade	Densidade	Controle sobre porosidade	Controle sobre granulometria
Deposição Gravitacional	Dinâmico	Lento	Baixa a média	Não	Sim
Geração Aleatória	Construtivo	Variável	Baixa a média	Não	Sim
Geração aleatória + compressão das paredes	Dinâmico	Lento	Média a alta	Médio	Sim
Geração aleatória + expansão	Dinâmico	Rápido	Alta	Preciso	Não
Sub-compactação de Jiang	Dinâmico	Muito Lento	Média a alta	Não	Sim
Triangulação	Construtivo	Muito rápido	Média a alta	Não	Não
Avanço Frontal	Construtivo	Rápido	Alta	Sim	Sim

Pérez *et al.* (2017) ressaltam a importância do método de avanço frontal para geração da amostra. No entanto, esse método utiliza como geometria de entrada as esferas, que nem sempre são suficientes para representar a complexidade do problema. Os autores apresentam, em seu trabalho, um avanço promissor em relação a esse método de geração, com a introdução de uma nova geometria chamada *spherocylinders* e a avaliação da existência de contatos por meio da Técnica Potencial de Minimização.

Morfa *et al.* (2018) também utilizaram o método de avanço frontal associado à técnica de células Laguerre para gerar o empacotamento de microestruturas policristalinas. Os dados de entrada dessa técnica consistem na distribuição estatística dos tamanhos de esferas inscritas nos grãos de cristais poliméricos da estrutura química de alguns materiais com a segmentação de danos planejados em ordem para detectar grãos e, em seguida, é colocado dentro de cada grão o círculo (formato menos complexo). A partir desses círculos, a distribuição dos tamanhos das esferas inscritas nos grãos 3D é estimada usando estereologia. Essa distribuição é usada para calcular as células de Laguerre que representam os grãos da estrutura policristalina. Essa formulação de geração de partículas foi aplicada as rochas e aos metais naturais, no entanto, esse método foi utilizado apenas para grãos que pudessem ser aproximados para o formato de um círculo.

3.3.5. INTEGRAÇÃO NÚMERICA

Definidos todos os parâmetros necessários ao DEM, inicia-se o processo de integração numérica para determinação da nova posição das partículas por meio das equações de movimento de Newton. Para isso, a maior parte dos códigos numéricos que usam o Método dos Elementos Discretos faz uso de um passo de tempo similar ao método das diferenças centrais (O'Sullivan, 2011). Inicialmente, é preciso determinar a aceleração da partícula no tempo atual para que seja possível determinar sua posição ($u^{t+\Delta t}$) no tempo $t + \Delta t$, por meio da Segunda Lei de Newton:

$$a^t = \frac{F_R}{m_p} \quad (3-19)$$

onde:

a^t : é a aceleração no tempo atual;

F_r : é a força resultante; e

m_p : é a massa da partícula.

Considerando o método de diferenças finitas, tem-se que:

$$a^t \cong \frac{u^{t-\Delta t} - 2u^t + u^{t+\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (3-20)$$

Isolando a posição atualizada ($u^{t+\Delta t}$), tem-se que:

$$u^{t+\Delta t} = 2u^t - u^{t-\Delta t} + a^t \Delta t^2 \quad (3-21)$$

Colocando Δt em evidência:

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \Delta t \left(\frac{u^t - u^{t-\Delta t}}{\Delta t} + a^t \Delta t \right) \quad (3-22)$$

Observa-se que a primeira parcela evidenciada pode ser descrita como $v^{t-\Delta t/2}$, ou seja, a velocidade média do passo anterior, que é um valor conhecido. Pode-se descrever a velocidade média do passo seguinte como:

$$v^{t+\Delta t/2} \cong v^{t-\frac{\Delta t}{2}} + a^t \Delta t \quad (3-23)$$

Substituindo a Equação 3-21 na 3-22, tem-se que:

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \Delta t \left(v^{t-\frac{\Delta t}{2}} + a^t \Delta t \right) = u^t + v^{t+\Delta t/2} \Delta t \quad (3-24)$$

Portanto, o ciclo de cálculo consiste em calcular a velocidade média atual para posteriormente atualizar a posição no passo de tempo seguinte. O processo de orientação das partículas no espaço segue procedimento similar, que considera as acelerações (α), as velocidades angulares (ω) e os momentos de inércia (I). O processo de orientação das partículas pode ser matematicamente descrito como:

$$\alpha^t = \frac{T_r}{I_{11}} \quad (3-25)$$

Partindo do mesmo desenvolvimento apresentado anteriormente para a determinação das posições das partículas, tem-se que:

$$\omega^{t+\Delta t/2} \cong \omega^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \alpha^t \Delta t \quad (3-26)$$

e

$$\phi^{t+\Delta t} = \phi^t + \omega^{t+\Delta t/2} \Delta t \quad (3-27)$$

onde:

ϕ : é a orientação das partículas.

O integrador numérico utilizado pelo *software* escolhido neste trabalho é denominado *leap-frog*, em que o cálculo das posições se dá no intervalo de tempo Δt e o cálculo das velocidades, no intervalo $\Delta t/2$, possibilitando uma redução do erro na atualização das posições a cada passo de tempo.

3.3.6. AMORTECIMENTO NUMÉRICO

A maior parte dos problemas geotécnicos estudados trata de problemas quase-estáticos. Considerando essa premissa, é desejável dissipar a energia cinética das partículas. Os modelos de contato utilizados nem sempre consideram a dissipação de energia. Para corrigir essa eventual distorção pode-se aplicar o amortecimento numérico, resultando em problemas quase-estáticos (Albuquerque, 2016). Existem os amortecimentos numéricos do tipo viscoso e não-viscoso. O *software* utilizado, o YADE, usa uma adaptação do amortecimento proposto por Cundall & Strack (1979), não viscoso, descrito matematicamente por:

$$\frac{\Delta F_d^t}{F^t} = -\lambda_d \operatorname{sign}\left(F^t \left(v^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\alpha^t \Delta t}{2}\right)\right) \quad (3-28)$$

onde:

λ_d : é o coeficiente de amortecimento. Esse coeficiente apresenta-se nas faixas de valores de 0 a 1.

3.3.7. PASSO DE TEMPO

A determinação do passo de tempo é fundamental no Método dos Elementos Discretos, pois determina a estabilidade da sequência de integração numérica. O *software* YADE utiliza como limite superior na determinação de seu passo de tempo a seguinte formulação:

$$\Delta t_{crit} = \frac{2}{\omega_{m\acute{a}x}} \quad (3-29)$$

onde:

$\omega_{m\acute{a}x}$: é a autofrequência do empacotamento.

Nos casos em que o sistema é constituído por um modelo de contato massa-mola, a frequência angular é determinada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3-30)$$

onde:

K : é a rigidez da mola; e

m : é a massa das partículas.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os dados e procedimentos utilizados nos ensaios numéricos a fim de refletir as condições ensaiadas no experimento do Modelo Reduzido.

4.1 MATERIAL ESTUDADO

O grupo de pesquisa do Instituto de Nagoya, liderado pelo professor Teruo Nakai, cedeu os dados referentes aos experimentos de modelos reduzidos em fundações. Esses experimentos referem-se às provas de carga realizadas tanto em fundações superficiais, quanto em fundações profundas (estacas curtas e longas), a sua construção pode ser observada na Figura 4.1.

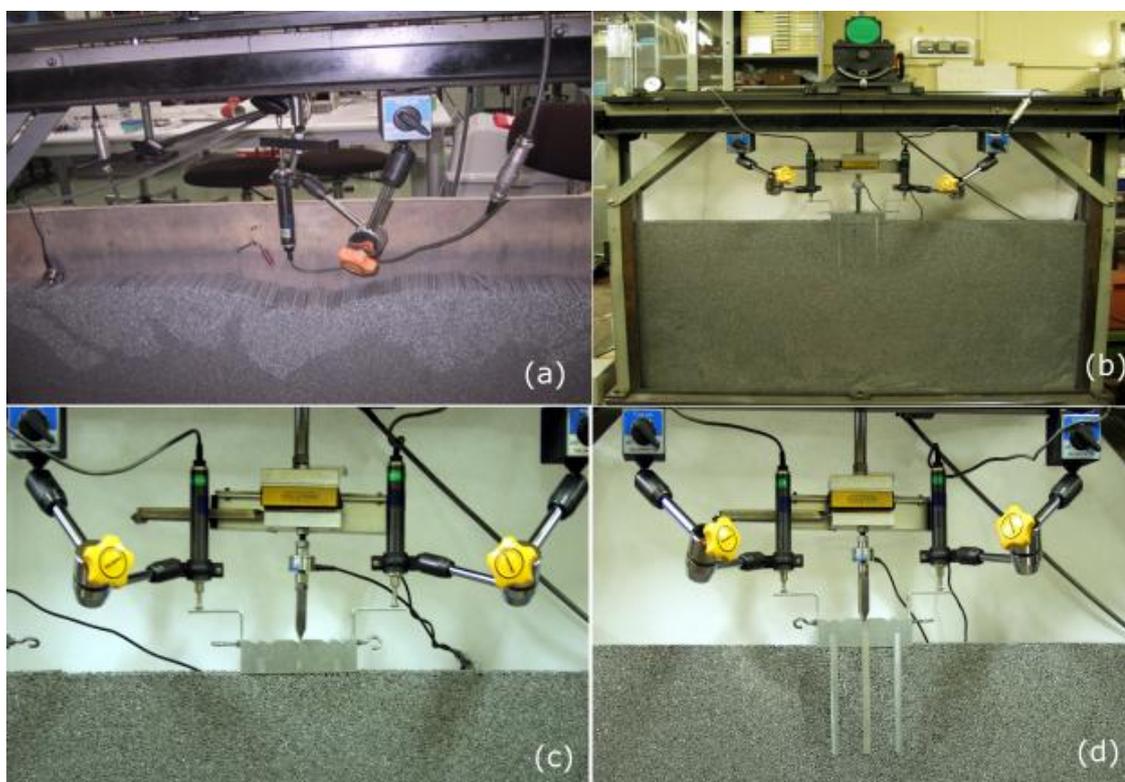


Figura 4.1 – (a) Montagem do maciço de Fundação (b) Prova de carga instrumentada (c) prova de carga bloco de fundação (d) Prova de carga das estacas curtas (Kurosaki, 2004)

O experimento físico foi construído considerando um solo idealizado, constituído por hastes de alumínio de raios de 1,6 e 3,0 mm, cujo comprimento era igual a 50 mm. Os diâmetros das hastes eram distribuídos na proporção de 3:2, resultando em um peso específico de $20,4 \text{ kN/m}^3$ para a amostra do ensaio biaxial. Para encontrar os parâmetros de resistência macroscópicos das hastes de alumínio, foi realizada uma campanha laboratorial, considerando um experimento biaxial adaptado, conforme ilustrado na Figura 4.2.

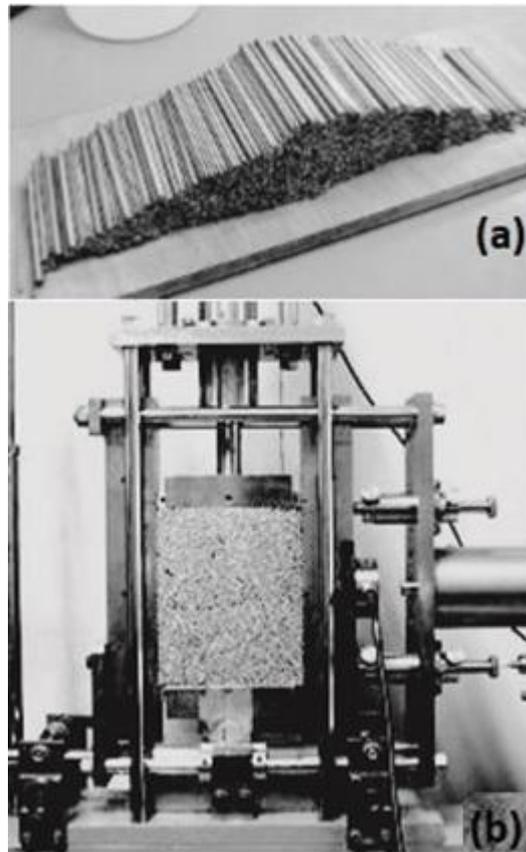


Figura 4.2 – (a) Hastes de alumínio (b) Experimento biaxial adaptado (Nakai, 2013)

Além das hastes de alumínio que simulam o maciço da fundação, o Modelo Reduzido constava de um bloco e estacas de alumínio, simulando uma estrutura do tipo radier estaqueado. Os materiais utilizados para reproduzir o bloco e as estacas no Modelo Reduzido tiveram seus parâmetros fornecidos pelos fabricantes e são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros dos materiais utilizados no Modelo Reduzido

Elemento	Material	Módulo de Young (kPa)
Bloco	Alumínio	9.8×10^9
Estaca Rígida	Alumínio	9.8×10^9

A construção do modelo reduzido foi realizada por meio da colocação do conjunto de fundação (*radier* estaqueado ou bloco de fundação) em um suporte apoiado na parede de funda da caixa. As hastes de alumínio eram colocadas lado a lado ao redor do conjunto de fundação considerando a proporção aproximada de 10:1, considerando os raios das partículas respectivamente de 1,6 mm e 3,0 mm, pois dessa forma, mantinha-se a proporção de 3:2 em peso indicada na construção do modelo. A aplicação da carga foi realizada por meio de células de carga acopladas na estrutura superior do modelo (Figura 4.1) que contavam com

um motor que permitia a aplicação de carregamentos excêntricos. A obtenção dos deslocamentos era feita via transdutores (LVDT's) instalados, bem como lasers sensíveis ao movimento. Para os carregamentos excêntricos, os mecanismos de ruptura foram obtidos através da sobreposição das imagens do início e fim do ensaio. Dessa forma, era possível realçar as cores por meio do programa *photoshop* e determinar a trajetória das partículas.

O grupo de pesquisa analisou e cedeu os dados referentes à prova de carga dos blocos e estacas curtas com comprimento de 12 cm, bem como das estacas longas cujo comprimento era de 24 cm, submetidos a carregamentos centrados, excêntricos e inclinados. Devido à dificuldade de implementar a aplicação de carregamentos no DEM, neste trabalho foram avaliadas as provas de carga centradas para parametrização dos ensaios numéricos.

4.2 SIMULAÇÃO NÚMERICA

Nesta seção serão apresentados os *softwares* utilizados para obtenção dos resultados numéricos, bem como toda a metodologia desenvolvida nas simulações numéricas para alcance dos resultados obtidos.

4.2.1. SOFTWARES UTILIZADOS

O principal programa utilizado para condução da pesquisa é conhecido como YADE, que significa *Yet Another Dynamic Engine*. O *software* escolhido se trata de um *software* aberto contemplado no pacote de instalação do terminal do sistema operacional Linux.

O YADE possui um código programado em C++, mas sua utilização é feita via terminal de comando por meio de *scripts* programados em *python*, uma linguagem considerada de fácil aprendizado. Desta forma, o YADE se tornou uma ferramenta bastante interessante para a condução da pesquisa, além do programa possuir uma comunidade consolidada para esclarecimento de eventuais dúvidas.

Para avaliar e comparar os mecanismos e as cargas de ruptura obtidos nos radiers estaqueados com o DEM, foi utilizado o *software* OptumG2. Esse programa apresenta boa interface gráfica, além de possuir licença gratuita para pesquisas acadêmicas. O *software* é um programa de elementos finitos não convencional criado para simular problemas geotécnicos bidimensionais.

O Optum G2 oferece uma estimativa da solução exata do problema estudado por meio da resolução da Teoria de Análise Limite (cinemática e estática) e utiliza o MEF de forma

subsidiária a fim de calcular o campo de tensões e deslocamentos do solo. Além disso, o *software* possui como parâmetro de entrada a definição de uma função de plastificação para avaliar os deslocamentos plásticos ocorridos. Nesta dissertação, optou-se por trabalhar com a solução numérica do Teorema da Análise Limite utilizando o OptumG2, sendo a função de plastificação utilizada para previsão de ruptura de Mohr-Coulomb. Considerando ainda a utilização do MEF associado à resolução do Teorema de Análise limite, observou-se que o programa OptumG2 se utiliza do multiplicador de carga (α) para avaliar quando começam a ocorrer escoamentos plásticos e deformações irreversíveis.

4.2.2. MODELO DE CONTATO

O modelo de contato utilizado nas simulações numéricas foi o modelo de Cundall & Strack (1979), que é a lei mais simples não coesiva elástica-friccional implementada no *software* YADE. A descrição dos materiais é feita por meio da entrada dos seguintes parâmetros para descrição das partículas individuais: módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν) e coeficiente de atrito na escala do grão (μ). Com base no módulo de Young (E), o programa determina as rigidezes tangencial e normal das partículas (Equação 4-1). Já o coeficiente de atrito no contato é responsável por determinar a máxima força tangencial transmitida às partículas conforme apresentado na Equação 3-13 da seção 3. Portanto, k_n , k_s e μ são parâmetros microscópicos que necessitam ser calibrados. O *software* YADE calcula a rigidez normal de suas partículas por meio da seguinte equação:

$$K_n = E.l \quad (4-1)$$

onde:

E : é o módulo de Young da partícula; e

l : é a distância entre o ponto de contato e o centro das esferas, no modelo utilizado é igual a 2 vezes o raio da partícula.

As unidades utilizadas no *software* YADE estão no Sistema Internacional (SI). A utilização do modelo de contato de Cundall & Strack (1979) é uma boa alternativa para o estudo de problemas bidimensionais, como apresentado por O'Sullivan (2011) nos estudos de Latzel *et al.* (2000), Chen e Ishibashi (1990), Calvetti *et al.* (2004) e Rothenburg e Kruyt (2004). Esse modelo apresenta um número menor de parâmetros que necessitam ser calibrados e uma alta estabilidade no estudo de problemas estáticos.

4.2.3. GERAÇÃO DE AMOSTRA ENSAIO BIAXIAL

A geração da amostra para simulação do ensaio de compressão biaxial foi realizada por meio do Método de Sub-Compactação, descrito por Jiang *et al.* (2003) adaptado, conforme apresentado na Figura 4.3 e no *script* do Anexo A1. A Sub-Compactação de Jiang consiste no seguinte processo:

- Geração de uma nuvem de partículas dispostas aleatoriamente dentro do contorno definido;
- Compactação das partículas por meio da locomoção do plano superior até a obtenção de uma porosidade alvo; e
- Repetição do primeiro passo até que a amostra esteja completamente preenchida.

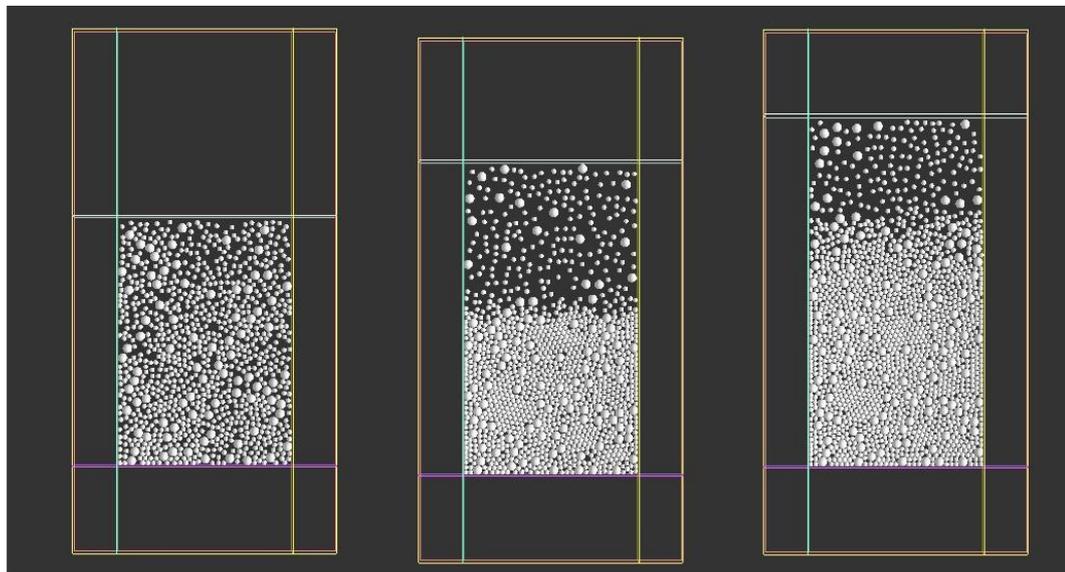


Figura 4.3 – Geração de Amostra pelo Método de Compactação

É importante ressaltar que, na etapa de geração do arranjo inicial de partículas, a amostra é gerada sem atrito para reduzir os custos computacionais. O atrito é posteriormente acionado durante a fase de cisalhamento nas simulações.

Destaca-se ainda nessa seção que o *software* YADE trabalha com geometrias simples, como esferas, cubos e fronteiras rígidas para facilitar a detecção dos contatos, e o experimento do modelo reduzido foi realizado com cilindros de alumínio. Apesar de o *software* ter introduzido recentemente o cilindro em seu código, ainda não existe lei que permite descrever o contato entre duas partículas cilíndricas, inviabilizando o seu uso nessa pesquisa. Dessa

forma, utilizaram-se esferas com o movimento translacional e rotacional restritos a 3 graus de liberdade para replicar o experimento biaxial bidimensional.

A adaptação desse método de geração da amostra foi proposta por Albuquerque (2016). O autor propôs a utilização de um único índice de vazios alvo para cada camada e a adoção de uma descompressão lenta, evitando instabilidades. Essas adaptações foram utilizadas nesse trabalho devido à necessidade de refletir as condições laboratoriais iniciais da amostra. A porosidade inicial alvo foi determinada por meio da Equação 4-2, considerando os parâmetros macroscópicos fornecidos na Tabela 4.2 que foram obtidos a partir da campanha do ensaio biaxial adaptado.

$$e = e_n + \lambda \cdot \ln \frac{P}{P_1} \quad (4-2)$$

onde:

e_n : é igual ao índice de vazios inicial;

e : igual ao índice de vazios da amostra após compressão;

λ : é o coeficiente de compressão de adensamento da curva virgem;

Tabela 4.2 – Parâmetros iniciais de resistência macroscópicos da amostra biaxial

λ	0,008
κ	0,004
e_n ($p= 98$ kPa)	0,30

As dimensões da amostra a ser ensaiada numericamente foram escolhidas por meio de uma breve calibração na quantidade de partículas na tentativa de equilibrar o custo computacional com os ganhos mecânicos. Foram mantidas as proporções do corpo de prova laboratorial, em que a altura (H) é 2 vezes a largura (L), e foram geradas três amostras para os ensaios biaxiais com mesmos parâmetros e dimensões distintas, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dimensão das Amostras

Dimensões (cm)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Largura (L)	5.5	11	22
Altura (H)	11	22	44
Quantidade de partículas	475	1.912	7.629

Dimensões (cm)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Tempo de Geração da Amostra (s)	118,713	254,075	1379,747

A Figura 4.4 ilustra as curvas obtidas pela variação da quantidade de partículas na amostra – no eixo das abscissas foram plotadas a deformação axial da amostra e, no das ordenadas, a tensão desviadora aplicada à amostra. Observa-se que 500 partículas resultariam em empacotamento insuficiente e com muitos ruídos no comportamento mecânico para representar o ensaio biaxial. Para os empacotamentos de 1.905 partículas e de 7.629 partículas, não houve uma alteração na resposta do comportamento mecânico do material. Desta maneira, optou-se pela redução do custo computacional e elegeu-se as dimensões da Amostra 2 para execução dos ensaios biaxiais.

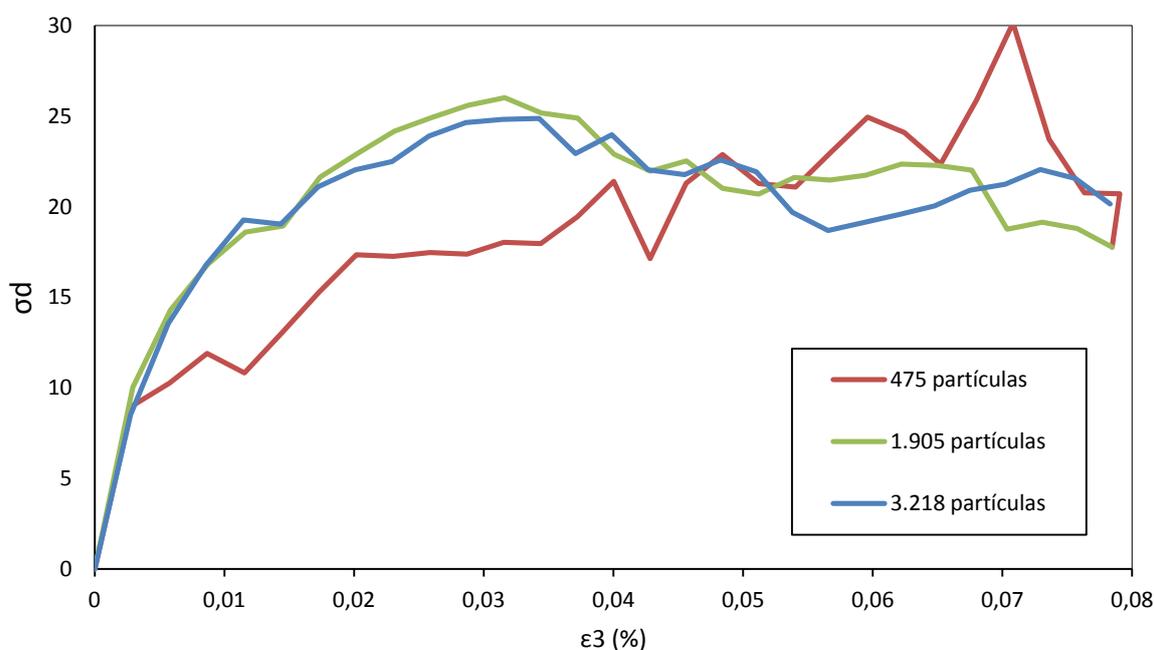


Figura 4.4 – Resultados da simulação do Ensaio Biaxial com diferentes números de partículas

A Tabela 4.4 resume os parâmetros utilizados para a geração da amostra do ensaio biaxial computacionalmente, são apresentados parâmetros como o amortecimento local não-viscoso utilizado, a velocidade de compressão da parede superior, a porosidade alvo macroscópica e as dimensões eleitas da amostra.

