

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

**ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEORRELA PELO  
MÉTODU DOS ELEMENTOS DISCRETOS**

**BRUNO DA SILVA BORGES**

**ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-206/12**

**BRASÍLIA / DF: ABRIL / 2012**

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

**ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO  
MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS**

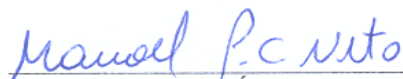
**BRUNO DA SILVA BORGES**

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

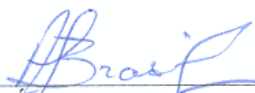
APROVADA POR:



ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D (UnB)  
(ORIENTADOR)



MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, D.Sc (UnB)  
(CO-ORIENTADOR)



ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc (UNB)  
(EXAMINADOR INTERNO)



ANA CRISTINA CASTRO FONTENLA SIEIRA, D.Sc (UERJ)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 02 DE ABRIL DE 2012.

## FICHA CATALOGRÁFICA

BORGES, BRUNO DA SILVA

Estudo da Interação Solo-Geogrelha pelo Método dos Elementos Discretos  
[Distrito Federal] 2012

xvi, 178 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Geossintéticos

2. Ensaio de Arrancamento

3. Areia

4. Métodos Numéricos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BORGES, B.S. (2012). Estudo da Interação Solo-Geogrelha pelo Método dos Elementos Discretos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-206/12, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 178 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno da Silva Borges

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo da Interação Solo-Geogrelha pelo Método dos Elementos Discretos

GRAU / ANO: Mestre / 2012

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.



Bruno da Silva Borges

bruno.silva.borges@gmail.com

*Dedico esta dissertação à memória de Sanderson Rodrigo, grande amigo e companheiro.  
Que a força esteja com você.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Gilmara e Devair, pelo apoio incondicional na realização deste trabalho.

Ao Professor e orientador Ennio Marques Palmeira, agradeço pela confiança depositada em mim e pela paciência durante todo processo de orientação. Tenho o Professor Ennio como um grande exemplo a ser seguido.

Ao Professor e co-orientador Manoel Porfírio Cordão Neto, pelo suporte prestado na área computacional.

A todo corpo docente do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, pela brilhante formação acadêmica que nos é fornecida.

À minha namorada, Andrelisa, pela enorme compreensão, otimismo e apoio prestados. Seu companheirismo foi fundamental na elaboração desta dissertação.

Aos grandes amigos Fernando Aquino e Larissa Aguiar, pelo incentivo no início da vida acadêmica e pela verdadeira amizade construída desde os tempos de graduação.

À Robinson Zuluaga, pelas incontáveis discussões teóricas e conceituais a cerca da modelagem por elementos discretos durante os almoços no RU.

À Ivone Alejandra e Jaime Rafael, pela enorme ajuda prestada na manutenção do funcionamento do computador utilizado nas simulações.

Aos amigos, Ivone, Jaime, Robinson, Ewerton, Marcus Vinícius Tavares, Alejandra, Ivan e Esteban, pela amizade construída nesses anos de pós-graduação.

Aos snipers, amigos por mais de uma década, pelos momentos de descontração e conversas fora do escopo acadêmico.

Ao CNPQ, pelos recursos financeiros disponibilizados para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

O uso dos geossintéticos como reforço de solos vem crescendo ao longo das últimas décadas, sendo esta técnica uma solução já consolidada na prática da engenharia. Nas obras com solo reforçado a interação solo-reforço consiste em um dos principais critérios de projeto e no caso de reforço com geogrelhas esta interação pode ser bastante complexa. Assim, diversos métodos analíticos e computacionais de análise da interação solo-geogrelha foram estudados nas últimas décadas, contudo o ensaio de arrancamento continua sendo a principal forma de avaliação da aderência entre solo e geogrelha. O ensaio de arrancamento, por sua vez, não é normatizado e sofre interferência de fatores como as condições de contorno e efeito de escala, sendo recomendado então, que o mesmo seja realizado em grandes dimensões, o que aumenta o custo e o tempo necessário para a realização dos projetos. Portanto, simulações computacionais do ensaio de arrancamento surgem como uma alternativa no sentido de aumentar o entendimento do comportamento da interação solo-geogrelha. O método dos elementos finitos já vem sendo utilizado, neste sentido, há algumas décadas e com resultados bastante satisfatórios, contudo sua abordagem pela mecânica dos meios contínuos não contempla todos os aspectos da interação solo-geogrelha. Neste contexto, o presente trabalho objetivou estudar o ensaio de arrancamento por meio de uma abordagem discreta, utilizando para isso o método dos elementos discretos que está implementado no programa comercial *PFC<sup>2D</sup>*. Assim, foram simulados ensaios de arrancamento em membros transversais isolados confinados por solo granular e os dados obtidos puderam ser comparados com resultados de ensaios de laboratório. Ensaos biaxiais e de cisalhamento direto também foram simulados para definir a influência dos parâmetros micromecânicos no comportamento do material granular. Foi verificado que o método dos elementos discretos demanda uma alta capacidade de processamento, mesmo para os padrões atuais, sendo possível realizar apenas análises em duas dimensões. Os valores obtidos para o ângulo de atrito nas simulações dos ensaios biaxiais e de cisalhamento direto foram menores do que os esperados para um material granular. Os resultados das simulações dos ensaios de arrancamento apresentaram uma boa coerência com resultados de ensaios reais, principalmente nos ensaios com a presença de uma barra transversal. Já nas simulações com duas ou três barras transversais a força de arrancamento apresentou valores menores do que os obtidos em ensaios reais.

## ABSTRACT

The use of geosynthetics as soil reinforcement has been growing in the last decades, being this technique a well consolidated solution in the engineering practice. In reinforced soil works the soil-reinforcement interaction consists in one of the main project criteria and in the case of geogrids this interaction can be very complex. Thus, many analytic and computational methods have been employed in the last decades to evaluate the soil-geogrid interaction, nevertheless the pullout test keeps being the main test to evaluate bond between soil and geogrid. The pullout test, on the other hand, is not standardized and its result is influenced by factors such as boundary conditions and scale effects. So, it is recommended to execute large scale pullout tests, which increases the project cost and time. Therefore, pullout test simulations come as an alternative way to improve the understanding on soil-geogrid interaction. The finite element method has been used in the last decades with this purpose and showed satisfactory results, although its continuum mechanics approach cannot model all aspects of the soil-geogrid interaction. In this context, the present research aimed to study the pullout test by means of a discrete approach, and to do so the discrete element method implemented in the commercial software *PFC<sup>2D</sup>* was used. Pullout tests on isolated transverse members buried in granular material were simulated and the predictions could be compared with results of laboratory tests. Biaxial and direct shear tests were also simulated to evaluate the influence of micromechanics parameters on the granular material behaviour. It was verified that the discrete element method demands a high process capability, even for the current standards, so the analysis was restricted to two dimensional problems. The results obtained showed that the friction angle values, from biaxial and direct shear tests, were smaller than the ones expected for a granular material. The pullout tests simulations results were consistent with the results of real tests, especially in the tests with one transverse member. In the tests with two and three transverse members the pullout forces predicted were smaller than those obtained in the laboratory tests.

# Sumário

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ESCOPO E ORGANIZAÇÃO .....	2
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 OS GEOSSINTÉTICOS NA ENGENHARIA .....	4
2.1.1 Tipos e finalidades dos geossintéticos .....	6
2.1.2 Geogrelhas .....	7
2.2 REFORÇO DE SOLOS COM GEOSSINTÉTICOS .....	8
2.2.1 Fatores que influenciam no comportamento de maciços reforçados .....	10
2.2.2 Avaliação da interação solo-reforço.....	11
2.3 O ENSAIO DE ARRANCAMENTO .....	13
2.3.1 Influência das condições de contorno .....	15
2.3.2 A interação solo-geogrelha nos ensaios de arrancamento .....	16
2.4 MODELOS DE ELEMENTOS DIRCRETOS APLICADOS À GEOMECÂNICA.....	22
<b>CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PFC<sup>2D</sup> .....</b>	<b>27</b>
3.1 NOTAÇÕES E CONVENÇÕES.....	30
3.2 O CICLO DE CALCULO.....	30
3.3 LEI FORÇA-DESLOCAMENTO.....	31
3.4 LEI DE MOVIMENTO .....	36
3.5 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO .....	38
3.6 DETERMINAÇÃO DO PASSO DE TEMPO.....	38
3.7 AMORTECIMENTO MECÂNICO.....	40
3.8 MODELOS DE CONTATOS .....	41
3.8.1 Modelos de rigidez.....	41
3.8.2 Modelo de deslizamento .....	42
3.8.3 Modelos de ligação .....	42
3.9 CLUMPS .....	47
<b>CAPÍTULO 4 METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
4.1 AVALIAÇÃO DOS RECURSOS COMPUTACIONAIS .....	49
4.2 ANÁLISES PARAMÉTRICAS .....	52
4.2.1 Simulação de ensaios biaxiais.....	53
4.2.2 Simulação de ensaios de cisalhamento direto .....	60
4.3 SIMULAÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO .....	63
4.3.1 Retroanálise dos ensaios de Palmeira (1987).....	67
<b>CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
5.1 ANÁLISES PARAMÉTRICAS .....	70
5.1.1 Simulação de ensaios biaxiais.....	70
5.1.2 Simulação de ensaios de cisalhamento direto .....	74
5.2 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO .....	78
5.3 RETROANÁLISE DOS ENSAIOS DE PALMEIRA (1987).....	89
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>97</b>
6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	100



<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>102</b>
<b>Apêndice A</b> Códigos - Teste de velocidade .....	107
<b>Apêndice B</b> Códigos - Ensaio biaxial .....	113
<b>Apêndice C</b> Códigos - Ensaio de cisalhamento direto.....	123
<b>Apêndice D</b> Códigos - Ensaio de arrancamento em barra única.....	135
<b>Apêndice E</b> Códigos - Ensaio de arrancamento em múltiplas barras.....	150
<b>Apêndice F</b> Resultados das simulações dos ensaios biaxiais .....	167
<b>Apêndice G</b> Resultados das simulações dos ensaios de cisalhamento direto .....	170
<b>Apêndice H</b> Resultados das simulações dos ensaios de arrancamento em duas barras .....	173
<b>Apêndice I</b> Resultados das simulações dos ensaios de arrancamento em três barras.....	177

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Histórico dos principais desenvolvimentos na área dos geossintéticos.....	5
Tabela 2.2 Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (ABNT 2003). ....	6
Tabela 2.3 Características dos equipamentos de ensaio de arrancamento de diversos autores (Dias, 2004).....	14
Tabela 4.1 Características da areia utilizada por Palmeira (1987) .....	51
Tabela 4.2 Características das caixas de ensaio utilizadas por Palmeira (1987).....	51
Tabela 4.3 Recursos computacionais e tempo demandado previsto para as análises em 3D...	51
Tabela 4.4 Recursos computacionais e tempo demandado previsto para as análises em 2D...	52
Tabela 4.5 Parâmetros utilizados no teste da velocidade – ensaio biaxial. ....	59
Tabela 4.6 Parâmetros utilizados no teste da rigidez – ensaio biaxial. ....	59
Tabela 4.7 Parâmetros utilizados na simulação do ensaio biaxial.....	60
Tabela 4.8 Parâmetros utilizados no teste da velocidade – ensaio de cisalhamento direto.....	62
Tabela 4.9 Parâmetros utilizados no teste da rigidez – ensaio de cisalhamento direto. ....	62
Tabela 4.10 Parâmetros utilizados na simulação do ensaio de cisalhamento.....	63
Tabela 4.11 Parâmetros utilizados nos ensaios de arrancamento em barra única. ....	65
Tabela 4.12 Dimensões das amostra utilizadas na análise da influência do tamanho da caixa de ensaio.....	65
Tabela 4.13 Parâmetros utilizados na análise da influência das propriedades da barra transversal.....	66
Tabela 4.14 Propriedades das areias utilizadas nos ensaios de arrancamento (Palmeira, 1987 - modificado). ....	67
Tabela 4.15 Ensaios de arrancamento realizados por Palmeira (1987) na caixa de ensaio média. ....	68
Tabela 5.1 Parâmetros de resistência obtidos nas simulações dos ensaios biaxiais.....	73
Tabela 5.2 Parâmetros utilizados na simulação realizada por Neves (2009). ....	74
Tabela 5.3 Parâmetros de resistência obtidos nas simulações dos ensaios biaxiais.....	77
Tabela 5.4 Coeficiente de variação da tensão vertical na análise da influência do tamanho da caixa de ensaio.....	82

## Lista de Figuras

Figura 2.1 Tipos de geogrelhas: (a) Extrudada - (i) uniaxial, (ii) biaxial; (b) Soldada; (c) Tecida (Shukla e Yin, 2006 - modificado). .....	8
Figura 2.2 Influência da presença de reforço (a) Elemento de solo sem reforço; (b) Elemento de solo com reforço (Abramento, 1998 - modificado). .....	9
Figura 2.3 Exemplos de aplicação da técnica de solo reforçado (Palmeira, 1987 - modificado). .....	10
Figura 2.4 Mecanismos de interação solo-reforço em uma estrutura de solo reforçado com geossintéticos (Palmeira, 2009 - modificado). .....	12
Figura 2.5 Interação solo-geossintético em taludes de obras diversas (Dias, 2004 - modificado). .....	12
Figura 2.6 Esquema típico de uma ensaio de arrancamento com medição individual de deslocamentos (Palmeira, 1987 - modificado) .....	13
Figura 2.7 Condições de contorno do ensaio de arrancamento: (a) Face frontal lubrificada; (b) Posicionamento de luva lubrificada; (c) Reforço afastado da face frontal; (d) Face frontal flexível (Palmeira, 2009 - modificado). .....	15
Figura 2.8 Mecanismos de interação solo-geogrelha (Becker, 2006). .....	17
Figura 2.9 Influência dos membros transversais na resistência ao arrancamento. (Palmeira, 2009 - modificado). .....	17
Figura 2.10 Resistência passiva em membros transversais isolados (Palmeira, 2009 - modificado). .....	18
Figura 2.11 Influência do tamanho relativo entre os grãos de solo e os membros transversais da geogrelha (Palmeira, 2009 - modificado) .....	19
Figura 2.12 Interferência entre os membros transversais de uma geogrelha: (a) Espaçamento grande entre membros; (b) Espaçamento pequeno entre membros; (c) Teste em uma grelha com vários membros (Palmeira, 2009 - modificado). .....	20
Figura 2.13 Grau de interferência em grelhas metálicas (Palmeira, 2009 - modificado). .....	21
Figura 3.1 Ciclo de cálculo do programa $PFC^{2D}$ (Neves, 2009) .....	30
Figura 3.2 Notação utilizada para descrever o contato partícula-partícula (Itasca, 2004). .....	32
Figura 3.3 Notação utilizada para descrever o contato partícula-parede (Itasca, 2004). .....	32
Figura 3.4 Determinação da direção normal no contato partícula-partícula (Itasca, 2004) .....	33
Figura 3.5 Sistema massa-mola múltiplo (Itasca, 2004) .....	38
Figura 3.6 Comportamento do modelo de contato: (a) componente normal da força de contato; (b) componente cisalhante da força de contato (Itasca, 2004 - modificado); .....	44
Figura 3.7 Representação do modelo de ligação paralela (Itasca, 2004). .....	45
Figura 4.1 Relação entre o número de partículas e memória RAM demandada .....	49
Figura 4.2 Relação entre tempo demandado e número de partículas geradas na análise .....	49

Figura 4.3 Geração de amostras, para o ensaio biaxial, pelo método da expansão de raios: (a) Condições de fronteira; (b) Geração de partículas com raio reduzido; (c) Expansão dos raios; (d) Amostra em equilíbrio. ....	55
Figura 4.4 Geração de amostras para o ensaio de cisalhamento direto: (a) Condições de fronteira; (b) Geração de partículas com raio reduzido; (c) Expansão dos raios; (d) Amostra em equilíbrio; (e) Amostra cisalhada.....	61
Figura 4.5 Geração de amostras para o ensaio de arrancamento em barra única: (a) Condições de fronteira; (b) Geração de partículas com raio reduzido; (c) Expansão dos raios; (d) Amostra em equilíbrio. ....	64
Figura 4.6 Simulação do ensaio de arrancamento em barra transversal com forma quadrada: (a) <i>Clump</i> formado por 9 círculos sobrepostos; (b) Configuração típica do ensaio.....	67
Figura 4.7 Simulação do ensaio de arrancamento com: (a) duas barras; (b) três barras. ....	69
Figura 5.1 Variação da velocidade no ensaio biaxial: (a) tensão confinante versus deformação axial; (b) tensão de desvio versus deformação axial. ....	71
Figura 5.2 Variação da rigidez no ensaio biaxial: (a) tensão confinante versus deformação axial; (b) tensão de desvio versus deformação axial. ....	72
Figura 5.3 Curva tensão-deformação para um arranjo denso de partículas (NEVES, 2009).....	74
Figura 5.4 Variação da velocidade no ensaio de cisalhamento direto: (a) tensão normal versus deformação axial; (b) tensão cisalhante versus deformação axial. ....	75
Figura 5.5 Variação da rigidez no ensaio de cisalhamento direto: (a) tensão normal versus deformação axial; (b) tensão cisalhante versus deformação axial.....	76
Figura 5.6 Influência da rigidez e velocidade de carregamento no ensaio de cisalhamento direto: (a) tensão normal versus deformação axial; (b) tensão cisalhante versus deformação axial. ....	77
Figura 5.7 Influência do tamanho da caixa de ensaio - $B = 2$ mm: (a) Tensão vertical versus deslocamento horizontal normalizado; (b) Resistência passiva normalizada versus deslocamento horizontal normalizado (c) Incremento de tensão na parede versus deslocamento horizontal normalizado.....	79
Figura 5.8 Influência do tamanho da caixa de ensaio - $B = 4$ mm: (a) Tensão vertical versus deslocamento horizontal normalizado; (b) Resistência passiva normalizada versus deslocamento horizontal normalizado (c) Incremento de tensão na parede versus deslocamento horizontal normalizado.....	80
Figura 5.9 Influência do tamanho da caixa de ensaio - $B = 8$ mm: (a) Tensão vertical versus deslocamento horizontal normalizado; (b) Resistência passiva normalizada versus deslocamento horizontal normalizado (c) Incremento de tensão na parede versus deslocamento horizontal normalizado.....	81
Figura 5.10 Número de partículas em contato com a barra transversal: (a) $B = 2$ mm; (b) $B = 4$ mm (c) $B = 8$ mm .....	83
Figura 5.11 Mecanismo de ruptura no ensaio de arrancamento: (a) $B = 2$ mm; (b) $B = 4$ mm; (c) $B = 8$ mm. ....	84

Figura 5.12 Mecanismo de ruptura generalizada dos elementos transversais da geogrelha em ensaios de arrancamento (Peterson e Anderson, 1980 <i>apud</i> Becker, 2006).....	84
Figura 5.13 Representação das forças de contato no ensaio de arrancamento para uma caixa de ensaio com dimensões de: (a) 10·B; (b) 40·B. ....	85
Figura 5.14 Influência das propriedades da barra transversal: (a) Densidade; (b) Rigidez normal; (c) Ângulo de atrito microscópico.....	86
Figura 5.15 Influência do atrito nas paredes da caixa de ensaio. ....	87
Figura 5.16 Influência da forma e tamanho da barra transversal: (a) Barra transversal circular; (b) Barra transversal quadrada. ....	88
Figura 5.17 Simulações do ensaio de arrancamento em 1 barra - Areia de Leighton Buzzard graduação 7/14: .....	90
Figura 5.18 Simulações do ensaio de arrancamento em 1 barra circular - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25: (a) B = 1,54 mm; (b) B = 2,40 mm; (c) B = 4,78 mm; (d) B = 9,50 mm; (e) Comparativo.....	91
Figura 5.19 Simulações do ensaio de arrancamento em 1 barra quadrada - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25: (a) B = 3,16 mm; (b) B = 6,00 mm; (c) B = 9,50 mm; (d) Comparativo.....	91
Figura 5.20 Influência da forma da barra transversal no ensaio de arrancamento em 1 barra.....	92
Figura 5.21 Simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras - Areia de Leighton Buzzard graduação 7/14. ....	93
Figura 5.22 Simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25: (a) B = 1,50 mm; (b) B = 3,16 mm; (c) B = 4,78 mm.....	94
Figura 5.23 Simulações do ensaio de arrancamento em 3 barras - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25. ....	94
Figura 5.24 Forças de contato para simulações do ensaio de arrancamento em três barras: (a) B = 3,16mm, espaçamento de 3,2 mm; (b) B = 3,16mm, espaçamento de 18 mm; (c) B = 3,16mm, espaçamento de 62 mm. ....	96

## Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADD	Análise de Deformação Descontínua
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DDA	<i>Discontinuous Deformation Analysis</i>
DDS	<i>Differential density scaling</i>
DEM	<i>Discrete Element Method</i>
DI	<i>Degree of interference</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
Eq.	Equação
Eqs.	Equações
<i>et al.</i>	Entre outros
IGS	<i>International Geosynthetics Society</i>
LAMCE	Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia
LCCV	Laboratório de Computação Científica e Visualização
LGM	<i>Lattice Geometric Model</i>
MED	Método dos Elementos Discretos
MEDi	Método dos Elementos Distintos
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLB	Método de Lattice Boltzmann
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
PetroDEM	Petrobras <i>Discrete Element Method</i>
<i>PFC<sup>2D</sup></i>	<i>Particle Flow Code in Two Dimensions</i>
PUC	Pontifícia Universidade Católica
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
Tecgraf	Tecnologia da Computação Gráfica
TPN	Tanque de provas numérico
UDEC	<i>Universal Distinct Element Code</i>
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo
<i>B</i>	Espessura do membro transversal
<i>D<sub>50</sub></i>	Diâmetro médio dos grãos (ou partículas)

$\sigma_b$	Resistência passiva do membro transversal
$\sigma_v$	Tensão Vertical
$x_i$	Vetor de posição
$\sigma_{ij}$	Tensor de tensões
$x_i^{[C]}$	Ponto de contato entre as partículas
$n_i$	Vetor unitário normal ao plano de contato
$U^n$	Deslocamento relativo ou interpenetração
$x_i^{[A]}$	Vetor de posição do centro da partícula A
$x_i^{[B]}$	Vetor de posição do centro da partícula B
$d$	Distância entre os centros das partículas
$R^{[\Phi]}$	O raio da partícula $\Phi$
$F_i$	Vetor força de contato
$F_i^n$	Componente normal do vetor força de contato
$F_i^s$	Componente cisalhante do vetor força de contato
$K^n$	Rigidez normal no contato
$K^s$	Rigidez ao cisalhamento no contato
$V^s$	Velocidade de cisalhamento no contato
$U^s$	Deslocamento cisalhante
$\Delta t$	Passo de tempo
$\Delta U^s$	Incremento de deslocamento cisalhante
$\Delta F^s$	Incremento de força elástica cisalhante
$\mu$	Coefficiente de atrito
$e_{ijk}$	Símbolo de permutação
$\dot{x}_i$	Vetor de velocidade da partícula
$\ddot{x}_i$	Vetor de aceleração da partícula
$\omega_i$	Velocidade angular da partícula
$\dot{\omega}_i$	Aceleração angular da partícula
$m$	Massa total da partícula
$g_i$	Vetor de aceleração das forças de corpo
$M_i$	Momento resultante atuando na partícula
$\dot{H}_i$	Momento angular da partícula
$I_1, I_2, I_3$	Momentos de inércia principais da partícula
$M_1, M_2, M_3$	Componentes do momento resultante referente aos eixos principais
$\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_3$	Aceleração angular sobre os eixos principais
$t_{crit}$	Intervalo de tempo crítico

$k^{tran}$	Rigidez translacional
$k^{rot}$	Rigidez rotacional
$\mathcal{F}_{(i)}$	Componente de força generalizada
$\mathcal{M}_{(i)}$	Componente de massa generalizada
$\mathcal{A}_{(i)}$	Componente de aceleração generalizada
$F_{(i)}^d$	Força de amortecimento
$\mathcal{V}_{(i)}$	Velocidade generalizada
$\alpha_l$	Constante de amortecimento
$\alpha$	Fator de relaxação
$F_c^S$	Resistência ao cisalhamento da ligação - modelo de ligação no contato
$F_c^n$	Resistência à tração da ligação - modelo de ligação no contato
$\bar{k}^n$	Rigidez normal - modelo de ligação paralela
$\bar{k}^S$	Rigidez cisalhante - modelo de ligação paralela
$\bar{\sigma}_c$	Resistência normal - modelo de ligação paralela
$\bar{\tau}_c$	Resistência cisalhante - modelo de ligação paralela
$\bar{R}$	Raio do disco de ligação - modelo de ligação paralela



# Capítulo 1

## Introdução

Os geossintéticos são conhecidos por sua versatilidade, facilidade de instalação e preço acessível, possuindo inúmeras aplicações em obras geotécnicas. Particularmente nos casos de reforço de solos, a geogrelha é o tipo de geossintético mais utilizado, podendo ser aplicada em obras de aterro sobre solos moles, pavimentação, estruturas de contenção, etc. Seu uso como técnica de reforço de solos já é, atualmente, uma solução consolidada e sua aplicação vem crescendo bastante no Brasil e no mundo (Sandroni *et al.*, 2010).

A interação entre o solo e o reforço é um dos principais critérios de projeto de obras com solo reforçado e no caso de reforço com geogrelhas esta interação pode ser bastante complexa. Isto se deve ao fato de que a aderência solo-geogrelha se dá pelo atrito entre a superfície da geogrelha e o solo e pela resistência passiva nos membros transversais, os quais são dependentes do tipo e da geometria do reforço. A fim de se compreender melhor a interação solo-reforço, diferentes tipos de estudos foram realizados nas últimas décadas (Palmeira, 1987; Palmeira et al., 1989; Palmeira, 2004; Teixeira, 2003), entretanto ainda hoje o ensaio de arrancamento é a principal forma de avaliação da aderência entre solo e geogrelha, conforme concluído por Palmeira (2009).

O ensaio de arrancamento, por sua vez, não é normatizado e sofre interferência de fatores como as condições de contorno e efeito de escala, sendo recomendado então que o mesmo seja realizado em grandes dimensões (Palmeira, 2009).

A necessidade de realização de ensaios de arrancamento para avaliação da interação solo-geogrelha aumenta os custos de projeto, além de demandar mais tempo. A fim de encontrar um método mais racional e acurado de previsão da aderência entre solo e geogrelha, Dias (2004) realizou um estudo que avaliou numericamente a interação solo-geogrelha por meio do método dos elementos finitos (MEF). O estudo mostrou boa coerência entre resultados previstos e experimentais de ensaios de arrancamento de grande porte, sendo possível avaliar alguns aspectos da interação solo-geogrelha.

Mesmo obtendo resultados satisfatórios, alguns aspectos da interação solo-geogrelha não podem ser modelados corretamente pelo MEF devido à sua abordagem pela mecânica dos meios contínuos como, por exemplo a própria geogrelha, que é modelada como um elemento contínuo com rugosidade equivalente sem a consideração da sua forma real e da rigidez à

---

flexão dos membros transversais (Palmeira, 2009). Estes aspectos não considerados nas análises pelo MEF podem levar a uma interpretação incompleta do comportamento de uma geogrelha em um ensaio de arrancamento.

Neste contexto, o presente estudo pretendeu analisar esta interação considerando o comportamento discreto do solo, por meio de análises pelo método dos elementos discretos (MED). Segundo Neves (2009), o MED pode modelar o comportamento micro e macromecânico de solos granulares, permitindo analisar propriedades não consideradas pela abordagem tradicional como o contato entre grãos e a forma das partículas.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal da presente pesquisa é o estudo da interação solo-geogrelha pelo método dos elementos discretos (MED), de forma a compreender melhor os fatores que mais influenciam no comportamento de solos reforçados com este tipo de geossintético. Têm-se como objetivos específicos:

- a) A análise paramétrica dos principais parâmetros micromecânicos utilizados, por meio da realização de simulações de ensaios biaxiais e de cisalhamento direto;
- b) A verificação das condições de contorno e efeito de escala nas simulações realizadas;
- c) A simulação de ensaios de arrancamento em diversas configurações, no sentido de avaliar a interação entre o solo e o reforço.