Tabela 4.4 – Parâmetros para geração da Amostra para o ensaio biaxial

Parâmetros	
Amortecimento local não-viscoso	0,40
Velocidade de compressão da amostra (m/s)	0,50
Dimensões	$L= 11$ cm $H= 22$ cm
Porosidade	0,22
Nº de partículas	1.912

A Figura 4.5 apresenta uma amostra do ensaio biaxial finalizada representando a distribuição dos raios dentro da amostra. As esferas em vermelho são as que possuem raio de 3,0 mm e as esferas em azul são as esferas que possuem o raio de 1,6 mm. Considerando a proporção de 3:2 em peso indicada pelo experimento laboratorial, as partículas se distribuíram segundo a proporção aproximada de dez partículas de menor dimensão para cada uma de maior dimensão.

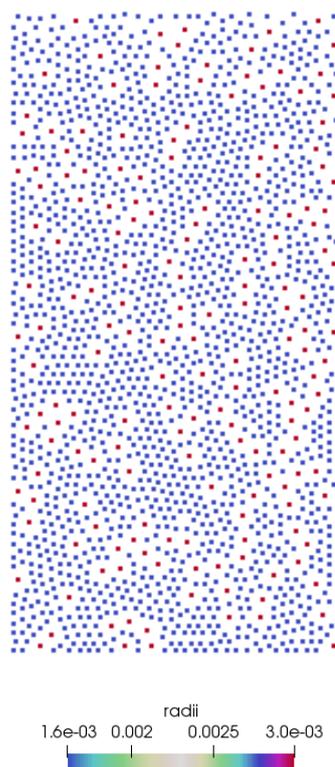


Figura 4.5 – Distribuição dos raios na geração da Amostra para o ensaio biaxial

4.2.4. ENSAIO BIAxIAL

Nesta fase foram realizados diversos testes com o ensaio biaxial apresentado no Apêndice A.3. A partir da geração da amostra, iniciou-se uma bateria de ensaios biaxiais para

encontrar os parâmetros mesoscópicos (da partícula) e microscópicos (do contato) que refletiriam o comportamento macroscópico, considerando as condições iniciais de laboratório, essa calibração foi realizada utilizando o método de tentativa e erro.

Para tanto, variaram-se os parâmetros de caracterização do solo no *software* YADE - o módulo de Young, o coeficiente de atrito e o coeficiente de Poisson da partícula – a fim de permitir calibração do ensaio numérico com o ensaio físico.

Tabela 4.5 – Intervalo de calibração dos parâmetros da Amostra

Coeficiente	Varição
E_p : Módulo de Young da Partícula (MPa)	80-1000
ν_π : coeficiente de Poisson da Partícula	0.2-0.5
μ : coeficiente de atrito do contato	0,16-0,42

Tedesco (2016) ressalta que, para valores muito baixos de rigidez, o método de geração das amostras utilizado pode apresentar uma elevada sobreposição inicial de partículas, gerando instabilidades. Logo, o valor mínimo fixado para o módulo de Young foi de 80 MPa. Na Figura 4.6 ilustra-se um dos ensaios biaxiais na condição inicial do ensaio e a 8% de deformação, condição de parada conforme experimento laboratorial utilizado para parametrização. Observa-se na Figura que o deslocamento era aplicado na fronteira superior da amostra enquanto as demais fronteiras eram submetidas a uma tensão constante. A partir desse deslocamento prescrito, a tensão era medida na fronteira.

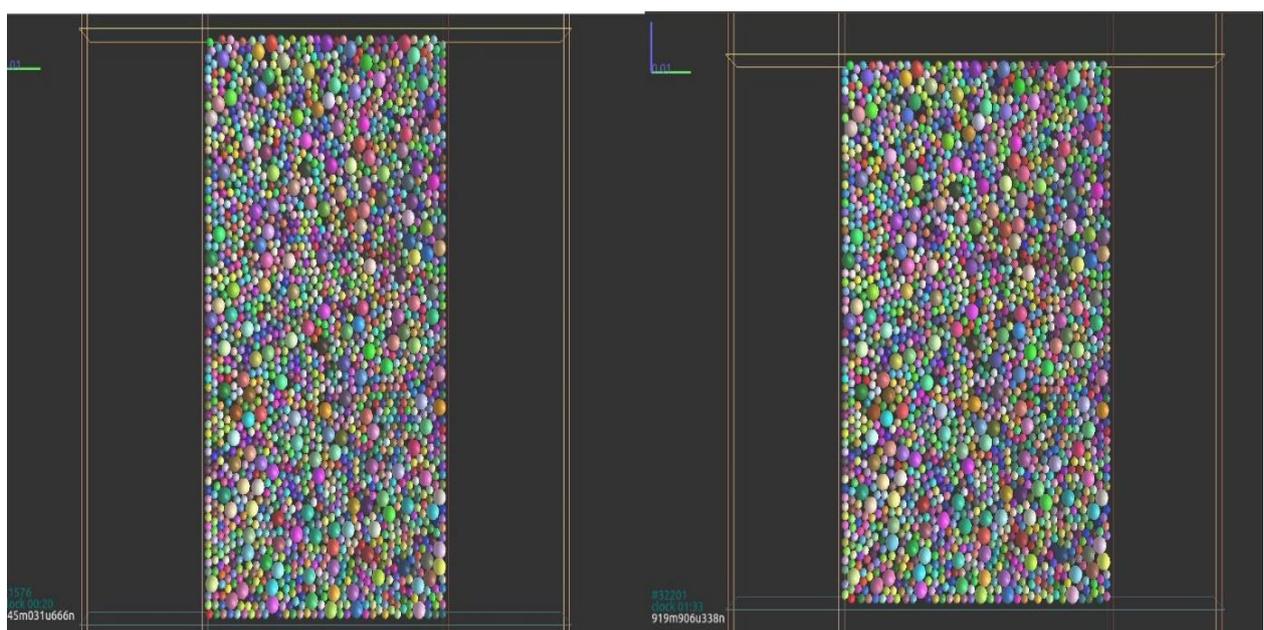


Figura 4.6 – Ensaio biaxial (a) Amostra no estágio Inicial (b) Amostra a 8% de Deformação

4.2.5. GERAÇÃO DO MACIÇO DA FUNDAÇÃO

Nesta etapa, foi realizada a geração do maciço de fundação para reproduzir o modelo reduzido para validar os parâmetros calibrados no ensaio biaxial por meio da aplicação na prova de carga. A Figura 4.7 e 4.8 apresentam as dimensões da fundação utilizadas nesse estudo, bem como as dimensões das fronteiras utilizadas.

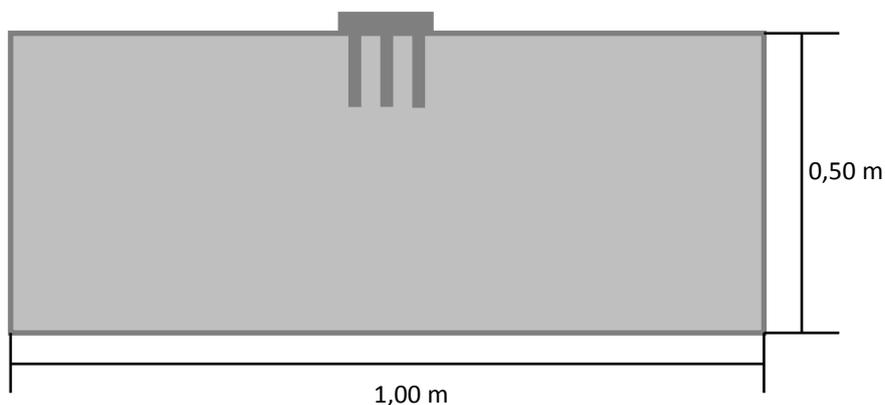


Figura 4.7 – Dimensões da Caixa para geração do maciço

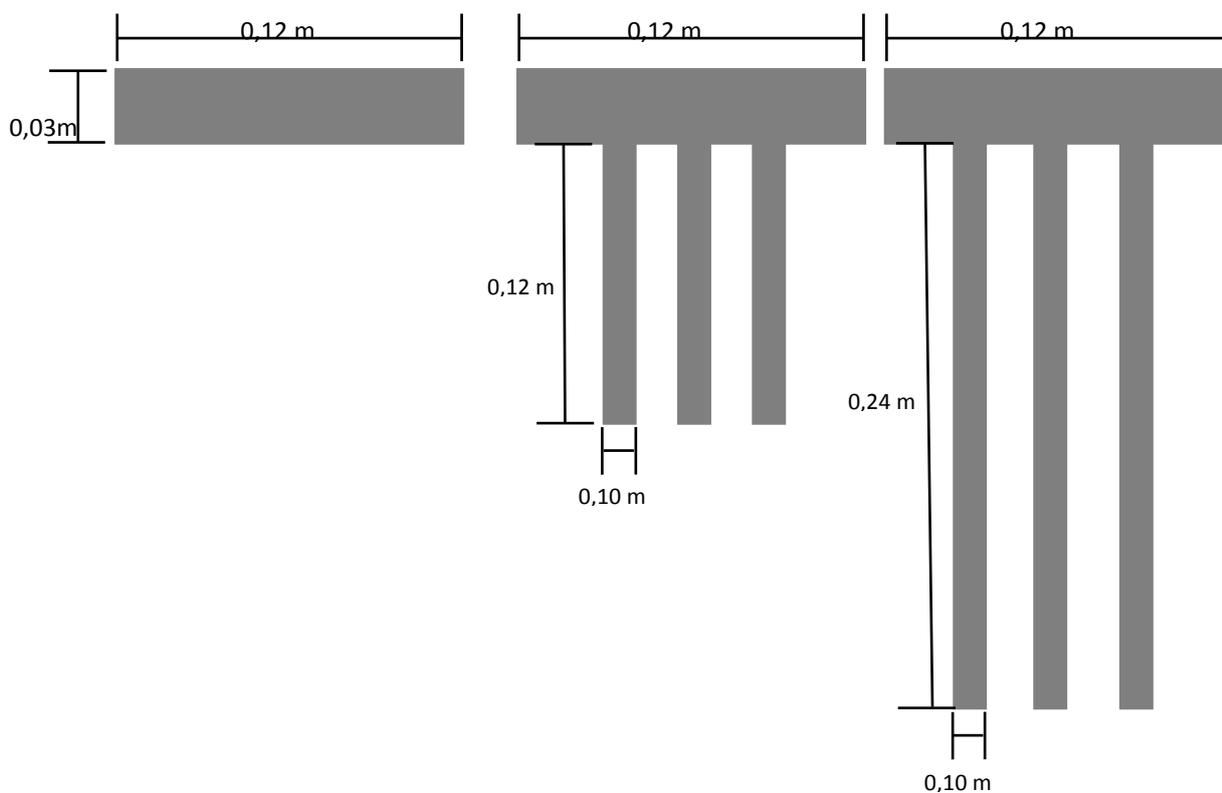


Figura 4.8 – Dimensões dos Blocos e Estacas

Os parâmetros utilizados para geração do maciço podem ser observados na Tabela 4.6. A velocidade de compressão foi multiplicada por dois visando reduzir o tempo de geração do

maciço, uma vez que as dimensões são cerca de quatro vezes maiores que a amostra do ensaio biaxial. O método de geração do maciço foi o mesmo adotado no ensaio biaxial, subcompactação de Jiang adaptado, a porosidade alvo foi apontada pelo ensaio experimental.

Tabela 4.6 – Parâmetros para geração da Amostra

Parâmetros	
Amortecimento	0,70
Velocidade de compressão da amostra (m/s)	1,00
Dimensão	L= 100 cm H= 50 cm
Porosidade Alvo	0.26
Nº de partículas	37.650

Os elementos de fundação (bloco e estacas), por se tratar de sólidos contínuos, foram gerados como uma partícula única, definida na programação dos *scripts* como partícula cúbica. Os parâmetros de discretização da partícula utilizados para o bloco e as estacas equivalem aos fornecidos na Tabela 4.1.

A geração do maciço das estacas foi realizada de duas formas distintas: (i) na primeira, as estacas foram cravadas a uma baixa velocidade no solo; (ii) na segunda, o solo foi gerado com as estacas posicionadas no local, simulando estacas escavadas com suporte. Na prática, os modelos reduzidos foram gerados no laboratório com a segunda técnica, sendo a fundação (bloco e estacas) fixada inicialmente a uma parede de fundo. Em seguida, as barras de alumínio foram cuidadosamente depositas para simular o maciço de fundação, como já descrito anteriormente.

Além disso, a densidade dos materiais necessitou de correção para que o solo fosse submetido inicialmente às mesmas condições do experimento no Modelo Reduzido. Nos ensaios realizados no *Nagoya Institute of Technology (NIT)*, foram usadas barras cilíndricas de alumínio, o que se aproxima de uma situação bidimensional. Entretanto, como já citado anteriormente, o programa YADE não oferece a opção de partículas cilíndricas, mas apenas esferas. Para simular o maciço de fundações com esferas, é preciso uma análise tridimensional em que todas as esferas de diferentes tamanhos tenham os centros locados no mesmo plano, e também deve-se restringir o grau de liberdade de deslocamento no sentido perpendicular a esse plano de modo a aproximar uma situação bidimensional. Ainda assim, os arranjos de partículas cilíndricas e esféricas geram empacotamentos iniciais com diferentes índices de vazios e, por conseguinte, diferentes porosidades e densidades aparentes. Portanto, foi

necessário fazer correções, o que pode ser conseguido alterando o peso específico dos “grãos” ou as dimensões das partículas.

Optou-se por corrigir as massas específicas entre o ensaio físico e numérico. A massa específica foi corrigida considerando que as massas das partículas do experimento físico e numérico fossem iguais, possibilitando a obtenção dos mesmos níveis de tensão inicial no Modelo Reduzido (1g):

$$m_{cilindro} = m_{esfera} \quad (4-3)$$

A partir da relação entre as massas, foi possível estabelecer o valor das densidades corrigidas:

$$\gamma_{esfera} = \frac{\gamma_{cilindro} \cdot H}{4R/3} \quad (4-4)$$

onde:

γ_{esfera} : é a densidade específica da esfera corrigida;

$\gamma_{cilindro}$: é a densidade específica do cilindro;

H : é o comprimento do cilindro;

R : é o raio da partícula.

As massas específicas corrigidas pelas equações 4-3 e 4-4 foram apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Massa específica corrigida

ρ (kg/m ³)	Material
Massa específica do bloco e estaca rígida (kg/m ³)	27.777
Massa específica da esfera de alumínio de 1,6mm (kg/m ³)	48.750
Massa específica da esfera de alumínio de 3,0mm (kg/m ³)	26.000

Ressalta-se que não foi possível realizar a correção do momento de inércia, parâmetro físico também influenciando pela falta de absoluta similaridade entre as partículas do experimento e do ensaio numérico. O *software* Yade calcula o momento de Inércia a partir da definição da geometria da partícula, dessa forma, esse não é um parâmetro de entrada da simulação e sua correção resultaria na necessidade de recompilar o código do programa.

4.2.6. ENSAIO PROVA DE CARGA NO MODELO REDUZIDO

Foram realizadas provas de carga sobre os seguintes modelos reduzidos: (1) apenas bloco ou fundação superficial isolada; (2) bloco sobre três estacas ou radier estaqueado curto; (3) bloco sobre três estacas ou radier estaqueado longo. As provas de carga sobre o bloco isolado estão ilustradas na Figura 4.9, tendo sido os ensaios realizados em duas etapas. Inicialmente, fez-se uma estabilização do modelo sujeito apenas ao peso próprio do conjunto do maciço e ao bloco de fundação. Em seguida, aplicou-se uma força monotonicamente crescente centrada no bloco.

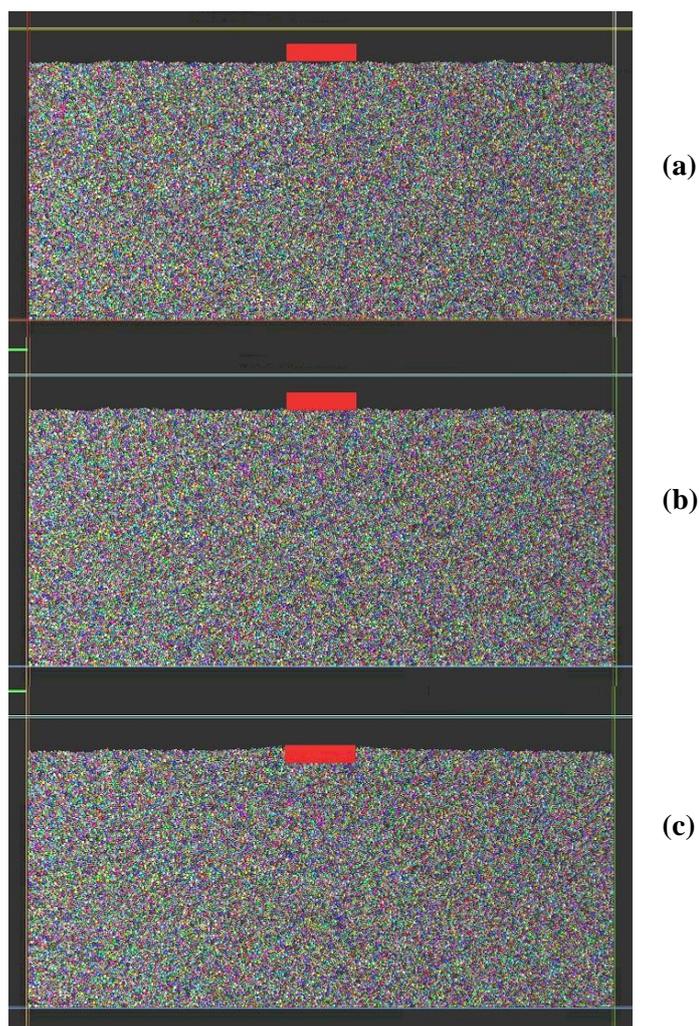


Figura 4.9 – Prova de Carga do Bloco de Fundação (a) Início do ensaio (b) Amostra estabilizada sob peso próprio (c) Ensaio finalizado

O mesmo processo foi realizado para simulação numérica dos ensaios dos radiers estaqueados. A Figura 4.10 ilustra o ensaio realizado no radier com estacas curtas. No primeiro quadro, observa-se o início do ensaio em que a amostra foi gerada com as estacas posicionadas no local; no segundo quadro, observa-se o deslocamento gerado pelo peso

próprio do radier estaqueado; e, no último quadro, observa-se o ensaio paralisado, no qual também se aplicou uma força monotonicamente crescente centrada no bloco.

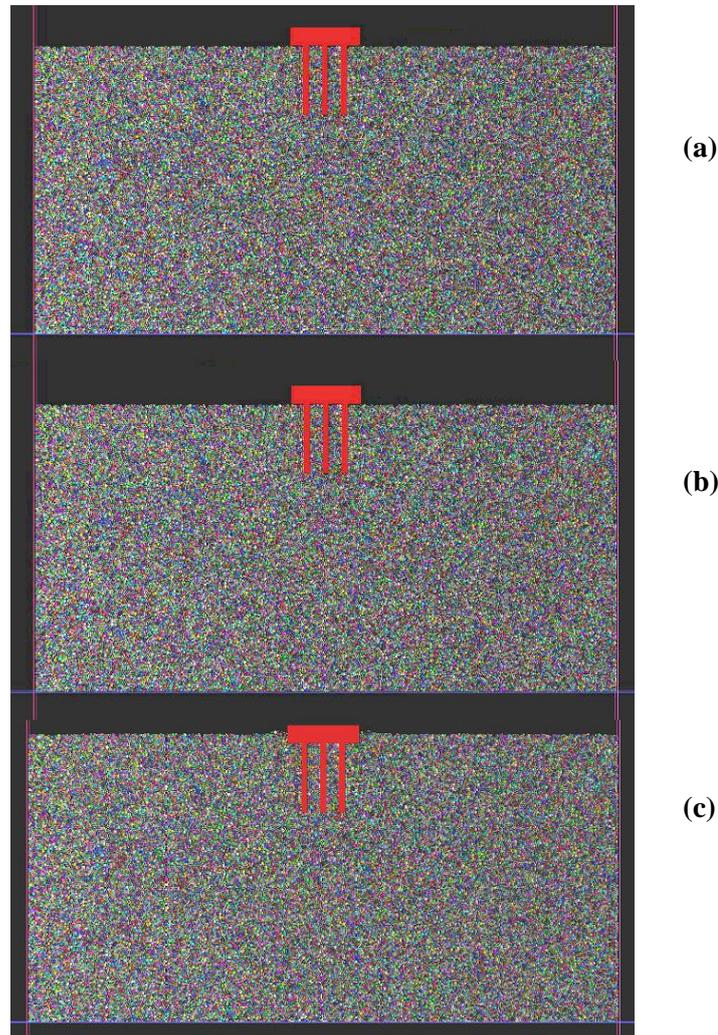


Figura 4.10 – Prova de Carga Estaca Curta (a) Início do Ensaio (b) Amostra estabilizada ao Peso próprio (c) Amostra Rompida

A paralisação do ensaio foi realizada seguindo o critério de parada utilizado foi o mesmo proposto por Van Impe (1991). O ensaio foi encerrado quando ocorria:

- (a) A ruptura física do solo, que acontece quando um pequeno incremento de carga gera uma deformação que tende ao infinito; ou
- (b) A ruptura convencional do solo ocorre quando o deslocamento medido é equivalente a 10% da menor dimensão do elemento de fundação, que no caso do bloco se tratava da largura ($B=12$ cm) e, no caso das estacas, foi considerado o seu comprimento ($L=12$ cm e $L=24$ cm).

4.2.7. ENSAIO OPTUM G2

A Figura 4.11 ilustra as malhas triangulares utilizadas para as simulações do maciço de fundação no *software* OPTUMG2. O *software* utiliza o Método dos Elementos Finitos de forma subsidiária ao Teorema dos Limites para o cálculo do estado de tensões e deslocamento. Na simulação, foram considerados como parâmetros de entrada os mesmos parâmetros macroscópicos do experimento laboratorial, considerando os blocos e as estacas como elementos super rígidos. O critério de ruptura utilizado para avaliação da superfície de plastificação da simulação foi o de Mohr-Coulomb. Inicialmente, o maciço foi discretizado com uma malha de 1.000 elementos, mas foi feita uma breve análise de convergência e se observou que a partir de 5.000 elementos já não havia mudança significativa na tensão máxima. Dessa forma, optou-se por trabalhar com 5.000 elementos.

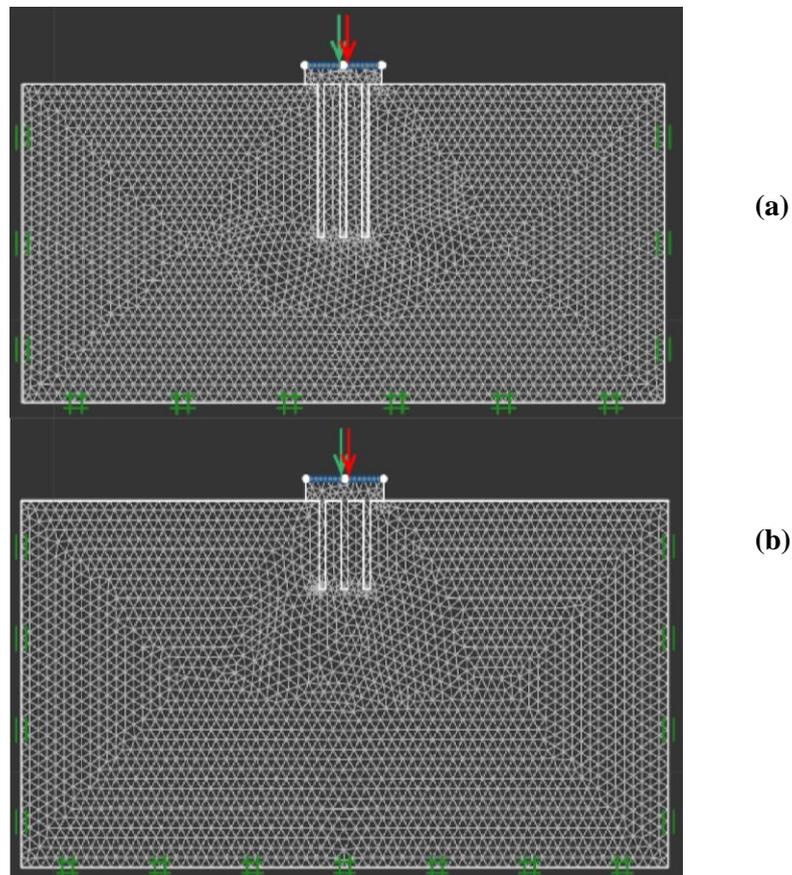


Figura 4.11 – (a) Malha para radiers com estaca longa (b) Malha para radiers com estaca curta

Como já citado anteriormente, o OptumG2 permitiu comparar os mecanismos de ruptura previstos pelo DEM e pela Teoria da Plasticidade (Análise Limite), bem como as cargas de ruptura em relação as estacas escavadas.

5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados numéricos provenientes das simulações realizadas, conforme metodologia apresentada.

5.1 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

A utilização do DEM requer a calibração dos parâmetros de simulação (ou controle) inerentes à utilização do método. Na etapa de ensaio biaxial foram avaliados os coeficientes de amortecimento e também como a velocidade do carregamento impactaria no resultado, para posteriormente definir a calibração dos parâmetros de resistência da amostra.

5.1.1. AMORTECIMENTO

O amortecimento local não-viscoso (*damping*) é o parâmetro responsável por dissipar a energia cinética apresentada no modelo de contato, o amortecimento é necessário ao estudo de problemas quase estáticos. A Figura 5.1 ilustra os resultados considerando a influência do amortecimento local não-viscoso. No eixo das abscissas foi plotada a deformação axial da amostra e, no das ordenadas, foi plotada a tensão desviadora aplicada à amostra, como nas demais figuras a serem apresentadas.

A avaliação do amortecimento foi realizada variando seus valores em uma faixa de 0,20 a 0,80, pois são os valores mais usuais encontrados na literatura. Optou-se por utilizar o valor médio de 0,40, para o ensaio biaxial, pois a utilização de um fator de amortecimento mais baixo implica na redução do tempo de simulação (Chareyre, 2005). Além disso, observou-se uma menor quantidade de ruídos no comportamento macro mecânico da amostra. Foi observado que a escolha do amortecimento teve influência na inclinação curva do trecho inicial (linear elástico), mas que houve pouca diferença entre o valor de amortecimento de 0,20 e 0,40. Desta forma, como o maciço possuía dimensões muito maiores que o ensaio biaxial, na simulação das provas de carga, reduziu-se o amortecimento para 0,20 visando a redução do tempo de simulação.

A simulação do ensaio biaxial pode ser em condições de tensão controlada ou deformação controlada. O comando necessário para representar as condições de contorno compatíveis com o ensaio biaxial no programa YADE é denominando *TriaxStressController* e necessita da definição de mais dois coeficientes de amortecimento, um aplicado à tensão e o outro à deformação. Nas Figuras 5.2 e 5.3, ilustra-se o resultado da variação desses

parâmetros na simulação nas faixas de 0,25 a 0,90 e de 0,90 a 0,99, respectivamente para os coeficientes de amortecimento aplicados à tensão e aplicados à deformação

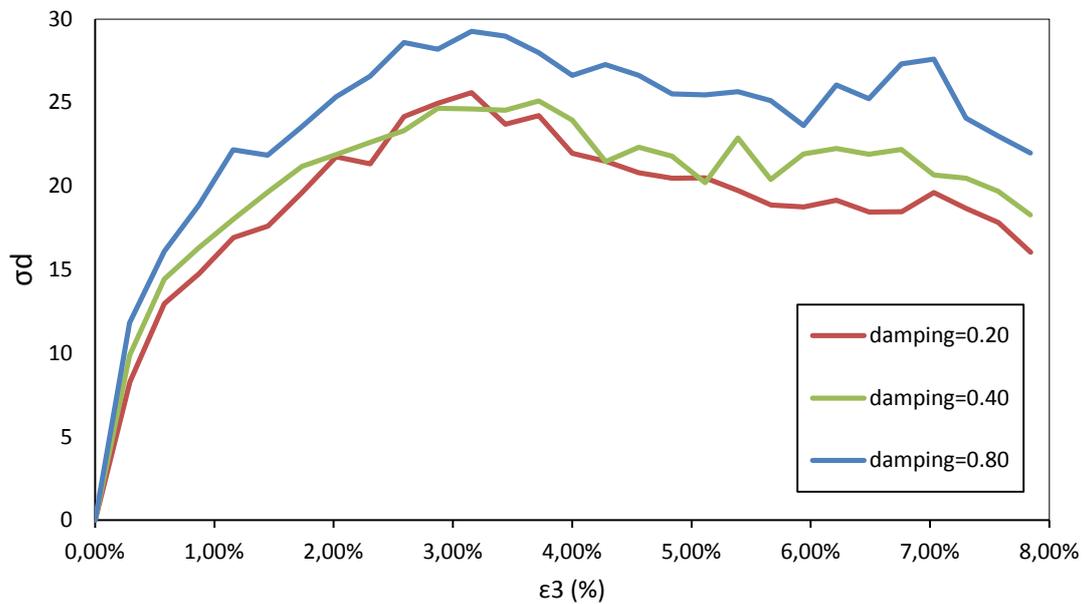


Figura 5.1 – Avaliação do *damping* não-viscoso

Foi observada uma baixa influência da variação desse amortecimento na curva tensão-deformação, optando-se por utilizar os valores indicados no manual – de 0,25 para o amortecimento na tensão, já que quanto menor esse valor, maior o controle de tensão nas paredes, e de 0,99 para o amortecimento da deformação, pois esse parâmetro controla a suavidade da aplicação da taxa de deformação. Como os resultados obtidos foram muito similares, optou-se por apenas variar o amortecimento para valores

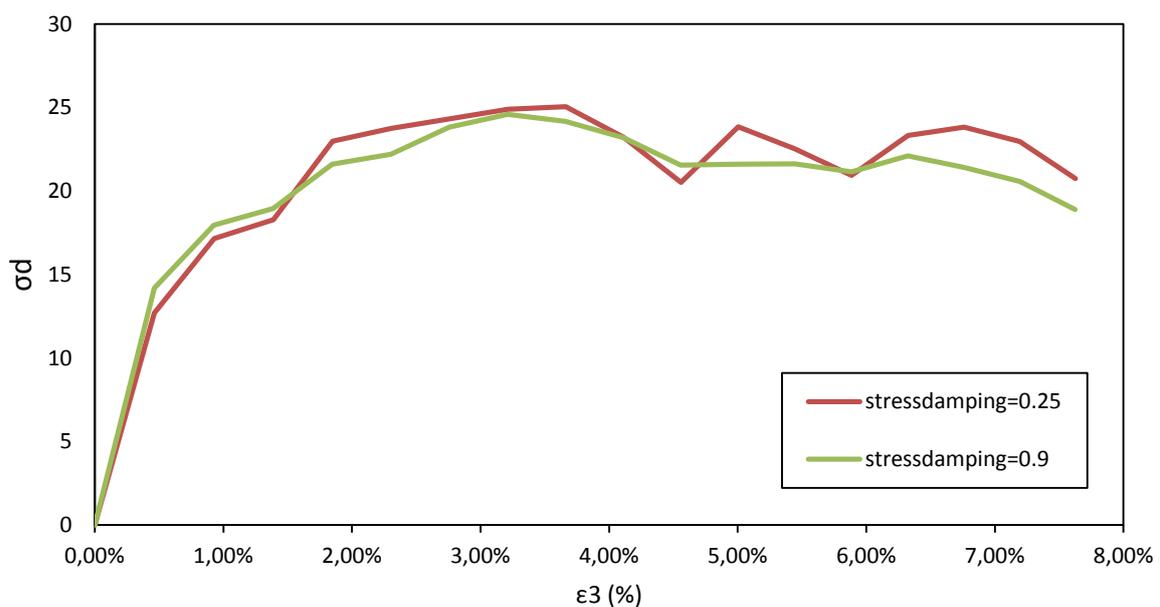


Figura 5.2 – Avaliação do amortecimento na aplicação de tensão

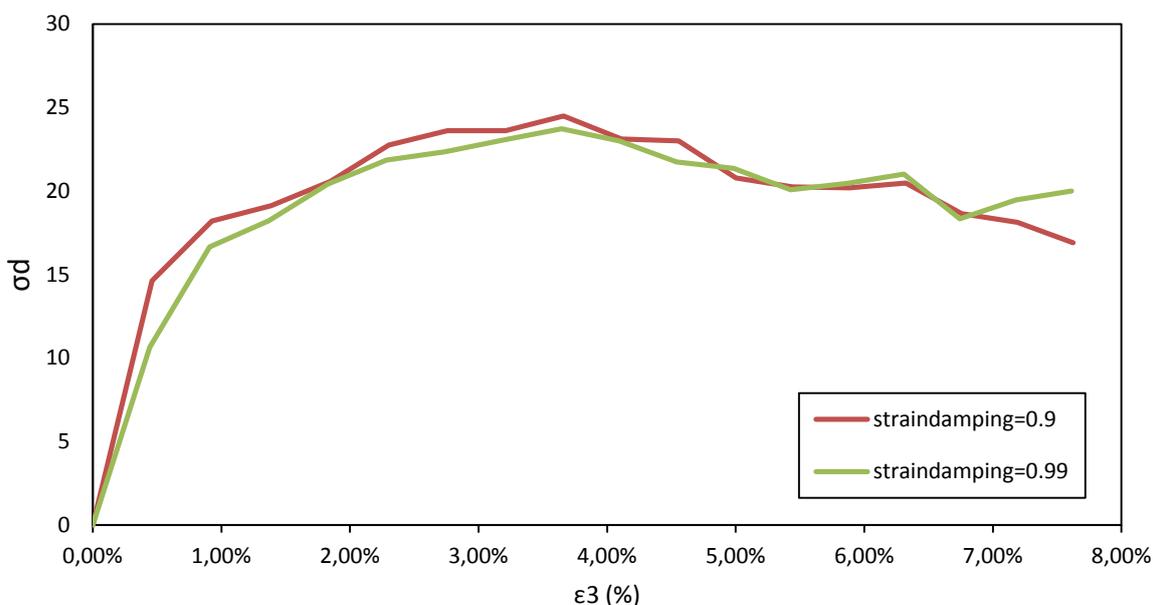


Figura 5.3 – Avaliação do amortecimento na aplicação de deslocamento

5.1.2. TAXA DE CARREGAMENTO

5.1.2.1. ENSAIO BIAXIAL

A taxa de carregamento é fator de fundamental importância nos resultados de uma campanha de ensaios experimentais (Fleischmann *et al.*, 2014), considerando que o DEM é um método que resolve equações dinâmicas para simular um problema estático. Nesta etapa, avaliou-se qual taxa de carregamento aderiria melhor aos resultados experimentais, variando a taxa de 0,05 a 0,15 m/s.

Optou-se por adotar uma velocidade prescrita de 0,10 m/s, conforme apresentado na Figura 5.4, bastante elevada considerando as taxas de deformação prescritas em ensaios laboratoriais. No entanto, a taxa foi adequada para representar o modelo e tornar a simulação factível, considerando o tempo dispendido para cada ensaio numérico. Observa-se que o comportamento ocorre como o esperado, fisicamente: quanto mais rápida ocorre a aplicação do carregamento, mais rígida é a resposta do material.

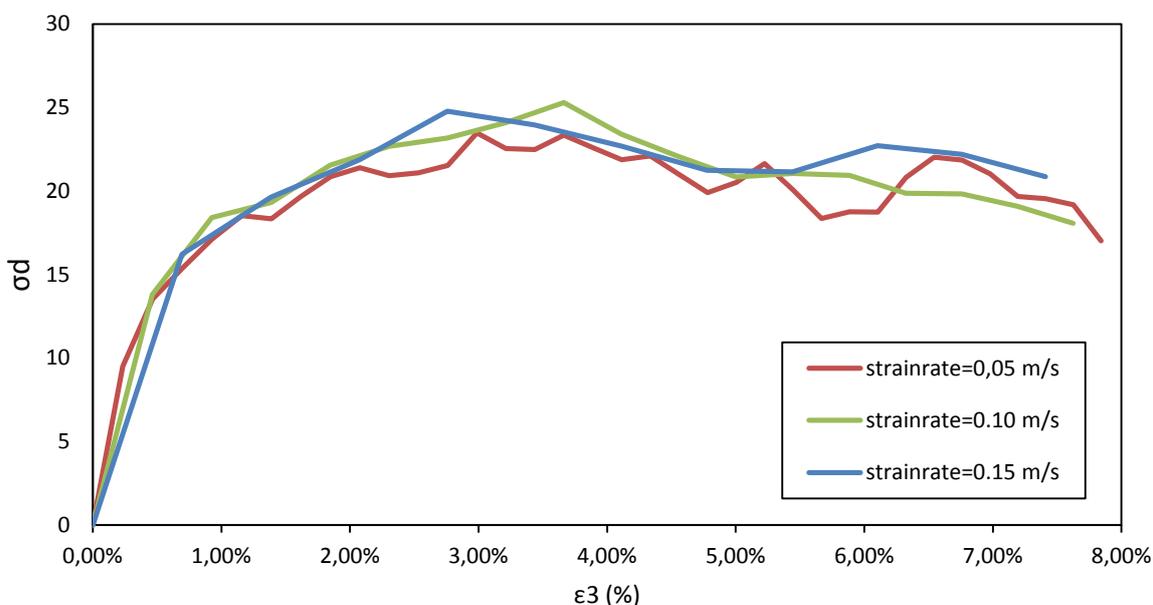


Figura 5.4 – Taxa de Carregamento

5.1.2.2. PROVA DE CARGA

Como já citado anteriormente, a taxa de carregamento é de fundamental importância nos resultados obtidos utilizando o DEM (Medina, 2017). O ensaio biaxial foi simulado à deformação controlada. Inicialmente, também se tentou simular a prova de carga prescrevendo os deslocamentos, no entanto, não foi possível encontrar a ruptura. Dessa forma, o experimento da prova de carga foi realizado utilizando um ensaio de tensão controlada. Portanto, foi necessário avaliar qual carregamento melhor se aproximava da curva experimental.

Na Figura 5.5 apresenta-se a influência da forma de aplicação dos carregamentos no resultado final. Optou-se por realizar o carregamento em incrementos de 10N, por apresentar a ruptura bem definida, bem como o comportamento mais próximo das rupturas encontradas no experimento físico.

Considerando o critério de aplicação de carga de maneira incremental, a prova de carga estática é realizada considerando os seguintes aspectos: antes do incremento de uma nova carga, é necessário que os recalques ocasionados pela carga aplicada no estágio anterior tenham estabilizado. Essa estabilidade foi medida numericamente por meio do critério de forças desbalanceadas propostas no *software*. O manual do YADE considera que se a razão das forças desbalanceadas do modelo se encontra abaixo de 1%, a amostra pode ser considerada estática. Portanto, toda vez que essa razão era atingida, um novo incremento de carga era realizado. No entanto, observou-se que para as estacas esse critério tinha pouca

aderência ao comportamento encontrado no experimento, pois as rupturas aconteciam de forma muito rígida e a cargas muito baixas, adotando-se a razão de forças desbalanceadas abaixo de 5%.

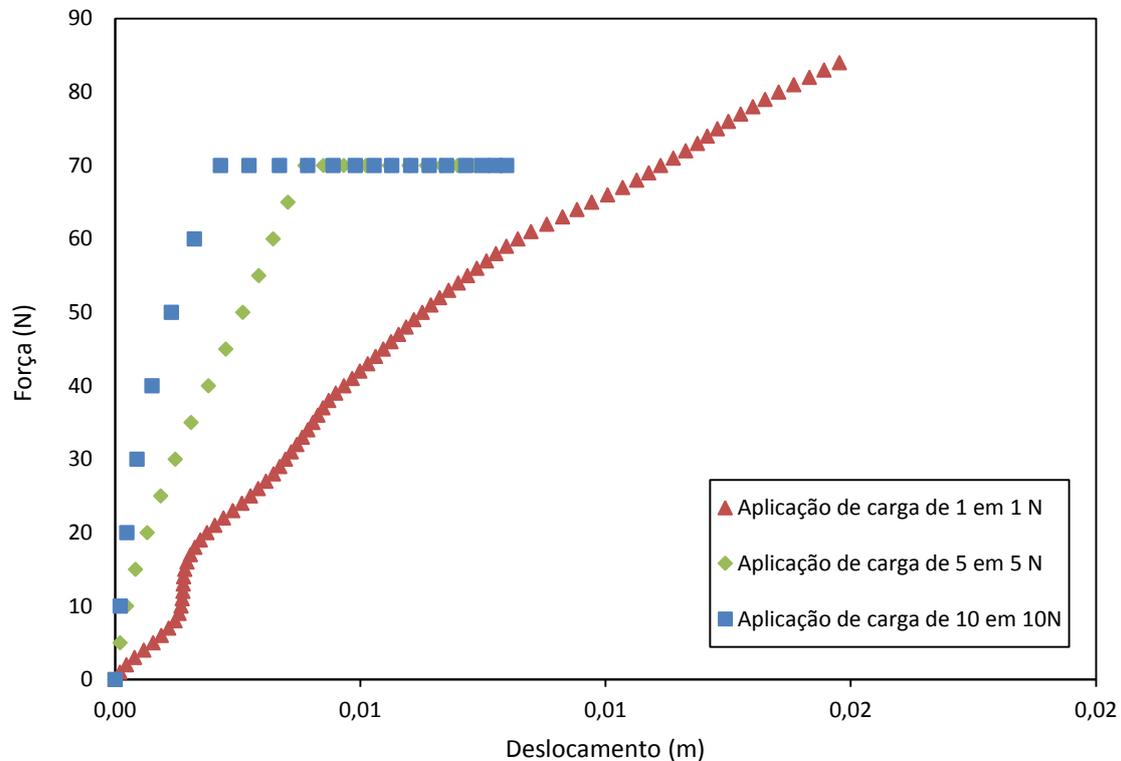


Figura 5.5 – Taxa de Carregamento

5.1.3. FATOR DE SEGURANÇA DO PASSO DE TEMPO

Por fim, o último fator avaliado foi o fator de segurança adotado para o passo de tempo, parâmetro fundamental na simulação dos métodos dos elementos discretos para manter a estabilidade do modelo. A Figura 5.6 ilustra a influência da variação do fator de segurança nas faixas de 0,20 a 0,80. Optou-se por utilizar a mediana dos valores de 0,50, devido às incertezas envolvidas na determinação nos parâmetros de resistência das partículas.

Ressalta-se, no entanto, que o fator de segurança no passo de tempo é um dos principais fatores de simulação, pois sua combinação com alguns parâmetros de resistência da partícula e do contato podem gerar instabilidades na simulação, fazendo com que o modelo não se comportasse como o esperado. Dessa forma, o fator de segurança de tempo é um critério que precisa ser avaliado durante o caso em estudo.

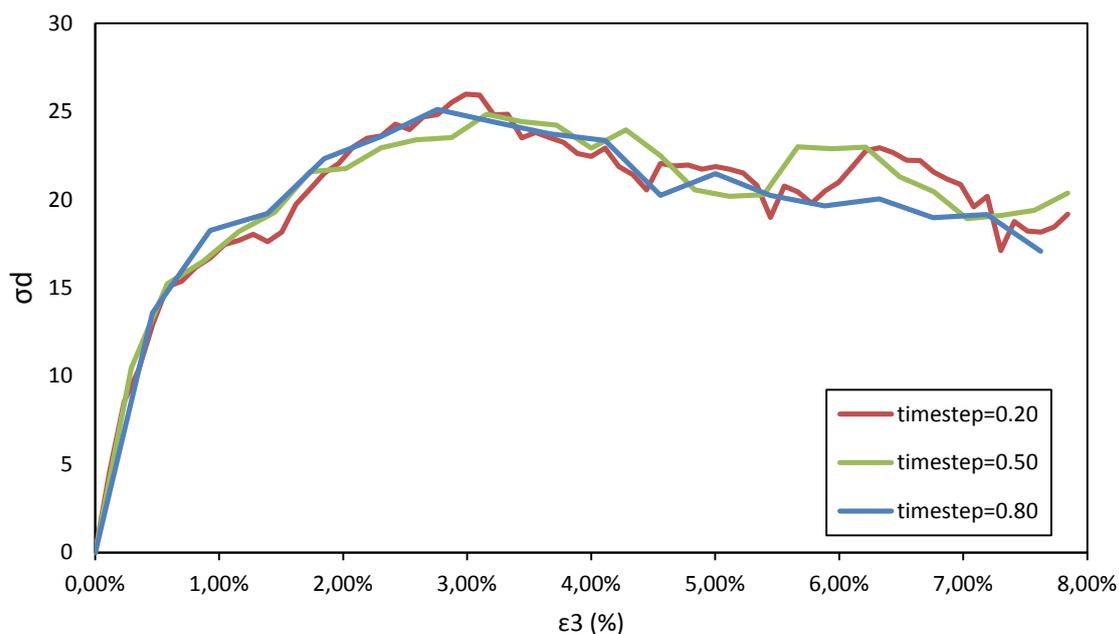


Figura 5.6 – Fator de Segurança Passo de tempo

5.1.4. VELOCIDADE DE INSERÇÃO DAS ESTACAS CRAVADAS

A velocidade de inserção das estacas foi calibrada na tentativa de reduzir possíveis instabilidades no método numérico. No entanto, foi observado que, a uma velocidade demasiadamente baixa, não conseguiu realizar a cravação do conjunto das estacas, e que a velocidade mínima alcançada na cravação gerava recalques negativos no início do ensaio.

Uma forma de minimizar os recalques negativos encontrados foi a aplicação da carga em menores incrementos de tempo, ou seja, reduziu-se o critério de estaticidade de 1% de forças desbalanceadas para 5%. A Figura 4.17 ilustra o processo de cravação da amostra apresentando a magnitude dos vetores de velocidade. Observa-se que, conforme ocorre o processo de cravação, as partículas tendem a se deslocar no sentido contrário ao da estaca, dificultando a representação do processo de cravação no *software* YADE.

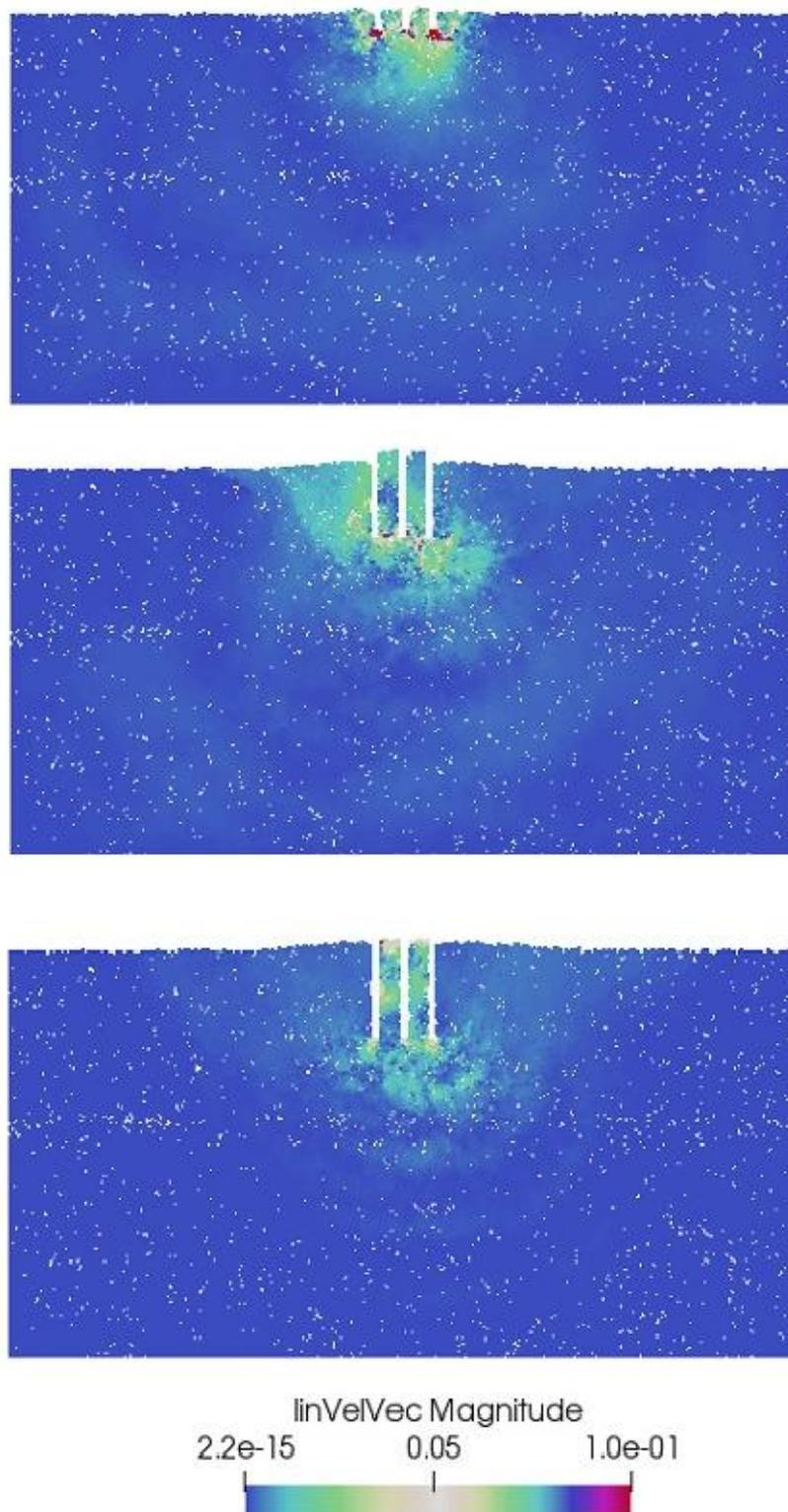


Figura 5.7 – Perturbação da Amostra durante o processo de cravação

5.2 GERAÇÃO DA AMOSTRA E DO MACIÇO

Foi observado que, durante a geração da amostra do ensaio biaxial, a porosidade-alvo indicada nos ensaios experimentais era muito elevada para um ensaio bidimensional em

esferas com o movimento restrito a uma direção. Esse fato deveu-se à diferença geométrica introduzida entre o modelo numérico e o experimental. Considerando os cilindros assentados cuidadosamente na posição horizontal, a porosidade seria obtida por meio da Equação 5-1, que representa a relação entre as áreas, já que os comprimentos seriam iguais e se cancelariam:

$$n = \frac{V_s}{V_t} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{caixa} - A_{esf}}{A_{caixa}} \quad (5-1)$$

onde:

A_{esf} : é área da esfera; e

A_{caixa} : são as dimensões do maciço (LxH).

No entanto, ao implementar essa formulação no *script* de geração da amostra com esferas, observou-se que a porosidade era muito elevada. Estabeleceu-se uma correlação entre a porosidade dos cilindros e da esfera e observou-se que se todos os cilindros estivessem corretamente alinhados, considerando curva granulométrica indicada no experimento, a porosidade máxima em um ensaio bidimensional seria de 0,17. Acredita-se que alguns cilindros poderiam estar levemente inclinados, resultando em uma porosidade maior.

Logo, considerando a porosidade alvo de 0,22 na geração da amostra do ensaio biaxial, foi observado que as esferas submetidas ao processo de compactação ficavam demasiadamente espaçadas e se rearranjavam pela ação da gravidade, resultando em uma porosidade média de 0,17, com desvio padrão de 0,04. A Figura 5.8 ilustra a distribuição final da porosidade na amostra, observa-se que a maior probabilidade de ocorrência dos valores é de 0,17. Observa-se também que a amostra gerada é bastante homogênea e que o método de sub-compactação de Jiang adaptado foi eficiente na produção de uma amostra com a mesma porosidade ao longo de suas dimensões.

Utilizando-se os mesmos parâmetros de resistência, foi avaliada a influência da variação da porosidade no ensaio biaxial. A Figura 5.9 ilustra como a porosidade é um parâmetro de fundamental importância nos resultados, apresentando em seus eixos das abscissas a deformação axial da amostra, e no das ordenadas a tensão maior normalizada pela tensão menor aplicada, observando-se assim um comportamento mais flexível ou rígido da amostra.