## 1.2 ESCOPO E ORGANIZAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, divididos de forma a facilitar a compreensão dos assuntos abordados. Uma descrição sucinta do conteúdo de cada capítulo é dada a seguir.

O presente capítulo apresenta a introdução sobre o tema estudado, na qual são mostrados a relevância do tema da pesquisa e seus objetivos.

No **Capítulo 2** é realizada uma revisão bibliográfica sobre os dois principais conceitos abordados: o uso dos geossintéticos no reforço de solos e o uso do método dos elementos discretos na simulação do comportamento de solos granulares.

Já no **Capítulo 3** é apresentada a formulação matemática implementada no código computacional utilizado, que é o *Particle Flow Code*.

---

O **Capítulo 4** apresenta uma análise da demanda computacional necessária e disponível para realização das simulações pelo MED. Em seguida, são mostradas as metodologias utilizadas nas simulações dos ensaios biaxiais, de cisalhamento direto e de arrancamento.

No **Capítulo 5**, os resultados das simulações dos ensaios biaxiais e de cisalhamento direto são apresentados, bem como os resultados dos ensaios de arrancamento, os quais são comparados qualitativamente com resultados de ensaios de laboratório.

Por fim, no **Capítulo 6**, as principais conclusões obtidas são apresentadas e são fornecidas sugestões para pesquisas futuras.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os conceitos necessários para o entendimento da presente pesquisa. Inicialmente são abordados os conceitos sobre os geossintéticos, apresentando um breve histórico sobre sua utilização, suas características e finalidades. Uma ênfase maior é dada às geogrelhas, as quais são objeto de estudo deste trabalho. Em seguida são apresentados os conceitos de solos reforçados, mais especificamente dos solos reforçados com geogrelhas, onde são discutidos os principais fatores que influenciam no comportamento de maciços reforçados. Por fim, são discutidos os conceitos sobre os métodos dos elementos discretos (MED), que foi a ferramenta utilizada nas simulações numéricas realizadas. É apresentado então um histórico do método utilizado, bem como suas formulações teóricas e peculiaridades.

#### 2.1 OS GEOSSINTÉTICOS NA ENGENHARIA

Os geossintéticos são definidos, pela Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), como “elementos planos, produzidos a partir de polímeros sintéticos ou naturais, e utilizados em combinação com solo, rocha e/ou outros materiais geotécnicos como parte integral de um projeto, estrutura ou sistema em engenharia civil” (Sieira, 2003).

O termo “geossintético” é composto pelo prefixo “geo”, em referência à sua utilização na melhoria de obras de engenharia envolvendo materiais geotécnicos como os solos e as rochas. O sufixo “sintético”, por sua vez, faz referência ao fato deste material ser produzido quase exclusivamente por produtos manufaturados pelo homem. Dentre os materiais utilizados na produção de geossintéticos estão primariamente os polímeros sintéticos derivados do petróleo, como o polietileno, o polipropileno, o poliéster, a poliamida, etc., entretanto a borracha, a fibra de vidro e outros materiais são utilizados com menos frequência na produção dos geossintéticos (Shukla e Yin, 2006; Ferreira, 2009).

O uso dos geossintéticos em obras de engenharia traz inúmeras vantagens devido à sua grande versatilidade. Estes elementos podem ser utilizados em diversas aplicações e em várias áreas da engenharia civil como geotecnia, transportes, recursos hídricos, geotecnia ambiental, obras costeiras, controle de sedimentos e prevenção de erosões.

A utilização de inclusões no solo a fim de melhorar suas características é uma técnica utilizada há muito tempo, sendo encontrados indícios de sua utilização pelas civilizações antigas como os babilônios, os romanos e os chineses. Sua utilização, entretanto, se limitava ao emprego de fibras naturais e de forma empírica (Sieira, 2003).

Contudo, foi na era moderna que a utilização dos geossintéticos se consolidou. Nas últimas décadas houve um desenvolvimento considerável na área de geossintéticos e nas suas aplicações sendo o geossintético, atualmente, considerado um material consolidado na indústria da construção civil. Os principais desenvolvimentos na área dos geossintéticos das últimas décadas são sumariados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Histórico dos principais desenvolvimentos na área dos geossintéticos.

Década	Desenvolvimentos	Fonte
Primeiras décadas	Um geossintético é utilizado pela primeira vez no reforço de estradas pavimentadas na Carolina do Sul, em 1926.	(1)
Década de 50	Uma gama de geossintéticos é manufaturada para serem utilizados como camadas filtrantes e de separação entre aterros granulares e solos pouco resistentes.	(1)
Década de 60	A empresa <i>Rhone-Poulenc Textiles</i> na França, começou a trabalhar com geotêxteis não-tecido agulhados em diferentes aplicações.	(1)
	Os geotêxteis são utilizados como reforço para estrutura de pavimentos e ferrovias.	(1)
Década de 70	Um geotêxtil não-tecido agulhado é utilizado pela primeira vez em uma barragem. Este geotêxtil foi utilizado como filtro para o dreno de pé da barragem Valcross, na França.	(1)
	Geotêxteis são incorporados como elementos de reforço em paredes de contenção, taludes íngremes, etc.	(1)
	Dá-se início ao processo de normatização com a criação do comitê ASTM D-13-18.	(1)
	É realizada a primeira conferência sobre geossintéticos em Paris, em 1977.	(1)
	É fabricado o primeiro geotêxtil não-tecido no Brasil em 1971.	(2)
Década de 80	Primeiras aplicações de geossintéticos como barreiras impermeabilizantes em depósitos de materiais contaminados.	(1)
	Koerner e Welsh escreveram o primeiro livro sobre geossintéticos em 1980.	(1)
	A Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS em inglês) é criada em 1983.	(1)
	O primeiro volume do periódico internacional <i>Geotextiles and Geomembranes</i> é publicado em 1984.	(1)
	É executada a primeira obra de grande porte com solo reforçado no Brasil.	(2)
Década de 90	Normas sobre geossintéticos são publicadas em vários países, como Estados Unidos, Suíça, Reino Unido, Índia, Brasil, entre outros.	(1)
	O segundo periódico internacional sobre geossintéticos, <i>Geosynthetics International</i> , é publicado em 1995.	(1)
	A representação brasileira da IGS no Brasil é criada em 1996.	(2)
	São realizados os primeiros simpósios brasileiros sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia.	(2)

(1) Shukla e Yin, (2006); (2) Sieira, (2003).

### 2.1.1 Tipos e finalidades dos geossintéticos

A NBR 12553 (ABNT, 2003) apresenta uma lista dos principais tipos de geossintéticos, a qual é apresentada na Tabela 2.2. Nesta tabela também estão indicadas as sugestões de abreviações e as funções usuais de cada geossintético.

Tabela 2.2 Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (ABNT 2003).

<b>Tipo de geossintético</b>	<b>Abreviação</b>	<b>Função*</b>
Geobarra	GB	(R)
Geocélula	GL	(E) (R)
Geocomposto	GC	
Geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante	GCL	(B) (D) (R)
Geocomposto para drenagem	GCD	
Geocomposto para reforço	GCR	
Geoespaçador	GS	(D)
Geoexpandido	GE	*
Geoforma	GF	*
Geogrelha	GG	
Geogrelha extrudada	GGE	
Geogrelha soldada	GGB	(R)
Geogrelha tecida	GGW	
Geomanta	GA	(B) (E)
Geomembrana	GM	
Geomembrana reforçada	GMR	(B) (S)
Geomembrana texturizada	GMT	
Georrede	GN	(D)
Geotêxtil	GT	
Geotêxtil não-tecido	GTN	
Geotêxtil não-tecido agulhado	GTNa	
Geotêxtil não-tecido termoligado	GTNt	(D) (E) (F) (P) (R) (S)
Geotêxtil não-tecido resinado	GTNr	
Geotêxtil tecido	GTW	
Geotêxtil tricotado	GTK	
Geotira	GI	(R)
Geotubo	GP	(D)

(B) Barreira impermeabilizante; (D) Drenagem; (E) Prevenção da erosão superficial; (F) Filtração; (P) Proteção; (R) Reforço; (S) Separação; \* Função específica.

Os geossintéticos possuem sete funções principais, sendo elas:

- a) Função de barreira impermeabilizante: conter e/ou evitar o fluxo de contaminantes, impedindo a migração de líquidos ou gases em aplicações ambientais;
- b) Função de drenagem: coletar e/ou facilitar o fluxo de fluidos no interior do maciço;
- c) Função de prevenção da erosão superficial: proteger a superfície do terreno contra o arraste de partículas pela ação de agentes erosivos como o vento e escoamento superficial;
- d) Função de filtração: permitir a passagem e coleta de fluidos, entretanto impedindo o carreamento de partículas do maciço;
- e) Função de proteção: reduzir as solicitações localizadas, homogeneizando os níveis de tensões que atingem determinada superfície ou camada;
- f) Função de reforço: aumentar a resistência do maciço por meio da inclusão de elementos com alta resistência à tração;
- g) Função de separação: evitar a mistura entre materiais com propriedades distintas.

Conforme mencionado anteriormente, neste capítulo será dado um maior enfoque às geogrelhas e na sua utilização com elemento de reforço. Informações mais completas para os outros tipos e funções de geossintéticos podem ser encontradas em Aguiar e Vettermatti (2004) e em Shukla e Yin (2006).

### **2.1.2 Geogrelhas**

Segundo a NBR 12553 (ABNT, 2003), as geogrelhas são elementos planos com estrutura em forma de grelha, com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, constituído por elementos resistentes à tração. A geogrelha é considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais. Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas (Figura 2.1), conforme apresentado a seguir:

- a) Geogrelha extrudada: obtida por meio de processo de extrusão e sucessivo estiramento, que pode ser em um único sentido, formando geogrelhas unidirecionais, ou nos dois sentidos, formando geogrelhas bidirecionais;

- b) Geogrelha soldada: composta por elementos de tração longitudinais e transversais, soldados nas juntas, produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, recobertos por um revestimento protetor;
- c) Geogrelha tecida: composta por elementos de tração longitudinais e transversais, tricotados ou intertecidos nas juntas, produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, e recobertos por um revestimento protetor.

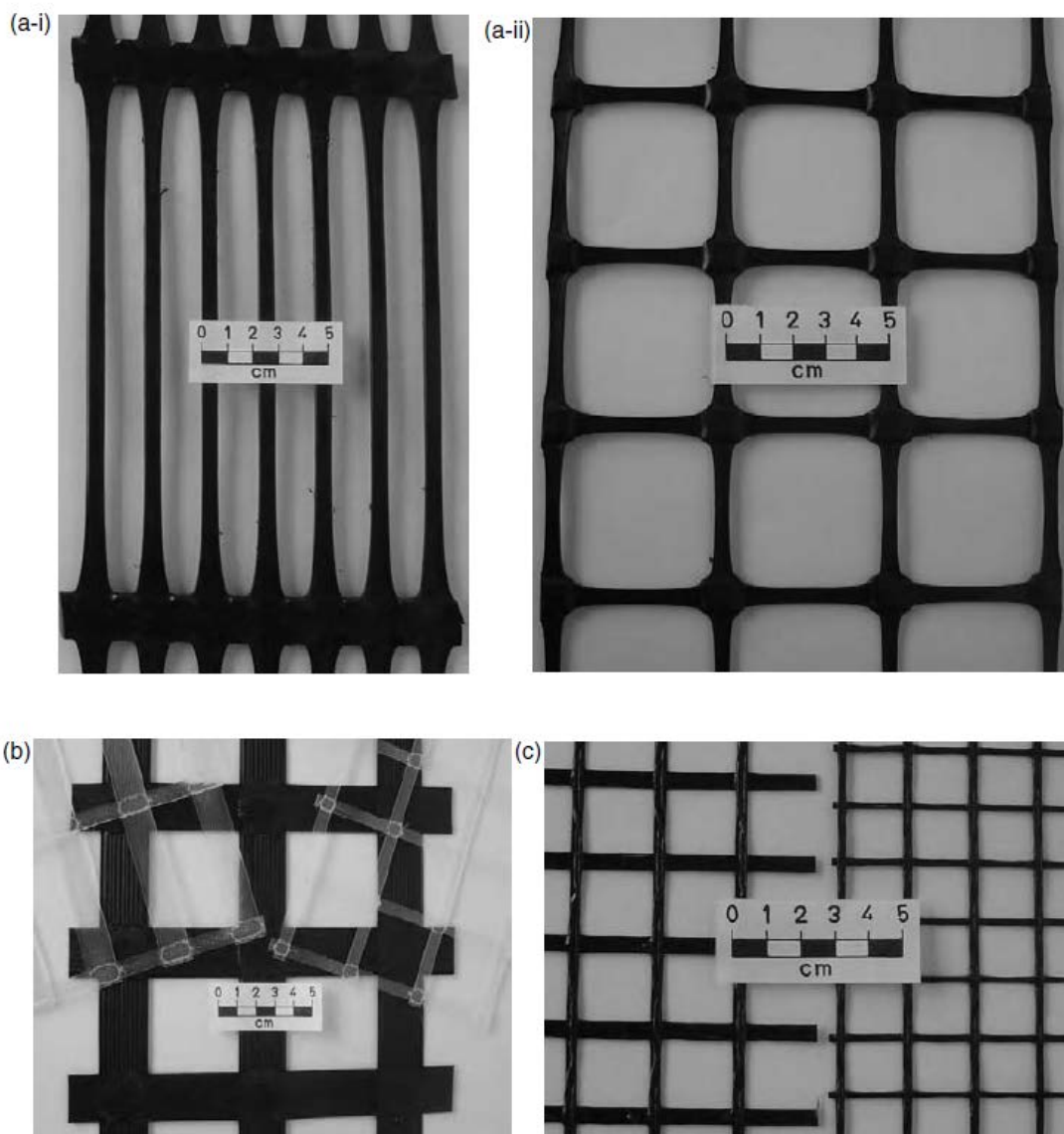


Figura 2.1 Tipos de geogrelhas: (a) Extrudada - (i) uniaxial, (ii) biaxial; (b) Soldada; (c) Tecida (Shukla e Yin, 2006 - modificado).

## 2.2 REFORÇO DE SOLOS COM GEOSSINTÉTICOS

Segundo Palmeira (1987), reforçar um solo por meio de inclusões consiste em posicioná-las em determinadas regiões do solo de forma a causar uma redistribuição favorável



de tensões. A inclusão causa um aumento na resistência do material e uma diminuição na sua compressibilidade, dessa forma maiores cargas podem ser aplicadas em estruturas com solo reforçado (Figura 2.2).

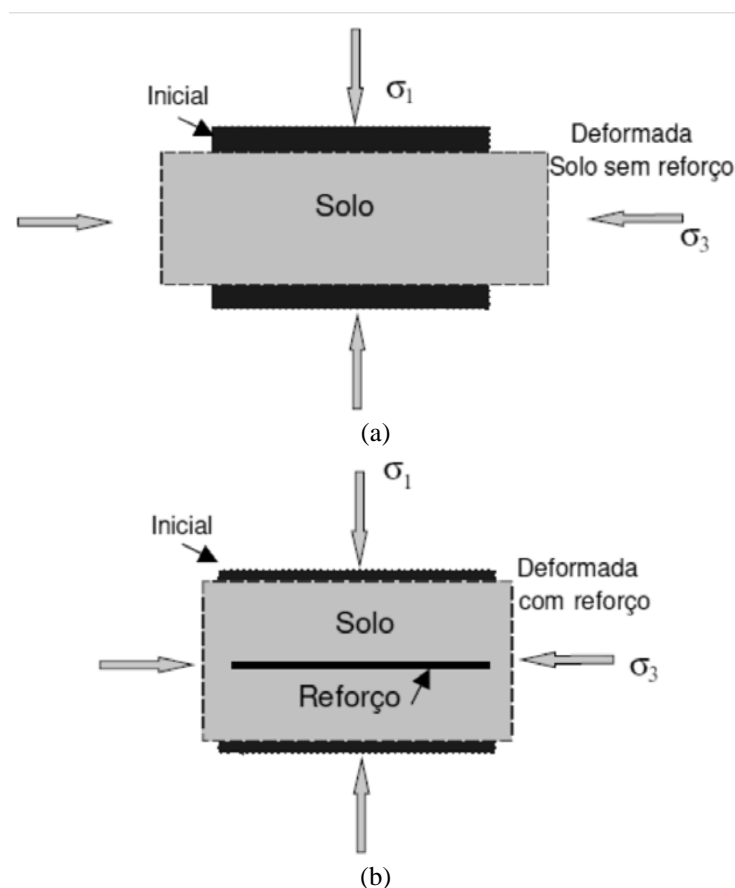


Figura 2.2 Influência da presença de reforço (a) Elemento de solo sem reforço; (b) Elemento de solo com reforço (Abramento, 1998 - modificado).

Um maciço de solo, em geral, possui baixa resistência à tração e pode apresentar deformações de tração e compressão, bem como distorções angulares. Devido a esta baixa resistência à tração dos solos, o uso do reforço se mostra eficiente quando posicionado em regiões que apresentam deformações devido aos esforços de tração e quando orientado na direção principal destas deformações. A orientação das deformações principais de tração, por sua vez, depende da geometria, técnica de construção e tipo de carregamento sobre a estrutura (Palmeira, 1987).

A técnica de reforço de solos tem-se mostrado muito atrativa, pois permite a construção de obras geotécnicas mais ousadas, econômicas e tecnicamente seguras. O solo reforçado pode ser utilizado em diversas aplicações como na execução de estradas não pavimentadas, de muros de contenção, de barragens, de aterros sobre solos moles, de

fundações em aterros reforçados, dentre outros. Outras formas de reforço de solos estão disponíveis, como solo grampeado e compactação profunda, entretanto estas técnicas fogem do escopo do presente trabalho. Na Figura 2.3 são mostrados exemplos de obras em que o solo reforçado por inclusões pode ser utilizado.

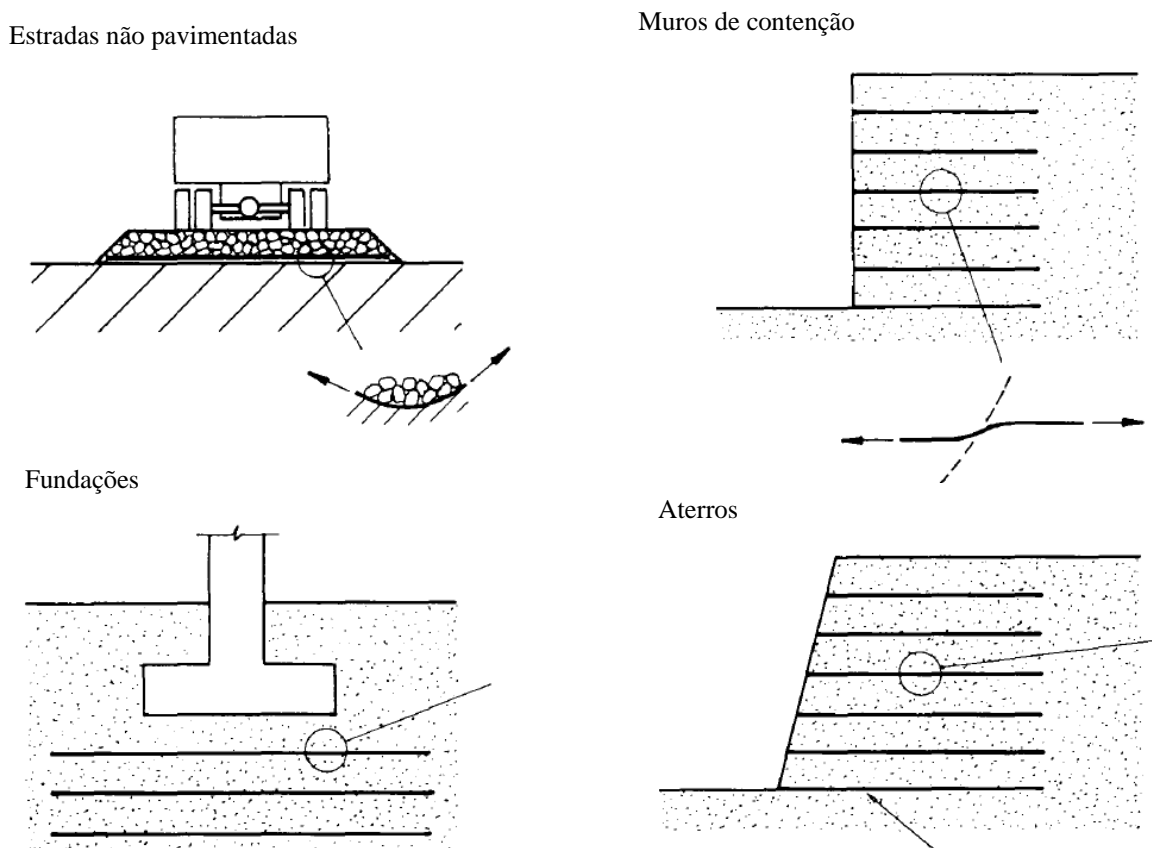


Figura 2.3 Exemplos de aplicação da técnica de solo reforçado (Palmeira, 1987 - modificado).

### 2.2.1 Fatores que influenciam no comportamento de maciços reforçados

Segundo Palmeira (1987), o comportamento de maciços reforçados depende das propriedades do próprio solo, das propriedades do reforço e da interação entre solo e o reforço.

Quanto às características do solo, os materiais granulares são ideais para a utilização em estruturas de solo reforçado, visto que possuem boa resistência e propriedades drenantes, além de possuírem um ângulo de atrito elevado, o que faz com que desenvolvam maior aderência com o reforço do que os solos finos. O reforço em solos finos também é utilizado, porém seu comportamento é mais complexo, conforme verificado por Tupa (1994).

Já quanto aos reforços, os mais comumente utilizados são os de aço e os poliméricos. Nos reforços de aço a principal preocupação é a corrosão, entretanto medidas como o uso do aço galvanizado ou inoxidável podem ser utilizadas a fim de se prevenir sua ocorrência. Nos reforços poliméricos, além da resistência à tração, uma característica muito importante a se considerar é a fluência, a qual depende do tipo de polímero, do nível de tensão e da temperatura. Outro aspecto a ser considerado é a rigidez à tração do reforço, que pode conferir ao maciço um comportamento frágil ou dúctil (Palmeira, 1987).

A interação solo-reforço, por sua vez, tem um papel fundamental no projeto e no comportamento de estruturas reforçadas e esta interação pode ser bastante complexa, dependendo das características do reforço e do solo. O tipo de reforço utilizado pode aumentar a complexidade do problema, dependendo de suas características geométricas e de seu comportamento mecânico.

### **2.2.2 Avaliação da interação solo-reforço**

Tendo em vista a complexidade da interação solo-reforço, diversos tipos de ensaios e modelos teóricos e numéricos foram estudados nas últimas décadas, sendo que alguns destes ensaios se tornaram clássicos, como o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de arrancamento. Outros tipos de ensaio também foram estudados, como o ensaio de tração confinada e o ensaio de cisalhamento direto com reforço oblíquo (Palmeira, 2009).

A escolha do ensaio mais adequado para se avaliar a interação solo-reforço deve ser realizada comparando-se o movimento relativo entre o reforço e o maciço adjacente ao mesmo, conforme sugerido por Collios *et al.* (1980). Assim a Figura 2.4 mostra uma estrutura de solo reforçado na qual são identificadas quatro regiões com diferentes condições de carregamento e seus respectivos mecanismos de ruptura. Para cada região um tipo de ensaio é mais adequado.

Pode-se perceber na Figura 2.4 que a região A representa o deslizamento de uma massa de solo ao longo da superfície do reforço, logo o ensaio de cisalhamento direto pode ser utilizado para a quantificação da aderência solo-reforço nestas condições. Na região B, tanto o solo quanto o reforço podem se deformar lateralmente, então o ensaio de tração confinada pode ser utilizado neste caso. A região C mostra um caso em que solo e reforço são cisalhados, logo pode ser utilizado o ensaio de cisalhamento direto com o reforço posicionado obliquamente ao plano de cisalhamento. Por fim, na região D apenas o reforço está sendo

tracionado, sendo recomendado o ensaio de arrancamento para a quantificação da interação solo-reforço (Palmeira, 2009).

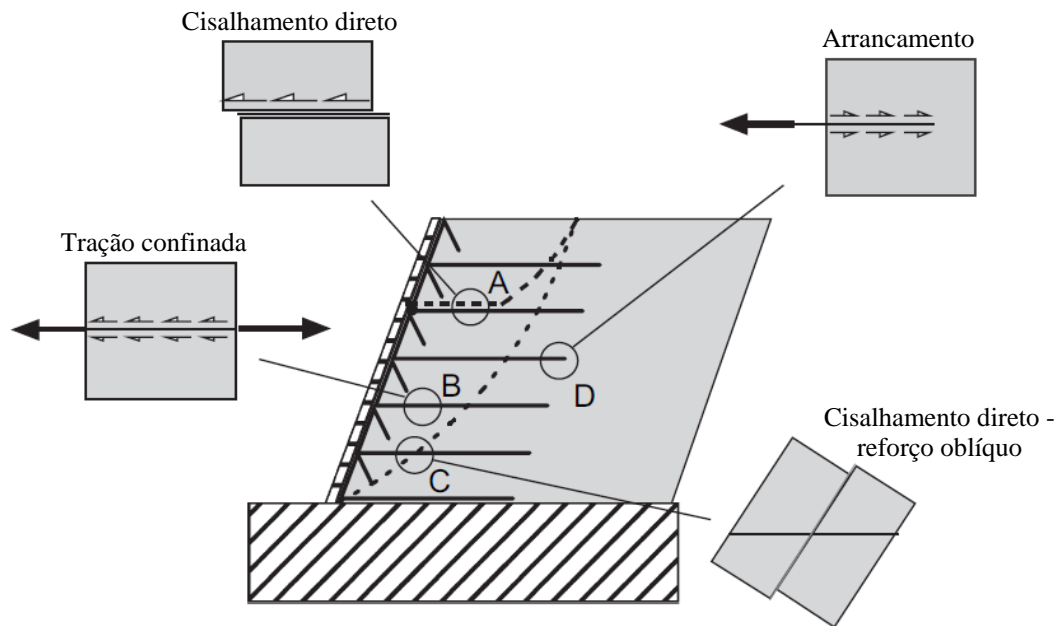


Figura 2.4 Mecanismos de interação solo-reforço em uma estrutura de solo reforçado com geossintéticos (Palmeira, 2009 - modificado).

Além dos ensaios mencionados anteriormente, o ensaio de plano inclinado (ou ensaio de rampa) também é utilizado na avaliação da interação solo-geossintético. Sua utilização é recomendada para casos em que a tensão normal é considerada pequena, como nos casos de avaliação da aderência entre o solo de cobertura e o geossintético em taludes em áreas de disposição de resíduos, conforme mostrado na Figura 2.5.

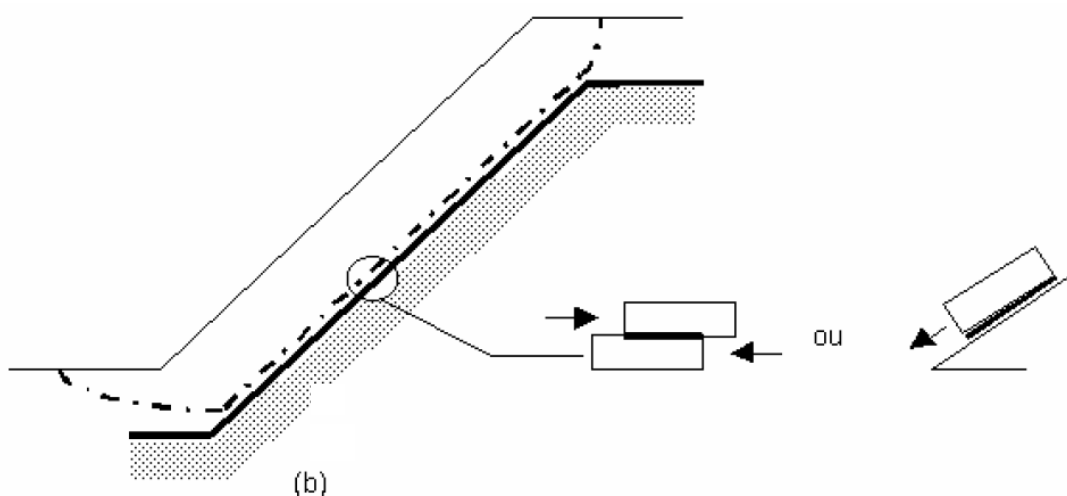


Figura 2.5 Interação solo-geossintético em taludes de obras diversas (Dias, 2004 - modificado).