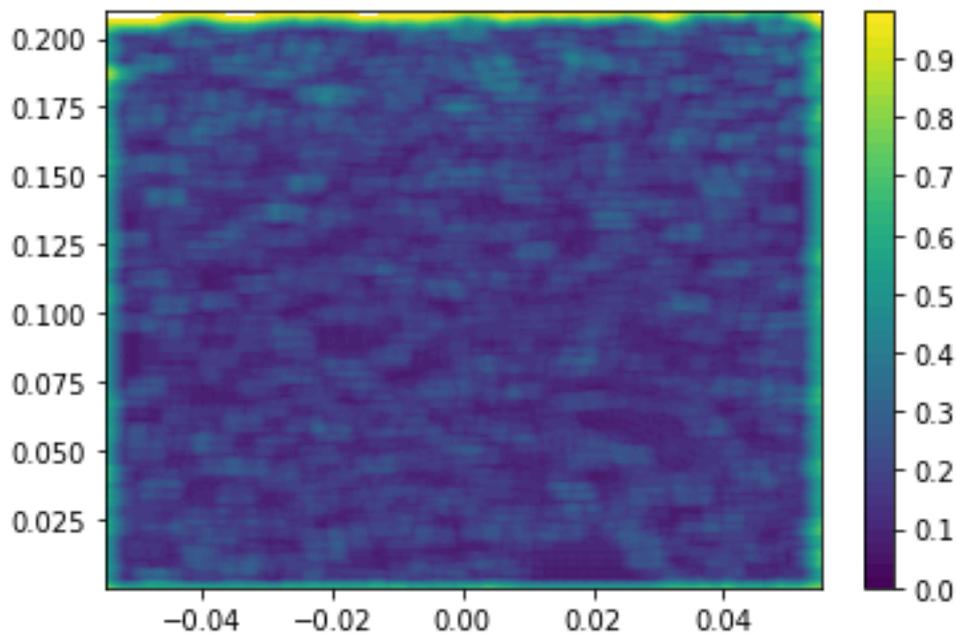


Figura 5.8 – Distribuição da porosidade na Amostra do Ensaio Biaxial

Optou-se por utilizar a maior porosidade alcançada no processo de geração da amostra em uma tentativa de reduzir diferenças do modelo numérico em relação ao experimento. Além disso, a curva proposta para porosidade de 0,17 apresenta maior aderência a curva experimental. Observa-se que a alteração de porosidade na simulação numérica utilizando o DEM produz o comportamento esperado pela mecânica dos solos, pois quanto menor a porosidade, maior o atrito macroscópico mobilizado devido à maior quantidade de contatos.

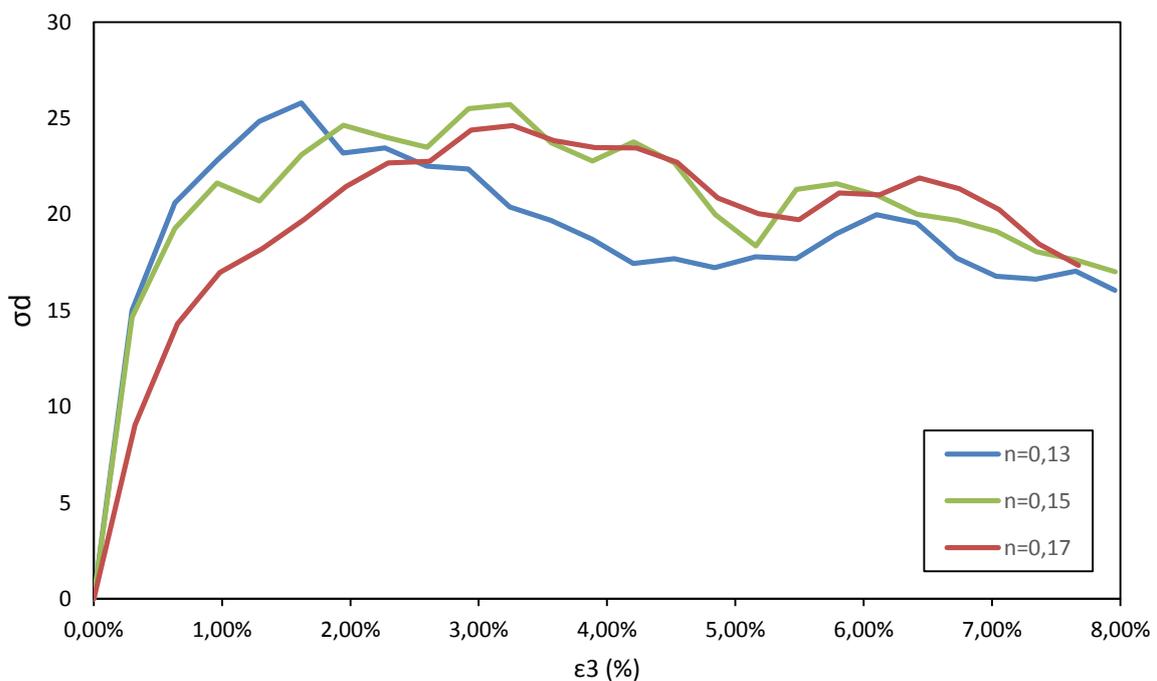


Figura 5.9 – Variação da porosidade na Amostra

O processo de geração do maciço de fundação foi bastante similar ao executado no ensaio biaxial. Inicialmente, optou-se por manter a porosidade alvo do modelo reduzido em 0,26 conforme indicado pelos autores do experimento. Posteriormente, foi avaliada a porosidade encontrada. A distribuição de porosidade localizada no modelo reduzido pode ser observada na Figura 5.10, em que a maior parte dos valores se concentra próximo à porosidade máxima de 0,16. As conclusões obtidas foram similares às encontradas na geração da amostra para o ensaio biaxial, em que as esferas possuíam uma porosidade maior que a possível no processo de compactação e acabavam se rearranjando por ação gravitacional, dando origem a uma porosidade média de 0,16, o maciço também foi considerado uma amostra bastante homogênea.

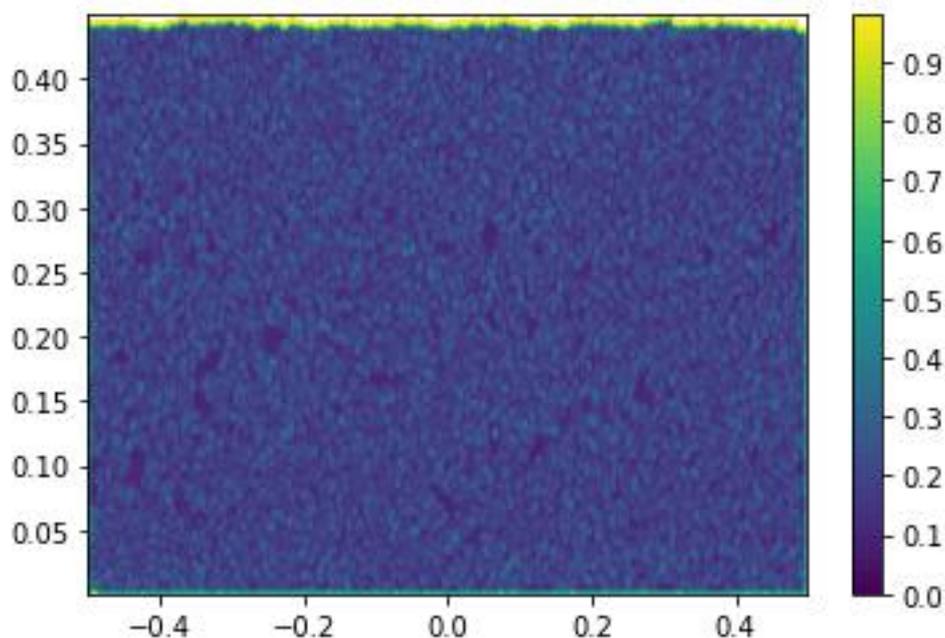


Figura 5.10 – Distribuição da porosidade no maciço de fundação

5.3 ENSAIO BIAXIAL

A calibração do ensaio biaxial foi realizada por meio da variação dos parâmetros mesoscópicos a fim de possibilitar a sua extrapolação para a simulação da prova de carga, ou seja, a calibração dos parâmetros foi realizada por meio do método de tentativa e erro. Optou-se por variar esses parâmetros no ensaio biaxial devido ao menor esforço computacional requerido, uma vez que esse empacotamento apresentava, aproximadamente, 1.900 partículas. Os principais parâmetros variados compreenderam o módulo de Young da partícula (E_p), o coeficiente de Poisson (ν_p) e o coeficiente de atrito (μ).

Conforme apresentado na Figura 5.11, a alteração do coeficiente de Poisson das partículas (ν_p) possui pouca influência no comportamento do ensaio biaxial. Esse coeficiente, no modelo proposto por Cundall, é responsável por determinar a razão entre os coeficientes de rigidez normal e cisalhante do modelo, portanto, optou-se por fixar o coeficiente de Poisson com valor igual ao macroscópico, de 0,20. O coeficiente de Poisson macroscópico obtido do ensaio com o valor das partículas pode ser calculado por:

$$\nu_M = 1 - \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_a} \quad (5-2)$$

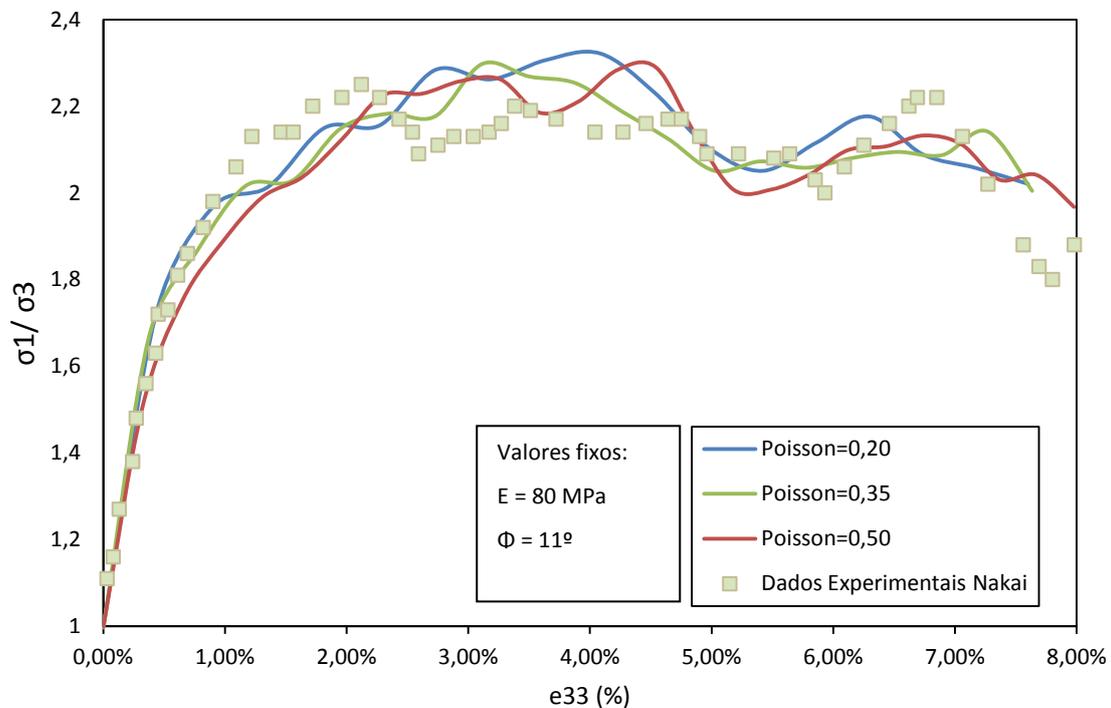


Figura 5.11 – Variação do Coeficiente de Poisson da partícula (ν_p) no ensaio biaxial

A Figura 5.12 ilustra a curva de deformação axial versus deformação volumétrica do modelo. Observa-se, nessa curva, que as esferas de alumínio têm comportamento similar a uma areia média a densa, apresentando dilatação negativa seguida de dilatação positiva (Nakai, 2013).

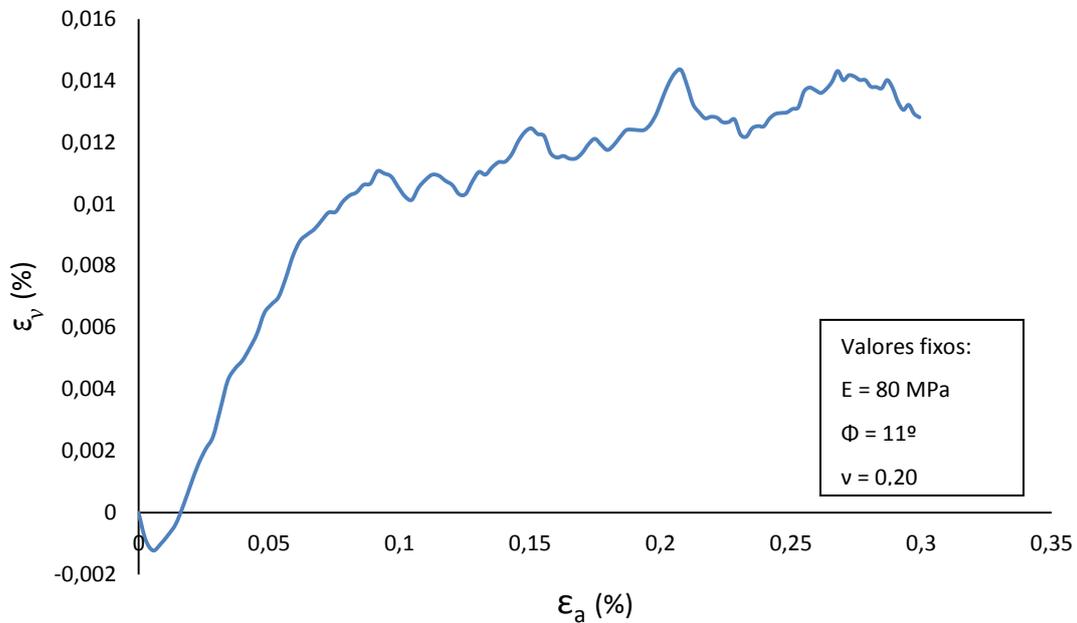


Figura 5.12 – Deformação volumétrica versus deformação axial para Poisson da partícula (ν_p) igual a 0,20

Após avaliar o coeficiente de Poisson, seguiu-se para avaliação do módulo de Young das partículas. O módulo de Young macroscópico obtido do ensaio biaxial pode ser calculado por:

$$E_M = \frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\varepsilon_a} \quad (5-3)$$

A Figura 5.13 apresenta a influência da variação do Módulo de Young da partícula (E_p) na calibração do ensaio biaxial.

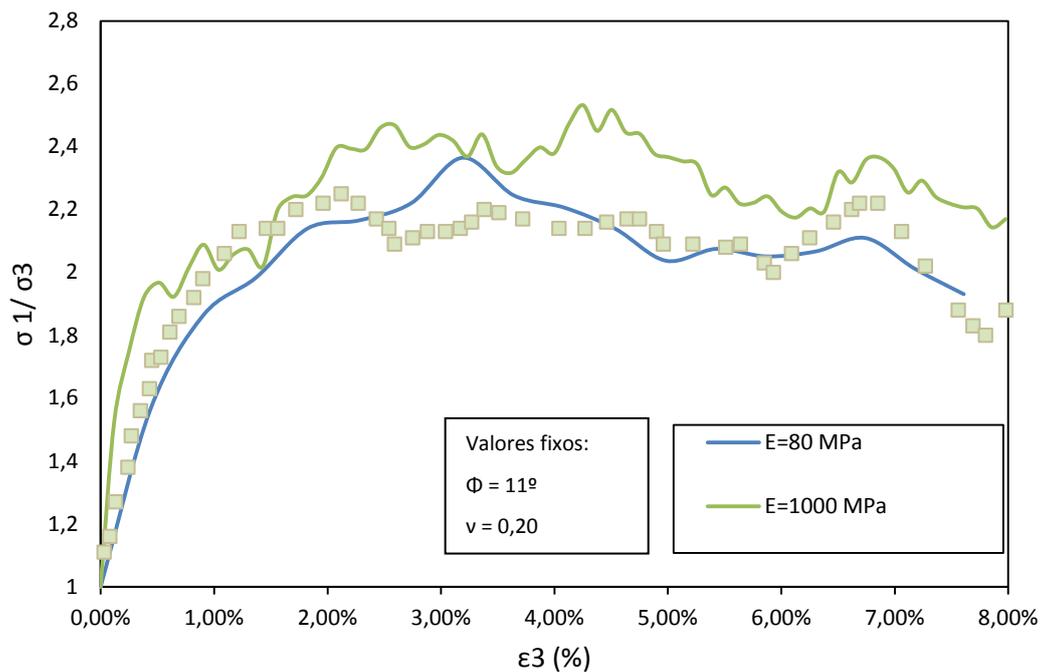


Figura 5.13 – Variação do Módulo de Young da partícula (E_p) no ensaio biaxial

Por fim, calibrou-se o ângulo de atrito entre as partículas (ϕ_p). Por se tratar de material sem coesão e com superfície de ruptura governada pelo critério de Mohr-Coulomb, o ângulo de atrito foi responsável por governar a resistência da amostra ensaiada e influenciou tanto o trecho linear-elástico, quanto a ruptura (Figura 5.14).

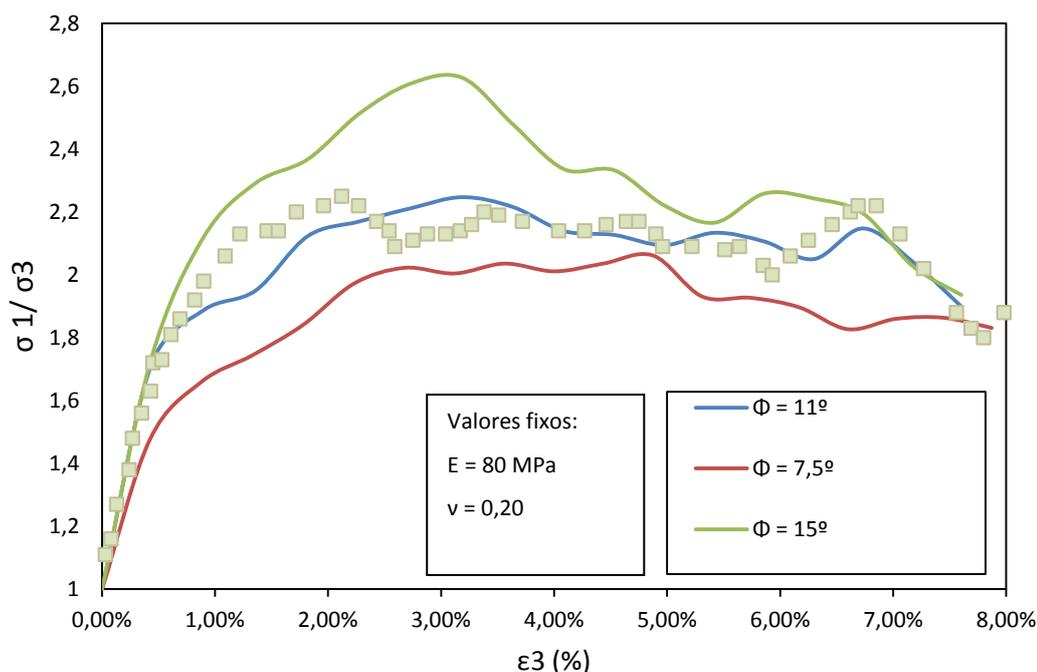


Figura 5.14 – Variação do ângulo de atrito entre as partículas (ϕ_p) no ensaio biaxial

Para avaliar os parâmetros de resistência macroscópicos por meio dos ensaios utilizando o DEM, foi necessário aplicar a regressão proposta por Albuquerque (2016). Essa regressão consiste na associação de um modelo hiperbólico proposto por Duncan&Chang (1970) a um modelo exponencial capaz de prever o comportamento das amostras no ensaio biaxial. Esse modelo é descrito pela seguinte equação:

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon_a}{\sigma_{res}}} + c \varepsilon_a \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon_a}{b}\right)^a\right) \quad (5-4)$$

onde:

σ_d : é a tensão de desvio;

ε_a : é a deformação axial;

σ_{res} : é a tensão residual após a ruptura; e

a , b e c : são parâmetros sem significado físico que governam a forma da curva. Caso o modelo não apresente amolecimento, o coeficiente $c=0$, restando apenas o modelo hiperbólico proposto por Duncan&Chang (1970).

A Figura 5.15 ilustra os resultados para as curvas com todos os parâmetros ajustados para os valores que tiveram maior aderência aos valores experimentais. Observa-se que, para os níveis de tensão impostos no experimento físico e representados no ensaio biaxial, não foi observado o fenômeno de amolecimento, mas que uma pequena alteração no ângulo de atrito resultou em uma alteração sensível no módulo de Young macroscópico. A partir dessas regressões foi possível obter o ângulo de atrito macroscópico, calculado considerando a formulação de Mohr-Coulomb para ruptura apresentada a seguir:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \quad (5-5)$$

onde:

σ_1 : é a tensão principal maior;

σ_2 : é a tensão principal menor;

φ : é o ângulo de atrito macroscópico das partículas; e

c : é igual à coesão, que no caso em estudo é igual a 0.

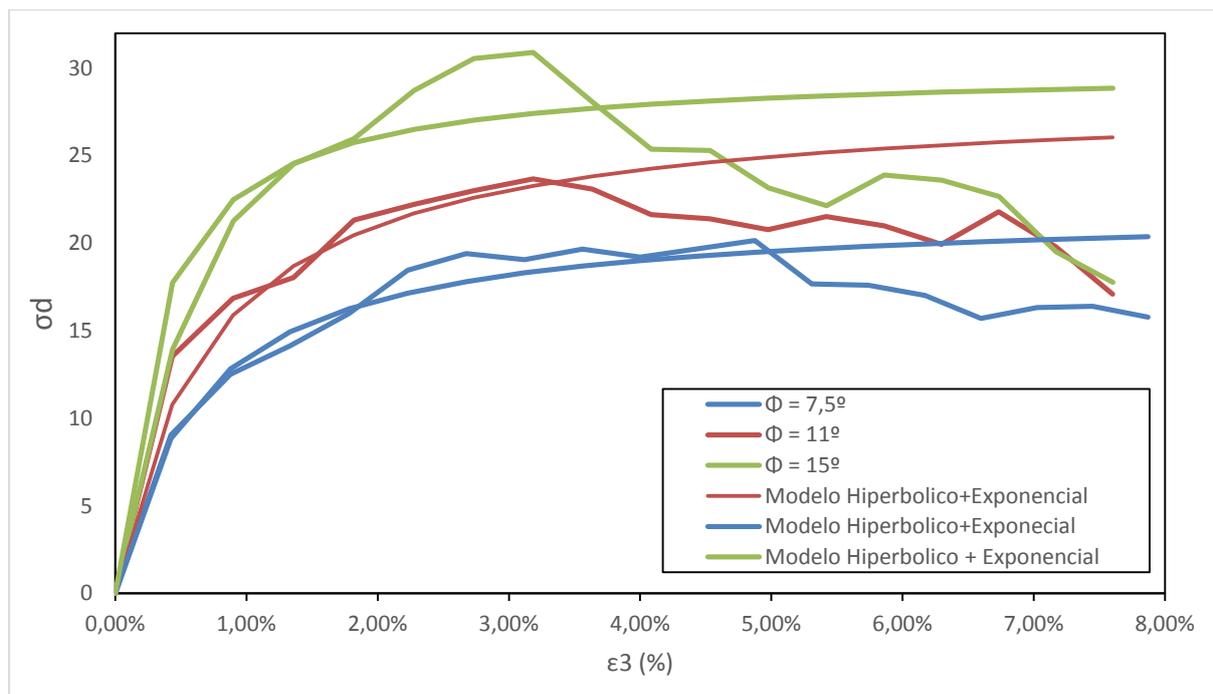


Figura 5.15 – Regressão Hiperbólica para o ângulo de atrito entre as partículas (ϕ_p) no ensaio biaxial

Finalizada a etapa de calibração do ensaio biaxial, na Tabela 5.1 observa-se um resumo dos parâmetros mesoscópicos e microscópicos calibrados versus os parâmetros macroscópicos da amostra. A primeira coluna traz os parâmetros das partículas calibrados. Já a segunda e a terceira coluna apresentam, respectivamente, os parâmetros macroscópicos da amostra alvo e obtidos por meio da regressão. Devido à diferença geométrica entre os modelos, optou-se por não comparar as deformações volumétricas e consequentemente, o coeficiente de Poisson, pois o modelo bidimensional no *software* YADE, trata-se de uma adaptação de um modelo tridimensional com graus de liberdade restritos, alterando sensivelmente a deformação volumétrica medida na amostra.

Tabela 5.1 – Parâmetros mesoscópicos e microscópicos calibrados no ensaio biaxial

Parâmetros	Mesoscópicos Calibrados	Macroscópicos Alvo	Macroscópico obtido
Módulo de Young (E)	80,0 MPa	4,3 MPa	4 MPa
Coefficiente de Poisson (ν_p)	0,20	0,20	-
Ângulo de atrito (Φ)	11°	22,02°	22,02°
Porosidade	0,17	0,22	0,17

5.4 ENSAIO DE PROVA DE CARGA

A prova de carga foi realizada a fim de avaliar se os parâmetros calibrados no ensaio biaxial numérico poderiam ser extrapolados e aplicados à um problema de contorno. Os *scripts* necessários para representar os experimentos se encontram nos apêndices A3 e A4, o primeiro trata-se da geração da amostra e o segundo do ensaio de prova de carga.

A Figura 5.16 ilustra as magnitudes do vetor velocidade na ruptura de uma prova de carga de um bloco. Observa-se que essa superfície se assemelha a proposta por Terzaghi com a formação de uma cunha embaixo do bloco (zona I) e duas zonas de cisalhamento (zona II) com superfícies logarítmicas. Apesar de uma certa assimetria no mecanismo de ruptura, foi considerado, que o script de prova de carga DEM se encontra apto a etapa de validação dos parâmetros encontrados no ensaio biaxial.