### 2.3 O ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Segundo Palmeira (2009), o ensaio de arrancamento consiste em uma importante ferramenta na avaliação da interação solo-reforço, principalmente no caso das geogrelhas, pois no mesmo é possível avaliar as contribuições das parcelas de atrito de superfície e resistência passiva.

O ensaio de arrancamento (*pull-out test*) consiste, basicamente, em um elemento de reforço confinado por duas camadas de solo, uma superior e outra inferior. Uma tensão vertical de confinamento é então aplicada ao solo por meio de uma placa rígida ou bolsa pressurizada e, logo após, a inclusão é tracionada até que se atinja a carga de arrancamento máxima, a qual é medida por meio de uma célula de carga. O deslocamento do reforço é medido por meio de extensômetros, sendo que no caso do ensaio de arrancamento em geogrelhas podem ser medidos os deslocamentos individuais de cada membro transversal (e a partir deles obter deformações). Para isso podem ser utilizados, no caso de geogrelhas extensíveis, extensômetros mecânicos (*tell-tales*) em cada membro que se deseja registrar os deslocamentos ou podem-se obter diretamente as deformações, por meio de extensômetros elétricos, nas geogrelhas mais rígidas. A Figura 2.6 apresenta um esquema típico do ensaio de arrancamento com a utilização de *tell-tales*.

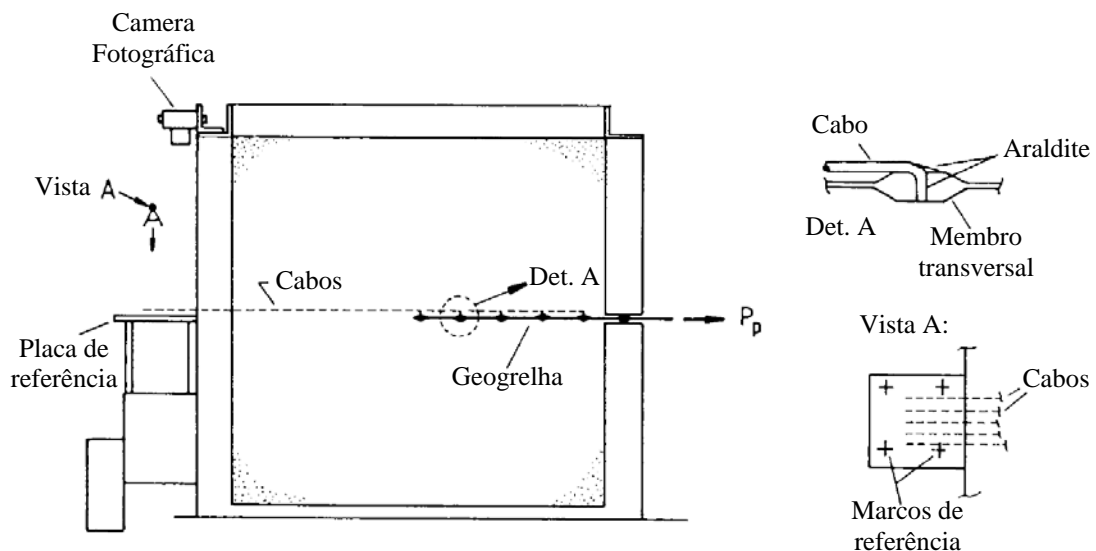


Figura 2.6 Esquema típico de uma ensaio de arrancamento com medição individual de deslocamentos (Palmeira, 1987 - modificado)

Como o ensaio de arrancamento não é amplamente normatizado, diferentes métodos de ensaio surgiram ao longo dos anos, nos quais foram utilizadas diferentes condições de

contorno, formas de aplicação de carga e dimensões. Dias (2004) comparou as características de ensaios de arrancamento realizados por diversos autores, conforme apresentado na Tabela 2.3.

É possível observar na Tabela 2.3 que existe uma diferença muito grande entre os ensaios realizados, o que torna a comparação e extrapolação dos resultados muito complicada, conforme apontado por Palmeira (2004). Neste sentido alguns órgãos internacionais já desenvolveram normas para o ensaio de arrancamento, como a ASTM D6706-01 e a DIN EM 13738. No Brasil ainda não existe uma norma específica para este tipo de ensaio.

Tabela 2.3 Características dos equipamentos de ensaio de arrancamento de diversos autores

Autor	Característica do Equipamento				
	Altura (mm)	Largura (mm)	Comp. (mm)	Sistema de Sobrecarga	Medidas Efetuadas
Ingold (1983)	300	285	500	Colchão de água	Força de arrancamento, deslocamento e volume
Palmeira (1987)	1000	1000	1000	Colchão de água	Força de arrancamento e deslocamentos
Christopher e Berg (1990)	310	600	1220	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamentos
Farrag <i>et al.</i> (1993)	760	900	1520	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e velocidade
Bergado e Chai (1994)	510	750	1250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e deformação
Alfaro <i>et al.</i> (1995)	400	600	1500	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento, deformação e dilatação
Chang <i>et al.</i> (1995)	150	500	400	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento e deformação
Ladeira e Lopes (1995)	600	1000	1530	Cilindros hidráulicos	Força de arrancamento e deslocamentos
Miyata (1996)	220	325	660	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento e dilatação
Ochiai <i>et al.</i> (1996)	200	400	600	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamentos
Bakeer <i>et al.</i> (1998)	152	610	610	Pistão pneumático	Força de arrancamento e deslocamento frontal
Teixeira e Bueno (1999)	500	700	1500	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e tensões no solo
Castro (1999)	1000	1000	1000	Cilindros hidráulicos	Força de arrancamento, deslocamento e deformação
Sugimoto <i>et al.</i> (2001)	625	300	680	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e força na face frontal.
Teixeira (2003)	150	300	250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e tensões no solo
Nakamura <i>et al.</i> (2003)	200	220	500	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamentos nos nós
Kakuda (2005)	150	300	250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e tensões no solo

### 2.3.1 Influência das condições de contorno

Segundo Palmeira (2009), as condições de contorno estão basicamente relacionadas ao atrito e rigidez das paredes e à rigidez da placa de aplicação de carga. Na metodologia de ensaio tradicional o solo está em contato com a parede frontal rígida, sendo importante que o atrito entre esta face e o solo seja minimizado. A redução do atrito nesta interface é usualmente obtida utilizando-se camadas de filmes plásticos lubrificadas com graxa (Figura 2.7 (a)). Como alternativa pode ser utilizada uma luva, conforme mostrado na Figura 2.7 (b), ou uma metodologia de ensaio onde o comprimento do reforço efetivamente testado está afastado da face frontal (Figura 2.7 (c)). Outra possibilidade é o uso de uma face frontal flexível, por meio do emprego de uma bolsa pressurizada (Figura 2.7 (d)).

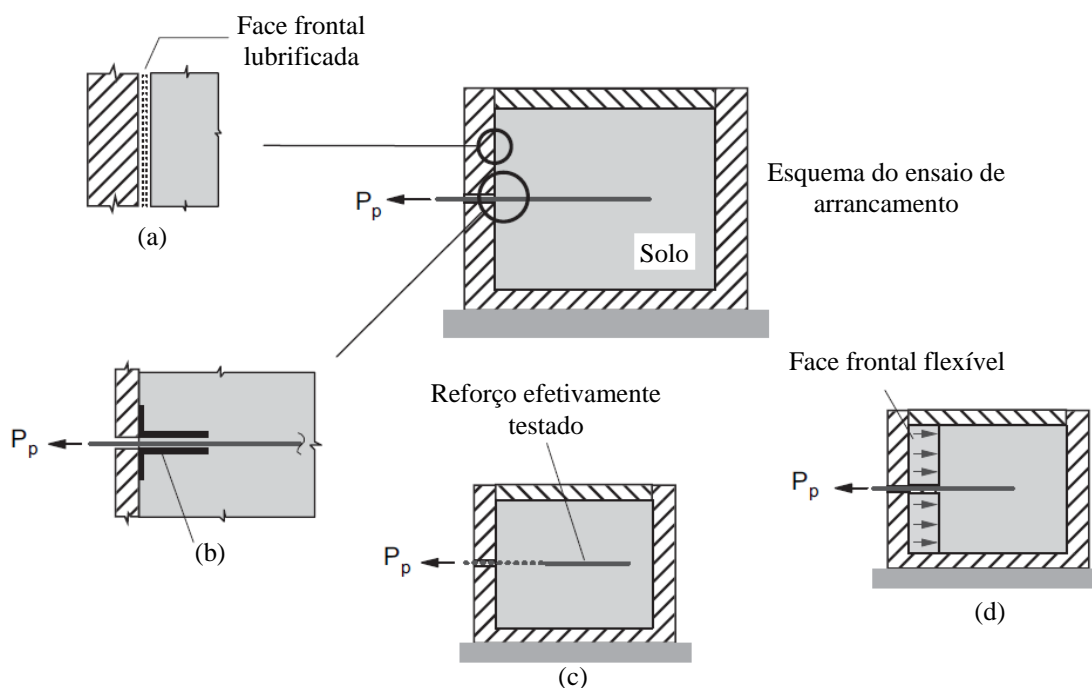


Figura 2.7 Condições de contorno do ensaio de arrancamento: (a) Face frontal lubrificada; (b) Posicionamento de luva lubrificada; (c) Reforço afastado da face frontal; (d) Face frontal flexível (Palmeira, 2009 - modificado).

A fim de se analisar a influência das condições de fronteira no ensaio de arrancamento, análises experimentais (Farrag *et al.*, 1993; Lopes & Ladeira, 1996) e computacionais (Dias, 2004) foram realizadas. Lopes & Ladeira (1996) realizaram ensaios sem a presença de luva e com a presença de uma luva de 20 cm, obtendo uma carga de arrancamento 10% maior para o caso sem luva. Já Farrag *et al.* (1993) analisaram a influência do tamanho da luva, realizando ensaios com a presença de luvas de 20 e 30 cm. Foi obtida uma carga de arrancamento 20%

maior para o caso com a luva de 20 cm. Dias (2004), por sua vez, realizou simulações por meio do método dos elementos finitos e analisou a influência da presença e do tamanho da luva (15 e 30 cm). Os resultados indicaram a mobilização de uma força de arrancamento maior para os casos com a presença da luva e a variação no tamanho da mesma não afetou significativamente a força de arrancamento. Estes resultados contraditórios sugerem então, que são requeridos mais estudos no sentido de determinar quais são os métodos mais eficazes para se diminuir a influência da parede frontal (Palmeira, 2009).

Dias (2004) analisou também a influência da rigidez da placa superior (aplicação de carga). Foram simuladas placas rígidas e flexíveis para duas alturas da caixa de ensaio (0,3 m e 1,0 m). Para ambos os casos os resultados mostraram que quanto mais altas as amostras, menor é o efeito da rigidez da placa superior. Tal resultado sugere que devem ser realizados, de preferencia, ensaios de arrancamento de grande escala.

Realizar ensaios de arrancamento de grande escala para avaliar condições de contorno é uma tarefa demorada e onerosa. Surge então a dúvida sobre qual o tamanho do equipamento de arrancamento em que a influência do efeito de escala seria desprezível. Palmeira (2009) analisou vários estudos realizados neste sentido (Dyer, 1985; Palmeira & Milligan, 1989; Dias, 2004) e observou que há uma pequena influência do tamanho da caixa para alturas maiores do que o comprimento do reforço. Como este comprimento é usualmente menor do que 1 m, os estudos sugerem que a altura da amostra de solo seja superior a 0,60 m para que se reduza o efeito de escala.

### **2.3.2 A interação solo-geogrelha nos ensaios de arrancamento**

Segundo Palmeira (2004) a interação entre solo e geogrelha é um fenômeno complexo que é dependente de diversos fatores como o tipo e a densidade do solo, as propriedades geométricas e mecânicas da geogrelha e o nível e velocidade de carregamento. A resistência ao arrancamento de geogrelhas se deve a mecanismos diferentes daqueles presentes em geossintéticos como os geotêxteis, nos quais está presente somente o atrito superficial devido à sua forma planar. Como as geogrelhas são elementos vazados existe uma penetração de solo nestes vazios, o que faz surgir outro mecanismo de interação: a resistência passiva. Tem-se então que a carga máxima de arrancamento das geogrelhas é obtida pela soma de dois mecanismos: a resistência passiva dos membros transversais e o atrito superficial nos membros longitudinais e transversais, conforme ilustrados na Figura 2.8 (Becker, 2006).



É difícil estimar a parcela de resistência que cabe a cada mecanismo, visto que fatores como a geometria da grelha e propriedades do solo afetam o comportamento de cada mecanismo. Neste contexto, Teixeira (2003) realizou testes de arrancamento em uma geogrelha de poliéster com malha quadrada (23 mm x 23 mm) confinada por um solo granular. Os testes foram realizados para a geogrelha com suas características geométricas originais e, em seguida, os membros transversais foram removidos, sendo ensaiados apenas os membros longitudinais. Os resultados são mostrados na Figura 2.9, na qual se pode observar que a resistência ao arrancamento é maior para o caso em que os membros transversais estão presentes. No caso em que são ensaiados apenas os membros longitudinais a resistência ao arrancamento possui um valor da ordem de 50% do valor apresentado no primeiro caso. Tal fato salienta que os dois mecanismos de interação são relevantes na determinação da resistência ao arrancamento (Palmeira, 2009).

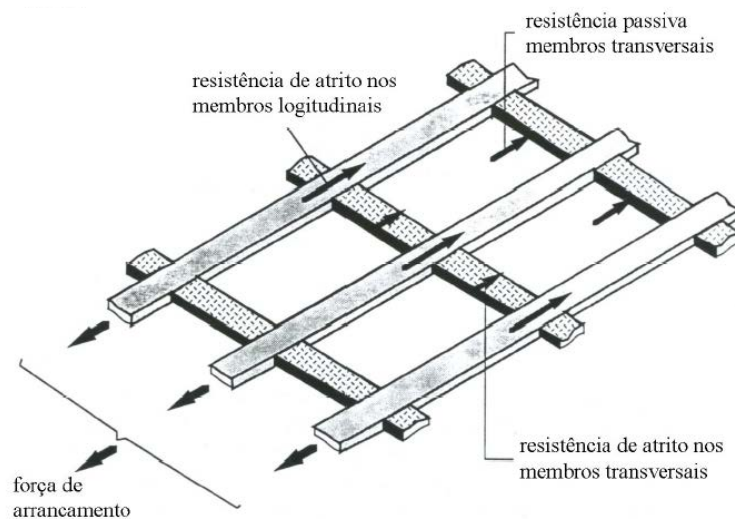


Figura 2.8 Mecanismos de interação solo-geogrelha (Becker, 2006).

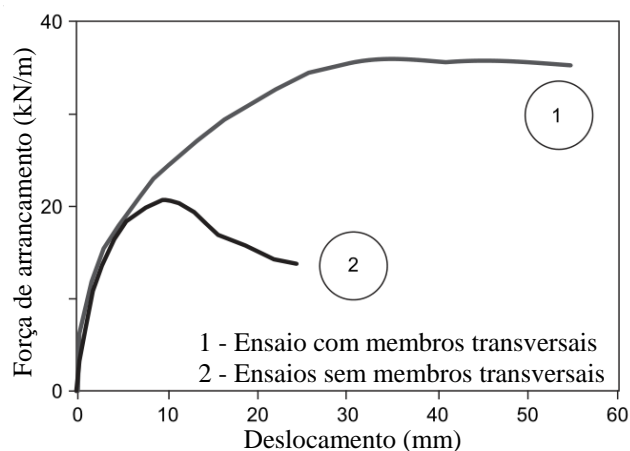


Figura 2.9 Influência dos membros transversais na resistência ao arrancamento. (Palmeira, 2009 - modificado)

A resistência passiva nos membros transversais também é afetada pelo tamanho relativo entre os grãos de solo e os membros transversais da geogrelha. Palmeira & Milligan (1989) apresentam resultados de ensaios de arrancamento realizados em barras metálicas isoladas de diversos tamanhos confinadas em areias com diferentes tamanhos de grãos. A resistência passiva normalizada pela tensão vertical é apresentada em função do ângulo de atrito do solo na Figura 2.10.

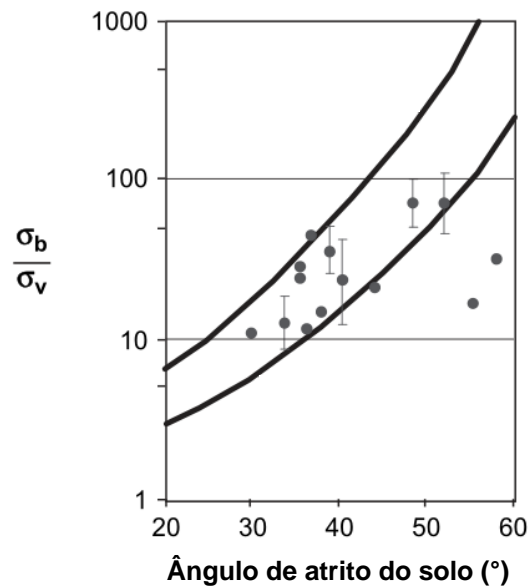


Figura 2.10 Resistência passiva em membros transversais isolados (Palmeira, 2009 - modificado).

Percebe-se que existe uma grande variabilidade nos resultados, a qual se deve ao tamanho relativo entre os grãos de solo e os membros transversais (Palmeira, 2009). Na Figura 2.11 é plotada, então, a resistência passiva normalizada *versus* a espessura da barra transversal, normalizada pelo diâmetro médio dos grãos. Neste caso pode-se verificar que para o mesmo solo, a resistência passiva é tão maior quanto menor for a espessura dos membros transversais. Pode-se visualizar também que a resistência passiva normalizada se torna praticamente constante quando a razão entre a espessura dos membros transversais e o diâmetro médio dos grãos ( $B/D_{50}$ ) for maior do que 12.

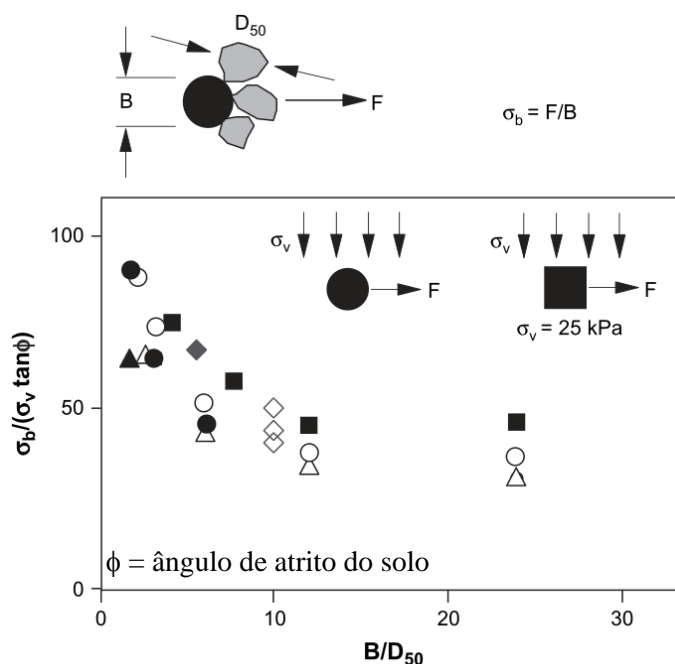


Figura 2.11 Influência do tamanho relativo entre os grãos de solo e os membros transversais da geogrelha (Palmeira, 2009 - modificado)

Segundo Palmeira (2004) a interferência entre membros transversais é outro fator que afeta a interação solo-geogrelha. Esta interferência entre membros pode ser claramente visualizada nos estudos foto elásticos conduzidos por Dyer (1985), sendo que alguns dos resultados são mostrados na Figura 2.12 (a)-(c). Nestes resultados é possível visualizar que a distribuição de carga entre os membros transversais de um grelha metálica é uniforme apenas se estes membros estiverem suficientemente espaçados (Figura 2.12-(a)). A medida que a distancia entre os membros diminui uma distribuição não uniforme de carga pode ocorrer (Figura 2.12-(b)). Esta não uniformidade de carga, por sua vez, se deve à interferência entre os membros transversais. Para casos em que vários membros transversais são ensaiados, também é verificada uma não uniformidade, com interação solo-geogrelha mais complexa neste caso (Palmeira, 2009).

O movimento dos membros transversais durante o ensaio de arrancamento leva à formação de uma região, atrás de cada membro transversal, em que o solo se encontra fofo e consequentemente possui uma baixa resistência. Estas regiões são identificadas pelas áreas escuras mostradas na Figura 2.12 (c). Tem-se então que à frente do membro transversal o solo se encontra em um estado passivo de tensões e atrás destes membros o solo se encontra no estado ativo de tensões.

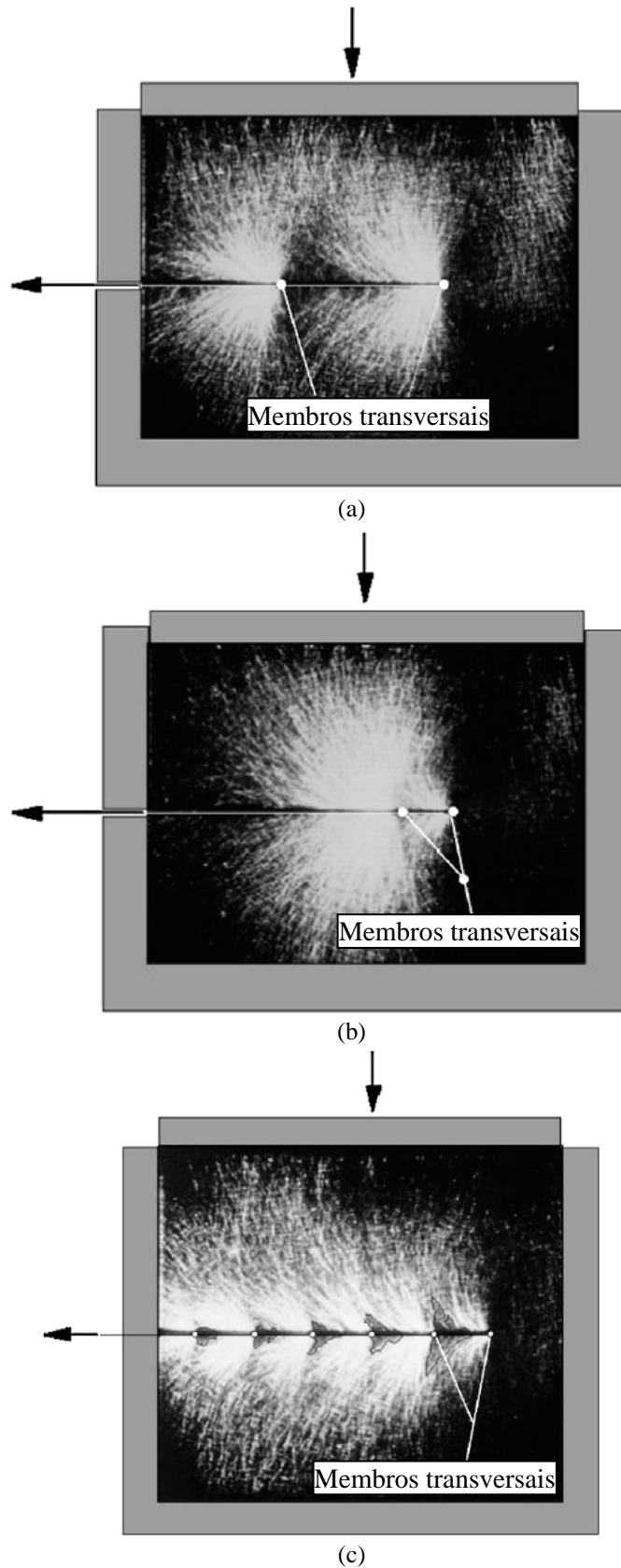


Figura 2.12 Interferência entre os membros transversais de uma geogrelha:  
 (a) Espaçamento grande entre membros; (b) Espaçamento pequeno entre membros;  
 (c) Teste em uma grelha com vários membros (Palmeira, 2009 - modificado).

O tamanho da região de baixa resistência e sua proximidade em relação ao membro transversal subsequente afetam a distribuição de cargas entre os membros transversais. Palmeira & Milligan (1989) verificaram, em testes realizados em membros transversais isolados confinados por uma areia densa e para grandes valores da razão  $B/D_{50}$ , que a massa de solo a frente do membro transversal afetada pelo mecanismo de ruptura pode possuir dimensões de até 6 vezes a espessura do membro transversal. Nos casos em que o membro transversal e os grãos de solo possuem dimensões similares as forças de contato se espalham por uma grande área, levando a condições de interferência mais complexas (McDowell *et al.*, 2006).

Tem-se então que quanto mais afastados estão os membros transversais, menor é a interferência entre os mesmos, mas não necessariamente maior a sua resistência ao arrancamento. Uma forma de se quantificar a interferência entre os membros transversais pode ser feita por meio do grau de interferência, o qual compara a resistência ao arrancamento de uma geogrelha com a resistência ao arrancamento que essa mesma geogrelha apresentaria caso não existisse interferência entre os membros ou como se os mesmos estivessem suficientemente afastados. Na Figura 2.13 é apresentada a definição do grau de interferência, bem como os resultados de ensaios realizados em barras metálicas isoladas confinadas por uma areia densa (Palmeira, 1987; Palmeira & Milligan, 1989).

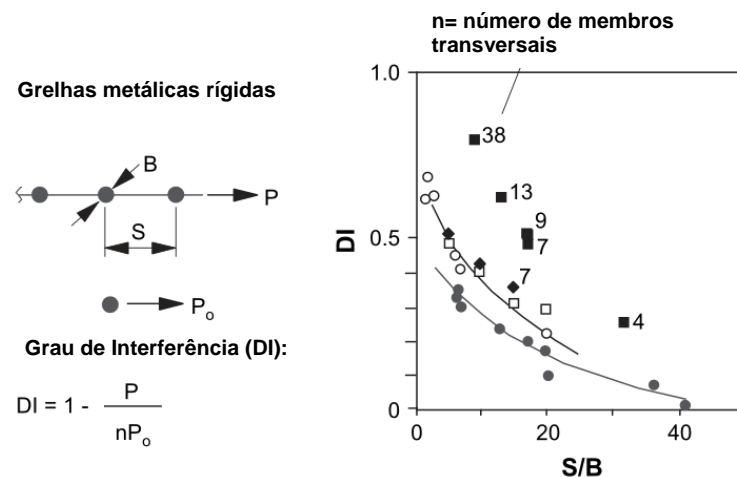


Figura 2.13 Grau de interferência em grelhas metálicas (Palmeira, 2009 - modificado)

Os resultados sugerem que quando a relação entre o espaçamento e a espessura dos membros transversais for maior do que 40 vezes a interferência entre os membros transversais tende a não ocorrer ( $DI = 0$ ). São apresentados também (Figura 2.13) os resultados das simulações realizadas por Dias (2004) por meio do método dos elementos finitos (MEF),

cujos resultados apresentaram tendência semelhante à observada nos ensaios reais realizados por Palmeira (1987).

Os resultados apresentados na Figura 2.13 foram obtidos para grelhas metálicas rígidas. Nos casos em que a geogrelha é flexível, a avaliação do grau de interferência é ainda mais complexa, devido a não uniformidade na distribuição das cargas entre os membros transversais. Tal fato se deve a baixa rigidez à tração apresentada pela maioria das geogrelhas poliméricas quando comparadas às grelhas metálicas e é devido também ao fenômeno da fluência, presente nestas grelhas poliméricas.

Outra forma de se avaliar a distribuição de carga entre os membros transversais é por meio de métodos analíticos. Palmeira (2004) propôs um método para determinação da distribuição de cargas entre os membros transversais. Este modelo analítico é particularmente útil na retro-análise de ensaios de arrancamento em geogrelhas, tendo o mesmo conseguido reproduzir adequadamente os resultados de ensaios de arrancamento de grande porte para casos em que a geometria da geogrelha é mais simples (Palmeira, 2009).

#### 2.4 MODELOS DE ELEMENTOS DISCRETOS APLICADOS À GEOMECÂNICA

O método dos elementos discretos (MED) é uma abordagem de modelagem numérica que pode simular os solos e outros materiais granulares. Uma característica única desta abordagem é que seu esquema explícito considera as partículas e suas interações em um material granular de forma individual. O MED apresenta uma abordagem alternativa à tipicamente utilizada quando se simula meios granulares (solos em particular), que se baseia no arcabouço teórico da mecânica dos meios contínuos. Em um modelo baseado nesta última abordagem é assumido que o solo se comporta como um material contínuo e os deslocamentos e rotações das partículas no interior do material não são considerados. Modelos constitutivos sofisticados são então necessários para capturar a complexidade do material advinda da sua natureza particulada. Portanto, no MED é possível capturar este comportamento complexo por meio de modelos numéricos simples que são utilizados para simular o contato entre as partículas e de simplificações na geometria das partículas, de forma a se diminuir o custo computacional e aumentar o número possível de partículas a serem simuladas (Donzé *et al.*, 2008; O'Sullivan, 2011).

Segundo O'Sullivan (2011), existem duas motivações principais para o uso do MED entre os pesquisadores da área de geomecânica. No primeiro caso, um modelo de elementos

discretos é criado de forma a simular ensaios de laboratório, sendo possível monitorar e analisar a evolução das forças de contato, a orientação e rotação das partículas, entre outros. Em ensaios reais de laboratório tais variáveis são praticamente impossíveis de serem avaliadas. Tem-se então que o MED permite “olhar” dentro do material e entender as interações fundamentais entre as partículas que permeiam o complexo comportamento macroscópico da amostra. A segunda motivação para o uso do MED é que o mesmo permite a análise dos mecanismos envolvidos nos problemas de geomecânica em que estão presentes grandes deslocamentos. As rupturas na geomecânica geralmente envolvem grandes deslocamentos ou deformações e o MED possibilita então, um melhor entendimento destes mecanismos de ruptura.

Diversos autores (Duran, 2000; O'Sullivan, 2011; Zhu *et al.*, 2007) dividem as técnicas numéricas utilizadas no MED em duas categorias chamadas de modelos de esferas “macias” e “duras” (*soft sphere models* e *hard sphere models*). A maior diferença entre estes métodos está no fato de que o modelo de esferas macias considera a penetração entre as partículas, já no modelo de esferas duras nenhuma penetração ou deformação é considerada. Em ambos os modelos as simulações são transientes, sendo que a evolução do sistema no tempo é considerada a partir da avaliação do estado do sistema de partículas em intervalos de tempos distintos.

Segundo O'Sullivan (2011), o modelo de partículas duras possui sua base conceitual no modelo chamado de colisional (*collisional*) ou regido por eventos (*event driven*), o qual parte das equações que governam a troca de quantidade de movimento entre as partículas e as forças de contato entre as partículas geralmente não são consideradas explicitamente. Neste tipo de modelo os eventos ocorrem sequencialmente, sendo que em cada incremento de tempo ocorre no máximo uma colisão e entre as colisões as partículas se movem segundo uma trajetória uniforme. É considerado também que quando as partículas colidem a energia é dissipada por meio de deformações plásticas e calor e a perda de quantidade de movimento é caracterizada unicamente por meio de coeficientes de recuperação elástica.

A abordagem pelo modelo colisional geralmente é mais apropriada para aplicações que envolvem um fluxo rápido de partículas, nas quais o material granular já se encontra parcial ou totalmente fluido. Segundo Delaney *et al.* (2007), o requisito computacional do modelo colisional é menor do que o modelo de esferas macias, entretanto este modelo não captura adequadamente os detalhes do comportamento de amostras densas, que possuem

diversos contatos simultâneos. Logo, as abordagens pelo modelo de esferas duras não são muito consideradas na engenharia geotécnica.

O princípio da abordagem pelo modelo das esferas macias é o de resolver, em incrementos discretos de tempo (passos de tempo), as equações que governam o equilíbrio dinâmico linear e angular das partículas em contato ou em colisão. Neste modelo, o termo “macias” não é muito adequado visto que as partículas (ou esferas) são efetivamente duras ou (rígidas), entretanto a interpenetração entre as mesmas é possível. De fato, neste modelo a força entre as partículas, o atrito e a restituição elástica são calculadas com base na interpenetração (*overlap*) entre as partículas. O cisalhamento ou força tangencial, por sua vez, é calculado a partir do deslocamento relativo acumulado nos pontos de contato em uma direção perpendicular à orientação normal dos contatos. Tem-se então que, diferentemente do modelo de esferas duras, o modelo de esferas macias permite lidar com amostras com múltiplos contatos simultâneos, o que é bastante comum em problemas estáticos ou quase estáticos.

O'Sullivan (2011) relata que existe também um método chamado de Dinâmica de Contato, o qual é pouco documentado em pesquisas na área da geomecânica. Rigorosamente, este método não pode ser considerado nem como um modelo de esferas duras nem como um modelo de esferas macias, podendo ser considerado como um meio termo entre as duas abordagens. A ideia geral do método é a de que as forças entre as partículas são determinadas de forma que não ocorra deformação nas mesmas, ou seja, é considerado que não existe interpenetração entre as partículas (modelo de esferas duras), entretanto, a duração do contato entre as mesmas é finita (modelo de esferas macias).

Tem-se então que os modelos de elementos discretos podem ser utilizados, na geomecânica, tanto para meios particulados ou granulares (*particulate DEM*) quanto para meios rochosos (*block DEM*). Em ambos os casos o modelo considera um sistema formado por inúmeros corpos individuais, sendo eles partículas ou blocos. O foco do presente trabalho são os modelos de elementos discretos particulados, entretanto cabe ressaltar que, principalmente, na área da mecânica das rochas existem algoritmos implementados para o modelo de blocos, como por exemplo, o código comercial UDEC (ITASCA, 1998) e a Análise de Deformação Descontínua. Os modelos de elementos discretos para blocos fogem do escopo do presente trabalho e não serão discutidos no mesmo. Para maiores informações sobre estes modelos pode-se consultar Jing & Stephansson (2007).



Conforme apontado por O'Sullivan (2002), vários algoritmos se enquadram no modelo das esferas macias. Entretanto, a abordagem mais comumente utilizada é o Método dos Elementos Distintos (MEDi), do termo em inglês *Distinct Element Method*, descrito originalmente por Cundall e Strack (1979). Outra abordagem pelo modelo das esferas macias, que é similar aos algoritmos utilizados no MED, é a Análise de Deformação Descontínua (ADD ou, em inglês, *Discontinuous Deformation Analysis - DDA*). Devido à preferência pelo MEDi o termo Método dos Elementos Discretos será sempre utilizado no presente trabalho para se designar o método proposto por Cundall e Strack (1979), exceto onde indicado em contrário.

Para se executar qualquer análise por meio do MED é necessário que o modelo esteja implementado em um código computacional, gerando um *software* ou programa. Em seu trabalho pioneiro, Cundall e Strack (1979) apresentaram o programa BALL e posteriormente TRUBALL, o qual serviu como forma de validação do método proposto pelos autores. Baars (1996) utilizou-se do algoritmo original de Cundall e Strack (1979) e realizou várias simulações de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em materiais granulares e coesivos, com o intuito de verificar o seu algoritmo. Baars (1996) utilizou então o seu programa para estudar o comportamento de poços de sondagem em campos de petróleo (Neves, 2009).

Com o grande aumento da capacidade de processamento dos micro-computadores na última década, a utilização do MED também aumentou, visto que se tornaram possíveis simulações mais robustas e com um maior número de partículas. Surgiram, então, novos códigos que implementam o MED, tanto comerciais quanto acadêmicos. Dentre os códigos comerciais existentes o *Particle Flow Code* da Itasca Consulting Group Inc. é um dos mais utilizados para se simular solos granulares. Vários trabalhos foram realizados com este código, tais como os apresentados por Zeghal (2004), Lobo-Guerrero (2006), Maeda *et al.* (2006), McDowell *et al.* (2006), Huang *et al.* (2008) e Neves (2009).

Dentre os códigos acadêmicos, pode-se citar o código YADE criado por Kozicki & Donzé (2008), que consiste em um software livre com programação orientada a objetos, tornando-o bastante flexível. O código, segundo Neves (2009), além de possuir o MED, implementa também o acoplamento com o Método dos Elementos Finitos (MEF), o SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) e o LGM (*Lattice Geometric Model*).

No Brasil existe uma iniciativa da Petrobrás, chamada de PetroDEM que consiste em um sistema integrado para simulação computacional utilizando o MED. Um dos objetivos da iniciativa é integrar parte do conhecimento existente em quatro universidades brasileiras,

---

sendo elas: a Universidade Federal do Rio de Janeiro, por meio do LAMCE/UFRJ; a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, por meio do Tecgraf/PUC-Rio; a Universidade de São Paulo, por meio do TPN/USP e a Universidade Federal de Alagoas, por meio do LCCV/UFAL. Atualmente, o PetroDEM vem sendo utilizado na realização de estudos em diversas áreas, destacando-se a hidrodinâmica não linear, estaca-torpedo e produção de areia em poços de petróleo. A iniciativa PetroDEM já fomentou a elaboração de vários artigos e publicações, conforme mostrados no site do PetroDEM (Petrobrás, 2011).

Na PUC-Rio existe também um código de MED próprio chamado de SAND, o qual foi utilizado por Alvarado (2006) na simulação de corridas de detrito por elementos discretos. Já Ibañez (2008) estudou a micromecânicas dos solos residuais, utilizando o código DEMlib, que é baseado no código SAND.

Outro código que teve seu desenvolvimento no Brasil é o MechSys, desenvolvido inicialmente na Universidade de Brasília por Pedroso (2006) e por Durand (2007) para realizar análises pelo método dos elementos finitos (MEF) utilizando modelos constitutivos complexos que consideram a elastoplasticidade e a não saturação dos solos. O MechSys consiste basicamente em um conjunto de bibliotecas que possibilitam o usuário gerar seu próprio código, que se adapte às suas necessidades. Segundo o site do programa (MechSys, 2011), atualmente o código possui implementados o método dos Elementos Discretos (MED), o método de Lattice Boltzmann (MLB) e o *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH).

## Capítulo 3

### Fundamentos Teóricos do $PFC^{2D}$

A avaliação da interação solo-geogrelha foi realizada por meio do código comercial *Particle Flow Code in Two Dimensions* ( $PFC^{2D}$ ) da Itasca International Inc., o qual implementa o método dos elementos discretos (MED) utilizando a abordagem das esferas (ou discos) “macias”.

Neste capítulo são apresentados, então, os principais conceitos teóricos acerca da modelagem por meio do MED, sendo deduzidas também as formulações matemáticas necessárias para o entendimento do funcionamento do método numérico e *software* utilizado. Em todo o desenvolvimento do presente capítulo foram utilizados o manual do programa  $PFC^{2D}$  (Itasca, 2004) e as considerações realizadas por Neves (2009).

No MED a interação entre partículas é tratada como um processo dinâmico com estados de equilíbrio sendo atingidos sempre que houver equilíbrio de forças. As forças de contato e deslocamentos de um conjunto de partículas sujeito a um determinado estado de tensões é encontrado por meio do monitoramento individual do movimento das partículas. Os movimentos resultam da propagação de perturbações através do conjunto de partículas causadas por movimentos e forças aplicados em paredes e/ou partículas. Este é um processo dinâmico no qual a velocidade de propagação depende das propriedades físicas do modelo.

O comportamento dinâmico é representado numericamente por um algoritmo de solução explícita no tempo (*explicit timestepping algorithm*), que utiliza um esquema de diferenças finitas centrais para integrar acelerações e velocidades. O MED se baseia na ideia de que o passo de tempo escolhido deve ser pequeno o suficiente de forma que, durante um único intervalo de tempo, as perturbações possam se propagar somente para a partícula vizinha. Então, em qualquer incremento de tempo, as forças atuando em quaisquer partículas podem ser determinadas, exclusivamente, pelas interações com as partículas adjacentes que estiverem em contato. Como a velocidade em que os distúrbios ocorrem na amostra é dependente das propriedades físicas do modelo, o passo de tempo deve ser definido de forma a satisfazer esta condição.

O ciclo de cálculo do MED alterna entre a aplicação da segunda Lei de Newton às partículas e a aplicação da lei de força-deslocamento nos contatos. A segunda Lei de Newton é usada na determinação do movimento de cada partícula, resultante do contato e forças de

corpo atuando nesta, enquanto que a lei de força-deslocamento é usada para atualizar as forças de contato resultantes do movimento relativo em cada contato. A presença das paredes no *PFC<sup>2D</sup>* requer que a lei de força-deslocamento seja aplicada somente para o contato partícula-parede. A segunda Lei de Newton não se aplica às paredes, pois o movimento das mesmas é especificado pelo usuário.

Um modelo de elementos discretos, em geral, simula o comportamento de um sistema constituído por um conjunto partículas com forma arbitrária (o termo partícula, neste contexto, representa um corpo que ocupa um lugar finito no espaço). O modelo é composto por partículas distintas que se deslocam independentemente uma das outras e interagem nos contatos e interfaces entre as mesmas. Se as partículas são assumidas como rígidas e o comportamento dos contatos é caracterizado utilizando-se a abordagem das esferas “macias”, na qual uma rigidez normal finita representa a rigidez mensurável no contato, então o comportamento mecânico do sistema é descrito em termos do movimento de cada partícula e das forças entre partículas atuando em cada ponto de contato. A segunda lei de Newton fornece então a relação fundamental entre o movimento das partículas e as forças que causam este movimento. O sistema de forças pode estar em equilíbrio estático (sem movimento) ou poderá haver fluxo das partículas.

Comportamentos mais complexos podem ser modelados permitindo que as partículas sejam unidas por meio de ligações nos seus pontos de contato de forma que, quando uma força exceder a resistência das ligações (contatos) estas serão rompidas. Tal fato permite a existência de tensões de tração entre as partículas.

Os modelos simulados por meio do *PFC<sup>2D</sup>* assumem as seguintes hipóteses:

- a) As partículas são tratadas como corpos rígidos;
- b) Os contatos ocorrem em uma área extremamente pequena (em um ponto);
- c) Os contatos são modelados utilizando-se a abordagem das esferas “macias”, ou seja, permite-se a sobreposição das partículas nos pontos de contato;
- d) A magnitude da sobreposição está relacionada à força de contato por meio da lei de força-deslocamento e todas as sobreposições são pequenas com relação ao tamanho das partículas;
- e) Ligações (*bonds*) podem existir entre os pontos de contato;

- f) Todas as partículas são circulares. Contudo, podem ser formados *clumps* de formato arbitrário sendo que cada *clump* consiste num conjunto de partículas sobrepostas que se comportam como um corpo rígido com fronteira deformável.

Um modelo criado no *PFC<sup>2D</sup>* consiste em uma coleção bidimensional de partículas circulares. O ambiente do *PFC<sup>2D</sup>* é de natureza bidimensional no qual existem apenas duas componentes de força e uma de momento, ao invés de três componentes de forças e três de momento, que existem em um modelo tridimensional. A componente de força fora do plano e as duas componentes de momento no plano não são consideradas, em nenhuma hipótese, nas equações de movimento ou na lei de força-deslocamento. Logo, sob um ponto de vista tridimensional, o que está sendo exatamente simulado em um modelo do *PFC<sup>2D</sup>* é uma questão de interpretação. O modelo pode simular um conjunto de cilindros com raios variados ou um conjunto de esferas com raios variados, em que seus centróides pertencem ao mesmo plano.

A hipótese de que as partículas são corpos rígidos é razoável, visto que a maior parte das deformações num sistema físico é devida ao movimento ao longo das interfaces. A deformação de um material granular como um todo (areia, por exemplo) é bem descrita por esta hipótese, pois a deformação resulta, basicamente, do deslizamento e rotação das partículas como corpos rígidos, da abertura e do intertravamento das interfaces. Tem-se então que a modelagem precisa da deformação das partículas não é necessária para se obter uma boa aproximação do comportamento global de um material granular.

Por fim, além das partículas circulares (ou bolas), um modelo do *PFC<sup>2D</sup>* possui também elementos denominados de paredes. As paredes permitem que sejam aplicadas condições de fronteira de velocidade, as quais possibilitam a compactação e o confinamento da amostra. As bolas e paredes interagem entre si por meio das forças que surgem nos contatos. As equações de movimento são satisfeitas para cada partícula, entretanto não são satisfeitas para cada parede. Tem-se então que forças atuando em uma parede não afetam seu movimento, o qual é especificado pelo usuário. Tem-se também que os contatos entre paredes não podem ocorrer, logo os possíveis contatos são do tipo partícula-partícula e partícula-parede.

### 3.1 NOTAÇÕES E CONVENÇÕES

Todos os vetores e tensores são expressos utilizando-se a notação indicial, a qual se refere a um sistema retangular de coordenadas cartesianas. Então, um vetor de posição é denotado por  $x_i$  e um tensor de tensões é denotado por  $\sigma_{ij}$ , sendo que os índices variam de 1 a 3 para o caso tridimensional e de 1 a 2 para o bidimensional. A convenção do somatório de Einstein é empregada, portanto a repetição de um índice em um termo representa o somatório do mesmo. Por exemplo, o vetor de tração  $t_i$  que atua na direção  $n_i$  é dado por:  $t_i = \sigma_{ij}n_j = \sigma_{i1}n_1 + \sigma_{i2}n_2 + \sigma_{i3}n_3$ . Tem-se também que um ponto sobre uma variável representa sua derivada com relação ao tempo, logo:  $\dot{x}_i = \partial x_i / \partial t$ .

### 3.2 O CICLO DE CÁLCULO

O ciclo de cálculo no *PFC<sup>2D</sup>* é um algoritmo baseado em passos de tempo, o qual consiste na aplicação iterativa da lei de movimento para cada partícula, da lei força-deslocamento para cada contato e de uma constante atualização da posição das paredes, conforme ilustrado na Figura 3.1. Os contatos podem existir entre duas partículas ou entre uma partícula e uma parede e os mesmos são criados e quebrados automaticamente durante o curso de uma simulação.

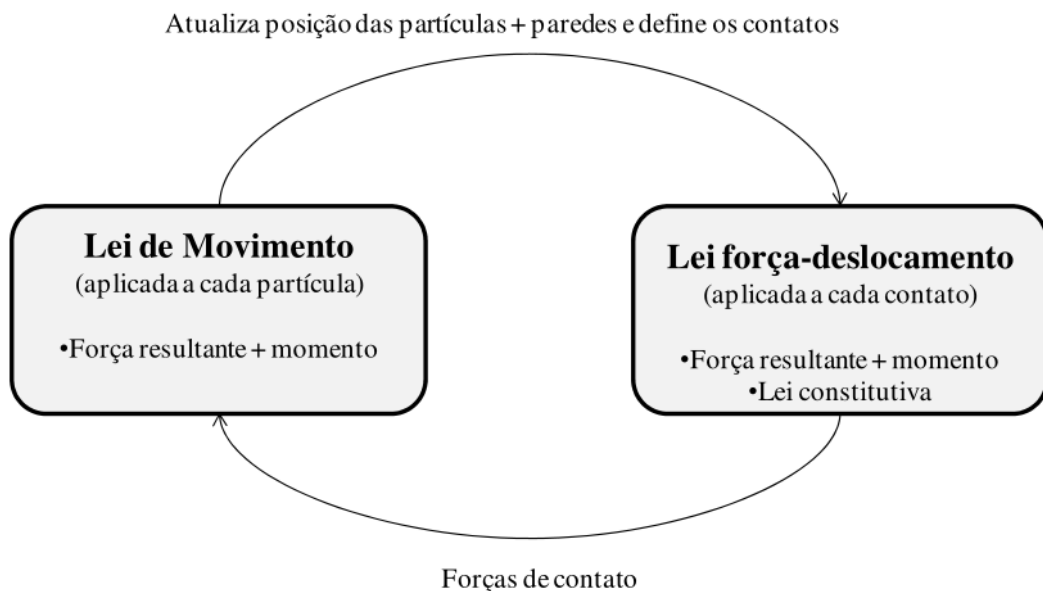


Figura 3.1 Ciclo de cálculo do programa *PFC<sup>2D</sup>* (Neves, 2009)

No início de cada passo de tempo o conjunto de contatos existentes é obtido em função da posição conhecida das partículas e paredes. A lei de força-deslocamento é então

aplicada em cada contato a fim de se atualizar a força existente nos mesmos, baseando-se no deslocamento relativo entre duas entidades (partícula-partícula ou partícula-parede) e no modelo constitutivo do contato. Em seguida, a lei de movimento é aplicada em cada partícula de modo a se obter sua velocidade e posição atualizada, baseada nas resultantes de força e momento em cada partícula, que são obtidas a partir da força nos contatos e em qualquer força de corpo atuante na partícula. É possível também atualizar a posição das paredes com base nas suas velocidades específicas.

### 3.3 LEI FORÇA-DESLOCAMENTO

A partir da lei força-deslocamento são calculadas as forças atuantes no contato entre duas entidades. Tanto no contato partícula-partícula quanto no contato partícula-parede esta força é calculada considerando-se o contato ocorrendo em um ponto, ou seja, usando o modelo das esferas macias. No contato entre duas partículas uma força e um momento adicional podem ser adicionados aos cálculos de forma a representar a cimentação entre as partículas (*parallel bond*).

A lei força-deslocamento atua num contato e pode ser descrita em termos de um ponto de contato,  $x_i^{[C]}$ , num plano, o qual é definido pelo vetor normal a ele,  $n_i$ . O ponto de contato está dentro do volume de interpenetração entre partículas. Para o contato do tipo partícula-partícula, o vetor normal está ao longo da linha que une os centros das partículas. Para o contato do tipo partícula-parede, o vetor normal está ao longo da linha que define a menor distância entre o centro da partícula e a parede. A força de contato é decomposta numa componente normal atuando na direção do vetor normal, e numa componente cisalhante atuando no plano de contato. A lei força-deslocamento relaciona as duas componentes de força às correspondentes componentes de deslocamento relativo, por meio de uma rigidez normal e outra tangencial nos contatos. Para o contato entre duas partículas (Figura 3.2), as equações relevantes serão apresentadas para duas partículas esféricas (A e B). Para o contato partícula-parede, as equações relevantes serão apresentadas para o caso de uma partícula esférica,  $b$ , e uma parede,  $w$  (Figura 3.3). Em ambos os casos,  $U^n$  denota a sobreposição (ou interpenetração).

Para o contato partícula-partícula, a normal,  $n_i$ , que define o plano de contato é dada por:

$$n_i = \frac{x_i^{[B]} - x_i^{[A]}}{d} \quad (3.1)$$

Onde  $x_i^{[A]}$  e  $x_i^{[B]}$  são os vetores posição dos centros das partículas A e B, e  $d$  é a distância entre os centros das partículas:

$$d = |x_i^{[B]} - x_i^{[A]}| = \sqrt{(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})} \quad (3.2)$$

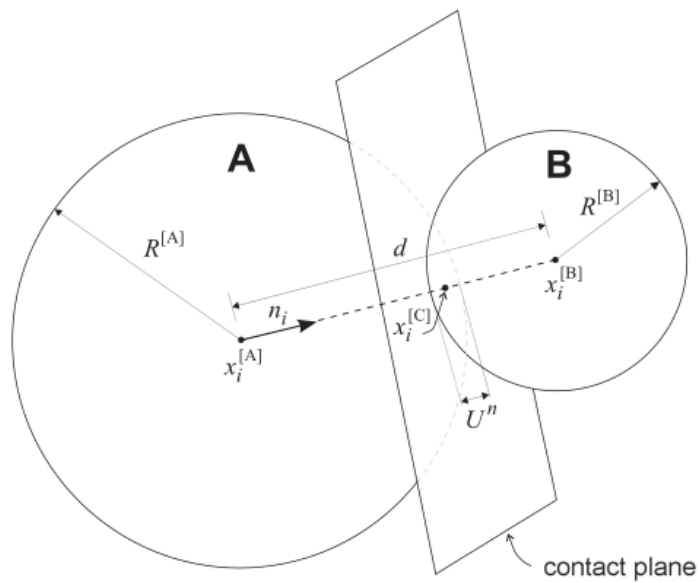


Figura 3.2 Notação utilizada para descrever o contato partícula-partícula (Itasca, 2004).

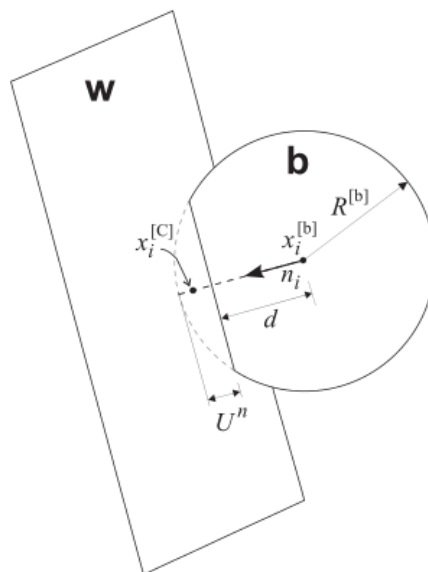


Figura 3.3 Notação utilizada para descrever o contato partícula-parede (Itasca, 2004).



Para o contato partícula-parede, a direção de  $n_i$  é encontrada por meio do mapeamento do centro da partícula numa porção relevante do espaço definida pela parede. Esta ideia é ilustrada na Figura 3.4 para uma parede bidimensional composta por dois segmentos de reta  $\overline{AB}$  e  $\overline{BC}$ . Todo o espaço no lado ativo desta parede pode ser decomposto em cinco regiões por meio de uma linha normal a cada segmento em seus pontos terminais. Se o centro da partícula localizar-se nas regiões 2 ou 4, realizará contato com a parede ao longo de seu comprimento, e  $n_i$  será normal ao segmento de reta correspondente. No entanto, se o centro da partícula localizar-se nas regiões 1,3 ou 5, o contato será estabelecido em um dos pontos terminais, e  $n_i$  estará ao longo da linha que liga o ponto terminal ao centro da partícula.

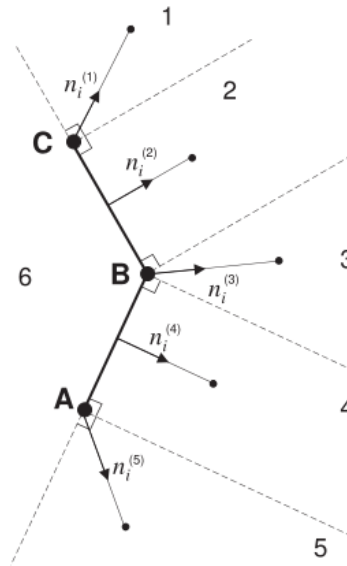


Figura 3.4 Determinação da direção normal no contato partícula-partícula (Itasca, 2004)

A sobreposição (*overlap*),  $U^n$ , definida como o deslocamento relativo entre os contatos na direção normal, é dada por:

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + A^{[B]} - d, & (\text{partícula-partícula}) \\ R^b - d, & (\text{partícula-parede}) \end{cases} \quad (3.3)$$

Onde  $R^{[\Phi]}$  é o raio da partícula  $\Phi$ . A localização do ponto de contato é dada por:

$$x_i^{[C]} = \begin{cases} x_i^{[A]} + \left(R^{[A]} - \frac{1}{2}U^n\right)n_i, & (\text{partícula-partícula}) \\ x_i^{[b]} + \left(R^{[b]} - \frac{1}{2}U^n\right)n_i, & (\text{partícula-parede}) \end{cases} \quad (3.4)$$

O vetor de força de contato,  $F_i$ , (o qual representa a ação da partícula A na partícula B para o contato do tipo partícula-partícula, e a ação da partícula na parede no contato do tipo

partícula-parede), pode ser decomposta em suas componentes normal e cisalhante com respeito ao plano de contato:

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (3.5)$$

Onde  $F_i^n$  e  $F_i^s$  denotam os vetores de componentes normal e cisalhante, respectivamente. A magnitude da força de contato normal é calculada como:

$$F^n = K^n U^n \quad (3.6)$$

Onde  $K^n$  representa a rigidez normal no contato. O valor de  $K^n$  é determinado pelo modelo de rigidez de contato.