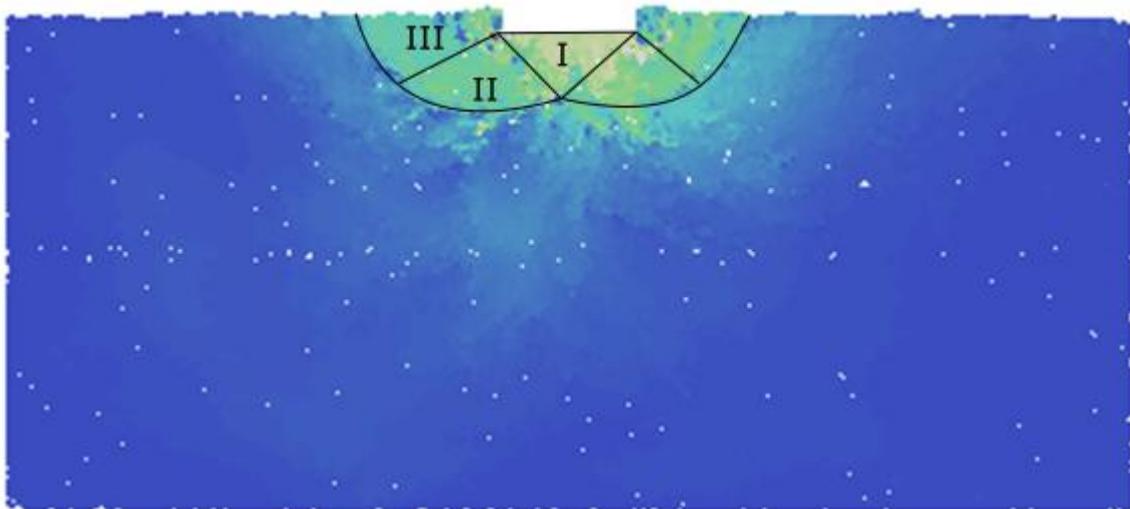


Figura 5.16 – Magnitude do vetor de velocidades na ruptura dos blocos

A superfície de ruptura encontra-se um pouco assimétrica, pois na geração da amostra não foi possível garantir a simetria, uma vez que a deposição das esferas é gerada aleatoriamente, obedecendo a curva granulométrica determinada.

Considerando todos os parâmetros calibrados, foi executada a validação por meio do ensaio de prova de carga no bloco. Os dados importados desse ensaio consistiram na força aplicada, no intervalo de tempo e nos recalques. A Figura 5.17 ilustra os resultados da curva força versus deslocamento. No eixo y, apresenta-se a carga aplicada normalizada pelo peso específico do empacotamento (γ), dimensão da base do bloco (B), tornando a unidade de medida adimensional. No eixo x, os recalques (ρ) são normalizados pela dimensão da base do bloco (B).

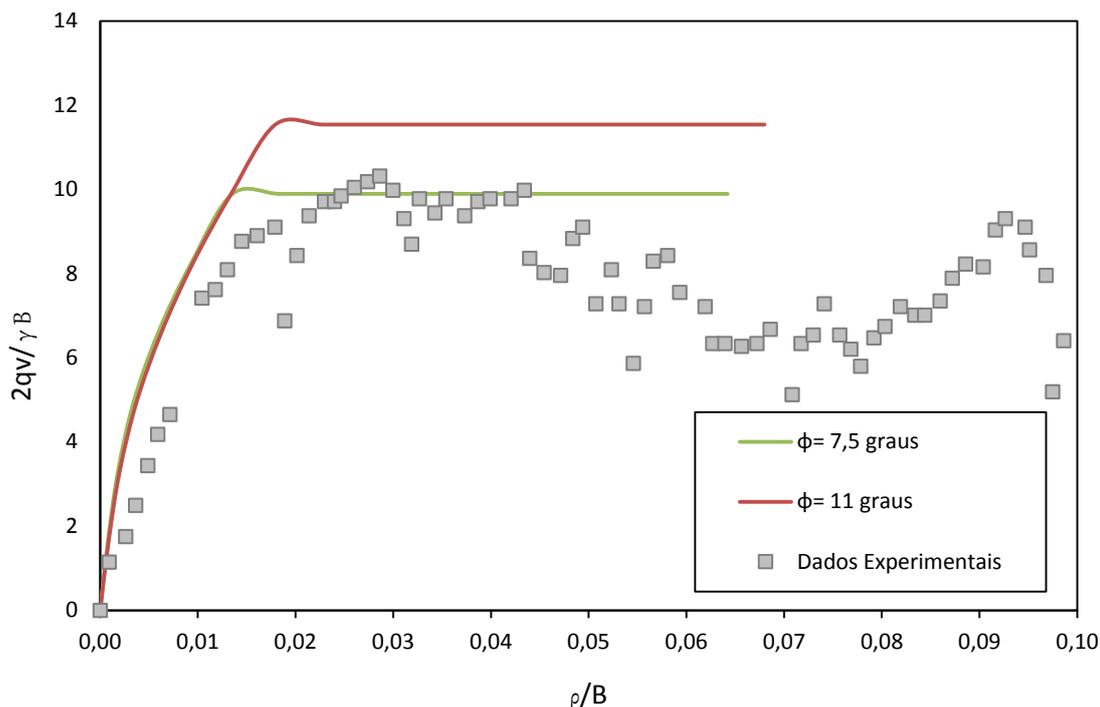


Figura 5.17 – Curva de Força versus Deslocamento do Bloco rígido

Inicialmente, foi simulada a prova de carga com os parâmetros calibrados no ensaio biaxial. Devido à ausência de similaridade na carga de ruptura do ensaio físico e numérico, variou-se o ângulo de atrito para valores menores em busca da mesma carga de ruptura. Como a Figura 5.17 ilustra, para o ângulo de atrito entre as partículas de 11 graus, a ruptura ocorreu em um valor acima do esperado. Dessa forma, optou-se por reduzir o ângulo de atrito das partículas para que fosse encontrada a mesma ruptura do MR no ensaio numérico. Esse fato justifica-se devido à pequena diferença introduzida nos valores de porosidade entre a amostra e o maciço da fundação. Observa-se que, para uma maior quantidade de partículas, a deposição gravitacional resultou em uma porosidade menor.

Depreende-se da prova de carga apresentada que o coeficiente de atrito foi o responsável por governar a ruptura do maciço. Considerando a formulação de Terzaghi apresentada na Equação 3.1, na qual é possível observar que a capacidade de carga de uma fundação superficial é composta por três parcelas – coesão do solo, atrito e sobrecarga –, o resultado se encontra compatível com a solução analítica. Isso porque, por se tratarem de esferas de alumínio ensaiadas, não foi prevista nenhuma coesão. Além disso, no início do ensaio não houve sobrecarga, pois o bloco se encontrava assentado acima da última linha de esferas.

Considerando que o maciço simulava uma areia medianamente densa, a ruptura ocorreu conforme o esperado, pois, para solos densos, espera-se que a ruptura aconteça de forma convencional e bem definida. A partir da formulação de Terzaghi foi possível obter a relação entre o ângulo de atrito do contato e o ângulo macroscópico do maciço. Dessa forma, os resultados obtidos para o ângulo de atrito macroscópico e das partículas foram, respectivamente, de 24° e 7,5°. O ângulo macroscópico encontrado na prova de carga é próximo ao valor calibrado no ensaio Biaxial.

Neves (2009) também propôs uma relação entre o ângulo de atrito macroscópico e microscópico das partículas para areias densas com distribuição granulométrica uniforme. Considerando essa formulação, a relação entre o ângulo de atrito macroscópico e microscópico para esse ensaio numérico teriam como resultados, respectivamente, 21° e 7,5°. Esse resultado apresenta boa aderência aos resultados encontrados.

Albuquerque (2016) também apresenta uma relação entre o ângulo de atrito macroscópico e microscópico, considerando a relação teórica proposta, o ângulo macroscópico obtido seria de 14,7°. No entanto, a correlação proposta não teve boa aderência aos resultados devido as diferenças nas curvas granulométricas utilizadas.

As Figuras 5.18 e 5.19 ilustram a superfície de ruptura dos blocos considerando os dois ângulos de atrito entre partículas distintos. Observa-se que, quanto maior o coeficiente de atrito interparticular, mais reduz-se a zona deformada abaixo dos blocos, considerando as mesmas condições de ensaio.

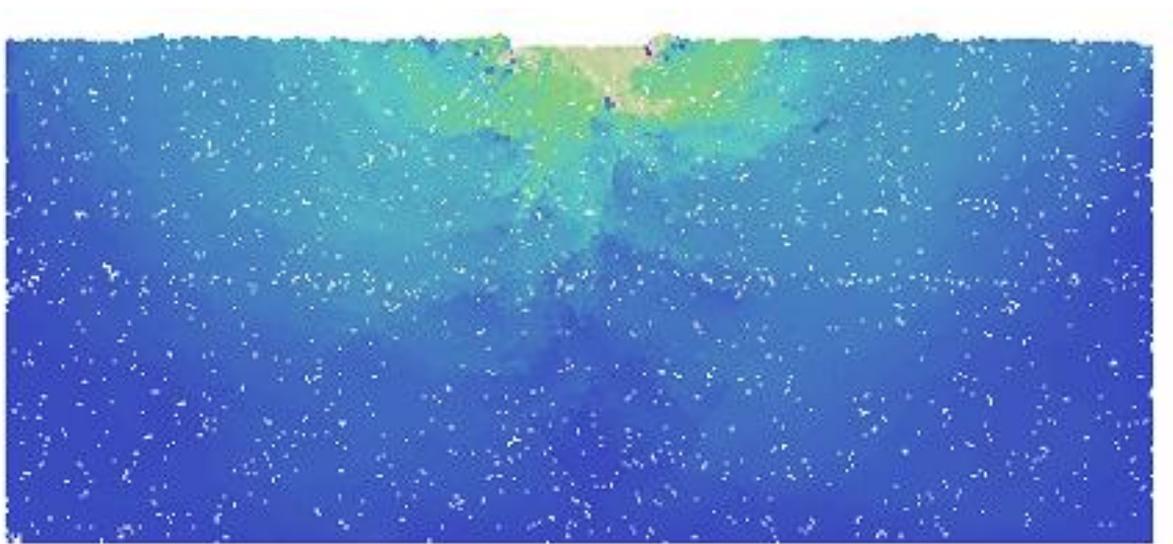


Figura 5.18 – Magnitude do vetor de velocidade na ruptura considerando $\phi_p = 7,5$ graus

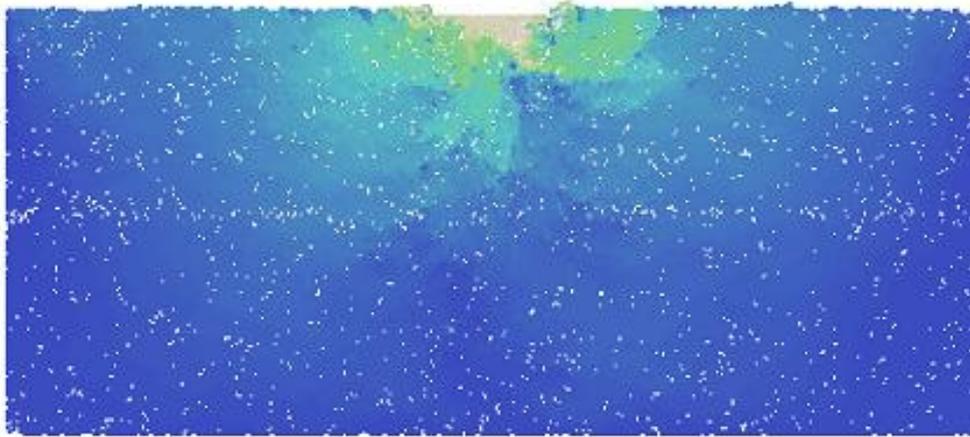


Figura 5.19 Magnitude do vetor de velocidade na ruptura considerando $\phi_p = 11$ graus

Após os ensaios numéricos nos blocos, foram conduzidos os estudos sobre as estacas curtas e longas. As estacas cravadas foram muito influenciadas pela velocidade de cravação: não foi possível encontrar uma velocidade que tornasse a simulação factível sem que ocorressem instabilidades numéricas, pois a velocidade de cravação já induzia uma força no conjunto e, quando iniciado o ensaio, eram observados recalques negativos. A Figura 5.20 ilustra os resultados obtidos nas estacas cravadas e, apesar de ter uma curva com boa aderência aos resultados experimentais, o processo de cravação gerou muita instabilidade numérica, aproximando os valores das curvas aos limites inferiores de atrito, por vezes ocasionando um valor de resistência maior para o coeficiente de atrito inferior. A construção dessas curvas foi realizada desconsiderando o trecho inicial, onde ocorriam recalques negativos. Dessa forma, optou-se por trabalhar com as estacas escavadas.

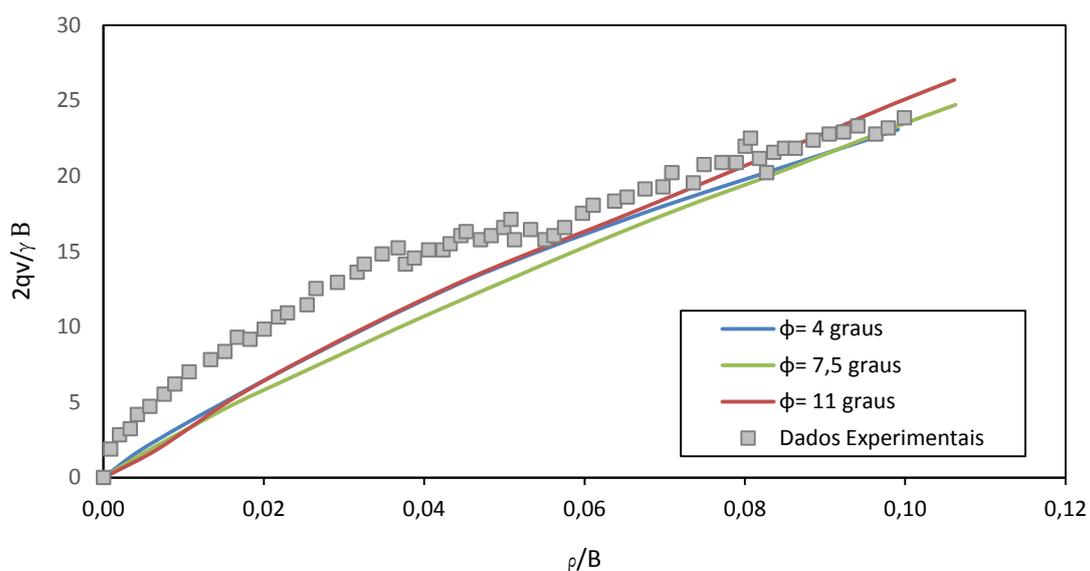


Figura 5.20 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas curtas cravadas

A Figura 5.21 ilustra os resultados obtidos para as estacas escavadas. As estacas escavadas foram calibradas considerando o experimento reduzido e o seu mecanismo e carga de ruptura foram comparados aos obtidos no programa *OptumG2*. Como o experimento físico não foi levado até a ruptura, o ângulo de atrito gerou pouca influência na calibração da curva. Mas, conforme previsto, a capacidade de carga é altamente dependente do ângulo de atrito entre as partículas e do carregamento aplicado.

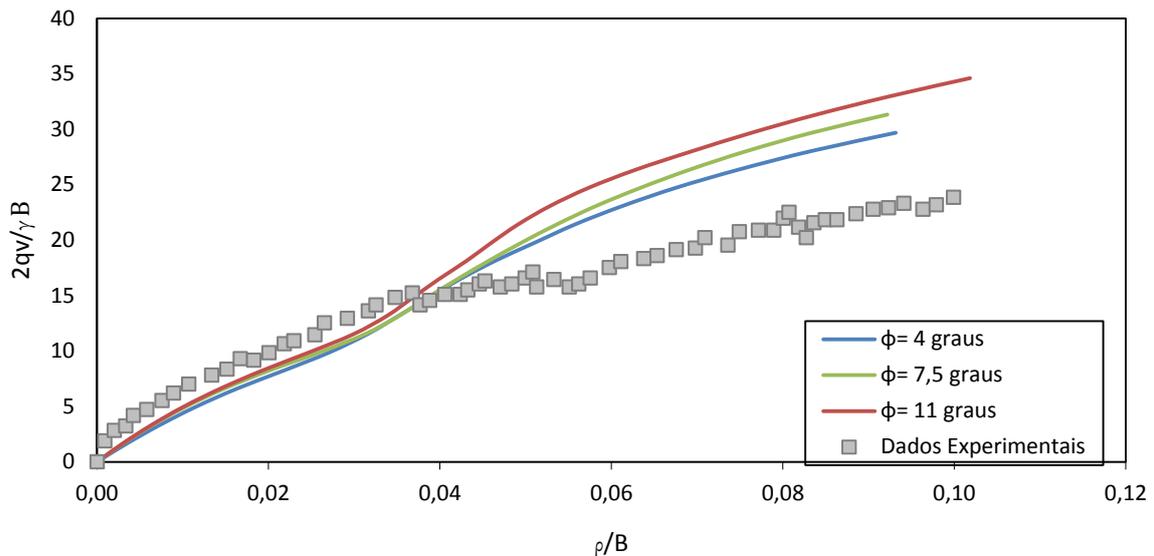


Figura 5.21 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas curtas escavadas

As Figuras 5.22 e 5.23 ilustram o resultado das superfícies de ruptura da estaca curta utilizando o DEM e a Figura 5.24 apresenta a superfície utilizando o Teorema da Análise Limite. É possível observar que as superfícies de ruptura são similares na forma em que o solo é mobilizado. Há um puncionamento do solo logo abaixo das estacas e um pequeno deslocamento da massa ao redor do conjunto bloco e estacas.

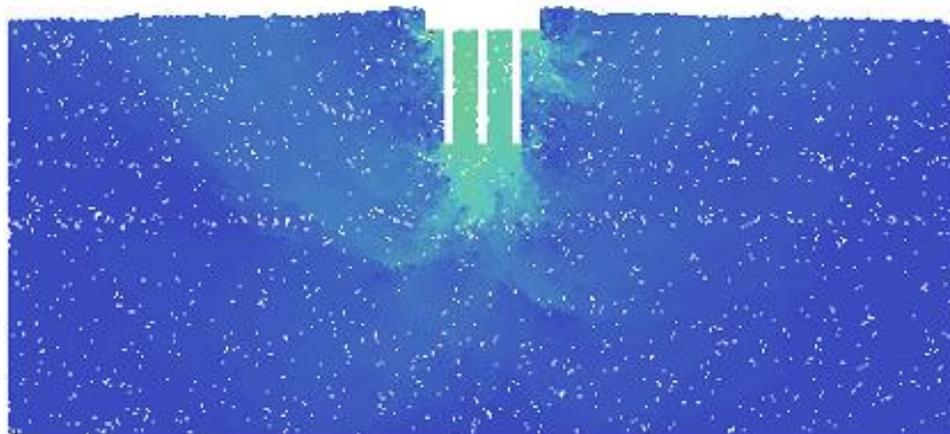


Figura 5.22 Magnitude do vetor de velocidade na ruptura das estacas curtas cravadas

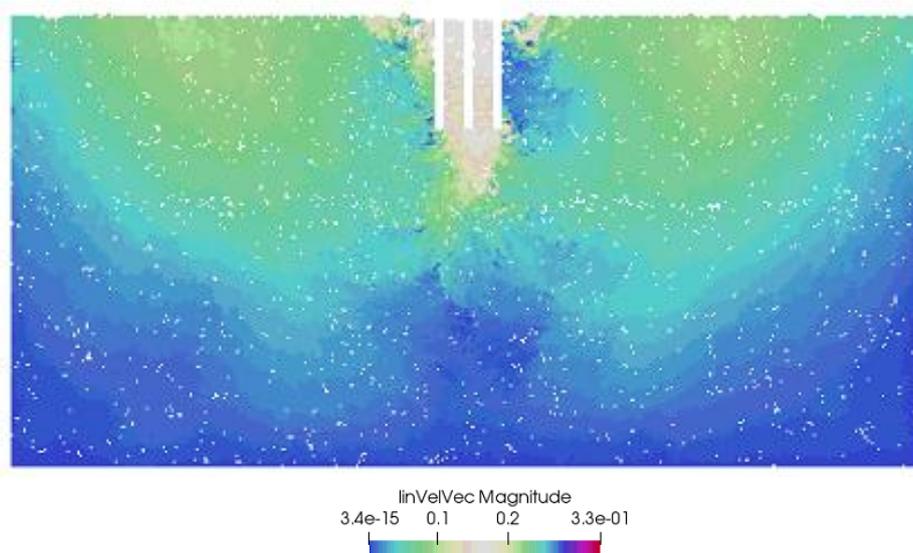


Figura 5.23 Magnitude do vetor de velocidade na ruptura das estacas curtas escavadas

Observa-se que, em ambos os casos, nas estacas cravadas e escavadas utilizando o DEM, há uma formação de uma cunha triangular embaixo das estacas, similar à proposta na ruptura para fundações superficiais sugerida por Terzaghi. Esse fenômeno ocorre devido à diferença entre a rigidez dos materiais que compõem as estacas e o solo, bem como pela proximidade entre as estacas, que é de aproximadamente 2,5 vezes o raio. Para essas características, as estacas apresentam ruptura similar à causada por um bloco de fundação superficial.

As estacas cravadas apresentam ainda uma zona deformada menor que a das estacas escavadas. O fenômeno é devido ao ganho de resistência no maciço, ocasionado pelo processo de cravação, que implica em uma redução da porosidade e uma maior mobilização do ângulo de atrito.

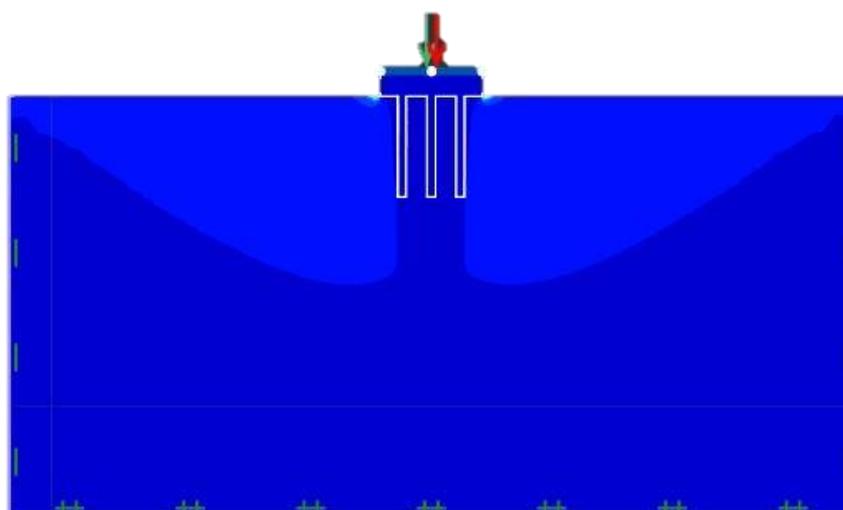


Figura 5.24 – Módulo dos vetores deslocamento na ruptura das estacas curtas

As Figuras 5.25 e 5.26 ilustram o mesmo processo descrito anteriormente, mas considerando as estacas longas e rígidas. O resultado apresentado também é bastante similar ao encontrado nas estacas curtas, no entanto, devido à profundidade uma área maior é mobilizada. A Figura 5.25 mostra que, apesar de ter uma boa aderência aos resultados experimentais, o processo de cravação gerou muita instabilidade numérica, aproximando os valores das curvas para os limites superiores do atrito e, por vezes, ocasionando um valor de resistência maior para o coeficiente de atrito inferior.

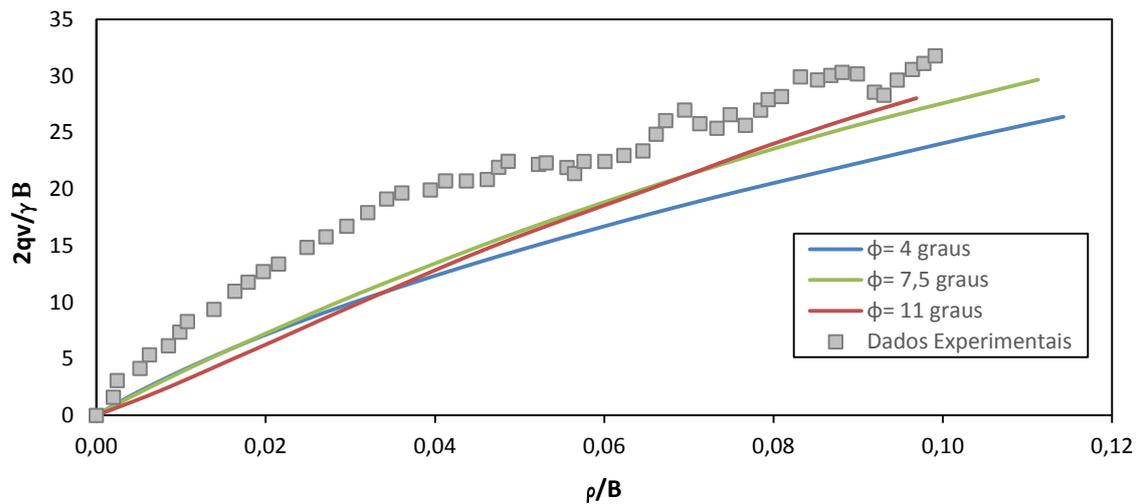


Figura 5.25 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas longas cravadas

A Figura 5.26 trata dos resultados das estacas escavadas, para os quais observa-se um comportamento similar ao esperado, em que a carga de ruptura é governada pelo coeficiente de atrito.