A rigidez normal é um módulo secante e está relacionado ao deslocamento e força totais. A rigidez cisalhante,  $K^s$ , por outro lado, é um módulo tangente e está relacionada à força e deslocamento incrementais.

A força de contato cisalhante é calculada de modo incremental. Quando um contato é formado, a força cisalhante total é nula. Cada incremento de deslocamento cisalhante relativo subsequente resulta num incremento de força cisalhante (elástica) adicionado ao valor atual.

O movimento do contato é considerado, durante o processo, por meio da atualização de  $n_i$  e  $x_i^{[C]}$  a cada passo de tempo.

O movimento cisalhante relativo no contato, ou a velocidade de cisalhamento no contato,  $V^S$  (definida como a velocidade de cisalhamento da partícula B relativa à partícula A no contato partícula- partícula, e como a velocidade de cisalhamento da partícula no ponto de contato com a parede para o contato partícula-parede), é dada por:

$$V^S = \left( \dot{x}_i^{[\Phi^2]} - \dot{x}_i^{[\Phi^1]} \right) t_i - \omega_3^{[\Phi^2]} \left| x_k^{[C]} - x_k^{[\Phi^2]} \right| - \omega_3^{[\Phi^1]} \left| x_k^{[C]} - x_k^{[\Phi^1]} \right| \quad (3.7)$$

Onde  $\dot{x}_i^{[\Phi^j]}$  e  $\omega_3^{[\Phi^j]}$  são as velocidades translacional e rotacional, respectivamente, da entidade  $\Phi^j$  dada por:

$$\{\Phi^1, \Phi^2\} = \begin{cases} \{A, B\}, & (\text{partícula-partícula}) \\ \{b, w\}, & (\text{partícula-parede}) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$E t_i = \{-n_2, n_1\}.$$

O componente de cisalhamento do incremento de deslocamento cisalhante que ocorre num passo de tempo  $\Delta t$  é calculado como:

$$\Delta U^S = V^S \Delta t \quad (3.9)$$

E é utilizado para calcular o incremento de força elástica cisalhante:

$$\Delta F^S = -k^S \Delta U^S \quad (3.10)$$

Onde  $k^S$  é a rigidez ao cisalhamento no contato. O valor de  $k^S$  é determinado pelo modelo de rigidez de contato utilizado.

A nova força de contato cisalhante é encontrada a partir da soma da força cisalhante existente no início do passo de tempo com o incremento de força cisalhante elástica

$$F^S \leftarrow F^S + \Delta F^S \leq \mu F^n \quad (3.11)$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito.

Os valores de força normal e cisalhante (determinados pelas Eqs. 3.6 e 3.10) são ajustados para satisfazer as relações constitutivas nos contatos. Após este ajuste, a contribuição da força de contato final para a força e momento resultantes nas duas entidades em contato é dada por:

$$\begin{aligned} F_i &= F^n n_i + F^S t_i \\ F_i^{[\Phi^1]} &\leftarrow F_i^{[\Phi^1]} - F_i \\ F_i^{[\Phi^2]} &\leftarrow F_i^{[\Phi^2]} + F_i \\ M_3^{[\Phi^1]} &\leftarrow M_3^{[\Phi^1]} - e_{3jk} (x_j^{[C]} - x_j^{[\Phi^1]}) F_k \\ M_3^{[\Phi^2]} &\leftarrow M_3^{[\Phi^2]} - e_{3jk} (x_j^{[C]} - x_j^{[\Phi^2]}) F_k \end{aligned} \quad (3.12)$$

Onde  $F_i^{[\Phi^j]}$  e  $M_3^{[\Phi^j]}$  são o somatório da força e do momento da entidade  $\Phi^j$  da Eq. 3.8,  $F_i$  é dada pela Eq. 3.5 e  $e_{ijk}$  é o símbolo de permutação dado por:

$$e_{ijk} = \begin{cases} 0, & \text{se 2 índices coincidirem;} \\ +1, & \text{se } i, j, k \text{ permutarem como } 1, 2, 3; \\ -1, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.13)$$

### 3.4 LEI DE MOVIMENTO

O movimento de uma única partícula é determinado pelos vetores de força e momento resultante atuando sobre ela, e pode ser descrito em termos de movimento translacional de um ponto na partícula e do movimento rotacional da partícula. O movimento de translação do centro de massa de uma partícula é descrito por meio de sua posição,  $x_i$ , velocidade,  $\dot{x}_i$ , e aceleração,  $\ddot{x}_i$ . O movimento rotacional da partícula é descrito por meio de sua velocidade angular,  $\omega_i$  e de sua aceleração angular  $\dot{\omega}_i$ .

As equações de movimento podem ser expressas como duas equações vetoriais: uma relaciona a força resultante ao movimento translacional e a outra relaciona o momento resultante ao movimento rotacional. A equação para o movimento translacional pode ser escrita na forma vetorial:

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (3.14)$$

Onde  $F_i$  é a força resultante, a soma de todas as forças externas aplicadas atuando na partícula;  $m$  é a massa total da partícula; e  $g_i$  é o vetor aceleração das forças de corpo. A equação para o movimento rotacional pode ser escrita como:

$$M_i = \dot{H}_i \quad (3.15)$$

Onde  $M_i$  é o momento resultante atuando na partícula e  $\dot{H}_i$  é o momento angular da partícula. Esta relação refere-se ao sistema de coordenadas locais numa partícula, em seu centro de massa. Se este sistema local está orientado sobre os eixos principais de inércia da partícula, então a Eq. 3.15 fica reduzida às equações do movimento de Euler:

$$\begin{aligned} M_1 &= I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 \\ M_2 &= I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 \\ M_3 &= I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Onde  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  são os momentos de inércia principais da partícula;  $\dot{\omega}_1$ ,  $\dot{\omega}_2$  e  $\dot{\omega}_3$  são as acelerações angulares sobre os eixos principais; e  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$  são os componentes do momento resultante referente aos eixos principais.

Tanto para partículas esféricas quanto para discos, de raio  $R$ , cuja massa é distribuída uniformemente no volume, o centro de massa coincide com o centro do disco ou esfera. Para uma partícula esférica, qualquer sistema de coordenadas preso ao seu centro de massa é um

sistema de eixos-principais. E os momentos de inércia iguais entre si, para uma partícula no formato de disco cujo eixo está fora do plano,  $\omega_1 = \omega_2 = 0$ . Então, para qualquer formato de partículas, a Eq. 3.16 pode ser simplificada quando escrita em função dos eixos principais:

$$M_3 = I\dot{\omega}_3 = (\beta mR^2)\dot{\omega}_3 \quad (3.17)$$

Onde:

$$\beta = \begin{cases} 2/5, & (\text{partícula esférica}) \\ 1/2, & (\text{partícula em forma de disco}) \end{cases} \quad (3.18)$$

As equações do movimento (Eqs. 3.14 e 3.17), são integradas utilizando-se um esquema de diferenças centrais envolvendo o passo de tempo  $\Delta t$ . As quantidades  $\dot{x}_i$  e  $\omega_3$  são calculadas nos intervalos médios de  $t \pm \Delta t / 2$ , enquanto que as quantidades  $x_i$ ,  $\ddot{x}_i$ ,  $\dot{\omega}_3$ ,  $F_i$  e  $M_3$  são calculadas nos intervalos de tempo primários  $t \pm n\Delta t$ .

As seguintes expressões descrevem as acelerações translacionais e rotacionais no tempo,  $t$ , em termos de velocidades no intervalo médio. As acelerações são calculadas como:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i^{(t)} &= \frac{1}{\Delta t} \left( \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} \right) \\ \dot{\omega}_3^{(t)} &= \frac{1}{\Delta t} \left( \omega_3^{(t+\Delta t/2)} - \omega_3^{(t-\Delta t/2)} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Inserindo estas expressões nas Eqs. 3.14 e 3.17 e resolvendo para as velocidades no tempo  $t \pm n\Delta t / 2$  chega-se a:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} &= \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left( \frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t \\ \omega_3^{(t+\Delta t/2)} &= \omega_3^{(t-\Delta t/2)} + \left( \frac{M_3^{(t)}}{I} \right) \Delta t \end{aligned} \quad (3.20)$$

Finalmente, as velocidades na Eq. 3.20 podem ser usadas para atualizar a posição do centro das partículas:

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (3.21)$$

### 3.5 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Em geral, o carregamento num conjunto de partículas é dado pela força gravitacional e/ou o movimento de paredes. Para cada parede, tanto a velocidade rotacional quanto translacional podem ser especificadas. No entanto, uma força não pode ser especificada, mas somente monitorada e então utilizada para controlar a velocidade das paredes. O movimento das paredes pode ser determinado atualizando-se a posição de cada ponto,  $P$ , que define a velocidade da parede por meio de diferenças finitas centrais, na qual a velocidade do ponto  $P$  (cuja posição é denotada por  $x_i^{[P]}$ ) é calculada por:

$$\dot{x}_i^{[P]} = \dot{x}_i^{[w]} + e_{i3k} \omega_3^{[w]} (x_k^{[P]} - x_k^{[w]}) \quad (3.22)$$

Onde  $\dot{x}_i^{[w]}$  é a velocidade translacional da parede,  $\omega_3^{[w]}$  é a velocidade rotacional da parede e  $x_k^{[w]}$  é o centro de rotação da parede.

Para cada partícula podem ser aplicadas forças, momentos e velocidades.

### 3.6 DETERMINAÇÃO DO PASSO DE TEMPO

Para o esquema de integração de diferenças finitas utilizado no cálculo do movimento, um intervalo de tempo pequeno o suficiente (crítico) deve ser calculado com o intuito de se garantir a estabilidade. O passo de tempo usado no *PFC<sup>2D</sup>* é uma fração deste intervalo de tempo crítico. Para um número infinito de pontos massa-mola (Figura 3.5), o menor período de vibração ocorrerá quando as massas estiverem movimentando-se em sentido oposto e de forma sincronizada. Este movimento faz com que o centro das molas seja estacionário tal que o movimento de um único ponto de massa pode ser descrito como na Figura 3.5 (b) e (c).

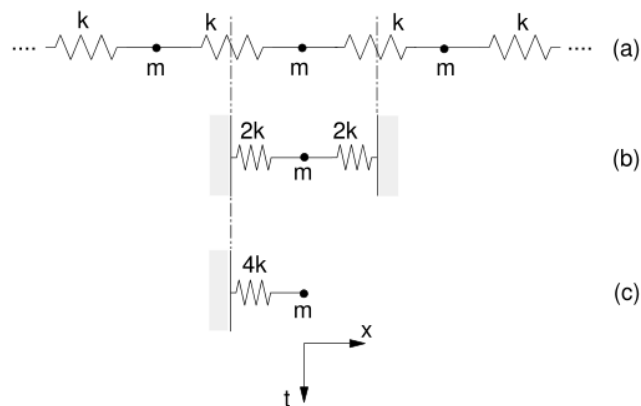


Figura 3.5 Sistema massa-mola múltiplo (Itasca, 2004)

O intervalo de tempo crítico será então:

$$t_{crit} = 2\sqrt{\frac{m}{4k}} = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.23)$$

Onde  $k$  é a rigidez de cada mola e  $m$  é a massa do ponto. O mesmo argumento pode ser utilizado para o movimento rotacional, porém com  $m$  sendo substituído por  $I$ , o momento de inércia. Para o sistema massa-mola múltiplo o intervalo de tempo crítico pode ser dado por:

$$t_{crit} = \begin{cases} \sqrt{m/k^{tran}}, & (translacional) \\ \sqrt{I/k^{rot}}, & (rotacional) \end{cases} \quad (3.24)$$

Onde  $k^{tran}$  e  $k^{rot}$  são a rigidez translacional e rotacional, respectivamente, e  $I$  é o momento de inércia da partícula.

Um sistema bidimensional, como o modelado pelo *PFC<sup>2D</sup>* contém muitas partículas com diferentes massas e rigidez. Pela aplicação da Eq. 3.24 separadamente para cada grau de liberdade de cada partícula, um intervalo de tempo crítico pode ser determinado para cada partícula. O intervalo de tempo crítico global é o menor dentre todos os intervalos de tempos críticos calculados para todas as partículas.

A rigidez translacional e rotacional das partículas pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} k_{(i)}^{tran} &\approx \bar{k}_{(ii)} = [(k^n - k^S)n_{(i)}^2 + k^S] + [A\{(\bar{k}^n - \bar{k}^S)n_{(i)}^2 + \bar{k}^S\}] \\ k_{(3)}^{rot} &\approx \hat{k}_{(33)} = [R^2 k^S] + [AR^2 \bar{k}^S + I \bar{k}^n] \end{aligned} \quad (3.25)$$

Aqui o segundo termo do lado direito somente aparece na presença de contato paralelo. Se não existir contato paralelo, estes termos desaparecem. Os subscritos entre parênteses indicam que esta não é uma relação vetorial.

A escala diferencial de densidade (*differential density scaling, DDS*) no passo de tempo também está disponível. Esta DDS modifica a massa inercial de cada partícula de forma que o intervalo de tempo crítico torna-se unitário. Pode ser usada para reduzir o número total de ciclos necessários. No entanto, pode ser usado somente na obtenção de soluções de regime permanente (final), onde não há aceleração de partículas. Assim, qualquer estado transiente não será calculado corretamente.

### 3.7 AMORTECIMENTO MECÂNICO

Com o objetivo de atingir a solução de regime permanente numa quantidade razoável de ciclos, o amortecimento é empregado para dissipar a energia por meio do atrito. No *PFC2D* existem três tipos de amortecimento: local, combinado e viscoso. Neste trabalho utilizou-se somente o amortecimento local, o qual será brevemente apresentado. Quanto aos outros dois tipos, o leitor interessado pode recorrer a Itasca (2004).

Para o amortecimento local, uma força de amortecimento é adicionada às equações de movimento:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{(i)} + F_{(i)}^d &= \mathcal{M}_{(i)} \mathcal{A}_{(i)}; \quad i = 1 \dots 3 \\ \mathcal{M}_{(i)} \mathcal{A}_{(i)} &= \begin{cases} m\ddot{x}_{(i)}, & \text{para } i = 1 \dots 2 \\ I\dot{\omega}_{(3)}, & \text{para } i = 3 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Onde  $\mathcal{F}_{(i)}$ ,  $\mathcal{M}_{(i)}$  e  $\mathcal{A}_{(i)}$  são os componentes de força generalizada, massa e aceleração, respectivamente;  $\mathcal{F}_{(i)}$  inclui a contribuição da força gravitacional; e  $F_{(i)}^d$  é a força de amortecimento:

$$\begin{aligned} F_{(i)}^d &= -\alpha_l |\mathcal{F}_{(i)}| \text{sign}(\mathcal{V}_{(i)}); \quad i = 1 \dots 3 \\ \text{sign}(y) &= \begin{cases} +1, & \text{se } y > 0; \\ -1, & \text{se } y < 0; \\ 0, & \text{se } y = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Onde  $\mathcal{V}_{(i)}$  é a velocidade generalizada dada por:

$$\mathcal{V}_{(i)} = \begin{cases} \dot{x}_{(i)}, & \text{para } i = 1 \dots 2 \\ \omega_{(3)}, & \text{para } i = 3 \end{cases} \quad (3.28)$$

Da Eq. 3.27 pode-se perceber que a magnitude da força de amortecimento é uma fração ( $\alpha$ , padrão = 0,7) da força resultante que atua na partícula. A direção da força de amortecimento é oposta àquela do movimento.

A força de amortecimento local amortece somente movimento acelerado e não movimento no regime permanente, onde a força resultante é nula. Outra vantagem do amortecimento local é a constante de amortecimento,  $\alpha$ , a qual é adimensional e então o amortecimento é independente da frequência.



### 3.8 MODELOS DE CONTATOS

O comportamento de um material no *PFC<sup>2D</sup>* é simulado associando-se modelos simples para os contatos entre as partículas. Este modelo de contato entre as partículas consiste em três partes: um modelo de rigidez, um modelo de deslizamento e um modelo de ligação. O modelo de rigidez fornece a relação elástica entre a força de contato e o deslocamento relativo. O modelo de deslizamento relaciona a força normal e de cisalhamento de forma que ocorra o escorregamento entre as partículas. Já o modelo de ligação estabelece um valor para a resistência da ligação entre as partículas, de forma a limitar as forças normais e de cisalhamento que podem ocorrer no contato.

#### 3.8.1 Modelos de rigidez

No *PFC<sup>2D</sup>* existem dois tipos de modelos de rigidez, o modelo linear e o modelo de Hertz. São descritos a seguir apenas os conceitos do modelo linear que foi o utilizado neste trabalho.

A rigidez do contato relaciona as forças de contato e os deslocamentos relativos na direção normal e cisalhante. A rigidez normal é dada por:

$$F_i^n = K^n U_i^n n_i \quad (3.29)$$

Onde  $K^n$  é uma rigidez secante, visto que relaciona a força normal total com o deslocamento normal total. Já a rigidez cisalhante é dada por:

$$\Delta F_i^S = -K^S \Delta U_i^S \quad (3.30)$$

Onde  $K^S$  é uma rigidez tangente, visto que relaciona o incremento de força normal com o incremento de deslocamento normal.

O modelo linear é definido por uma rigidez normal  $K^n$  e outra cisalhante  $K^S$ , o que faz com que exista uma relação linear entre a força e o deslocamento. A rigidez total no contato é calculada assumindo que as rigidezes das duas entidades em contato trabalham em série. A rigidez normal (secante) do contato é dada por:

$$K^n = \frac{K_n^{[A]} K_n^{[B]}}{K_n^{[A]} + K_n^{[B]}} \quad (3.31)$$

Já a rigidez cisalhante do contato (tangente) é dada por:

$$K^S = \frac{K_S^{[A]} K_S^{[B]}}{K_S^{[A]} + K_S^{[B]}} \quad (3.32)$$

Onde os sobrescritos [A] e [B] denotam as duas entidades em contato. Para o modelo linear, a rigidez normal secante,  $k^n$ , é igual à rigidez normal tangente, visto que:

$$k^n \equiv \frac{dF^n}{dU^n} = \frac{d(K^n U^n)}{dU^n} = K^n \quad (3.33)$$

Onde  $K^n$  é dado pela Eq. 3.31.

### 3.8.2 Modelo de deslizamento

O modelo de deslizamento é uma propriedade intrínseca das duas entidades em contato, o qual não proporciona resistência à tração e permite que o deslizamento ocorra. Para isso a força cisalhante é limitada. Este modelo está sempre ativo exceto se existir alguma ligação entre as entidades, caso em que o modelo de ligação prevalece sobre o modelo de deslizamento.

O modelo de deslizamento é definido por um coeficiente de atrito no contato  $\mu$ , o qual é admitido como sendo o menor coeficiente das duas entidades que estão em contato. O deslizamento é induzido por meio da limitação da máxima força cisalhante atuante no contato de acordo com:

$$F_{max}^S = \mu |F_i^n| \quad (3.34)$$

Se a força cisalhante  $|F_i^S|$ , calculada por meio do deslocamento e da rigidez cisalhante, exceder a força de cisalhamento máxima  $F_{max}^S$  o deslizamento pode ocorrer e a força cisalhante torna-se igual a  $F_{max}^S$ .

$$F_i^S \leftarrow F_i^S \left( \frac{F_{max}^S}{|F_i^S|} \right) \quad (3.35)$$

### 3.8.3 Modelos de ligação

O *PFC<sup>2D</sup>* permite que as partículas sejam ligadas em seus pontos de contato. Os modelos de ligação suportados pelo programa são: o modelo de ligação nos contatos (*contact bond model*) e o modelo de ligação paralela (*parallel bond model*). Ambos podem ser

idealizados como uma espécie de cola unindo as duas partículas. No modelo de ligação nos contatos a cola possui um tamanho extremamente pequeno, atuando apenas no ponto de contato. Já no modelo de ligação paralela a cola possui um tamanho finito, atuando em uma seção transversal circular ou retangular localizada entre as partículas. O modelo de ligação nos contatos pode transmitir apenas força, enquanto que o modelo de ligação paralela pode transmitir força e momento.

Os dois tipos de modelos de ligação podem estar ativados simultaneamente, entretanto sua presença inativa o modelo de deslizamento. Uma vez que a ligação é formada entre duas partículas, o contato continua a existir até que a ligação seja quebrada. As ligações podem ocorrer apenas entre as partículas e nunca entre uma partícula e uma parede.

O modelo de ligação no contato pode ser interpretado como um par de molas elásticas com rigidez normal e cisalhante constantes atuando no ponto de contato. Estas duas molas possuem determinadas resistências ao cisalhamento ( $F_C^S$ ) e à tração ( $F_C^n$ ), de forma que a força cisalhante é limitada a resistência ao cisalhamento e a força normal de tração é limitada a resistência à tração. As forças de tração são desenvolvidas quando não há a interpenetração entre as partículas ( $U^n < 0$ ), ou seja, quando o movimento relativo entre as partículas tende a afastá-las.

Se a magnitude da força normal de tração se igualar ou exceder a resistência normal, o contato se parte e ambas as forças de contato (normal e cisalhante) são definidas como nulas. Se a magnitude da força de contato cisalhante se igualar ou exceder a resistência ao cisalhamento, o contato se parte, entretanto ambas as forças de contato (normal e cisalhante) não são alteradas.

O comportamento do modelo de contato entre duas partículas pode ser visualizado na Figura 3.6, na qual  $F^n$  representa a força normal ( $F^n > 0$  indica tração),  $U^n$  o deslocamento relativo ( $U^n > 0$  indica interpenetração),  $F^S$  a força cisalhante e  $U^S$  o deslocamento cisalhante relativo medido com referência a localização do contato no momento em que o mesmo foi criado.

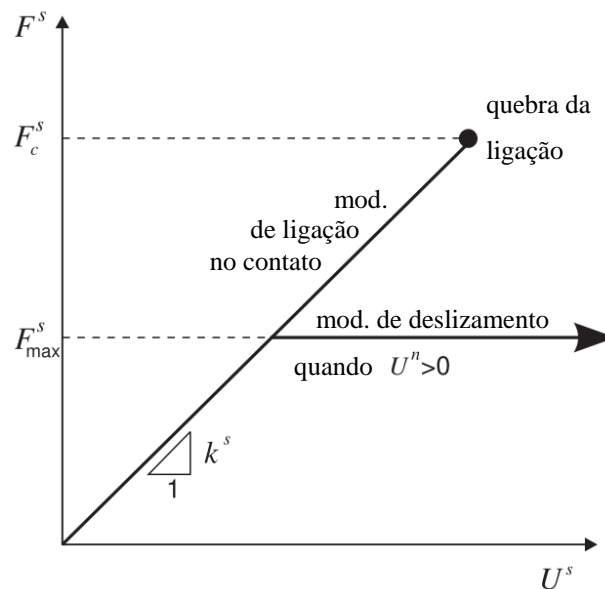
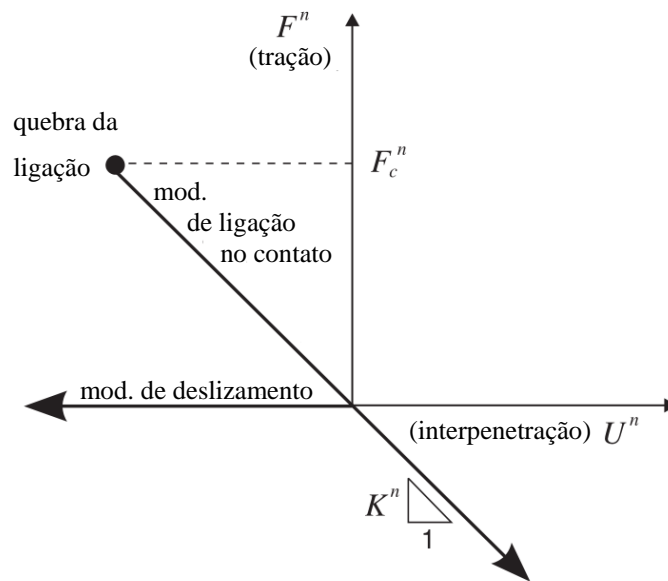


Figura 3.6 Comportamento do modelo de contato: (a) componente normal da força de contato; (b) componente cisalhante da força de contato (Itasca, 2004 - modificado);

O modelo de ligação paralela, por sua vez, descreve o comportamento de uma porção finita de um material cimentício depositado entre duas partículas, as quais podem ser tratadas como esferas ou cilindros de espessura determinada. Estas ligações estabelecem uma interação elástica entre as partículas, a qual age em “paralelo” com o modelo de deslizamento ou de ligação no contato descritos anteriormente. A ligação paralela pode transmitir tanto forças quanto momentos e sua existência não exclui a possibilidade de deslizamento.

O modelo de ligação paralela pode ser interpretado como um conjunto de molas elásticas, com rigidez normal e cisalhante constantes, uniformemente distribuídas na seção

transversal do material cimentício, a qual se encontra no plano de contato e centrada no ponto de contato entre as partículas. A Figura 3.7 mostra uma representação do modelo, com a força normal e cisalhante, e momento transmitido.

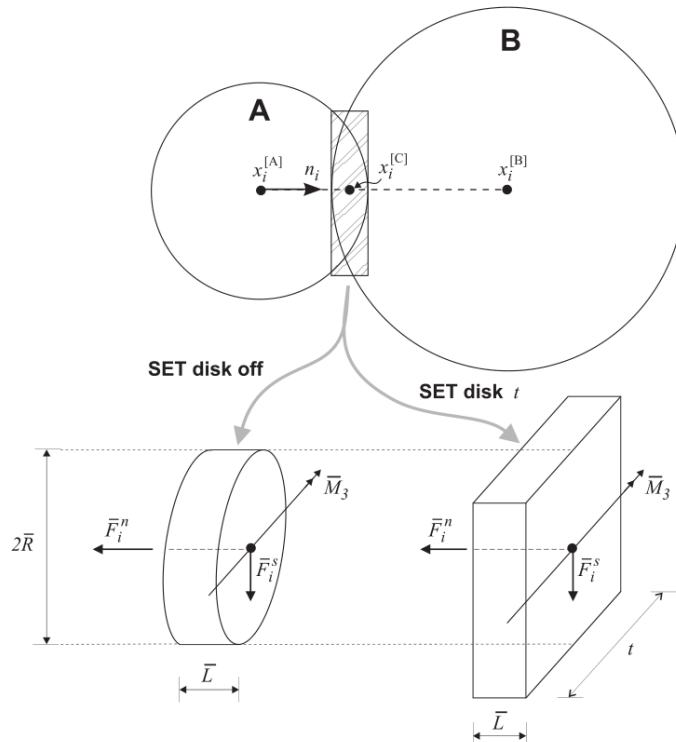


Figura 3.7 Representação do modelo de ligação paralela (Itasca, 2004).

O modelo de ligação paralela é especificado pela rigidez normal e cisalhante,  $\bar{k}^n$  e  $\bar{k}^s$ , resistência normal e cisalhante,  $\bar{\sigma}_c$  e  $\bar{\tau}_c$  (tensão), e pelo o raio do disco de ligação,  $\bar{R}$ . A força total,  $\bar{F}_i$ , e momento transmitido,  $\bar{M}_3$ , seguem a convenção de que a força e o momento representam a ação da ligação na partícula B (Figura 3.7). O vetor de força pode ser decomposto em um componente normal e outro cisalhante com respeito ao plano de contato como:

$$\bar{F}_i = \bar{F}_i^n + \bar{F}_i^s \quad (3.36)$$

Onde  $\bar{F}_i^n$  e  $\bar{F}_i^s$  denotam, respectivamente, os componentes normal e cisalhante do vetor de força. A componente normal do vetor de força pode ser expressa em termos do valor escalar  $\bar{F}^n$ , como:

$$\bar{F}_i^n = (\bar{F}_j n_j) n_i = \bar{F}^n n_i \quad (3.37)$$

A força e o momento total exercidos pelas conexões paralelas são determinados de forma incremental. Quando um contato é formado,  $\bar{F}_i$  e  $\bar{M}_3$  são inicialmente nulos. Então, qualquer movimento relativo ou incremento de rotação causarão o desenvolvimento de uma força ou momento incremental. As forças elásticas incrementais que ocorrem durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  podem ser calculadas como:

$$\begin{aligned}\Delta \bar{F}_i^n &= (-\bar{K}^n A \Delta U^n) n_i \\ \Delta \bar{F}_i^S &= -\bar{K}^S A \Delta U_i^S\end{aligned}\quad (3.38)$$

Onde  $\Delta U_i = V_i \Delta t$ ;  $V_i$  é calculado pela Eq. 3.7 e o incremento elástico de momento é dado por:

$$\Delta \bar{M}_3 = -\bar{K}^n I \Delta \theta_3 \quad (3.39)$$

Onde  $\Delta \theta_3 = (\omega_3^{[B]} - \omega_3^{[A]}) \Delta t$ .