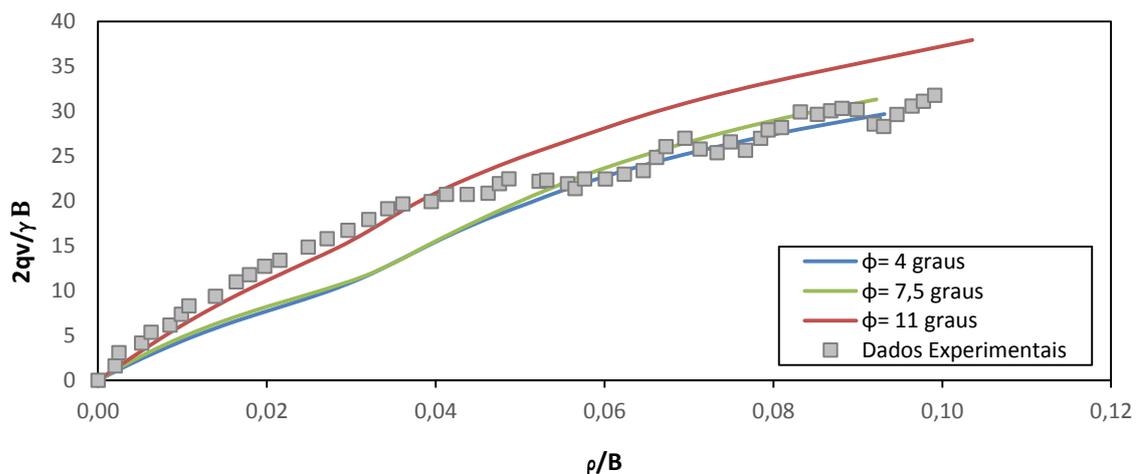


Figura 5.26 – Curva de força versus deslocamento normalizada para estacas longas escavadas

As Figura 5.27 e 5.28 ilustram a magnitude do vetor de velocidade na ruptura. Observa-se que para as estacas cravadas o mesmo processo descrito anteriormente nas estacas

curtas, devido à alteração da porosidade durante o processo de cravação, o solo é menos mobilizado na ruptura das estacas cravadas do que nas estacas escavadas.

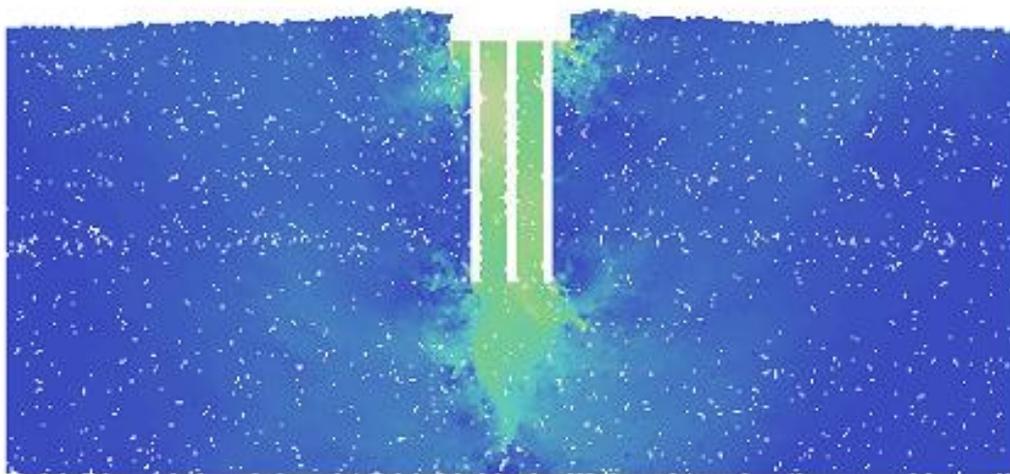


Figura 5.27 – Magnitude do vetor de velocidade das estacas longas cravadas

As Figura 5.28 e 5.29 ilustram a superfície de ruptura nas estacas escavadas utilizando o DEM e o programa *OptumG2*. Observa-se que para os mesmos parâmetros de entrada, uma semelhança entre a superfície de ruptura utilizando o Teorema de Análise Limite e o método dos elementos discretos para as estacas longas.

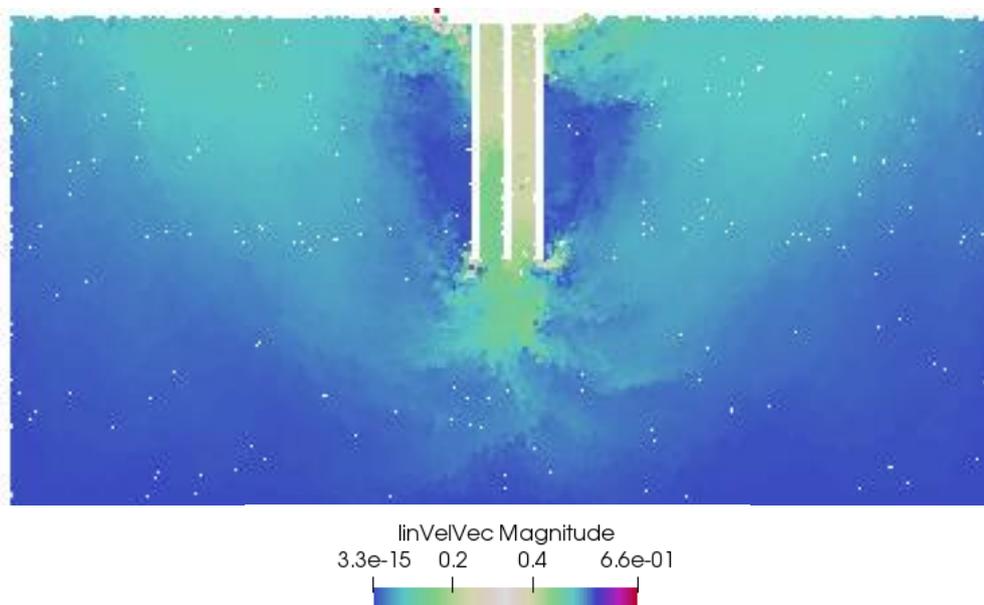


Figura 5.28 – Magnitude do vetor de velocidade na ruptura das estacas longas escavadas

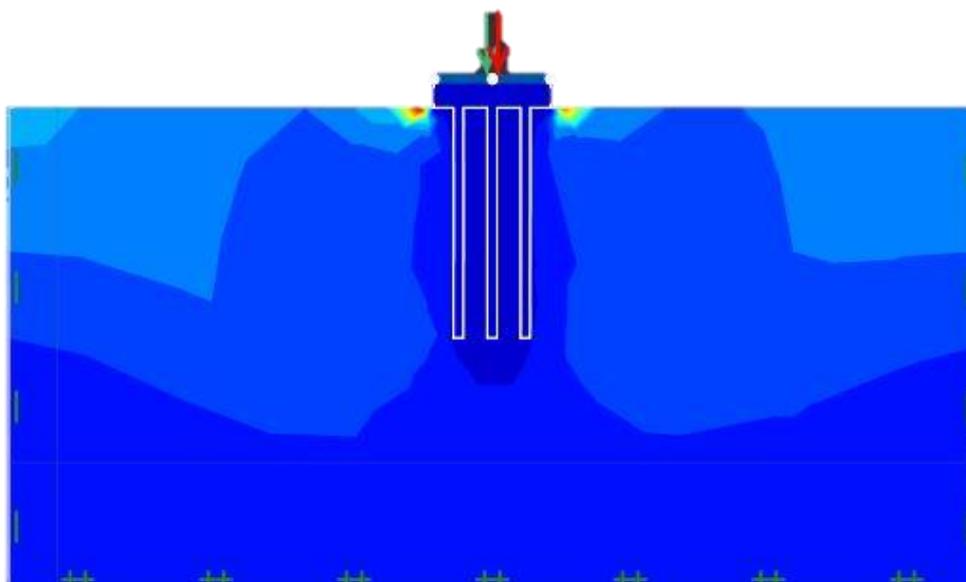


Figura 5.29 – Módulo dos vetores deslocamento na ruptura das estacas longas

A Tabela 5.2, exposta abaixo, traz uma comparação entre as cargas de ruptura mostradas no DEM versus a carga de ruptura apresentada pela Teoria da Análise Limite. É possível observar que o DEM mostra uma boa capacidade de prever qualitativamente as superfícies de ruptura. No entanto, a previsão quantitativa da carga de ruptura não se situou entre os limites inferiores e superiores encontrados pelo Teorema da Análise Limite.

Os resultados ficaram próximos ao limite inferior da Tensão de ruptura e deve se considerar que o Teorema de Análise Limite é baseado na teoria da plasticidade que assume várias simplificações para a resolução dos problemas.

Tabela 5.2 – Carga de ruptura DEM versus Análise Limite

Modelo analisado	Tensão de ruptura DEM (KPa)	Tensão de ruptura Análise Limite (kPa)	
		Superior	Inferior
Estaca curta	275	410	290,6
Estaca Longa	302	843.7	473.5

6 CONCLUSÕES

O objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar a potencialidade utilização do DEM para previsão dos mecanismos de ruptura de fundações que não estão completamente entendidos. Conclui-se que a utilização do DEM apresentou uma boa capacidade de prever a carga e os mecanismos de ruptura das fundações superficiais e profundas em comparação aos mecanismos obtidos pela teoria da plasticidade por meio da resolução Teorema de Análise Limite via *software* OptumG2 e pela equação de capacidade de carga de Terzaghi.

Por meio da utilização do DEM foi possível avaliar os micro-mecanismos essenciais e responsáveis pelo comportamento macroscópico do maciço de fundação e da amostra do ensaio biaxial. Dentre os índices físicos que mais afetaram o comportamento da amostra para o ensaio biaxial durante a calibração, destaca-se a porosidade. Esta é obtida durante a geração das partículas e é responsável por governar a rigidez do corpo de prova ensaiado, por isso é de fundamental importância a escolha do método de geração da amostra. O método eleito, subcompactação de Jiang adaptado, apresentou dificuldades de manter porosidades tão elevadas em ensaios bidimensionais, mas foi considerado satisfatório para a criação de empacotamentos densos com controle de porosidade.

O módulo de Young da partícula é de fundamental importância na geração da amostra e do maciço, já que auxilia na determinação da porosidade do empacotamento. O *software* YADE trabalha com o modelo de contato suave que permite pequenas sobreposições entre as partículas. Logo, quanto maior o Young da partícula, menor a sobreposição, o que acarreta em diferentes arranjos e distribuições de porosidade dentro da amostra.

O modelo de Hertz foi eficiente na calibração do parâmetro biaxial, no entanto, apresentou um comportamento divergente do esperado na aplicação da prova de carga, em que se optou por utilizar o modelo proposto por Cundall & Strack. Este modelo é fortemente afetado pela quantidade de partículas do empacotamento, o que levou à condução de um breve estudo que apontou que, em aproximadamente 1.900 partículas, o aumento na dimensão do corpo de prova do ensaio biaxial não apresentava mais ganhos macro mecânicos na obtenção dos resultados.

Determinada a densidade do empacotamento, os parâmetros que mais influenciaram na resistência do solo consistem no ângulo de atrito entre as partículas e no módulo de Young da partícula. Esse resultado é condizente com o modelo proposto por Cundall & Strack que é um modelo elástico, no qual a não linearidade é introduzida pela alternância entre a existência

e a inexistência de contato entre duas partículas, bem como pelo critério de deslizamento existente nos contatos.

As provas de cargas reproduziram satisfatoriamente as superfícies de ruptura das fundações em comparação com os modelos contínuos e analíticos. O módulo de Young macroscópico das partículas calibrado sofreu pouca influência da alteração das dimensões entre a amostra do ensaio biaxial e o maciço da prova de carga, desde que as porosidades fossem consideradas valores próximos. No entanto, o maciço acabou resultando em um empacotamento mais denso e o ângulo de atrito, responsável por governar a resistência, não obteve similaridade com os valores calibrados e apresentou-se como parâmetro altamente dependente da porosidade. Observou-se, também, que a influência do ângulo de atrito apresentada no trecho linear-elástico da curva não refletiu no maciço de fundação.

A geração do maciço para as provas de carga era bastante demorada devido às dimensões do problema estudado, que consistiam no tamanho de um modelo reduzido. Nas provas de carga, foi observada uma grande influência do carregamento na curva força-deslocamento: quanto mais rápido os carregamentos eram aplicados, mais rígida era a resposta do maciço de fundação.

Dessa forma, a utilização do DEM em escala reduzida apresentou-se como uma boa ferramenta para avaliar os parâmetros microscópicos responsáveis por governar o comportamento macro mecânico. No entanto, a sua utilização comercial ainda depende do estabelecimento de correlações, dos parâmetros mesoscópicos, microscópicos e macroscópicos que se deseja estudar, pois foi dispendido tempo considerável na calibração dos parâmetros.

6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta pesquisa foi um passo na aplicação do DEM a problemas geotécnicos. Para que essa metodologia seja concluída seria necessário estudar outros parâmetros, entre eles:

- Em termos laboratoriais, realizar os experimentos de resistência das partículas e os experimentos físicos do Modelo Reduzido, diminuindo as incertezas de parâmetros laboratoriais que impactam na resposta do DEM, como tempo de carregamento, os parâmetros de amortecimento, a densidade do empacotamento e a rigidez do material;
- Estudar partículas cimentadas para que seja possível representar solos coesivos;

-
- Estudar a resposta de diferentes granulometrias ao problema de contorno;
 - Estudar partículas com diferentes formatos;
 - Avaliar a influência de um empacotamento com mesmo parâmetros e diferentes métodos de geração da amostra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, B. C. P. (2016). Influência do Ângulo de Atrito da Partícula nos Parâmetros Macroscópicos de Resistência do Meio no Estado Plano de Deformações. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 87 p.

AVANZI, E. D. & BERNARDES, G. D. P. (2005). Estudo de Comportamento de Estruturas Grampeadas Utilizando Modelos Reduzidos - Conceitos Teóricos para Garantia da Similitude Modelo- Protótipo. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, PR.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2019). NBR 6122: Projeto e execução de fundações.

BARROS, G. C. G.. (2014). Análise limite com o método dos elementos de contorno. Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Cilamce, Fortaleza, Ceará, ISSN 2178-4949.

BOON, C. W., HOULSBY, G. T. & UTILI, S. (2015). Designing Tunnel Support in Jointed Rock Masses Via the DEM. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(2): 603–632.

CARGILL, B. K. W. & KO, H.-Y. (1983). Centrifugal Modeling of Transient. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(4): 536–555.

CATHERINEO'SULLIVAN, L. & S. O. (2008). Discrete Element Analysis of the Response of Granular Materials During Cyclic Loading. *Soils And Foundations*, Vol 48 No. 4, 511-530.

CHEVALIER, B., COMBE, G. & VILLARD, P. (2012). Experimental and discrete element modeling studies of the trapdoor problem: Influence of the macro-mechanical frictional parameters. *Acta Geotechnica*, 7:15–39.

CORDEIRO, A. F. B. (2017). Modelagem Física de Radiers Estaqueados com e sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 188p.

CUNDALL, P. A. & STRACK, O. D. L. (2009). Discussion: A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 30(3): 331–336.

DUAN, N., CHENG, Y.P., LIU, J.W. (2018). DEM analysis of pile installation effect: comparing a bored and a driven pile. *Granular Matter* (2018): 20-36

PEREIRA, M. S. (2018). Modelagens física e numérica de solo colapsível reforçado por colunas de solo laterítico compactado. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 145 p.

FLEISCHMANN, J. A., PLESHA, M. E. & DRUGAN, W. J. (2014). ‘Determination of Yield Surfaces for Isotropic Non-Cohesive Particulate Materials by the Discrete Element Method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(4): 1081–1100.

FU, Z., CHEN, S. & LIU, S. (2016). Discrete Element Simulations of Shallow Plate-Load Tests. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, ISSN 1532-3641.

GABRIELI, F., COLA, S. & CALVETTI, F. (2009). Use of an up-scaled DEM model for analysing the behaviour of a shallow foundation on a model slope. *Geomechanics and Geoenvironment*, 4(2): 109–122.

HARTMANN, D. A. (2012). Modelagem centrífuga de aterros estruturados com reforço geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 133p.

KHANAL, M., ELMOUTTIE, M., POULSEN, B., OLSSON, A. Deepak Adhikary. (2017). Effect of Loading Rate on Sand Pile Failure: 2D DEM Simulation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(2): 889–896.

KUROSAKI, SHOKO (2003). Deformation and bearing capacity characteristics of pile and shallow foundation(パイルドラフト基礎の変形および支持力特性におよぼ). Dissertação de Mestrado, Nagoya Institute of Technology, Nagoia, JP, 147p.

LIN, J. & WU, W. (2017). A general rotation averaging method for granular materials. *Granular Matter*, Springer Berlin Heidelberg, 19(3): 1–13.

LIU, J., DUAN, N., CUI, L. & ZHU, N. DEM investigation of installation responses of jacked open-ended piles. *Acta Geotechnica* (2019) 14:1805–1819

M. F. RANDOLPH, E. A. R. H. (2001). The Complementary Roles of Physical and Computational Modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 1(1): pp. 01–08.

MORFA, C. R., CORTÉS, L. A., FARIAS, M. M., MORALES, I. P.P, VALERA, R. R., OÑATE, E. (2018). Systemic characterization and evaluation of particle packings as initial sets for discrete element simulations. *Computational Particle Mechanics*, Springer

International Publishing, 5(3): 319–334.

MORFA, C. R., FARIAS, M. M., MORALES, I. P.P, VALERA, R. R., OÑATE, E. (2018). Virtual modeling of polycrystalline structures of materials using particle packing algorithms and Laguerre cells. *Computational Particle Mechanics*. Springer International Publishing, 5(2): 213–226.

NAKAI, T. (2013). *Constitutive Modeling of Geomaterials - Principles and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group, 374p.

NEVES, C. E. V. (2009). *Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF, 166 p.

NG, T.-T. (2009). Discrete Element Method Simulations of the Critical State of a Granular Material. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 9, No. 5, ASCE, ISSN 1532-3641.

NOREÑA, P. C. T. (2015). *Interação cíclica solo-duto em argila mole: modelagem física em centrífuga, interação cíclica solo-duto em argila mole: modelagem física em centrífuga*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 271p.

O’SULLIVAN, C. (2011). Particle-Based Discrete Element Modeling: Geomechanics Perspective. *International Journal of Geomechanics*, 11(6): 449–464.

O’SULLIVAN, C. (2011). *Particulate Discrete Element Modelling, Particulate Discrete Element Modelling*. Spoon Press Taylor & Francis Group, New York, United State of America, volume 4, 561 p.

O’SULLIVAN, C. (2011). *Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective*. Taylor & Francis, ISBN 0-203-88098-6.

O’SULLIVAN, C. (2014). *Advancing geomechanics using dem. Geomechanics from Micro to Macro*, CRC Press, pp. 21–32.

PÉREZ MORALES, I., MORFA, C. R., FARIAS, M. M., VALERA, R. R (2017). Dense packing of general-shaped particles using a minimization technique. *Computational Particle Mechanics*, Springer International Publishing, 4(2): 165–179.

PHILLIP GRIMA, A. & WILHELM WYPYCH, P. (2011). Discrete element simulations of granular pile formation. *Engineering Computations*, 28(3): 314–339.

QUETESCHINER, D., LICHTENEGGER T., PIRKER S., SCHNEIDERBAUER S.(2018). Multi-level coarse-grain model of the DEM. *Powder Technology*, 338: 614–624.

RINCON, E. R. (2016). Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 237 p.

RUI, R., FRITS, V.T., XIA, X., EEKELEN, S. V., HU, G., XIA Y (2016). Evolution of soil arching; 2D DEM simulations. *Computers and Geotechnics*. Elsevier Ltd, 73: 199–209.

SADD, M. H., ADHIKARI, G. & CARDOSO, F. (2000). DEM simulation of wave propagation in granular material. *Powder Technology*, 109(1–3): 222–233.

SALAZAR, A., SÁEZ, E. & PARDO, G. (2015). Modeling the direct shear test of a coarse sand using the 3D Discrete Element Method with a rolling friction model. *Computers and Geotechnics*, Elsevier Ltd, 67: 83–93.

SALGUEIRO, A. P. H. B. (2010). Aplicação do teorema cinemático da análise limite ao cálculo da estabilidade de túneis escavados em solos em condições não drenadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, PT, 128 p.

SHAHIN, H. M., NAKAI, T., OKUDA, K., KATO, M. (2014). Mechanism of Support in Anchor Type Retaining Wall — Model Tests and Numerical Simulations, in *Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers: 472–481.

SHIN, D., YANG, Y. , DENG, Y. & XUE, J. DEM (2019). Modelling of screw pile penetration in loose granular assemblies considering the effect of drilling velocity ratio. *Granular Matter* (2019): 21-74.

SANTOS DA SILVA, L. (2003). Análise Limite de Problemas Geotécnicos com Elementos Finitos Mistos e Híbridos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 127 p.

SUZUKI, K. & KUHN, M. R. (2013). Uniqueness of Discrete Element Simulations in Monotonic Biaxial Shear Tests. *International Journal of Geomechanics*, 14(5), ASCE, ISSN 1532-3641.

TAVARES, M. V. C. F. (2012). Avaliação experimental de fundações estaqueadas em modelos 1g. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia

Civil e Ambiental, Brasília, DF, 155 p.

TEDESCO, B. M. M. S. (2016). Modelagem Numérica de Ensaios de Enrocamento. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 87 p.

THORNTON, C. (2015). Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations. Springer, United Kingdom, Volume 24, 195 p.

WOOD, D. M. (2004). Geotechnical Modelling. CRC Press. New York, United States of America, volume 2.2, 476 p.

ZHAO, X., XU, J., ZHANG, Y., XIAO, Z. (2018). Coupled DEM and FDM algorithm for geotechnical analysis. International Journal of Geomechanics, 18(6): 1–14.

ZULUAGA, R. A. G. (2016). Relação entre características microestruturais e o comportamento macroscópico de solos granulares. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 171 p.

APÊNDICE

A.1. – GERAÇÃO DE AMOSTRA PARA ENSAIO BIAIXIAL

```
# -*- coding: utf-8 -*-

from yade import pack,utils,plot,export

import numpy as np
import operator,fractions

# TODAS AS UNIDADES ESTÃO NO S.I.

#####
### 1.PARÂMETROS DE ENTRADA ###
#####

# 1.1 IMPORT PARAMETERS FROM TABLE
# Parametros de Entrada
nRead=readParamsFromTable(
    AnguloAtritoP = 0, #angulo de atrito do contato
    CoesaoP = 0, #coesao entre as particulas
    PoissonP= 0.2, # coeficiente de poisson da particula
    PorosidadeS = 0.22, #porosidade macroscopica
    MatType = 'frict', #tipo de teste
    TestType = '2D', #teste bidimensional
    PSD = [[0.0032,0.006],[0.6,1.]], #curva granulometrica
    verlet = 0.35,
    YoungP = 8e7, #Modulo de Young da particula
    unknown0k=True
)
from yade.params import table

# 1.2 PARAMETROS DO MEIO E DAS PARTICULAS
YoungP = table.YoungP #kN/m2
PoissonP = table.PoissonP #Adimensional
AnguloAtritoP = radians(table.AnguloAtritoP)
CoesaoP = table.CoesaoP
PorosidadeS = table.PorosidadeS

# 1.3 DIMENSÕES DOS ELEMENTOS

# 1.3.1 CURVA GRANULOMETRICA DO SOLO - PSD=[[diâmetros],[Quantidade passante
Acumulada]]

PSD = table.PSD

# 1.3.2 DADOS MÉDIOS DOS ELEMENTOS
rMeanElemento = ((PSD[0][0]+PSD[0][-1])/2)/2
rRelFuzzElemento = PSD[0][-1]/(2*rMeanElemento)-1
rMaxElemento = PSD[0][-1]/2
rMinElemento = PSD[0][0]/2

# 1.4 TIPO DE MATERIAL
MatType = table.MatType # 'frict', 'cohfrict', 'concrete'

# 1.5 TIPO DE AMOSTRA
TestType = table.TestType

#####
### 2.MATERIAL ###
#####

# 2.1 Material Meio
if MatType == 'frict':
    Material=FrictMat(frictionAngle=0)
```

```

# 2.2 Material Contorno
MatContorno = FrictMat(frictionAngle=0)
0.materials.append(MatContorno)

#####
### 3.GEOMETRIA ###
#####

# 3.1 Triaxial

# 3.1.1 Dimensões
width = 0.11
height = 0.22

if TestType == '2D':
    dx = 1.01*2*rMaxElemento
    dy = width
    dz = height
    CorteTransversal = dy

# 3.1.2 Faces
mn,mx=(-.5*dx,-.5*dy,0),(.5*dx,.5*dy,dz)
walls=aabbWalls([mn,mx],thickness=0,material=MatContorno)
wallIds=0.bodies.append(walls)

base=0.bodies[4]
topo=0.bodies[5]

#####
### 4.CÁLCULOS ###
#####

# 4.1. InteractionLoop
enlargeFactor=1.5

LoopFrict=InteractionLoop(
    [
        Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom(),
    ],
    [
        Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys(), #tipo de material em contato
    ],
    [
        Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack(), #lei de contato
    ],
)

if MatType == 'frict':
    IntLoop = LoopFrict

# 4.2 Factory Parameters
#geracao de nuvem de particulas

MassFlowRate = 2500/(CorteTransversal*dz)

```

```

VMAX = 5
VMIN = 5
FCenter = (0.,0.,height/2)
FExtents2D = (0,width/2.,height/2)
FExtents3D = (width/2.,width/2.,height/2)

factory2D = BoxFactory(
    center = FCenter, extents = FExtents2D,
    PSDsizes = PSD[0], PSDcum = PSD[1], PSDcalculateMass = True,
    vMax = VMAX, vMin = VMIN, vAngle = 0., normal = (0.,0.,-1.),
    maxParticles = -1,
    massFlowRate = MassFlowRate,
    label = 'factory',
    blockedDOFs = 'XYZ',
    materialId = 0
)

if TestType == '2D':
    factory = factory2D

#4.3 Engines
0.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([
        Bo1_Sphere_Aabb(aabbEnlargeFactor=enlargeFactor),
        Bo1_Box_Aabb(),
        Bo1_Wall_Aabb(),
        Bo1_Facet_Aabb()
    ], verletDist=0.07*2*rMeanElemento),
    IntLoop,
    factory,
    DomainLimiter(lo=(-dx/2,-dy/2.,0.),hi=(dx/2,dy/
2.,dz+5*rMeanElemento),iterPeriod=100),
    GlobalStiffnessTimeStepper(
        active=True,
        defaultDt=SpherePWaveTimeStep(radius=rMeanElemento,
density=0.materials[0].density, young=0.materials[0].young),
        timeStepUpdateInterval=10,timestepSafetyCoefficient=0.8
    ),
    NewtonIntegrator(damping=0.4, gravity=[0.,0.,-9.81], label='newton'),
    PyRunner(command='PreencherTriaxial()',iterPeriod=10,label='PrepararAmostra'),
]

#####
### 5.PyRunner ###
#####

def Porosity(Region):
    if TestType == '3D':
        return porosity(Region)
    elif TestType == '2D':
        soma=0.
        for b in 0.bodies:
            if isinstance(b.shape,Sphere):
                soma+=pi*(b.shape.radius**2)
        return (Region-soma)/Region

if TestType == '2D':
    acelerador = 0.5

```

```

Compressao=False
Descompressao=False
AlturaPreenchida=0

def PreencherTriaxial():
    global Compressao
    global Descompressao
    global topo
    global AlturaPreenchida
    if Compressao:
        if Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])<PorosidadeS:
            topo.state.vel = (0.,0.,1.*acelerador)
            Descompressao = True
            Compressao = False
            newton.damping = 0.4
        else:
            topo.state.vel = (0,0,-10*acelerador)
    elif Descompressao:
        if abs(0.forces.f(topo.id)[2])==0:
            if topo.state.vel==(0,0,1*acelerador):
                print Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])
                AlturaPreenchida=topo.state.pos[2]
                print AlturaPreenchida/height
            if topo.state.pos==(0,0,dz+rMaxElemento):
                if AlturaPreenchida>height-rMeanElemento:
                    topo.state.vel=(0,0,0)
                    Descompressao=False
                    Material.frictionAngle=radians(35)
                    newton.damping=0.4

PrepararAmostra.command='EstabilizarTriaxial()'
                                PrepararAmostra.iterPeriod=1
                                else:
                                topo.state.vel = (0,0,0)
                                Descompressao = False
                                factory.massFlowRate = 220/
(CorteTransversal*(height-AlturaPreenchida))
                                newton.damping = 0.1
                                else:
                                topo.state.vel=(0,0,0)
                                topo.state.pos=(0,0,dz+rMaxElemento)
elif factory.massFlowRate==0:
    Compressao=True

def EstabilizarTriaxial():
    if topo.state.pos[2]>0.98*height:
        topo.state.vel=(0,0,-25)
    else:
        topo.state.vel=(0,0,0)
        if utils.unbalancedForce()<0.001:
            PrepararAmostra.command='FinalizarPreparo()'

def FinalizarPreparo():
    print "Amostra Preparada"
    print "Densidade"
    print Material.density
    print "Porosidade"
    print Porosity(CorteTransversal*AlturaPreenchida)
    print "Tempo"
    print 0.realtime
    export.textExt('Packing' + TestType + MatType + '-' +
str(PorosidadeS),'x_y_z_r_matId')
    0.pause()

```

A.2. – GERAÇÃO DE AMOSTRA: PROVA DE CARGA - BLOCOS E ESTACAS ESCAVADAS

```
# -*- coding: utf-8 -*-
from yade import pack,utils,plot,ympart, export
import numpy as np
# 1.PARÂMETROS DE ENTRADA
#1.1 SOLO
from yade import pack,utils,plot,export
import numpy as np
import operator,fractions
# TODAS AS UNIDADES ESTÃO NO S.I.
#####
### 1.PARÂMETROS DE ENTRADA ###
#####

# 1.1 IMPORT PARAMETERS FROM TABLE
nRead=readParamsFromTable(
    DensidadeP1 = 48750,
    DensidadeP2 = 26000,
    PoissonP = 0.2,
    AnguloAtritoP = 0,
    CoesaoP = 0,
    PorosidadeS = 0.26,
    MatType = 'frict',
    TestType = '2D',
    PSD = [[0.0032,0.006],[0.6,1.]],
    verlet = 0.35,
    YoungP = 8e7,
    unknownOk=True
)
from yade.params import table

# 1.2 PARAMETROS DO MEIO (MACROSCÓPICOS)
DensidadeP1=table.DensidadeP1
DensidadeP2=table.DensidadeP2 #tf/m³
YoungP = table.YoungP #kN/m²
PoissonP = table.PoissonP #Adimensional
AnguloAtritoP = radians(table.AnguloAtritoP)
CoesaoP = table.CoesaoP
PorosidadeS = table.PorosidadeS

# 1.3 DIMENSÕES DOS ELEMENTOS
# 1.3.1 CURVA GRANULOMETRICA DO SOLO - PSD=[[diâmetros],[Quantidade passante
Acumulada]]
PSD = table.PSD

# 1.3.2 DADOS MÉDIOS DOS ELEMENTOS
rMeanElemento = ((PSD[0][0]+PSD[0][-1]))/2
rRelFuzzElemento = PSD[0][-1]/(2*rMeanElemento)-1
rMaxElemento = PSD[0][-1]/2
rMinElemento = PSD[0][0]/2

# 1.4 TIPO DE MATERIAL
MatType = table.MatType # 'frict', 'cohfrict', 'concrete'

# 1.5 TIPO DE AMOSTRA
TestType = table.TestType
```

```

#####
### 2.MATERIAL ###
#####

# 2.1 Material Meio
if MatType == 'frict':
    Material=FrictMat(frictionAngle=0)

# 2.2 Material Contorno
MatContorno = FrictMat(frictionAngle=0)
0.materials.append(MatContorno)

#####
### 3.GEOMETRIA ###
#####

# 3.1 Triaxial

# 3.1.1 Dimensões
width = 1
height = 0.50

if TestType == '2D':
    dx = 1.01*2*rMaxElemento
    dy = width
    dz = height
    CorteTransversal = dy

# 3.1.2 Faces
mn,mx=(-.5*dx,-.5*dy,0),(.5*dx,.5*dy,dz)
walls=aabbWalls([mn,mx],thickness=0,material=MatContorno)
wallIds=0.bodies.append(walls)

base=0.bodies[4]
topo=0.bodies[5]

#####
### 4.CÁLCULOS ###
#####

# 4.1. InteractionLoop
enlargeFactor=1.5

LoopFrict=InteractionLoop(
    [
        Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom(),
    ],
    [
        Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys(),
    ],
    [
        Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack(),
    ],
)

```

```

if MatType == 'frict':
    IntLoop = LoopFrict

# 4.2 Factory Parameters

MassFlowRate = 5000/(CorteTransversal*dz)
VMAX = 5
VMIN = 5
FCenter = (0.,0.,height/2)
FExtents2D = (0,width/2.,height/2)
FExtents3D = (width/2.,width/2.,height/2)

factory2D = BoxFactory(
    center = FCenter, extents = FExtents2D,
    PSDsizes = PSD[0], PSDcum = PSD[1], PSDcalculateMass = True,
    vMax = VMAX, vMin = VMIN, vAngle = 0., normal = (0.,0.,-1.),
    maxParticles = -1,
    massFlowRate = MassFlowRate,
    label = 'factory',
    blockedDOFs = 'XYZ',
    materialId = 0
)

if TestType == '2D':
    factory = factory2D

#4.3 Engines
O.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([
        Bo1_Sphere_Aabb(aabbEnlargeFactor=enlargeFactor),
        Bo1_Box_Aabb(),
        Bo1_Wall_Aabb(),
        Bo1_Facet_Aabb()
    ], verletDist=0.07*2*rMeanElemento),
    IntLoop,
    factory,
    DomainLimiter(lo=(-dx/2,-dy/2.,0.),hi=(dx/2,dy/
2.,dz+50*rMeanElemento),iterPeriod=100),
    GlobalStiffnessTimeStepper(
        active=True,
        defaultDt=SpherePWaveTimeStep(radius=rMeanElemento,
density=0.materials[0].density, young=0.materials[0].young),
        timeStepUpdateInterval=10,timestepSafetyCoefficient=0.8
    ),
    NewtonIntegrator(damping=0.7, gravity=[0.,0.,-9.81], label='newton'),
    PyRunner(command='PreencherTriaxial()',iterPeriod=100,label='PrepararAmostra'),
]

#####
### 5.PyRunner ###
#####

def Porosity(Region):
    if TestType == '3D':
        return porosity(Region)

```

```

elif TestType == '2D':
    soma=0.
    for b in O.bodies:
        if isinstance(b.shape, Sphere):
            soma+=pi*(b.shape.radius**2)
    return (Region-soma)/Region

if TestType == '2D':
    acelerador = 1

Compressao=False
Descompressao=False
AlturaPreenchida=0

def PreencherTriaxial():
    global Compressao
    global Descompressao
    global topo
    global AlturaPreenchida
    if Compressao:
        if Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])<PorosidadeS:
            topo.state.vel = (0.,0.,1.*acelerador)
            Descompressao = True
            Compressao = False
            newton.damping = 0.7
        else:
            topo.state.vel = (0,0,-10*acelerador)
    elif Descompressao:
        if (abs(0.forces.f(topo.id)[2]))==0:
            if topo.state.vel==(0,0,1*acelerador):
                print Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])
                AlturaPreenchida=topo.state.pos[2]
                print AlturaPreenchida/height
            if topo.state.pos==(0,0,dz+rMaxElemento):
                if AlturaPreenchida>height-rMeanElemento:
                    topo.state.vel=(0,0,0)
                    Descompressao=False
                    Material.frictionAngle=radians(23)
                    newton.damping=0.4

PrepararAmostra.command='EstabilizarTriaxial()'
                                PrepararAmostra.iterPeriod=1
                                else:
                                    topo.state.vel = (0,0,0)
                                    Descompressao = False
                                    factory.massFlowRate = 220/
(CorteTransversal*(height-AlturaPreenchida))
                                    newton.damping = 0.1
                                else:
                                    topo.state.vel=(0,0,0)
                                    topo.state.pos=(0,0,dz+rMaxElemento)
elif factory.massFlowRate==0.:
    Compressao=True

def EstabilizarTriaxial():
    if topo.state.pos[2]>0.98*height:
        topo.state.vel=(0,0,-25)
    else:
        topo.state.vel=(0,0,0)
        if utils.unbalancedForce()<0.01:
            PrepararAmostra.command='FinalizarPreparo()'

```

```
def FinalizarPreparo():
    print "Amostra Preparada"
    print "Densidade"
    print Material.density
    print "Porosidade"
    print Porosity(CorteTransversal*AlturaPreenchida)
    print "Tempo"
    print 0.realtime
    export.textExt('Packing' + TestType + MatType + '-' +
str(PorosidadeS), 'x_y_z_r_matId')
    0.pause()

0.run()
utils.waitForBatch()
```

```

# -*- coding: utf-8 -*-

from yade import pack,utils,plot,ympport, export

import numpy as np

#####
### 1.PARAMETROS DE ENTRADA ###
#####

# TODAS AS UNIDADES ESTÃO NO S.I.

# 1.1.DADOS DA FUNDAÇÃO
AlturaBloco=0.03 #Altura do bloco
de fundação
comprimentoestaca=0.12 #Comprimento da
estaca
larguraestaca=0.01 #Largura da
estaca

#1.2 SOLO

from yade import pack,utils,plot,export

import numpy as np
import operator,fractions

# 1.3 IMPORT PARAMETERS FROM TABLE
nRead=readParamsFromTable(
    DensidadeP1 = 48750,
    DensidadeP2 = 26000,
    PoissonP = 0.2,
    AnguloAtritoP = 0,
    CoesaoP = 0,
    PorosidadeS = 0.16,
    MatType = 'frict',
    TestType = '2D',
    PSD = [[0.0032,0.006],[0.6,1.]],
    verlet = 0.35,
    YoungP = 8e7,
    unknownOk=True
)
from yade.params import table

# 1.4 PARAMETROS DO MEIO
DensidadeP1=table.DensidadeP1
DensidadeP2=table.DensidadeP2
YoungP = table.YoungP
PoissonP = table.PoissonP #Adimensional
AnguloAtritoP = radians(table.AnguloAtritoP)
CoesaoP = table.CoesaoP
PorosidadeS = table.PorosidadeS

# 1.5 DIMENSÕES DOS ELEMENTOS

# 1.5.1 CURVA GRANULOMETRICA DO SOLO - PSD=[[diâmetros],[Quantidade passante
Acumulada]]

PSD = table.PSD

# 1.5.2 DADOS MÉDIOS DOS ELEMENTOS
rMeanElemento = ((PSD[0][0]+PSD[0][-1]))/2
rRelFuzzElemento = PSD[0][-1]/(2*rMeanElemento)-1
rMaxElemento = PSD[0][-1]/2

```

```

rMinElemento = PSD[0][0]/2

# 1.6 TIPO DE MATERIAL
MatType = table.MatType      # 'frict', 'cohfrict', 'concrete'

# 1.7 TIPO DE AMOSTRA
TestType = table.TestType

#####
### 2.MATERIAL ###
#####

# 2.1 Material Meio
if MatType == 'frict':
    Material=FrictMat(density=20400, frictionAngle=0)
    0.materials.append(Material)

# 2.2 Material Contorno
MatContorno = FrictMat(frictionAngle=0)
0.materials.append(MatContorno)

#2.3 SHALLOW AND PILE MATERIAL
AngAtritoA=atan(radians(60))
DensidadeA=27777
MatBloco=FrictMat(density=DensidadeA, frictionAngle=AngAtritoA, young=9e12, label="aluminio")
0.materials.append(MatBloco)

#####
### 3.GEOMETRIA ###
#####

# 3.1 Triaxial

# 3.1.1 Dimensões
width = 1
height = 0.515

if TestType == '2D':
    dx = 1.01*2*rMaxElemento
    dy = width
    dz = height
    CorteTransversal = dy

# 3.1.2 Faces
mn,mx=(-0.5*dx, -0.5*dy, 0), (0.5*dx, 0.5*dy, dz)
walls=aabbWalls([mn,mx], thickness=0, material=MatContorno)
wallIds=0.bodies.append(walls)

base=0.bodies[4]
topo=0.bodies[5]

# 2.GEOMETRIA

# 2.1. FUNDAÇÃO
GeomEst1=box((0,0.0325, 0.5-comprimentoestaca/2), (1.01*1*0.003, larguraestaca/2, comprimentoestaca/2), material=MatBloco, color=(1,0,0))
GeomEst2=box((0,-0.0325, 0.5-comprimentoestaca/2), (1.01*1*0.003, larguraestaca/2, comprimentoestaca/2), material=MatBloco, color=(1,0,0))
GeomEst3=box((0,0, 0.5-comprimentoestaca/2), (1.01*1*0.003, larguraestaca/2, comprimentoestaca/2), fixed=True, material=MatBloco, color=(1,0,0))

```

```
0.bodies.appendClumped([(GeomEst1),(GeomEst2),(GeomEst3)])
```

```
#2.2 DEFINE BLOCKED DOFs
```

```
for b in 0.bodies:  
    if b.isClump:  
        b.state.blockedDOFs='xyzXYZ'
```

```
#####  
### 4.CÁLCULOS ###  
#####
```

```
# 4.1. InteractionLoop
```

```
enlargeFactor=1.5
```

```
LoopFrict=InteractionLoop(  
    [  
        Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),  
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),  
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom(),  
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom(),  
    ],  
    [  
        Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys(),  
    ],  
    [  
        Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack(),  
    ],  
)  
  
LoopCohFrict=InteractionLoop(  
    [  
        Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),  
  
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom6D(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),  
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom6D(),  
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom6D(),  
    ],  
    [  
        Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys(),  
  
        Ip2_CohFrictMat_CohFrictMat_CohFrictPhys(setCohesionNow=True,setCohesionOnNewContacts=True,l  
    ],  
    [  
        Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack(),  
        Law2_ScGeom6D_CohFrictPhys_CohesionMoment(useIncrementalForm=True)  
    ],  
)  
  
LoopConcrete=InteractionLoop(  
    [  
        Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),  
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),  
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom(),  
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom(),  
    ],  
    [  
        Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys(),  
        Ip2_CpmMat_CpmMat_CpmPhys(cohesiveThresholdIter=10),  
        Ip2_FrictMat_CpmMat_FrictPhys(),  
    ],  
    [  

```

```

        Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack(),
        Law2_ScGeom_CpmPhys_Cpm(),
    ],
)
if MatType == 'frict':
    IntLoop = LoopFrict

# 4.2 Factory Parameters

MassFlowRate = 100000/(CorteTransversal*dz)
VMAX = 5
VMIN = 5
FCenter = (0.,0.,height/2)
FExtents2D = (0,width/2.,height/2)
FExtents3D = (width/2.,width/2.,height/2)

factory2D = BoxFactory(
    center = FCenter, extents = FExtents2D,
    PSDsizes = PSD[0], PSDcum = PSD[1], PSDcalculateMass = True,
    vMax = VMAX, vMin = VMIN, vAngle = 0., normal = (0.,0.,-1.),
    maxParticles = -1,
    massFlowRate = MassFlowRate,
    label = 'factory',
    blockedDOFs = 'XYZ',
    materialId = 0
)

if TestType == '2D':
    factory = factory2D

#4.3 Engines
0.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([
        Bo1_Sphere_Aabb(aabbEnlargeFactor=enlargeFactor),
        Bo1_Box_Aabb(),
        Bo1_Wall_Aabb(),
        Bo1_Facet_Aabb()
    ], verletDist=0.07*2*rMeanElemento),
    IntLoop,
    factory,
    DomainLimiter(lo=(-dx/2,-dy/2.,0.),hi=(dx/2,dy/
2.,dz+50*rMeanElemento),iterPeriod=100),
    GlobalStiffnessTimeStepper(
        active=True,
        defaultDt=SpherePWaveTimeStep(radius=rMeanElemento,
density=0.materials[0].density, young=0.materials[0].young),
        timeStepUpdateInterval=10,timestepSafetyCoefficient=0.8
    ),
    NewtonIntegrator(damping=0.7, gravity=[0.,0.,-9.81], label='newton'),
    PyRunner(command='PreencherTriaxial()',iterPeriod=100,label='PrepararAmostra'),
]

#####
### 5.PyRunner ###
#####

```

```

def Porosity(Region):
    if TestType == '3D':
        return porosity(Region)
    elif TestType == '2D':
        soma=0.
        for b in O.bodies:
            if isinstance(b.shape, Sphere):
                soma+=pi*(b.shape.radius**2)
        return (Region-soma)/Region

if TestType == '2D':
    acelerador = 1
elif TestType == '3D':
    acelerador = 5

Compressao=False
Descompressao=False
AlturaPreenchida=0

def PreencherTriaxial():
    global Compressao
    global Descompressao
    global topo
    global AlturaPreenchida
    if Compressao:
        if Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])<PorosidadeS:
            topo.state.vel = (0.,0.,1.*acelerador)
            Descompressao = True
            Compressao = False
            newton.damping = 0.7
        else:
            topo.state.vel = (0,0,-10*acelerador)
    elif Descompressao:
        if (abs(O.forces.f(topo.id)[2]))==0:
            if topo.state.vel==(0,0,1*acelerador):
                print Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])
                AlturaPreenchida=topo.state.pos[2]
                print AlturaPreenchida/height
            if topo.state.pos==(0,0,dz+rMaxElemento):
                Material.density=DensidadeS*100/(1-
Porosity(CorteTransversal*AlturaPreenchida))
                if AlturaPreenchida>height-rMeanElemento:
                    topo.state.vel=(0,0,0)
                    Descompressao=False
                    Material.frictionAngle=radians(11)
                    newton.damping=0.4

PrepararAmostra.command='EstabilizarTriaxial()'
                    PrepararAmostra.iterPeriod=1
                else:
                    topo.state.vel = (0,0,0)
                    Descompressao = False
                    factory.massFlowRate = 220/
(CorteTransversal*(height-AlturaPreenchida))
                    newton.damping = 0.1
                else:
                    topo.state.vel=(0,0,0)
                    topo.state.pos=(0,0,dz+rMaxElemento)
            elif factory.massFlowRate==0.:
                Compressao=True

```

```
def EstabilizarTriaxial():
    if topo.state.pos[2]>0.98*height:
        topo.state.vel=(0,0,-25)
    else:
        topo.state.vel=(0,0,0)
        if utils.unbalancedForce()<0.01:
            PrepararAmostra.command='FinalizarPreparo()'

def FinalizarPreparo():
    print "Amostra Preparada"
    print "Densidade"
    print Material.density
    print "Porosidade"
    print Porosity(CorteTransversal*AlturaPreenchida)
    print "Tempo"
    print 0.realtime
    export.textExt('Packing' + TestType + MatType + '-' +
str(PorosidadeS,'x_y_z_r_matId')
    0.pause()

0.run()
utils.waitForBatch()
```

A.3. – ENSAIO BIAXIAL

```
# -*- coding: utf-8 -*-
from yade import pack,utils,plot,ympart, export
import numpy as np

# 1.PARÂMETROS DE ENTRADA
#1.1 SOLO
from yade import pack,utils,plot,export

import numpy as np
import operator,fractions

# TODAS AS UNIDADES ESTÃO NO S.I.
#####
### 1.PARÂMETROS DE ENTRADA ###
#####

# 1.1 IMPORT PARAMETERS FROM TABLE
nRead=readParamsFromTable(
    DensidadeP1 = 48750,
    DensidadeP2 = 26000,
    PoissonP = 0.2,
    AnguloAtritoP = 0,
    CoesaoP = 0,
    PorosidadeS = 0.26,
    MatType = 'frict',
    TestType = '2D',
    PSD = [[0.0032,0.006],[0.6,1.]],
    verlet = 0.35,
    YoungP = 8e7,
    unknownOk=True
)
from yade.params import table

# 1.2 PARAMETROS DO MEIO (MACROSCÓPICOS)
DensidadeP1=table.DensidadeP1
DensidadeP2=table.DensidadeP2 #tf/m³
YoungP = table.YoungP #kN/m²
PoissonP = table.PoissonP #Adimensional
AnguloAtritoP = radians(table.AnguloAtritoP)
CoesaoP = table.CoesaoP
PorosidadeS = table.PorosidadeS

# 1.3 DIMENSÕES DOS ELEMENTOS
# 1.3.1 CURVA GRANULOMETRICA DO SOLO - PSD=[[diâmetros],[Quantidade passante
Acumulada]]
PSD = table.PSD

# 1.3.2 DADOS MÉDIOS DOS ELEMENTOS
rMeanElemento = ((PSD[0][0]+PSD[0][-1]))/2
rRelFuzzElemento = PSD[0][-1]/(2*rMeanElemento)-1
rMaxElemento = PSD[0][-1]/2
rMinElemento = PSD[0][0]/2

# 1.4 TIPO DE MATERIAL
MatType = table.MatType # 'frict', 'cohfrict', 'concrete'

# 1.5 TIPO DE AMOSTRA
TestType = table.TestType
```

```

#####
### 2.MATERIAL ###
#####

# 2.1 Material Meio
if MatType == 'frict':
    Material=FrictMat(frictionAngle=0)

# 2.2 Material Contorno
MatContorno = FrictMat(frictionAngle=0)
0.materials.append(MatContorno)

#####
### 3.GEOMETRIA ###
#####

# 3.1 Triaxial

# 3.1.1 Dimensões
width = 1
height = 0.50

if TestType == '2D':
    dx = 1.01*2*rMaxElemento
    dy = width
    dz = height
    CorteTransversal = dy

# 3.1.2 Faces
mn,mx=(-.5*dx,-.5*dy,0),(.5*dx,.5*dy,dz)
walls=aabbWalls([mn,mx],thickness=0,material=MatContorno)
wallIds=0.bodies.append(walls)

base=0.bodies[4]
topo=0.bodies[5]

#####
### 4.CALCULOS ###
#####

# 4.1. InteractionLoop
enlargeFactor=1.5

LoopFrict=InteractionLoop(
    [
        Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom(),
    ],
    [
        Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys(),
    ],
    [
        Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack(),
    ],
)

```

```

if MatType == 'frict':
    IntLoop = LoopFrict

# 4.2 Factory Parameters

MassFlowRate = 5000/(CorteTransversal*dz)
VMAX = 5
VMIN = 5
FCenter = (0.,0.,height/2)
FExtents2D = (0,width/2.,height/2)
FExtents3D = (width/2.,width/2.,height/2)

factoy2D = BoxFactory(
    center = FCenter, extents = FExtents2D,
    PSDsizes = PSD[0], PSDcum = PSD[1], PSDcalculateMass = True,
    vMax = VMAX, vMin = VMIN, vAngle = 0., normal = (0.,0.,-1.),
    maxParticles = -1,
    massFlowRate = MassFlowRate,
    label = 'factory',
    blockedDOFs = 'XYZ',
    materialId = 0
)

if TestType == '2D':
    factory = factoy2D

#4.3 Engines
0.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([
        Bo1_Sphere_Aabb(aabbEnlargeFactor=enlargeFactor),
        Bo1_Box_Aabb(),
        Bo1_Wall_Aabb(),
        Bo1_Facet_Aabb()
    ], verletDist=0.07*2*rMeanElemento),
    IntLoop,
    factory,
    DomainLimiter(lo=(-dx/2,-dy/2.,0.),hi=(dx/2,dy/
2.,dz+50*rMeanElemento),iterPeriod=100),
    GlobalStiffnessTimeStepper(
        active=True,
        defaultDt=SpherePWaveTimeStep(radius=rMeanElemento,
density=0.materials[0].density, young=0.materials[0].young),
        timeStepUpdateInterval=10,timestepSafetyCoefficient=0.8
    ),
    NewtonIntegrator(damping=0.7, gravity=[0.,0.,-9.81], label='newton'),
    PyRunner(command='PreencherTriaxial()',iterPeriod=100,label='PrepararAmostra'),
]

#####
### 5.PyRunner ###
#####

def Porosity(Region):
    if TestType == '3D':
        return porosity(Region)

```

```

elif TestType == '2D':
    soma=0.
    for b in O.bodies:
        if isinstance(b.shape, Sphere):
            soma+=pi*(b.shape.radius**2)
    return (Region-soma)/Region

if TestType == '2D':
    acelerador = 1

Compressao=False
Descompressao=False
AlturaPreenchida=0

def PreencherTriaxial():
    global Compressao
    global Descompressao
    global topo
    global AlturaPreenchida
    if Compressao:
        if Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])<PorosidadeS:
            topo.state.vel = (0.,0.,1.*acelerador)
            Descompressao = True
            Compressao = False
            newton.damping = 0.7
        else:
            topo.state.vel = (0,0,-10*acelerador)
    elif Descompressao:
        if (abs(O.forces.f(topo.id)[2]))==0:
            if topo.state.vel==(0,0,1*acelerador):
                print Porosity(CorteTransversal*topo.state.pos[2])
                print AlturaPreenchida=topo.state.pos[2]
                print AlturaPreenchida/height
            if topo.state.pos==(0,0,dz+rMaxElemento):
                if AlturaPreenchida>height-rMeanElemento:
                    topo.state.vel=(0,0,0)
                    Descompressao=False
                    Material.frictionAngle=radians(23)
                    newton.damping=0.4

PrepararAmostra.command='EstabilizarTriaxial()'
                                PrepararAmostra.iterPeriod=1
                                else:
                                    topo.state.vel = (0,0,0)
                                    Descompressao = False
                                    factory.massFlowRate = 220/
(CorteTransversal*(height-AlturaPreenchida))
                                    newton.damping = 0.1
                                else:
                                    topo.state.vel=(0,0,0)
                                    topo.state.pos=(0,0,dz+rMaxElemento)
elif factory.massFlowRate==0.:
    Compressao=True

def EstabilizarTriaxial():
    if topo.state.pos[2]>0.98*height:
        topo.state.vel=(0,0,-25)
    else:
        topo.state.vel=(0,0,0)
        if utils.unbalancedForce()<0.01:
            PrepararAmostra.command='FinalizarPreparo()'