A área,  $A$ , e a inércia,  $I$ , da seção transversal da ligação são dadas por:

$$A = \begin{cases} \pi \bar{R}^2, & (\text{part. como esferas}) \\ 2 \bar{R} t, & (\text{part. como cilindros com espessura } t) \end{cases} \quad (3.40)$$

$$I = \begin{cases} \frac{1}{4} \pi \bar{R}^4, & (\text{part. como esferas}) \\ \frac{2}{3} t \bar{R}^3, & (\text{part. como cilindros com espessura } t) \end{cases} \quad (3.41)$$

Os novos vetores de força e momento associados à conexão paralela são encontrados somando-se os valores existentes no início do passo de tempo aos vetores de força e momento incrementais. Os novos vetores de força são calculados como:

$$\begin{aligned}\bar{F}_i^n &\leftarrow \bar{F}_i^n + \Delta \bar{F}_i^n \\ \bar{F}_i^S &\leftarrow \bar{F}_i^S + \Delta \bar{F}_i^S\end{aligned}\quad (3.42)$$

E o novo vetor de momento é calculado por:

$$\bar{M}_3 \leftarrow \bar{M}_3 + \Delta \bar{M}_3 \quad (3.43)$$

As tensões máximas de tração e de cisalhamento, atuando na periferia da ligação, são calculadas da seguinte forma:

$$\sigma_{max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}_3|}{I} \bar{R} \quad (3.44)$$

$$\tau_{max} = \frac{|\bar{F}_i^S|}{A}$$

Caso a máxima tensão de tração ou cisalhante excedam as resistência normal e cisalhante da ligação, respectivamente, então a conexão paralela será rompida. No caso da ligação permanecer intacta, então a contribuição final dos vetores de força e momento na força e momento resultantes do sistema é:

$$\begin{aligned} F_i^{[A]} &\leftarrow F_i^{[A]} - \bar{F}_i \\ F_i^{[B]} &\leftarrow F_i^{[B]} + \bar{F}_i \\ M_3^{[A]} &\leftarrow M_3^{[A]} - e_{3jk} (x_j^{[C]} - x_j^{[A]}) \bar{F}_k - \bar{M}_3 \\ M_3^{[B]} &\leftarrow M_3^{[B]} + e_{3jk} (x_j^{[C]} - x_j^{[B]}) \bar{F}_k + \bar{M}_3 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Onde  $F_i^{[\Phi]}$  e  $M_3^{[\Phi]}$  são o somatório das forças e momento para a partícula  $\Phi$ , e  $\bar{F}_i$  é dado pela Eq. 3.36.

### 3.9 CLUMPS

Os *clumps* são uma forma de se criar grupos de partículas conectadas umas às outras que agem como um corpo rígido único. Os mesmos são utilizados para superar a limitação do código *PFC<sup>2D</sup>* de permitir apenas a geração de partículas circulares. Por meio dos *clumps*, podem ser criadas partículas com geometria arbitrária.

Os contatos internos ao *clump* são desconsiderados durante o ciclo de cálculo, resultando numa economia de tempo durante a simulação. No entanto, os contatos entre o *clump* e as partículas externas não são afetados. As partículas dentro de um *clump* podem se sobrepor e as forças de contato não serão geradas entre estas partículas, contudo qualquer força de contato que existir quando um *clump* for criado ou quando uma partícula for adicionada a ele, será preservada. Portanto, um *clump* atua como um corpo rígido (com fronteira deformável) que não se fragmenta com a atuação de forças sobre o mesmo.

## Capítulo 4

### Metodologia

Conforme mencionado no Capítulo 3, a modelagem pelo MED, no presente estudo, se deu por meio do código comercial *Particle Flow Code in Two Dimensions (PFC<sup>2D</sup>)*, o qual não possui uma interface gráfica completa, sendo que toda a modelagem deve ser realizada por meio de *scripts* contendo os comandos e as funções implementadas no programa. A fim de se propiciar uma versatilidade maior ao programa, novas funções podem ser criadas (e as existentes alteradas) por meio de uma linguagem de programação própria denominada *FISH*, que por sua vez, foi extensivamente utilizada nas simulações realizadas.

Os conceitos e principais formulações matemáticas utilizadas no programa *PFC<sup>2D</sup>* também foram abordados no capítulo anterior. Neste capítulo é mostrado então, como estes conceitos foram utilizados para se avaliar a interação solo-geogrelha, ou seja, são apresentadas as metodologias utilizadas na modelagem dos ensaios biaxiais, de cisalhamento direto e de arrancamento.

Nas simulações realizadas procurou-se seguir os passos recomendados por Itasca (2004), os quais são:

- Passo 1: Definir os objetivos da modelagem numérica;
- Passo 2: Criar um esquema conceitual do sistema físico;
- Passo 3: Construir e rodar modelos ideais simples;
- Passo 4: Reunir os dados específicos do problema;
- Passo 5: Preparar uma série de modelos detalhados;
- Passo 6: Rodar os modelos detalhados;
- Passo 7: Exportar os resultados para a interpretação.

A fim de realizar as diversas simulações pretendidas, três etapas foram realizadas: a avaliação dos recursos computacionais, as análises paramétricas e a simulação dos ensaios de arrancamento. Todos os códigos produzidos nessas etapas são apresentados nos apêndices.



#### 4.1 AVALIAÇÃO DOS RECURSOS COMPUTACIONAIS

Inicialmente foi almejado realizar uma análise em três dimensões do fenômeno estudado, visto que suas características seriam melhores representadas por uma análise deste tipo. Foi realizada então, uma análise da demanda computacional para a investigação em questão, conforme recomendado por Itasca (2004). Neste teste são obtidos o tempo necessário e a memória RAM alocada para se executar 1000 ciclos de cálculo para um determinado número de partículas. Os resultados foram plotados nos gráficos mostrados Figura 4.1 e na Figura 4.2 e o código utilizado se encontra no Apêndice A.

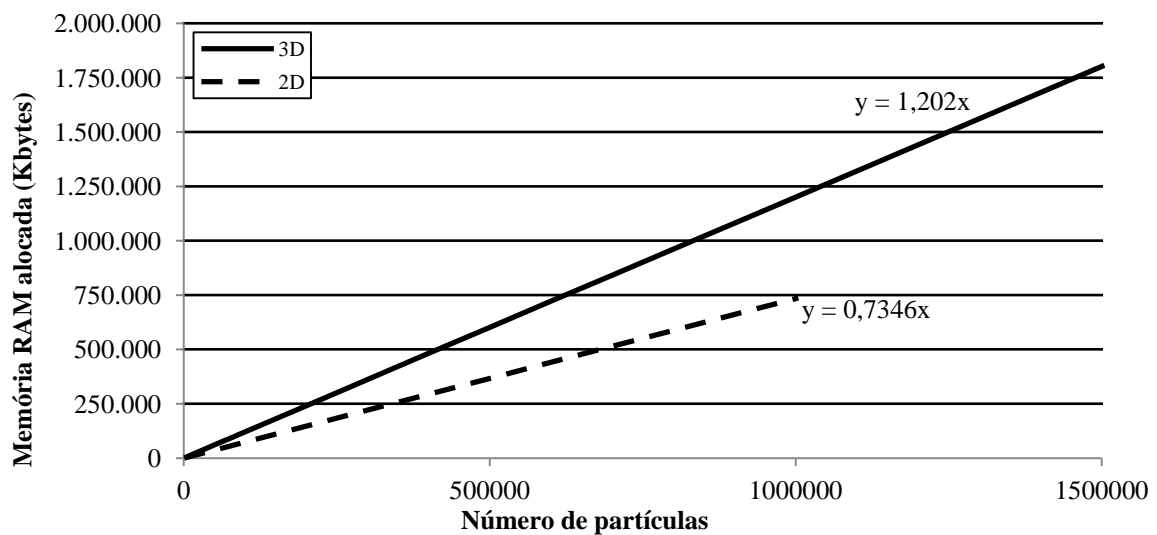


Figura 4.1 Relação entre o número de partículas e memória RAM demandada

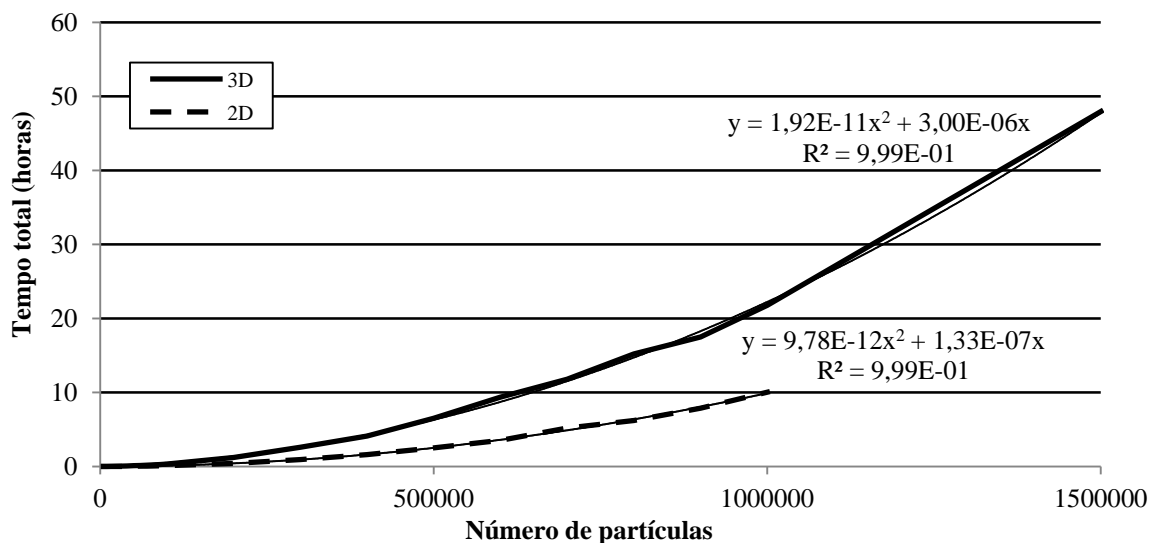


Figura 4.2 Relação entre tempo demandado e número de partículas geradas na análise

Na Figura 4.1, é possível observar que a quantidade de memória RAM requerida é linearmente proporcional à quantidade de partículas geradas, já na Figura 4.2 percebe-se que o

tempo necessário para se realizar 1000 ciclos de cálculo é proporcional à quantidade de partículas geradas, entretanto sua variação é ajustada por um polinômio de 2º grau.

O recurso computacional disponível para a pesquisa foi um computador pessoal composto por um processador Intel Core i7 980X de 12 núcleos, 4 Gb de Memória RAM DDR-3 1333 Mhz e um disco rígido com 1 Tb de capacidade de armazenamento. Os outros componentes são compatíveis com a configuração apresentada. No início da pesquisa, data de aquisição do computador apresentado, esta configuração era a melhor possível de ser adquirida em termos de computadores pessoais.

A memória RAM foi limitada a 4 Gb em função do software utilizado. Este software, denominado *PFC<sup>2D</sup>*, em sua versão 3.1 possui uma arquitetura de 32 bits, na qual é possível se utilizar no máximo 3,33 Gb de RAM. Como cerca de 1,0 Gb é utilizado pelo sistema operacional, apenas 2,0 Gb ficam livres para o uso do programa. Tem-se então que, de acordo com o teste de memória realizado, apresentado na Figura 4.1, as análises estariam limitadas a uma quantidade máxima de aproximadamente 1.660.000 partículas para análises em 3 dimensões e 2.720.000 partículas para análises em 2 dimensões.

Outro fator importante é o tempo necessário para as análises, o qual deve estar dentro de um limite que possibilite a realização de toda a campanha de simulações no prazo estabelecido. Para se estimar o tempo demandado nas análises, a principal variável é a quantidade de partículas necessárias na simulação do fenômeno. Esta quantidade pode ser aproximada pelas Eqs. 4.1 e 4.2, nas quais o número,  $N$ , de partículas de uma determinada amostra é calculado em função do volume,  $V$ , da amostra, da porosidade requerida,  $n$ , e do raio médio,  $\bar{R}$ , das partículas que compõem a amostra:

$$N_{3D} = \frac{3V(1 - n)}{4\pi\bar{R}^3} \quad (4.1)$$

$$N_{2D} = \frac{A(1 - n)}{\pi\bar{R}^2} \quad (4.2)$$

Os resultados de Palmeira (1987) foram obtidos em ensaios com uma areia comumente utilizada em pesquisas no Reino Unido, a areia de Leighton Buzzard. Os ensaios de cisalhamento direto e arrancamento realizados por aquele autor foram executados com a referida areia em três caixas de ensaio com diferentes dimensões. As características das areias e das caixas de ensaio utilizadas são mostradas na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 respectivamente.

Tabela 4.1 Características da areia utilizada por Palmeira (1987)

Propriedades	Areia de Leighton Buzzard		
	25/52	14/25	7/14
Raio mínimo dos grãos [mm]	0,10	0,30	0,59
Raio máximo dos grãos [mm]	0,30	0,59	1,00

Tabela 4.2 Características das caixas de ensaio utilizadas por Palmeira (1987)

Propriedades	Caixa de Ensaio		
	Pequena	Média	Grande
Altura [cm]	3,1	15,2	100,0
Largura [cm]	6,0	25,3	100,0
Profundidade [cm]	6,0	15,2	100,0

Com base nas características da areia de Leighton Buzzard e nas Eqs. 4.1 e 4.2 pôde-se então calcular um valor aproximado da quantidade de partículas necessárias para se gerar uma amostra densa para as caixas de ensaio pequena, média e grande. A amostra pode ser considerada densa, pois se utilizou valores mínimos para a porosidade, ou seja, 0,15 para 2D e 0,3 para 3D, conforme recomendado por Itasca (2004).

O tempo e a memória RAM demandada para cada caso foram então calculados por meio das regressões obtidas na Figura 4.1 e na Figura 4.2. Estes valores foram calculados tanto para duas, quanto para três dimensões e os resultados são apresentados na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 Recursos computacionais e tempo demandado previsto para as análises em 3D

Caixa de Ensaio \ Areia de Leighton Buzzard	25/52 (fina)	14/25 (média)	7/14 (grossa)
Pequena	2.331.222 partículas	211.638 partículas	37.117 partículas
	2,8 Gb	254,4 Mb	44,6 Mb
	2,9 dias	43 minutos	3 minutos
Média	122.103.227 partículas	11.085.036 partículas	1.944.087 partículas
	146,8 Gb	13,3 Gb	2,3 Gb
	21 anos	63 dias	2 dias

Tabela 4.4 Recursos computacionais e tempo demandado previsto para as análises em 2D

<b>Caixa de Ensaio</b>	<b>Areia de Leighton Buzzard</b>	<b>25/52 (fina)</b>	<b>14/25 (média)</b>	<b>7/14 (grossa)</b>
<b>Pequena</b>		12.581 partículas	2.541 partículas	796 partículas
		9,2 Mb	1.9 Mb	0,6 Mb
		13 segundos	2 segundos	0,6 segundo
<b>Média</b>		260.120 partículas	52.543 partículas	16.463 partículas
		191,0 Mb	38,6 Mb	12,1 Mb
		28 minutos	2 minutos	19 segundos
<b>Grande</b>		6.764.085 partículas	1.366.309 partículas	428.090 partículas
		5,0 Gb	1,0 Gb	314,5 Mb
		11 dias	11,4 horas	1,2 horas

Os valores mostrados na Tabela 4.3 evidenciam que, para as análises em três dimensões, apenas amostras na caixa de ensaio pequena poderiam ser simuladas e somente com as areias média e grossa, pois a quantidade demandada de memória RAM para as outras análises é maior do que a disponível. Os valores para a caixa grande não foram apresentados, pois são extremamente altos, portanto, impraticáveis. Tem-se também que no trabalho de Palmeira (1987), a caixa de ensaios pequena foi utilizada apenas para a realização de ensaios de cisalhamento direto, os ensaios de arrancamento foram executados nas caixas média e grande. Portanto, optou-se pela simulação do fenômeno em duas dimensões, apesar das limitações apresentadas por esse tipo de análise, visto que a demanda computacional das análises em três dimensões é maior do que os recursos disponíveis.

Para as análises em duas dimensões só não é possível simular a amostra na caixa de ensaio grande utilizando a areia fina. As outras análises são exequíveis, entretanto para amostras com grande quantidade de partículas o tempo de simulação também é maior.

## 4.2 ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Nas simulações pelo MED diversos fatores influenciam o comportamento da amostra e conseqüentemente o fenômeno estudado. Dentre os principais estão os parâmetros micromecânicos e a velocidade de carregamento. Conforme mencionado por Itasca (2004), apesar da existência de valores base e algumas fórmulas teóricas para casos mais simples, os parâmetros micromecânicos são melhores definidos por tentativa e erro, por meio da simulação de ensaios simples como um ensaio biaxial. Ao longo do processo de tentativa e

erro os resultados simulados devem ser constantemente comparados com resultados de ensaios reais.

Para o presente trabalho os ensaios biaxiais foram simulados logo no início da pesquisa, devido a sua facilidade de simulação e pelo fato de estarem bem documentados no manual do programa. Assim, foram utilizados no processo de familiarização com a linguagem de programação *FISH*, embutida no *PFC<sup>2D</sup>*.

Também foram simulados ensaios de cisalhamento direto, sendo que os resultados obtidos pelas simulações foram comparados com os obtidos por Palmeira (1987), de forma a se determinar os parâmetros micromecânicos e a velocidade de carregamento adequada.

#### 4.2.1 Simulação de ensaios biaxiais

Na simulação dos ensaios biaxiais, por meio do MED, uma amostra retangular densa foi gerada a partir de partículas cilíndricas com espessura unitária, as quais foram confinadas por fronteiras denominadas paredes. A aplicação das tensões confinantes e de desvio foi realizada por um servomecanismo, por meio do qual velocidades controladas são impostas às paredes de forma a se obter as tensões requeridas. As tensões, por sua vez, foram calculadas por meio da relação  $F_p/A_p$ , onde  $F_p$  é o somatório das forças de contato atuantes na parede e  $A_p$  é área da parede. Todos os códigos gerados para a realização das simulações dos ensaios biaxiais estão apresentados no Apêndice B.

O modelo geométrico elaborado para as simulações do ensaio biaxial que consiste em quatro paredes ortogonais entre si é apresentado na Figura 4.3 (a). Neste modelo percebe-se que as paredes se estendem após a intersecção com as paredes adjacentes permitindo o movimento relativo entre as mesmas sem que ocorra o desconfinamento da amostra. A intersecção entre as paredes não constitui um problema de modelagem, visto que no *PFC<sup>2D</sup>* as paredes interagem apenas com as partículas e não com outras paredes.

Definidas as condições de fronteira, as partículas devem ser geradas de forma a se obter uma amostra granular com a porosidade e distribuição de grãos requerida. O'Sullivan (2011) apresenta os principais métodos desenvolvidos para a geração de amostras irregulares, sendo que o método da expansão de raios (*Radius Expansion method*) consiste em um método simples e que é bastante utilizado na geração de amostras granulares densas com granulometria uniforme. Este é o método de geração de partículas implementado no *PFC<sup>2D</sup>* e utilizado nas simulações realizadas no presente estudo. Foram então desenvolvidas algumas

formulações matemáticas para se entender o processo de geração de partículas, as quais são apresentadas a seguir.

Tem-se que a porosidade é definida por:

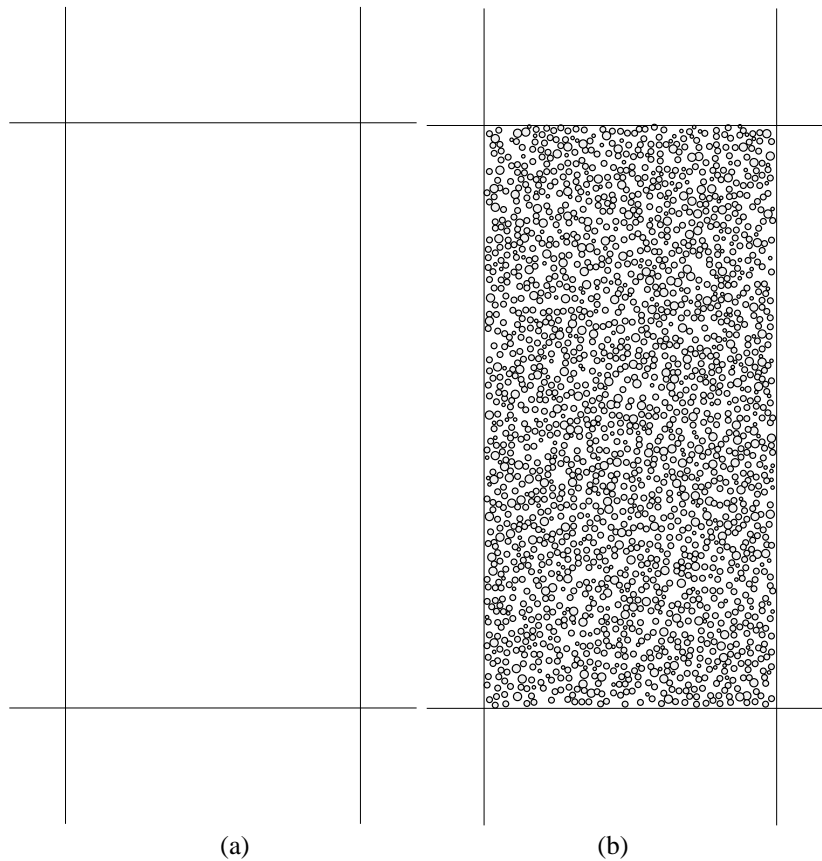
$$n = 1 - \frac{A_p}{A} \quad (4.3)$$

Onde  $A_p$  representa a área de todas as partículas e  $A$  a área total da amostra. Logo:

$$nA = A - \sum_{i=1}^{N_p} \pi R_i^2 \quad (4.4)$$

$$\therefore \sum_{i=1}^{N_p} R_i^2 = \frac{A(1 - n)}{\pi} \quad (4.5)$$

Onde  $N_p$  é o número de partículas da amostra.



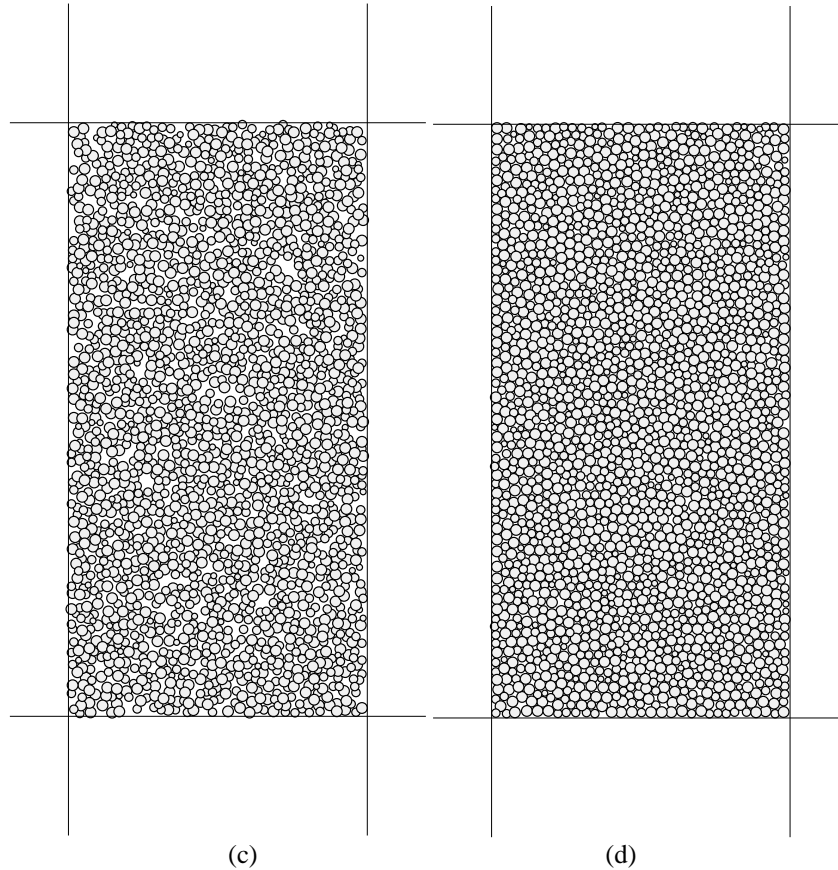


Figura 4.3 Geração de amostras, para o ensaio biaxial, pelo método da expansão de raios: (a) Condições de fronteira; (b) Geração de partículas com raio reduzido; (c) Expansão dos raios; (d) Amostra em equilíbrio.

Considerando que:

$$\sum_{i=1}^{N_P} R_i^2 \cong N \bar{R}^2 \quad (4.6)$$

Onde  $\bar{R}$  é o raio médio das partículas e  $N$  é o número total de partículas.

Substituindo a Eq. 4.6 na Eq. 4.5 tem-se que:

$$N \bar{R}^2 = \frac{A(1-n)}{\pi} \quad (4.7)$$

$$\therefore N = \frac{A(1-n)}{\pi \bar{R}^2} \quad (4.8)$$

Voltando à Eq. 4.5 e chamando  $n_0$  e  $R_0$  de porosidade e raio inicial respectivamente, tem-se que:

$$\frac{\sum R^2}{\sum R_0^2} = \frac{(1-n)}{(1-n_0)} \quad (4.9)$$

Sendo  $m$  o fator pelo qual os raios de todas as partículas devem ser multiplicados para que se modifique a porosidade de  $n_0$  para  $n$  e utilizando o mesmo fator  $m$  para todas as partículas, então:

$$R = mR_0 \Rightarrow \frac{\sum m^2 R_0^2}{\sum R_0^2} = \frac{(1 - n)}{(1 - n_0)} \quad (4.10)$$

$$\therefore m = \sqrt{\frac{1 - n}{1 - n_0}} \quad (4.11)$$

As etapas principais do processo de geração de amostras, por meio do método da expansão dos raios, estão sumariadas a seguir e podem ser visualizadas na Figura 4.3 (b)-(d).

- a) O número aproximado de partículas,  $N$ , necessárias para se gerar a amostra na porosidade requerida é calculado por meio da Eq. 4.8;
- b) O número de partículas determinado anteriormente é criado dentro da área delimitada pelas fronteiras (paredes), contudo os raios destas partículas são divididos por um fator  $m$  arbitrário de forma a se criar partículas menores do que as desejadas;
- c) Em seguida, a porosidade inicial,  $n_0$ , é calculada por meio da Eq. 4.3 e o fator  $m$  é obtido por meio da Eq. 4.11. Então, os raios das partículas geradas são multiplicados pelo fator  $m$  de forma a se obter a porosidade,  $n$ , requerida;
- d) Após a expansão dos raios a amostra é submetida a ciclos de cálculo até que se atinja um estado isotrópico de tensões;
- e) A porosidade é calculada novamente e é verificado se foi atingido o valor requerido.