```

```
def FinalizarPreparo():
    print "Amostra Preparada"
    print "Densidade"
    print Material.density
    print "Porosidade"
    print Porosity(CorteTransversal*AlturaPreenchida)
    print "Tempo"
    print 0.realtime
    export.textExt('Packing' + TestType + MatType + '-' +
str(PorosidadeS), 'x_y_z_r_matId')
    0.pause()

0.run()
utils.waitForBatch()
```

A.4. – PROVA DE CARGA BLOCO

```
# -*- coding: utf-8 -*-

## This script details the simulation of a Oedometric test on sphere packings
using Yade

from yade import pack,utils,plot,ympport
import math

#####
### 1.INPUTS ###
#####

# 1.1 IMPORT PARAMETERS FROM TABLE
nRead=readParamsFromTable(
    DensidadeP1 = 48750,
    DensidadeP2 = 26000,
    YoungP = 8e7,
    PoissonP = 0.2,
    AnguloAtritoP = 7.5, #variar angulo de atrito para calibrar com a curva do
professor Nakai
    Porosidade = 0.26,
    MatType = 'frict',
    TestDim = '2D',
    rate = 0.1,
    PSD = [[0.0032,0.006],[0.6,1.]],
    TensaoIsotropica = 1.9e4,
    verlet = 0.035,
    unknownOk=True
)
from yade.params import table

# 1.2 PARTICLE/MEDIUM PARAMETERS
mediumPorosity = table.Porosidade
particleDensity1 = table.DensidadeP1 #kg/m³
particleDensity2 = table.DensidadeP2
particleYoung = table.YoungP #Pa
particlePoisson = table.PoissonP #Adimensional
particleFricAng = radians(table.AnguloAtritoP)

# 1.3 ELEMENTS DIMENSIONS

# 1.3.1 MEDIUM PARTICLE SIZE DISTRIBUTION
PSD = table.PSD

# 1.3.2 SPHERES RADIUS
meanElementRadius = ((PSD[0][0]+PSD[0][-1])/2)/2
maxElementRadius=PSD[0][-1]/2
minElementRadius=PSD[0][0]/2

# 1.4 MATERIAL TYPE
materialType = 'frict' # 'frict', 'cofrict', 'concrete'

# 1.5 DIMENSIONS (2D OR 3D)
testDimensions = table.TestDim

# 1.6 SHALLOW AND PILE (2D)
AlturaBloco=0.03 #Altura do bloco
de fundação
LarguraBloco=0.06 #Exedente dos bordos do
bloco com relação à(s) estaca(s)
```

```

# 1.7 IMPORT/EXPORT NAMES
ImportName = 'Packing' + testDimensions + str(materialType)+ '-' +
str(table.Porosidade)
ExportName = 'ProvadeCarga' + testDimensions + str(materialType) + '-Phi' +
str(table.AnguloAtritoP) + '-Y' + str(particleYoung/1.e6)+'MPa' + '-Poisson' +
str(particlePoisson) + '-' + str(mediumPorosity)

# 1.8. USER DEFINED FUNCTIONS

# 1.8.1. POROSITY

def Porosity(Region):
    soma=0.
    for b in O.bodies:
        if isinstance(b.shape,Sphere):
            soma+=pi*(b.shape.radius**2)
    return (Region-soma)/Region

##### 2.MATERIAL #####

# 2.1 MEDIUM MATERIAL

if materialType == 'frict':
    spheresMaterial1=FrictMat(density=particleDensity1,
frictionAngle=particleFricAng, young=particleYoung, poisson=particlePoisson)
    spheresMaterial2=FrictMat(density=particleDensity2,
frictionAngle=particleFricAng, young=particleYoung, poisson=particlePoisson)

O.materials.append(spheresMaterial1)
O.materials.append(spheresMaterial2)

# 2.2 BOUNDARY MATERIAL
boundaryMaterial=FrictMat(density=particleDensity1, frictionAngle=particleFricAng,
young=10.*particleYoung, poisson=2*particlePoisson)
O.materials.append(boundaryMaterial)

#2.3 SHALLOW AND PILE MATERIAL
AngAtritoA=atan(radians(0))
DensidadeA=27777
MatBloco=FrictMat(density=DensidadeA, frictionAngle=AngAtritoA, young=9e15, label="aluminio")
O.materials.append(MatBloco)

##### 3.GEOMETRY #####

# 3.1 PACKING DIMENSIONS

width = 1
height = 0.50
dx = 1.01*2*maxElementRadius
dy = width
dz = height
CorteTransversal = dy
baseArea = dy
lateralAreaX = dy
lateralAreaY = 1.

# 3.2 BOUNDARIES

corner1,corner2 = (-.5*dx,-.5*dy,0.),(.5*dx,.5*dy,dz)
walls = aabbWalls([corner1, corner2], thickness=0., oversizeFactor=2,
material=boundaryMaterial)
wallIds = O.bodies.append(walls)

```

```

base=0.bodies[4]
topo=0.bodies[5]

#3.3 SHALLOW AND PILE

0.bodies.append(box((0,0,0.444112+AlturaBloco/2),
(1.01*1*maxElementRadus,LarguraBloco,AlturaBloco/2),
material=MatBloco,color=(1,0,0)))

# 3.4 IMPORT SPHERE PACKING

0.bodies.append(ympart.textExt(fileName = ImportName, format='x_y_z_r_matId'))

# 3.5. ASSIGN MATERIAL PROPERTIES TO THE SPHERES

for b in 0.bodies:
    if isinstance(b.shape,Sphere):
        if b.shape.radius > 0.002:
            b.material=spheresMaterial2
        elif b.shape.radius < 0.002:
            b.material=spheresMaterial1
        else:
            b.material=MatBloco

# 3.6. DEFINE BLOCKED DOFs
for b in 0.bodies:
    if isinstance(b.shape,Sphere):
        b.state.blockedDOFs='XYZ'

# 4.1. TEST PROCEDURE

def Porosity(Region):
    if testDimensions == '3D':
        return porosity(Region)
    elif testDimensions == '2D':
        soma=0.
        for b in 0.bodies:
            if isinstance(b.shape,Sphere):
                soma+=pi*(b.shape.radius**2)
        return (Region-soma)/Region

if testDimensions == '2D':
    acelerador = 0.1
elif testDimensions == '3D':
    acelerador = 5

def Iniciar():
    if unbalancedForce()<0.005:
        print 'comecou'
        print 0.bodies[6].state.pos[2]
        Carregar.dead=False
        Ini.dead=True

```

```

deltaforca=10
x=0
def PreencherTriaxial():
    global x
    0.forces.setPermF(6,(0,0,-1*x))
    newton.damping = 0.2
    if unbalancedForce()<0.01:
        x+=deltaforca
        myAddData()
        print x

##### 5. RECORD AND PLOT DATA #####

def myAddData():
    force = 0
    forca = x
    plot.addData(z1=0.bodies[6].state.refPos[2]-0.bodies[6].state.pos[2],
f1=forca, i=0.iter, t=0.time)

plot.plots={'t':'f1','t':'z1','z1':'f1'}
plot.plot()

##### 6.SIMULATION PROCEDURE #####

enlargeFactor = 1.5

0.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([
        Bo1_Sphere_Aabb(),
        Bo1_Box_Aabb(),
        Bo1_Wall_Aabb(),
        Bo1_Facet_Aabb()
    ]),verletDist=table.verlet*2.*meanElementRadius),
    InteractionLoop(
        [Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
        [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
        [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]),
    GlobalStiffnessTimeStepper(
        active=True,
        defaultDt=SpherePWaveTimeStep(radius=meanElementRadius,
density=0.materials[0].density, young=0.materials[0].young),
        timeStepUpdateInterval=1000,timestepSafetyCoefficient=0.5
    ),
    PyRunner(command='Iniciar()',iterPeriod=100,label='Ini',dead=False),
    PyRunner(command='PreencherTriaxial()',iterPeriod=100,label='Carregar',dead=True),
    NewtonIntegrator(damping=0.2, gravity=[0.,0.,-9.81], label='newton'),

```

```
] VTKRecorder(fileName='3d-vtk-', recorders=['all'], iterPeriod=1000),
```

```
##### 7. RUN SIMULATION #####
```

```
0.run()  
utils.waitForBatch()
```

A.5. – PROVA DE CARGA ESTACA ESCAVADA

```
# -*- coding: utf-8 -*-

## This script details the simulation of a Oedometric test on sphere packings
using Yade

from yade import pack,utils,plot,ympart,export
import math

#####
### 1.INPUTS ###
#####

# 1.1 IMPORT PARAMETERS FROM TABLE
nRead=readParamsFromTable(
    DensidadeP1 = 48750,
    DensidadeP2 = 26000,
    YoungP = 8e7,
    PoissonP = 0.2,
    AnguloAtritoP = 7.5, #variari angulo de atrito para calibrar com a curva do
professor Nakai
    Porosidade = 0.26,
    MatType = 'frict',
    TestDim = '2D',
    rate = 0.1,
    PSD = [[0.0032,0.006],[0.6,1.]],
    TensaoIsotropica = 1.9e4,
    verlet = 0.035,
    unknownOk=True
)
from yade.params import table

# 1.2 PARTICLE/MEDIUM PARAMETERS
mediumPorosity = table.Porosidade
particleDensity1 = table.DensidadeP1 #kg/m³
particleDensity2 = table.DensidadeP2
particleYoung = table.YoungP #Pa
particlePoisson = table.PoissonP #Adimensional
particleFricAng = radians(table.AnguloAtritoP)

# 1.3 ELEMENTS DIMENSIONS

# 1.3.1 MEDIUM PARTICLE SIZE DISTRIBUTION
PSD = table.PSD

# 1.3.2 SPHERES RADIUS
meanElementRadus = ((PSD[0][0]+PSD[0][-1])/2)/2
maxElementRadus=PSD[0][-1]/2
minElementRadus=PSD[0][0]/2

# 1.4 MATERIAL TYPE
materialType = 'frict' # 'frict', 'cohfrict', 'concrete'

# 1.5 DIMENSIONS (2D OR 3D)
testDimensions = table.TestDim

# 1.6 SHALLOW AND PILE (2D)
AlturaBloco=0.03 #Altura do bloco
de fundação #Comprimento da
estaca #Comprimento da
larguraestaca=0.01 #Largura da
estaca
```

```

# 1.7 IMPORT/EXPORT NAMES
ImportName = 'Packing' + testDimensions + str(materialType)+ '-' +
str(table.Porosidade)
ExportName = 'ProvadeCarga' + testDimensions + str(materialType) + '-Phi' +
str(table.AnguloAtritoP) + '-Y' + str(particleYoung/1.e6)+'MPa'+ '-Poisson' +
str(particlePoisson) + '-' + str(mediumPorosity)

# 1.8. USER DEFINED FUNCTIONS

# 1.8.1. POROSITY

def Porosity(Region):
    soma=0.
    for b in O.bodies:
        if isinstance(b.shape,Sphere):
            soma+=pi*(b.shape.radius**2)
    return (Region-soma)/Region

##### 2.MATERIAL ### #####

# 2.1 MEDIUM MATERIAL

if materialType == 'frict':
    spheresMaterial1=FrictMat(density=particleDensity1,
frictionAngle=particleFricAng, young=particleYoung, poisson=particlePoisson)
    spheresMaterial2=FrictMat(density=particleDensity2,
frictionAngle=particleFricAng, young=particleYoung, poisson=particlePoisson)

O.materials.append(spheresMaterial1)
O.materials.append(spheresMaterial2)

# 2.2 BOUNDARY MATERIAL
boundaryMaterial=FrictMat(density=particleDensity1, frictionAngle=particleFricAng,
young=10.*particleYoung, poisson=2*particlePoisson)
O.materials.append(boundaryMaterial)

#2.3 SHALLOW AND PILE MATERIAL
AngAtritoA=atan(radians(0))
DensidadeA=2777
MatBloco=FrictMat(density=DensidadeA, frictionAngle=AngAtritoA, young=9e15, label="aluminio")
O.materials.append(MatBloco)

##### 3.GEOMETRY ### #####

# 3.1 PACKING DIMENSIONS

width = 1
height = 0.8
dx = 1.01*2*maxElementRadus
dy = width
dz = height
CorteTransversal = dy
baseArea = dy
lateralAreaX = dy
lateralAreaY = 1.

# 3.2 BOUNDARIES

corner1,corner2 = (-.5*dx,-.5*dy,0.),(.5*dx,.5*dy,dz)
walls = aabbWalls([corner1, corner2], thickness=0., oversizeFactor=2,
material=boundaryMaterial)
wallIds = O.bodies.append(walls)

```

```

base=0.bodies[4]
topo=0.bodies[5]

#3.3 SHALLOW AND PILE

GeomBloco=box((0,0,0.50+AlturaBloco/2),(1.01*1*0.003,0.06,AlturaBloco/2),
material=MatBloco,color=(1,0,0))
GeomEst1=box((0,0.0325,0.5-comprimentoestaca/2),(1.01*1*0.003,larguraestaca/
2,comprimentoestaca/2),material=MatBloco,color=(1,0,0))
GeomEst2=box((0,-0.0325,0.5-comprimentoestaca/2),(1.01*1*0.003,larguraestaca/
2,comprimentoestaca/2),material=MatBloco,color=(1,0,0))
GeomEst3=box((0,0,0.5-comprimentoestaca/2),(1.01*1*0.003,larguraestaca/
2,comprimentoestaca/2),fixed=True,material=MatBloco,color=(1,0,0))

0.bodies.appendClumped([(GeomBloco),(GeomEst1),(GeomEst2),(GeomEst3)])

# 3.4 IMPORT SPHERE PACKING

0.bodies.append(ympart.textExt(fileName = ImportName, format='x_y_z_r_matId'))

# 3.5. ASSIGN MATERIAL PROPERTIES TO THE SPHERES

for b in 0.bodies:
    if isinstance(b.shape,Sphere):
        if b.shape.radius > 0.002:
            b.material=spheresMaterial2
        elif b.shape.radius < 0.002:
            b.material=spheresMaterial1
        else:
            b.material=MatBloco

# 3.6. DEFINE BLOCKED DOFs

for b in 0.bodies:
    if isinstance(b.shape,Sphere):
        b.state.blockedDOFs='XYZ'
    elif b.isClump:
        b.state.blockedDOFs='XYZ'

# 4.1. TEST PROCEDURE

def Porosity(Region):
    if testDimensions == '3D':
        return porosity(Region)
    elif testDimensions == '2D':
        soma=0.
        for b in 0.bodies:
            if isinstance(b.shape,Sphere):
                soma+=pi*(b.shape.radius**2)
        return (Region-soma)/Region

if testDimensions == '2D':
    acelerador = 1
elif testDimensions == '3D':
    acelerador = 5

def Iniciar():
    if unbalancedForce()<0.01:
        print 'comecou'

```

```

y=0.bodies[6].state.pos[2]
print y
Carregar.dead=False
Ini.dead=True

deltaforca=10
x=0
def PreencherTriaxial():
    global x
    0.forces.setPermF(6,(0,0,-1*x))
    newton.damping = 0.2
    if unbalancedForce()<0.05:
        x+=deltaforca
        print x

##### 5. RECORD AND PLOT DATA #####
#####

def myAddData():
    force = 0
    forca = x
    plot.addData(z1=0.bodies[6].state.refPos[2]-0.bodies[6].state.pos[2],
f1=forca, i=0.iter, t=0.time)

plot.plots={'t':'f1','t':'z1','z1':'f1'}
plot.plot()

##### 6.SIMULATION PROCEDURE #####
#####

enlargeFactor = 1.5

0.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([
        Bo1_Sphere_Aabb(),
        Bo1_Box_Aabb(),
        Bo1_Wall_Aabb(),
        Bo1_Facet_Aabb()
    ],verletDist=table.verlet*2.*meanElementRadius),
    InteractionLoop(
        [Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
        [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
        [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]),
    GlobalStiffnessTimeStepper(
        active=True,
        defaultDt=SpherePWaveTimeStep(radius=meanElementRadius,

```

```
density=0.materials[0].density, young=0.materials[0].young),
    timeStepUpdateInterval=1000,timestepSafetyCoefficient=0.5
),
PyRunner(command='Iniciar()',iterPeriod=100,label='Ini',dead=False),
PyRunner(command='PreencherTriaxial()',iterPeriod=100,label='Carregar',dead=True),
NewtonIntegrator(damping=0.2, gravity=[0.,0.,-9.81], label='newton'),
VTKRecorder(fileName='3d-vtk-',recorders=['all'],iterPeriod=1000),
PyRunner(command='myAddData()',iterPeriod=100,label='Graph',dead=False),
]
```

```
##### 7. RUN SIMULATION #####
```

```
O.run()
utils.waitForBatch()
```

A.5. – PROVA DE CARGA ESTACA CRAVADA

```
# -*- coding: utf-8 -*-

## This script details the simulation of a Oedometric test on sphere packings
using Yade

from yade import pack,utils,plot,ympart,export
import math

#####
### 1.INPUTS ###
#####

# 1.1 IMPORT PARAMETERS FROM TABLE
nRead=readParamsFromTable(
    DensidadeP1 = 48750,
    DensidadeP2 = 26000,
    YoungP = 8e7,
    PoissonP = 0.2,
    AnguloAtritoP = 11, #variari angulo de atrito para calibrar com a curva do
professor Nakai
    Porosidade = 0.26,
    MatType = 'frict',
    TestDim = '2D',
    rate = 0.1,
    PSD = [[0.0032,0.006],[0.6,1.]],
    TensaoIsotropica = 1.9e4,
    verlet = 0.035,
    unknownOk=True
)
from yade.params import table

# 1.2 PARTICLE/MEDIUM PARAMETERS
mediumPorosity = table.Porosidade
particleDensity1 = table.DensidadeP1 #kg/m³
particleDensity2 = table.DensidadeP2
particleYoung = table.YoungP #Pa
particlePoisson = table.PoissonP #Adimensional
particleFricAng = radians(table.AnguloAtritoP)

# 1.3 ELEMENTS DIMENSIONS

# 1.3.1 MEDIUM PARTICLE SIZE DISTRIBUTION
PSD = table.PSD

# 1.3.2 SPHERES RADIUS
meanElementRadus = ((PSD[0][0]+PSD[0][-1])/2)/2
maxElementRadus=PSD[0][-1]/2
minElementRadus=PSD[0][0]/2

# 1.4 MATERIAL TYPE
materialType = 'frict' # 'frict', 'cohfrict', 'concrete'

# 1.5 DIMENSIONS (2D OR 3D)
testDimensions = table.TestDim

# 1.6 SHALLOW AND PILE (2D)
AlturaBloco=0.03 #Altura do bloco
de fundação
comprimentoestaca=0.12 #Comprimento da
estaca
larguraestaca=0.01 #Largura da
estaca
centro=0.44112 #Coordenada Z da esfera
```

```

mais alta

# 1.7 IMPORT/EXPORT NAMES
ImportName = 'Packing' + testDimensions + str(materialType)+ '-' +
str(table.Porosidade)
ExportName = 'ProvadeCarga' + testDimensions + str(materialType) + '-Phi' +
str(table.AnguloAtritoP) + '-Y' + str(particleYoung/1.e6)+'MPa'+ '-Poisson' +
str(particlePoisson) + '-' + str(mediumPorosity)

# 1.8. USER DEFINED FUNCTIONS

# 1.8.1. POROSITY

def Porosity(Region):
    soma=0.
    for b in O.bodies:
        if isinstance(b.shape,Sphere):
            soma+=pi*(b.shape.radius**2)
    return (Region-soma)/Region

##### 2.MATERIAL #####

# 2.1 MEDIUM MATERIAL

if materialType == 'frict':
    spheresMaterial1=FrictMat(density=particleDensity1,
frictionAngle=particleFricAng, young=particleYoung, poisson=particlePoisson)
    spheresMaterial2=FrictMat(density=particleDensity2,
frictionAngle=particleFricAng, young=particleYoung, poisson=particlePoisson)

O.materials.append(spheresMaterial1)
O.materials.append(spheresMaterial2)

# 2.2 BOUNDARY MATERIAL
boundaryMaterial=FrictMat(density=particleDensity1, frictionAngle=particleFricAng,
young=10.*particleYoung, poisson=2*particlePoisson)
O.materials.append(boundaryMaterial)

#2.3 SHALLOW AND PILE MATERIAL
AngAtritoA=atan(radians(0))
DensidadeA=2777
MatBloco=FrictMat(density=DensidadeA,frictionAngle=AngAtritoA, young=9e15, label="aluminio")
O.materials.append(MatBloco)

##### 3.GEOMETRY #####

# 3.1 PACKING DIMENSIONS

width = 1
height = 0.8
dx = 1.01*2*maxElementRadus
dy = width
dz = height
CorteTransversal = dy
baseArea = dy
lateralAreaX = dy
lateralAreaY = 1.

# 3.2 BOUNDARIES

corner1,corner2 = (-.5*dx,-.5*dy,0.),(.5*dx,.5*dy,dz)
walls = aabbWalls([corner1, corner2], thickness=0., oversizeFactor=2,

```

```

material=boundaryMaterial)
wallIds = 0.bodies.append(walls)

base=0.bodies[4]
topo=0.bodies[5]

#3.3 SHALLOW AND PILE

GeomBloco=box((0,0,centro+AlturaBloco/2+comprimentoestaca),
(1.01*1*0.003,0.06,AlturaBloco/2), material=MatBloco,color=(1,0,0))
GeomEst1=box((0,0,0.0325,centro-comprimentoestaca/2+comprimentoestaca),
(1.01*1*0.003,larguraestaca/2,comprimentoestaca/2),
material=MatBloco,color=(1,0,0))
GeomEst2=box((0,-0.0325,centro-comprimentoestaca/2+comprimentoestaca),
(1.01*1*0.003,larguraestaca/2,comprimentoestaca/2),
material=MatBloco,color=(1,0,0))
GeomEst3=box((0,0,centro-comprimentoestaca/2+comprimentoestaca),
(1.01*1*0.003,larguraestaca/2,comprimentoestaca/2),fixed=True,
material=MatBloco,color=(1,0,0))

0.bodies.appendClumped([(GeomBloco),(GeomEst1),(GeomEst2),(GeomEst3)])

# 3.4 IMPORT SPHERE PACKING

0.bodies.append(ympart.textExt(fileName = ImportName, format='x_y_z_r_matId'))

# 3.5. ASSIGN MATERIAL PROPERTIES TO THE SPHERES

for b in 0.bodies:
    if isinstance(b.shape,Sphere):
        if b.shape.radius > 0.002:
            b.material=spheresMaterial2
        elif b.shape.radius < 0.002:
            b.material=spheresMaterial1
        else:
            b.material=MatBloco

# 3.6. DEFINE BLOCKED DOFs

for b in 0.bodies:
    if isinstance(b.shape,Sphere):
        b.state.blockedDOFs='XYZ'
    elif b.isClump:
        b.state.blockedDOFs='XYZ'

# 4.1. TEST PROCEDURE

def Porosity(Region):
    if testDimensions == '3D':
        return porosity(Region)
    elif testDimensions == '2D':
        soma=0.
        for b in 0.bodies:
            if isinstance(b.shape,Sphere):
                soma+=pi*(b.shape.radius**2)
        return (Region-soma)/Region

if testDimensions == '2D':
    acelerador = 1
elif testDimensions == '3D':
    acelerador = 5

```

```

def Iniciar():
    if 0.bodies[6].state.pos[2]>centro+AlturaBloco/2:
        for b in 0.bodies:
            if b.isClump:
                b.state.vel = (0,0,-1*acelerador)
    else:
        export.textExt('Packing','x_y_z_r_matId')
        if unbalancedForce()<0.005:
            print 'comecou'
            print 0.bodies[6].state.pos[2]
            Carregar.dead=False
            Ini.dead=True

deltaforca=10
x=0
def PreencherTriaxial():
    global x
    0.forces.setPermF(6,(0,0,-1*x))
    newton.damping = 0.2
    if unbalancedForce()<0.05:
        x+=deltaforca
        myAddData()
        print x

##### 5. RECORD AND PLOT DATA #####
#####

def myAddData():
    force = 0
    forca = x
    plot.addData(z1=0.45612-0.bodies[6].state.pos[2], f1=forca, i=0.iter,
t=0.time)

plot.plots={'t':'f1','t':'z1','z1':'f1'}
plot.plot()

##### 6.SIMULATION PROCEDURE #####
#####

enlargeFactor = 1.5

0.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([
        Bo1_Sphere_Aabb(),
        Bo1_Box_Aabb(),
        Bo1_Wall_Aabb(),
        Bo1_Facet_Aabb()
    ]),verletDist=table.verlet*2.*meanElementRadius),
    InteractionLoop(
        [Ig2_Wall_Sphere_ScGeom(),
        Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),
        Ig2_Box_Sphere_ScGeom()],

```

```

        Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()),
        [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
        [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]),
    ),
    GlobalStiffnessTimeStepper(
        active=True,
        defaultDt=SpherePWaveTimeStep(radius=meanElementRadus,
        density=0.materials[0].density, young=0.materials[0].young),
        timeStepUpdateInterval=1000, timestepSafetyCoefficient=0.5
    ),
    PyRunner(command='Iniciar()', iterPeriod=100, label='Ini', dead=False),
    PyRunner(command='PreencherTriaxial()', iterPeriod=100, label='Carregar', dead=True),
    NewtonIntegrator(damping=0.2, gravity=[0., 0., -9.81], label='newton'),
    PyRunner(command='myAddData()', iterPeriod=100, label='Graph', dead=False),
]

```

```

##### 7. RUN SIMULATION #####

```

```

O.run()
utils.waitForBatch()

```