Estando a amostra gerada e seu estado de equilíbrio estático verificado, as tensões de confinamento e desviadora devem ser aplicadas. Contudo, a verificação do estado de tensões em que a amostra se encontra nas simulações pelo MED não é realizada de forma direta, assim como a aplicação de tensões. No modelo gerado é possível se obter diretamente apenas algumas variáveis, como por exemplo, as forças de contato (tanto para o contato partícula-partícula quanto para o contato partícula-parede) e a força resultante atuando na parede. Logo, as tensões foram obtidas dividindo-se o somatório das forças de contato atuantes na parede,  $\sum_{N_C} F^{(w)}$ , pela área da parede,  $A^{(w)}$ , conforme mostrado na Eq. 4.12:



$$\sigma^{(w)} = \frac{\sum_{N_c} F^{(w)}}{A^{(w)}} \quad (4.12)$$

Em um modelo de elementos discretos também não é possível se prescrever um estado de tensões inicial à amostra de forma direta, para isso é utilizado um sistema de servocontrole. Às paredes pode se impor apenas velocidades, entretanto caso se aplique estas velocidades no sentido de confinar a amostra pode-se aumentar o valor das tensões normais atuantes na amostra, ou vice-versa. Neste sentido atua o sistema de servocontrole, no qual a velocidade da parede é definida de modo a satisfazer a Eq. 4.13:

$$\dot{u}^{(w)} = G(\sigma^{(w)} - \sigma^{(r)}) = G\Delta\sigma \quad (4.13)$$

Onde  $G$  é o parâmetro denominado “ganho”, o qual é definido como se segue. Tem-se então que o incremento de força máximo devido ao movimento da parede em um passo de tempo é:

$$\Delta F^{(w)} = K_n \dot{u}^{(w)} \Delta t \quad (4.14)$$

Onde  $K_n$  é a soma da rigidez normal de todos os contatos existentes com a parede e  $\Delta t$  é o passo de tempo. Logo, o incremento de tensão na parede é de:

$$\Delta\sigma^{(w)} = \frac{K_n \dot{u}^{(w)} \Delta t}{A^{(w)}} \quad (4.15)$$

Para manter a estabilidade da amostra o valor absoluto do incremento de tensão em um passo de tempo deve ser menor do que o valor absoluto da diferença entre a tensão medida (atual) e a requerida. Tal medida previne a ocorrência de alterações bruscas na tensão, o que causaria instabilidades no modelo e faz com que a tensão requerida seja obtida de maneira suave (Kuhn, 2006). Foi utilizado então, um fator de relaxação  $\alpha$  (definido como 0,5 por padrão), de forma que a condição de estabilidade seja:

$$|\Delta\sigma^{(w)}| < \alpha |\Delta\sigma| \quad (4.16)$$

Substituindo a Eqs. 4.13 e 4.15 na Eq. 4.16, tem-se que:

$$\frac{K_n G |\Delta\sigma| \Delta t}{A^{(w)}} < \alpha |\Delta\sigma| \quad (4.17)$$

$$\therefore G \leq \frac{\alpha A^{(w)}}{K_n \Delta t} \quad (4.18)$$

A velocidade da parede e o ganho são então definidos de forma a satisfazerem as Eqs. 4.13 e 4.18, respectivamente. O sistema de servocontrole permite que velocidades diferentes

sejam prescritas para as paredes nas direções  $x$  e  $y$ , o que possibilita a obtenção de valores distintos para  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ .

Atingida a tensão confinante requerida, Kuhn (2006) recomenda que todas as paredes sejam fixadas e a amostra seja submetida a ciclos de cálculo para se garantir que a tensão confinante seja obtida de forma isotrópica. Este intervalo de tempo é chamado de período de dormência (*period of quiescence*). Neste período são verificadas novamente as propriedades como a porosidade e o estado de tensões, contudo estas propriedades foram verificadas mediante a utilização dos círculos de medição. Esta ferramenta presente no programa possibilita a determinação de áreas circulares arbitrárias, dentro das quais são medidas informações da amostra como a porosidade e o estado de tensões, dentre outras.

Sendo possível gerar a amostra na porosidade inicial almejada e aplicar tensões confinantes e desviadoras, o procedimento de ensaio utilizado nas simulações foi similar ao procedimento utilizado no ensaio real. Inicialmente gerou-se a amostra na porosidade requerida, logo após aplicou-se a tensão confinante e em seguida a tensão desviadora foi aumentada até que se atingiu uma deformação axial de, no mínimo, 10%. Antes da simulação do ensaio biaxial propriamente dito, foram realizados testes nos quais se verificou a influência dos parâmetros micromecânicos e da velocidade de carregamento no comportamento da amostra.

Em todas as simulações realizadas foi utilizado como modelo de contato o modelo de deslizamento (*Slip Contact Model*), visto que não foi utilizado nenhum modelo de ligação entre as partículas. Os parâmetros micromecânicos requeridos pelo modelo consistem na rigidez do contato entre as partículas (rigidez normal  $K_n$  e cisalhante  $K_s$ ) e no coeficiente de atrito ( $\phi_\mu$ ) entre as mesmas. Como valores iniciais para os parâmetros micromecânicos foram adotados os valores utilizados por Neves (2009), que analisou o comportamento de solos granulares pelo MED. Foram utilizados, entretanto, valores iguais para a rigidez normal e cisalhante no contato, tendo em vista que valores diferentes para estes parâmetros não influenciaram significativamente o comportamento da amostra, conforme mostrado por Zhang *et al.* (2007).

No ciclo de cálculo do MED um passo de tempo crítico é calculado de forma a se garantir a estabilidade do esquema numérico, entretanto os valores do passo de tempo são da ordem de  $10^{-6}$  segundos, o que faz com que sejam necessários  $10^6$  ciclos para que se simule 1 segundo no modelo. Considerando então os valores apresentados na Tabela 4.4, os quais são referentes a 1000 ciclos de cálculo, tem-se que o tempo necessário para rodar as simulações,

utilizando-se velocidades reais de carregamento, seria demasiadamente grande. Logo, outra recomendação proposta por Zhang *et al.* (2007) é a de se rodar diversas simulações com diferentes velocidades de carregamento a fim de se obter um valor para velocidade que garanta uma tensão confinante estável e um tempo de simulação aceitável.

Realizou-se então, inicialmente, a simulação dos ensaios biaxiais com valores para os parâmetros micro-mecânicos adotados por Neves (2009) e para diferentes velocidades de carregamento, a fim de se encontrar o valor ideal para este parâmetro. Os parâmetros adotados no teste da velocidade estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Parâmetros utilizados no teste da velocidade – ensaio biaxial.

<b>Kn (N/m)</b>	<b>Ks (N/m)</b>	<b>Kn parede (N/m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\tan \phi</math></b>	<b><math>\sigma_3</math> (kPa)</b>	<b>Vel. Cis. (m/s)</b>
						v1 = 0,001
						v2 = 0,01
5,00·10 <sup>8</sup>	5,00·10 <sup>8</sup>	5,00·10 <sup>7</sup>	2700,00	0,50	1000,0	v3 = 0,1
						v4 = 0,4
						v5 = 1,0

Uma vez definida a velocidade da simulação, foi analisada a influência da rigidez no comportamento da amostra. Conforme mencionado anteriormente, foi utilizado o mesmo valor para a rigidez normal e cisalhante no contato. Foram simulados ensaios para quatro valores diferentes para a rigidez do contato, conforme apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Parâmetros utilizados no teste da rigidez – ensaio biaxial.

<b>Kn (N/m)</b>	<b>Ks (N/m)</b>	<b>Kn parede (N/m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\tan \phi</math></b>	<b><math>\sigma_3</math> (kPa)</b>	<b>Vel. Cis. (m/s)</b>
kn 1 = 1,00·10 <sup>8</sup>	ks 1 = 1,00·10 <sup>8</sup>	1,00·10 <sup>8</sup>				
kn 2 = 5,00·10 <sup>8</sup>	ks 2 = 5,00·10 <sup>8</sup>	5,00·10 <sup>8</sup>				
kn 3 = 1,00·10 <sup>9</sup>	ks 3 = 1,00·10 <sup>9</sup>	1,00·10 <sup>9</sup>	2700,00	0,50	1000,0	0,01
kn 4 = 1,00·10 <sup>10</sup>	ks 4 = 1,00·10 <sup>10</sup>	1,00·10 <sup>10</sup>				

Definidos os valores da velocidade de carregamento e da rigidez no contato procedeu-se a análise da influência do coeficiente de atrito entre os grãos ( $\phi_\mu$ ) no comportamento macroscópico da amostra, ou seja, foi verificada a influência do coeficiente de atrito nos parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) da amostra. Para isso, foram realizadas três simulações completas de ensaios biaxiais, uma para cada coeficiente de atrito. Os parâmetros adotados nas simulações são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Parâmetros utilizados na simulação do ensaio biaxial.

<b>Kn (N/m)</b>	<b>Ks (N/m)</b>	<b>Kn parede (N/m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\tan \varphi_{\mu}</math></b>	<b><math>\sigma_3</math> (kPa)</b>	<b>Vel. Cis. (m/s)</b>
					50kPa	
$1,00 \cdot 10^9$	$1,00 \cdot 10^9$	$1,00 \cdot 10^8$	2660,00	0,00	100kPa	0,01
				0,36	200kPa	
				0,50	400kPa	

As tensões de confinamento adotadas foram escolhidas em função dos valores utilizados por Palmeira (1987) em seus ensaios. Já os valores para o coeficiente de atrito foram escolhidos de forma a se contemplar todo o escopo de valores fisicamente aceitáveis para este parâmetro. Adotou-se então um valor mínimo ( $\varphi_{\mu} = 0^{\circ}$ ), um valor médio ( $\varphi_{\mu} = 20^{\circ}$ ) e um valor máximo ( $\varphi_{\mu} = 27^{\circ}$ ). O ângulo de atrito interno de  $20^{\circ}$  foi escolhido por representar o valor real medido para o atrito entre os grãos da areia de Leighton Buzzard, conforme verificado por Cavarretta (2009).

#### 4.2.2 Simulação de ensaios de cisalhamento direto

Uma vez simulados os ensaios biaxiais foram realizadas as simulações dos ensaios de cisalhamento direto que consistiram na geração de uma caixa de cisalhamento direto composta por duas partes, uma superior e outra inferior, sendo cada uma gerada por meio de quatro paredes finitas. A caixa de cisalhamento possui dimensões de 5 cm de altura por 5 cm de largura e é apresentada na Figura 4.4(a).

A amostra foi gerada no interior da caixa de cisalhamento, a qual permaneceu fixa até o início da fase de cisalhamento. A geração das partículas se deu por meio do método da expansão dos raios, o mesmo utilizado nos ensaios biaxiais e abordado na seção anterior. Foram geradas partículas com um diâmetro mínimo e máximo de 1,18 mm e 2,00 mm, respectivamente, e o processo de geração das mesmas é apresentado na Figura 4.4(b)-(d).

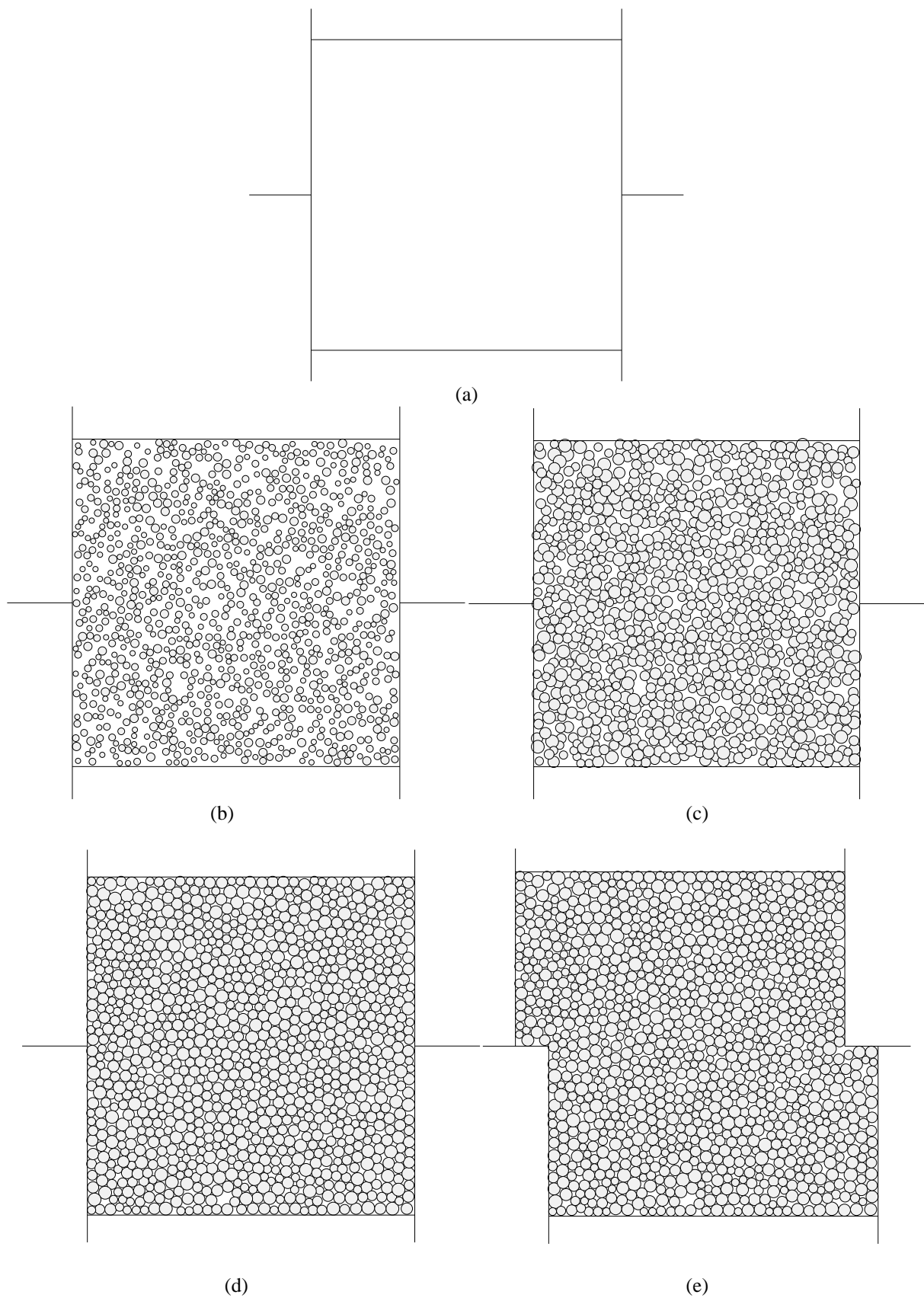


Figura 4.4 Geração de amostras para o ensaio de cisalhamento direto: (a) Condições de fronteira; (b) Geração de partículas com raio reduzido; (c) Expansão dos raios; (d) Amostra em equilíbrio; (e) Amostra cisalhada.

A tensão vertical ( $\sigma_v$ ) foi obtida por meio do servomecanismo descrito na seção anterior. Durante a fase de confinamento do ensaio de cisalhamento direto este mecanismo foi ativado nas paredes superior e inferior da caixa de cisalhamento. Obtida a tensão vertical desejada, a parte inferior da caixa de cisalhamento foi submetida a uma determinada velocidade de cisalhamento e o acréscimo de força horizontal médio nas paredes foi registrado.

Durante a fase de cisalhamento, o servomecanismo foi ativado apenas na parede superior da caixa de cisalhamento. Tal medida foi adotada de forma a permitir a obtenção dos deslocamentos verticais da parede superior (que também aplica a tensão vertical) e possibilitar a visualização de fenômenos como a dilatação. Já os deslocamentos horizontais foram obtidos a partir da parede vertical inferior da caixa de cisalhamento. Na Figura 4.4(e) é apresentada a visualização de uma simulação concluída.

As análises paramétricas da velocidade, rigidez e ângulo de atrito interno entre as partículas também foram realizadas para o ensaio de cisalhamento direto, sendo estas feitas com o intuito de verificar se o comportamento apresentado nas simulações dos ensaios biaxiais se confirma nas simulações dos ensaios de cisalhamento direto. Entretanto, utilizaram-se nas simulações dos ensaios de cisalhamento direto os parâmetros geométricos característicos da areia de Leighton Buzzard. Tem-se então, que os parâmetros utilizados na análise da velocidade são apresentados na Tabela 4.8 e os utilizados na análise da rigidez são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 Parâmetros utilizados no teste da velocidade – ensaio de cisalhamento direto.

<b>Kn (N/m)</b>	<b>Ks (N/m)</b>	<b>Kn parede (N/m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\tan \phi</math></b>	<b><math>\sigma_v</math> (kPa)</b>	<b>Vel. Cis. (m/s)</b>
1,00·10 <sup>8</sup>	1,00·10 <sup>8</sup>	1,00·10 <sup>8</sup>	2660,00	0,36	100,0	v1 = 0,001
						v2 = 0,005
						v3 = 0,01
						v4 = 0,1
						v5 = 0,5

Tabela 4.9 Parâmetros utilizados no teste da rigidez – ensaio de cisalhamento direto.

<b>Kn (N/m)</b>	<b>Ks (N/m)</b>	<b>Kn parede (N/m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\tan \phi</math></b>	<b><math>\sigma_v</math> (kPa)</b>	<b>Vel. Cis. (m/s)</b>
kn1 = 1,00·10 <sup>7</sup>	ks 1 = 1,00·10 <sup>7</sup>	1,00·10 <sup>7</sup>	2660,00	0,36	100,0	0,01
kn 2 = 1,00·10 <sup>8</sup>	ks 2 = 1,00·10 <sup>8</sup>	1,00·10 <sup>8</sup>				
kn 3 = 1,00·10 <sup>9</sup>	ks 3 = 1,00·10 <sup>9</sup>	1,00·10 <sup>9</sup>				
kn 4 = 1,00·10 <sup>10</sup>	ks 4 = 1,00·10 <sup>10</sup>	1,00·10 <sup>10</sup>				
kn 5 = 1,00·10 <sup>11</sup>	kn 5 = 1,00·10 <sup>11</sup>	1,00·10 <sup>11</sup>				

Definida então a velocidade e a rigidez do contato, foram realizadas simulações a fim de se verificar a relação entre o ângulo de atrito microscópico e o ângulo de atrito macroscópico. Para isso foram simulados três ensaios de cisalhamento direto com três valores distintos para o ângulo de atrito microscópico e as tensões verticais foram iguais às tensões confinantes adotadas nos ensaios biaxiais. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 4.10 e os códigos gerados para as simulações dos ensaios de cisalhamento direto encontram-se no Apêndice C.

Tabela 4.10 Parâmetros utilizados na simulação do ensaio de cisalhamento.

<b>Kn (N/m)</b>	<b>Ks (N/m)</b>	<b>Kn parede (N/m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>tan <math>\phi\mu</math></b>	<b><math>\sigma_v</math> (kPa)</b>	<b>Vel. Cis. (m/s)</b>
					50kPa	
				0,00	100kPa	
1,00·10 <sup>8</sup>	1,00·10 <sup>8</sup>	1,00·10 <sup>8</sup>	2660,00	0,36	200kPa	0,01
				0,45	400kPa	

### 4.3 SIMULAÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Inicialmente foram realizadas simulações de ensaios de arrancamento em uma única barra, as quais foram realizadas de forma a possibilitar a análise de fatores como: a influência do tamanho da caixa de ensaio; a influência da massa específica, rigidez e coeficiente de atrito da barra transversal e a influência do atrito nas paredes da caixa de ensaio. Para estas análises foram realizados ensaios de arrancamento em uma barra transversal única, de forma a se eliminar o efeito da interferência entre as barras transversais, o que adicionaria uma maior complexidade às análises.

As simulações se deram por meio dos mesmos mecanismos utilizados nas simulações dos ensaios biaxiais e de cisalhamento direto. O modelo geométrico do ensaio de arrancamento consistiu em quatro paredes finitas, sendo que as paredes verticais permaneceram fixas durante o ensaio e nas paredes horizontais foi ativado o servomecanismo para se aplicar as tensões verticais requeridas (Figura 4.5-(a)). No centro da caixa foi posicionado o elemento de reforço e em seguida a amostra foi gerada por meio do método da expansão dos raios, conforme apresentado na Figura 4.5-(b)-(d). Para se atingir a tensão vertical requerida o servomecanismo foi ativado nas duas paredes horizontais, de forma a evitar o surgimento de um gradiente de tensão na amostra. Atingida a tensão vertical requerida, as paredes foram fixadas (servomecanismo desativado) e a amostra foi submetida a inúmeros ciclos de cálculo, de forma a se garantir o seu equilíbrio. Logo em seguida o

servomecanismo foi ativado na parede horizontal superior e uma velocidade de arrancamento foi prescrita ao elemento transversal. A força resultante horizontal atuante na barra transversal foi registrada, bem como seu deslocamento horizontal.

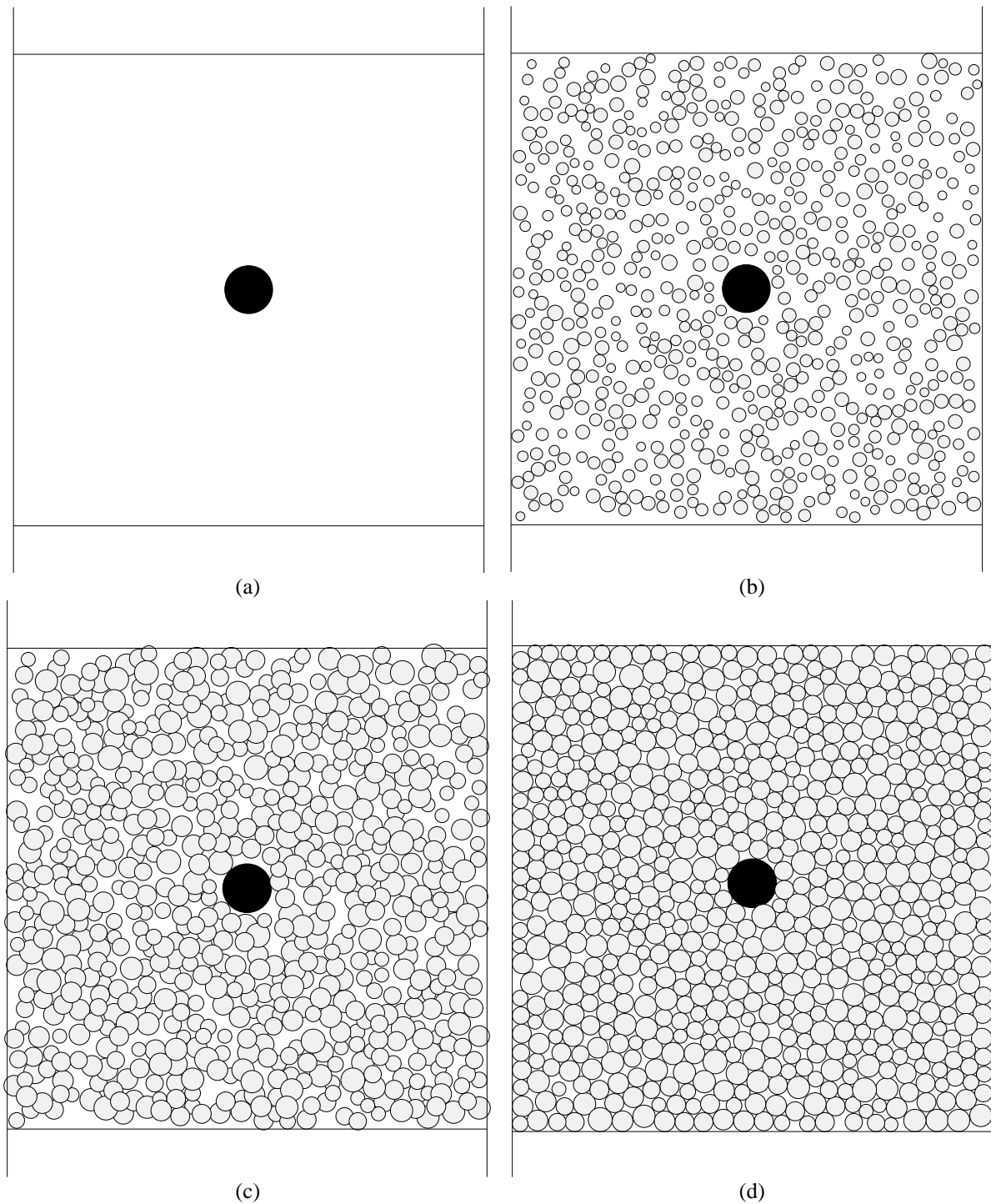


Figura 4.5 Geração de amostras para o ensaio de arrancamento em barra única: (a) Condições de fronteira; (b) Geração de partículas com raio reduzido; (c) Expansão dos raios; (d) Amostra em equilíbrio.



Os parâmetros utilizados nas simulações dos ensaios de arrancamento em barra única são apresentados na Tabela 4.11, os quais foram os mesmos utilizados nos ensaios de cisalhamento direto. Esta escolha se deu pelo fato de já se possuir relativo conhecimento acerca do comportamento da amostra gerada com esses parâmetros. Além disso, nas simulações dos ensaios de cisalhamento direto foram utilizados os parâmetros geométricos da areia Leighton Buzzard, utilizada também por Palmeira (1987) nos ensaios de arrancamento.

Tabela 4.11 Parâmetros utilizados nos ensaios de arrancamento em barra única.

Parâmetros	Entidade		
	Partículas (Grãos)	Barra Transversal	Paredes
Kn (N/m)	$1,00 \cdot 10^8$	$1,00 \cdot 10^9$	$1,00 \cdot 10^8$
Ks (N/m)	$1,00 \cdot 10^8$	$1,00 \cdot 10^9$	0,00
$\tan \phi \mu$	0,36	0,36	0,00
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2660,00	7800,00	Não aplica

Em todas as simulações do ensaio de arrancamento, exceto se exposto ao contrário, as amostras foram geradas com uma porosidade inicial  $n = 0,15$  e a tensão vertical aplicada foi a mesma utilizada por Palmeira (1987) em seus ensaios de arrancamento, 25 kPa. Uma vez atingida a tensão vertical requerida, foi aplicada à barra transversal uma velocidade de arrancamento  $v = 0,01$  m/s, igual ao valor utilizado nos ensaios de cisalhamento direto.

Foram realizadas então, simulações de ensaios de arrancamento em barras transversais de 2,0 mm, 4,0 mm e 8,0 mm de diâmetro, sendo que para cada diâmetro geraram-se amostras nas quais a distância mínima entre o membro transversal e a parede da caixa de ensaio variou de 10·B a 40·B. As dimensões das simulações realizadas são apresentadas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Dimensões das amostra utilizadas na análise da influência do tamanho da caixa de ensaio.

Distância mínima entre membro transversal e a parede da caixa de ensaio	Diâmetro do membro transversal (B)		
	2,00 mm	4,00 mm	8,00 mm
10·B	20 mm x 20 mm	40 mm x 40 mm	80 mm x 80 mm
20·B	40 mm x 40 mm	80 mm x 80 mm	160 mm x 160 mm
40·B	80 mm x 80 mm	160 mm x 160 mm	320 mm x 320 mm
80·B	160 mm x 160 mm	320 mm x 320 mm	640 mm x 640 mm

Logo em seguida, foram realizadas simulações para se analisar a influência da massa específica, rigidez e coeficiente de atrito da barra transversal no comportamento da amostra

submetida ao ensaio de arrancamento. Para estas simulações foram utilizados os mesmos parâmetros fornecidos pela Tabela 4.11, exceto os parâmetros físicos da barra transversal, os quais foram variados segundo os valores fornecidos pela Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Parâmetros utilizados na análise da influência das propriedades da barra transversal.

Parâmetro testado	Valores utilizados
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	2660,0 / 4000,0 / 7800,0
Rigidez normal - $K_n$ (N/m)	$1,00 \cdot 10^8$ / $1,00 \cdot 10^9$ / $1,00 \cdot 10^{10}$ / $1,00 \cdot 10^{11}$
Coefficiente de atrito	0,00 / 0,36 / 1,00 / 2,00 / 4,00

Conforme mencionado no Capítulo 2, nos ensaios de arrancamento, principalmente, o atrito na parede frontal deve ser minimizado, de forma a ser evitar a formação de uma zona de alta resistência próxima a esta parede. Com isso todas as simulações anteriores foram realizadas com o atrito nas paredes definido como nulo. Decidiu-se então, verificar a influência da presença do atrito nas paredes da caixa de ensaio. Para isso foram realizadas simulações em que o coeficiente de atrito das paredes foi definido com os seguintes valores: 0,00 / 0,20 / 0,36 / 0,70 / 1,00. Já os outros parâmetros de ensaio foram os definidos na Tabela 4.11.

Em seguida, foi analisada a influência da forma e das dimensões do membro transversal. Assim, foram realizadas simulações de ensaios de arrancamento em barras transversais de 1, 2, 4, 8 e 16 mm de diâmetro com forma circular e quadrada. A distância mínima entre o membro transversal e a parede da caixa de ensaio foi de  $40 \cdot B$  e os parâmetros de ensaio foram, também, os definidos na Tabela 4.11.

Para gerar a barra transversal quadrada foi utilizado o mecanismo de criação de *clumps* em que uma partícula de forma arbitrária é criada por meio da união de partículas circulares. O *clump* criado para se formar a barra transversal quadrada consiste na junção de nove partículas circulares, conforme apresentado na Figura 4.6(a). Já na Figura 4.6(b) pode-se observar o ensaio de arrancamento em uma barra transversal quadrada. Os códigos gerados para a simulação dos ensaios de arrancamento em barra transversal única encontram-se no Apêndice D.

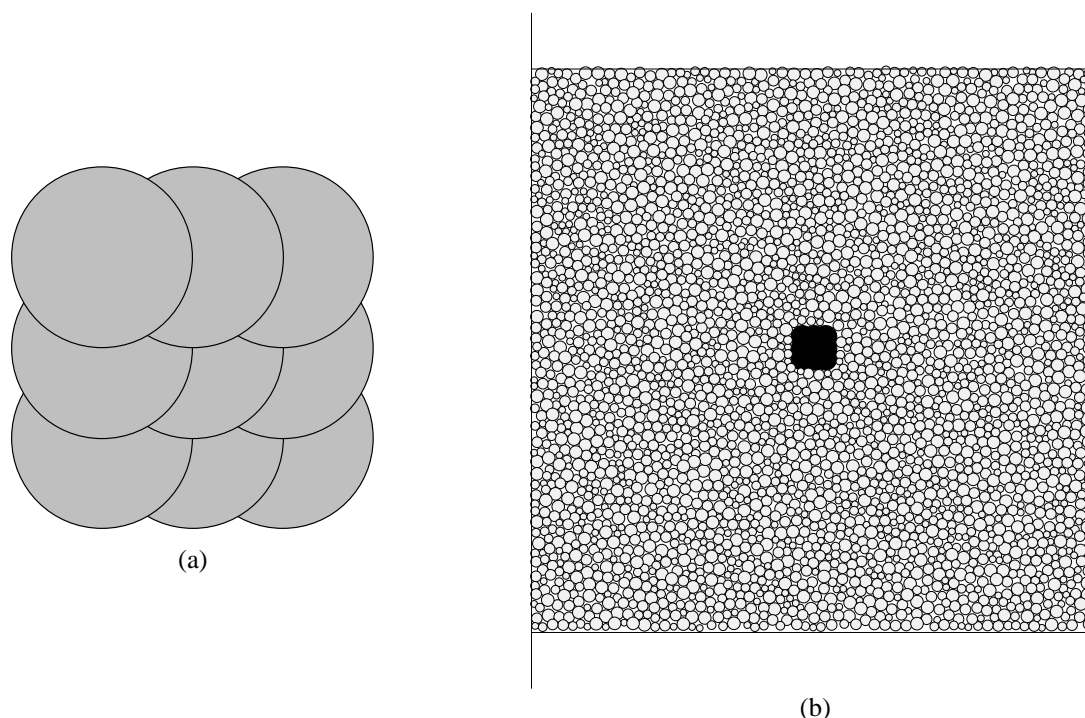


Figura 4.6 Simulação do ensaio de arrancamento em barra transversal com forma quadrada: (a) *Clump* formado por 9 círculos sobrepostos; (b) Configuração típica do ensaio.

### 4.3.1 Retroanálise dos ensaios de Palmeira (1987)

Após a análise dos principais fatores que influenciam o comportamento das simulações de ensaios de arrancamento, realizaram-se simulações destes ensaios com propriedades físicas e geométricas similares aos realizados por Palmeira (1987). Este autor realizou ensaios de arrancamento de médio e grande porte, nos quais se utilizou a areia de Leighton Buzzard, uma areia uniforme e amplamente estudada no Reino Unido. Foram utilizadas várias graduações desta areia para se verificar a influência do tamanho dos grãos, sendo que suas características principais são mostradas na Tabela 4.14. Como reforço, foram utilizadas grelhas de aço e geogrelhas sintéticas com geometrias variadas, tendo em vista que a geometria é um dos principais fatores que interferem na interação solo-geogrelha.

Tabela 4.14 Propriedades das areias utilizadas nos ensaios de arrancamento (Palmeira, 1987 - modificado).

Areia	Faixa do tamanho de partículas (mm)	D50 (mm)	G <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e (±0,005)	ID (%)	CU	φ <sub>DS</sub> (°)
Leighton Buzzard 25/52	0,2 – 0,6	0,4	2,66	0,52	87	1,5	38,3
Leighton Buzzard 14/25	0,6 – 1,18	0,8	2,66	0,53	87	1,3	51,3
Leighton Buzzard 7/14	1,18 – 2,0	1,6	2,66	0,55	86	1,4	48,2

D<sub>50</sub>: diâmetro médio da partículas;  
 G<sub>s</sub>: massa específica real dos grãos;  
 e: índice de vazios;

I<sub>D</sub>: densidade relativa;  
 CU: coeficiente de uniformidade;  
 φ<sub>DS</sub>: ângulo de atrito – cisalhamento direto com σ<sub>v</sub> = 25 KPa.

Logo, com base nos ensaios de Palmeira (1987), foram realizadas as simulações dos ensaios de arrancamento executados na caixa média, a qual possui dimensões de 152 mm x 253 mm x 152 mm (altura x largura x profundidade). Nesta caixa de ensaio foram realizados ensaios com uma, duas ou três barras metálicas e as características dos ensaios realizados são apresentadas na Tabela 4.15. Não foram realizadas simulações com a areia de Leighton Buzzard na graduação 25/52, tendo em vista que, por ser a areia com a graduação mais fina, estas simulações demandariam modelos com cerca de 300.000 partículas, os quais exigiriam um tempo demasiadamente grande para serem processados.

Tabela 4.15 Ensaios de arrancamento realizados por Palmeira (1987) na caixa de ensaio média.

Graduação da Areia	n° membros	Diâmetro dos membros Transversais - B (mm)	Espaçamento dos membros Transversais - S (mm)	Teste n° (Palmeira, 1987)
14/25	1	1,54	---	3
14/25	1	2,40	---	4
14/25	1	3,16	---	7*
14/25	1	4,78	---	2
14/25	1	6,00	---	5*
14/25	1	9,50	---	1
14/25	1	9,50	---	6*
7/14	1	2,40	---	45
7/14	1	4,78	---	44
7/14	1	9,50	---	46
14/25	2	1,50	53,5	24
14/25	2	1,50	25,0	25
14/25	2	3,16	129,0	11
14/25	2	3,16	18,0	13
14/25	2	3,16	62,0	19
14/25	2	4,78	93,7	21
14/25	2	4,78	30,0	22
14/25	2	4,78	60,0	23
7/14	2	3,16	60,0	49
7/14	2	4,78	30,0	47
14/25	3	3,16	18,0	17
14/25	3	3,16	62,0	18
14/25	3	3,16	3,2	33

\* Barra transversal quadrada

Para a simulação dos ensaios de arrancamento em duas ou três barras simultaneamente foi gerado um novo código para o programa *PFC<sup>2D</sup>* (Apêndice E), o qual possibilita a geração de uma, duas ou três barras cilíndricas. O processo de geração de partículas e os parâmetros utilizados nestas simulações são os mesmos utilizados nas simulações com uma barra apenas. A única diferença está no fato de que é aplicada a mesma velocidade de arrancamento em

todas as barras, de forma que os deslocamentos em todos os membros transversais sejam iguais. Tal consideração é válida, visto que nos ensaios reais foram utilizados cabos de aço como membros longitudinais, os quais são bastante rígidos e, conseqüentemente, sofreram pequenas deformações. Na Figura 4.7 são ilustradas as simulações dos ensaios de arrancamento em duas ou três barras isoladas.

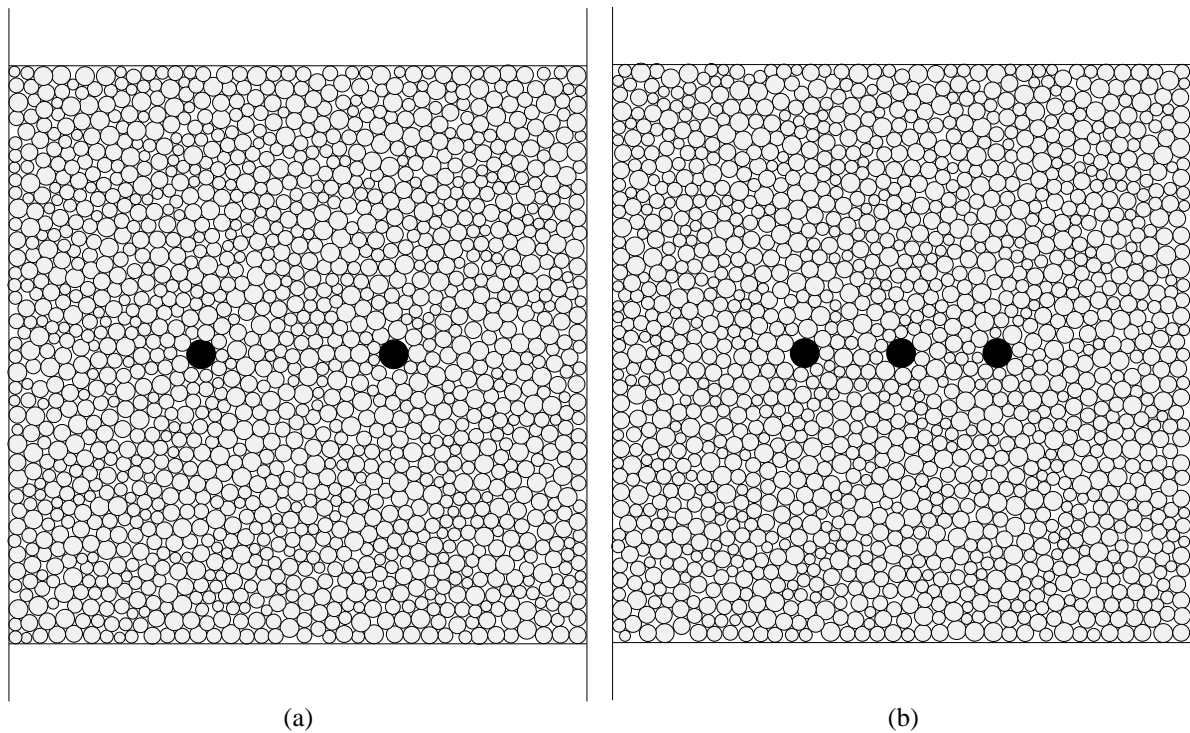


Figura 4.7 Simulação do ensaio de arrancamento com: (a) duas barras; (b) três barras.

## Capítulo 5

### Apresentação e análise de resultados

No presente trabalho todas as simulações realizadas se deram segundo a metodologia descrita no Capítulo 4. Foram feitas então análises paramétricas, nas quais foram simulados ensaios biaxiais e de cisalhamento direto no sentido de se avaliar a influência dos parâmetros micromecânicos e de fatores como a velocidade de cisalhamento no comportamento da amostra. Logo após foram simulados os ensaios de arrancamento, sendo realizadas, inicialmente, simulações em uma barra transversal única. Em seguida foram simulados ensaios de arrancamento com as mesmas características dos ensaios realizados por Palmeira (1987). Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos por estas simulações.

#### 5.1 ANÁLISES PARAMÉTRICAS

##### 5.1.1 Simulação de ensaios biaxiais

Conforme exposto no Capítulo 4, foram realizadas inicialmente as simulações dos ensaios biaxiais para diferentes velocidades de carregamento, a fim de se encontrar o valor ideal para este parâmetro. Os valores adotados no teste da velocidade foram apresentados na Tabela 4.5 e os resultados obtidos nas simulações são mostrados na Figura 5.1.

Na Figura 5.1 é possível perceber que a velocidade de carregamento influencia significativamente no comportamento do modelo, sendo que quanto menor for a velocidade, mais próximo da estabilização se encontra o modelo. Na Figura 5.1 verifica-se também que as curvas das velocidades  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  encontram-se próximas, apresentando valores para a tensão de desvio de pico de aproximadamente 1700 kPa. Adotou-se, portanto, nas análises subsequentes, a velocidade  $v_2 = 0,01$  m/s como velocidade padrão. Esta escolha se deu em função de que esta velocidade propicia uma tensão confinante estável durante toda a simulação (Figura 5.1a) e em um tempo de simulação aceitável.

Uma vez definida a velocidade da simulação, foi analisada a influência da rigidez do contato no comportamento da amostra. Foram simulados ensaios para quatro valores diferentes de rigidez do contato, conforme apresentado na Tabela 4.6. Os resultados destas simulações são apresentados na Figura 5.2.

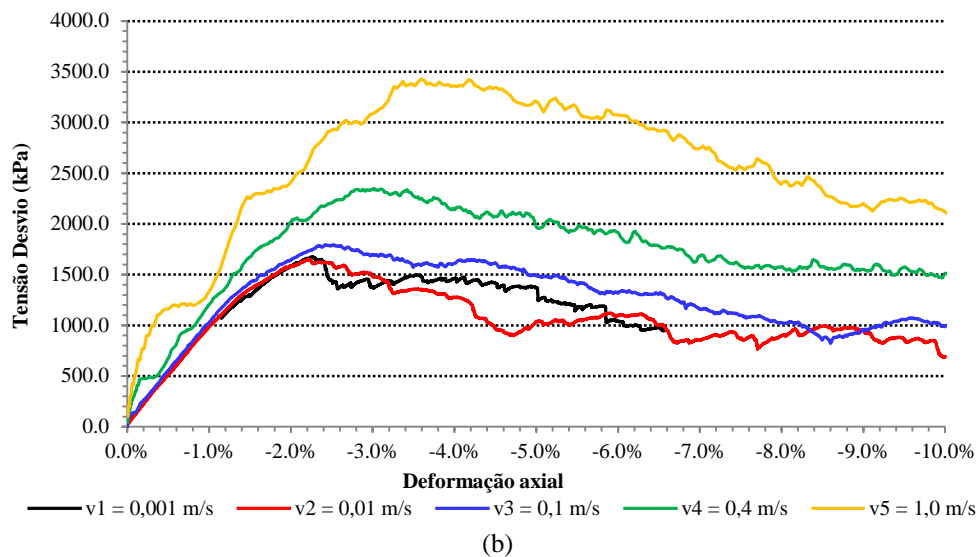
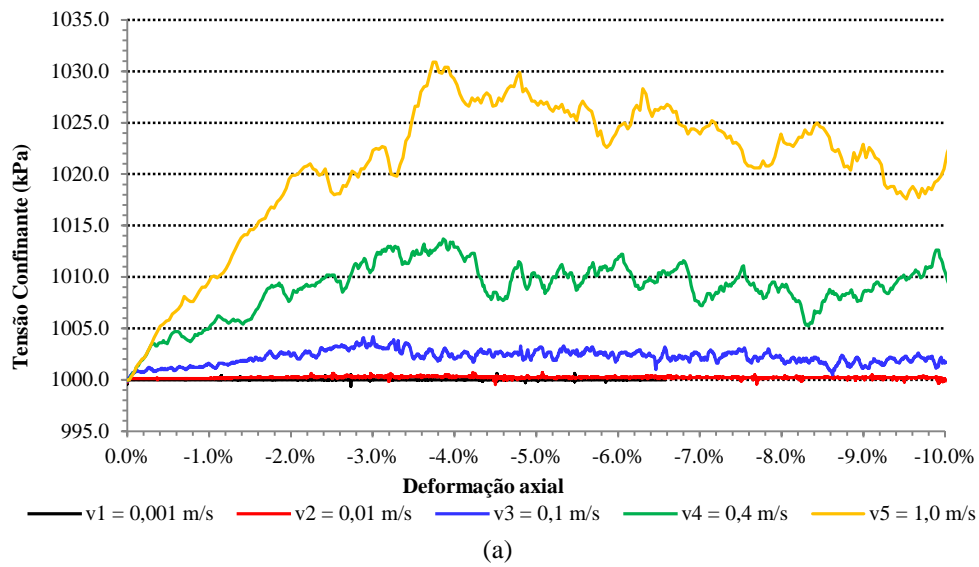
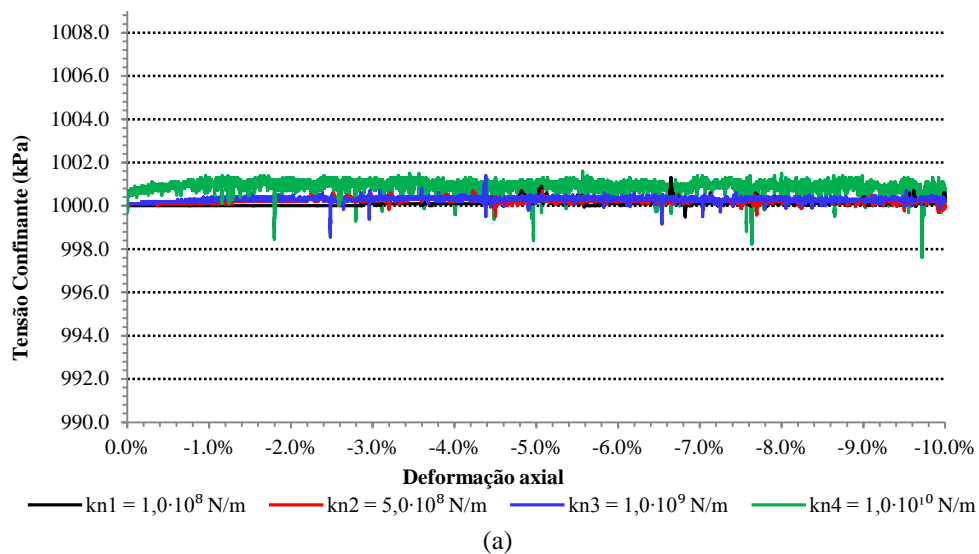


Figura 5.1 Variação da velocidade no ensaio biaxial: (a) tensão confinante versus deformação axial; (b) tensão de desvio versus deformação axial.



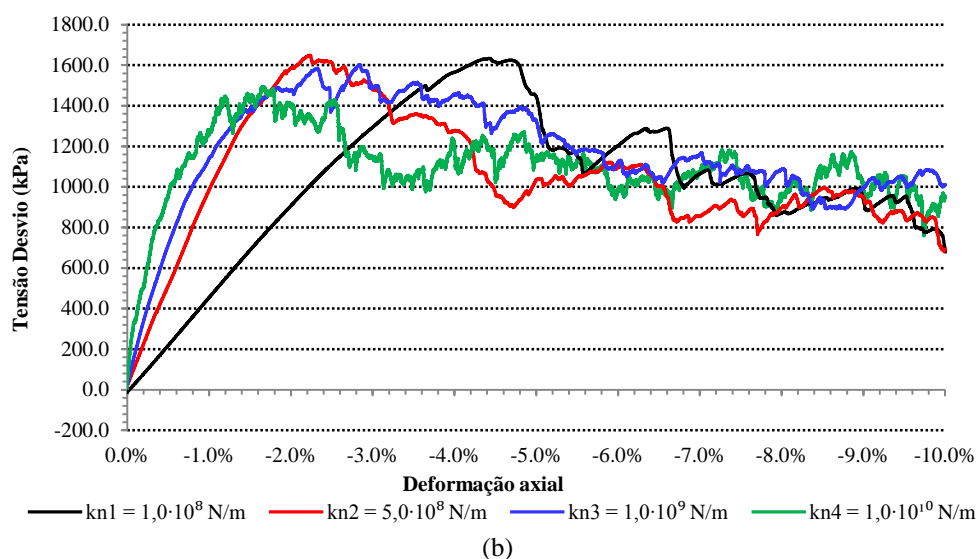


Figura 5.2 Variação da rigidez no ensaio biaxial: (a) tensão confinante versus deformação axial; (b) tensão de desvio versus deformação axial.

É possível observar na Figura 5.2(a) que a tensão confinante se mantém estável durante as simulações para todos os valores de rigidez adotados, excetuando-se a curva para a rigidez  $Kn_4$  indicando que para valores elevados da rigidez no contato o modelo se torna mais instável. Já Figura 5.2(b) mostra que a variação da rigidez do contato não influencia significativamente os valores das resistências de pico e a grandes deformações, sendo estes valores de aproximadamente 1500 kPa e 1000 kPa, respectivamente. Contudo, o módulo de elasticidade sofreu influência significativa devido à variação da rigidez, o qual aumenta com o aumento da rigidez do contato. Com base nos resultados da Figura 5.2 adotou-se a rigidez  $kn_3 = 1,0 \cdot 10^9$  N/m como padrão, tendo em vista que para esse valor a tensão confinante permaneceu estável durante a simulação.

Definidos os valores da velocidade de carregamento e da rigidez no contato procedeu-se a análise da influência do coeficiente de atrito entre os grãos ( $\varphi_\mu$ ) no comportamento macroscópico da amostra. Foram realizadas, então, três simulações completas de ensaios biaxiais e os parâmetros adotados nestas simulações foram apresentados na Tabela 4.7. Os resultados completos dos ensaios biaxiais encontram-se no Apêndice F e os valores dos parâmetros de resistência para cada coeficiente de atrito utilizado são mostrados na Tabela 5.1.

É possível observar na Tabela 5.1 que o ângulo de atrito macroscópico é diretamente proporcional ao ângulo de atrito microscópico, fato que era esperado e também foi observado por Neves (2009). É possível perceber também que mesmo para a amostra sem atrito entre as partículas ( $\varphi_\mu = 0$ ), o ângulo de atrito macroscópico apresenta o valor de  $9,0^\circ$ . Isto se deve ao



entrosamento entre as partículas que por si só confere parte da resistência ao cisalhamento à amostra.

Tabela 5.1 Parâmetros de resistência obtidos nas simulações dos ensaios biaxiais.

Coef. de atrito ( $\phi\mu$ )	Parâmetros de Resistência	$\phi$	$c$
0,00		9,0°	0,0
0,36		24,0°	0,0
0,50		25,5°	0,0

Nas simulações dos ensaios biaxiais, as amostras apresentaram valores para o ângulo de atrito macroscópico considerados baixos em comparação com os valores usuais apresentados por areias uniformes. Este fato se deve a dois fatores principais sendo eles: a simulação do modelo em duas dimensões e a forma das partículas utilizadas nas simulações.

Tem-se que todas as simulações foram realizadas em duas dimensões de forma a diminuir o tempo de processamento e viabilizar as análises. Os materiais granulares são materiais em que as três dimensões influenciam no seu comportamento. Em um modelo de elementos discretos em três dimensões os contatos podem se formar em toda superfície da partícula, diferentemente da modelagem em duas dimensões, na qual se utilizaram partículas circulares de comprimento unitário (cilindros) para simular os grãos de areia. Logo, a utilização de modelos bidimensionais limitou a ocorrência de contatos em apenas um plano e diminuiu o entrosamento entre as partículas, levando à ocorrência de baixos valores para o ângulo de atrito macroscópico.

Outro fator contribuinte para os baixos valores do ângulo de atrito macroscópico foi a utilização de partículas circulares para a simulação dos grãos de areia. Partículas com formas não circulares e com a presença de arestas vivas tendem a possuir um intertravamento maior do que partículas circulares. No *PFC*<sup>2D</sup> é permitido apenas o uso de partículas circulares, sendo que a simulação de grãos com formas não circulares pode ser realizada por meio dos *clumps*, conforme exposto no item 3.9. A utilização de *clumps* aumenta significativamente a demanda de processamento visto que aumenta o número de partículas na análise, logo foram utilizadas apenas partículas circulares de forma a viabilizar as análises.

Por fim, na Figura 5.3 são mostradas as curvas tensão-deformação obtidas por Neves (2009) em simulações de ensaios biaxiais, nas quais foram utilizados como parâmetros os valores da Tabela 5.2. É possível observar na Figura 5.3 que a curva referente a uma tensão confinante de 1000 kPa se assemelha bastante à curva obtida para a velocidade  $v_4 = 0,4$  m/s,

apresentada na Figura 5.1 e também plotada no gráfico da Figura 5.3. Para ambas as curvas a tensão de desvio de pico e residual foram de aproximadamente 2400 kPa e 1500 kPa, respectivamente. Percebe-se então, que mesmo com uma pequena diferença nos parâmetros utilizados, foi possível reproduzir os resultados obtidos por Neves (2009), o que corrobora a confiabilidade do código desenvolvido.

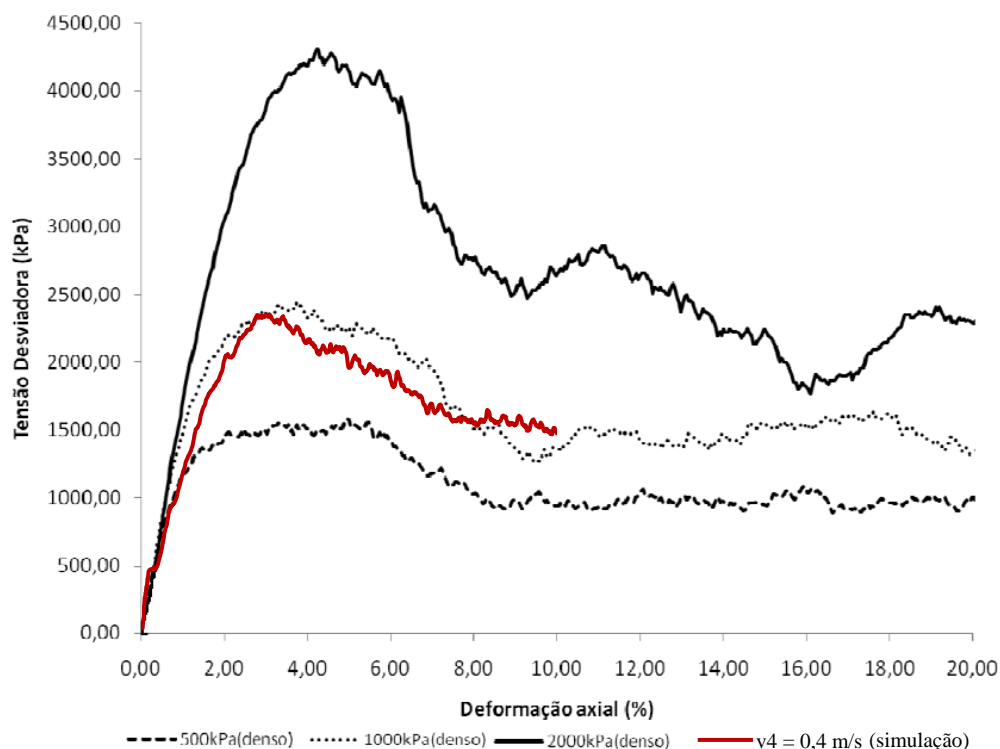


Figura 5.3 Curva tensão-deformação para um arranjo denso de partículas (NEVES, 2009).

Tabela 5.2 Parâmetros utilizados na simulação realizada por Neves (2009).

<b>Kn (N/m)</b>	<b>Ks (N/m)</b>	<b>Kn parede (N/m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>tan <math>\phi\mu</math></b>	<b><math>\sigma_3</math> (kPa)</b>	<b>Vel. Cis. (m/s)</b>
5,00·10 <sup>8</sup>	4,00·10 <sup>8</sup>	5,00·10 <sup>7</sup>	2700,00	0,50	1000,0	0,4
(5,00·10 <sup>8</sup> )	(5,00·10 <sup>8</sup> )	(5,00·10 <sup>7</sup> )	(2700,00)	(0,50)	(1000,0)	(0,4)

\* Os valores entre parênteses são referentes aos utilizados na simulação do ensaio biaxial com  $v_4 = 0,4$  m/s

### 5.1.2 Simulação de ensaios de cisalhamento direto

As análises paramétricas da velocidade, rigidez e ângulo de atrito interno também foram realizadas para o ensaio de cisalhamento direto, sendo estas feitas com o intuito de verificar se o comportamento apresentado nas simulações dos ensaios biaxiais se confirma nas simulações dos ensaios de cisalhamento direto. Os resultados para a análise da velocidade são apresentados na Figura 5.4 e os resultados para a análise da rigidez são apresentados na Figura 5.5.

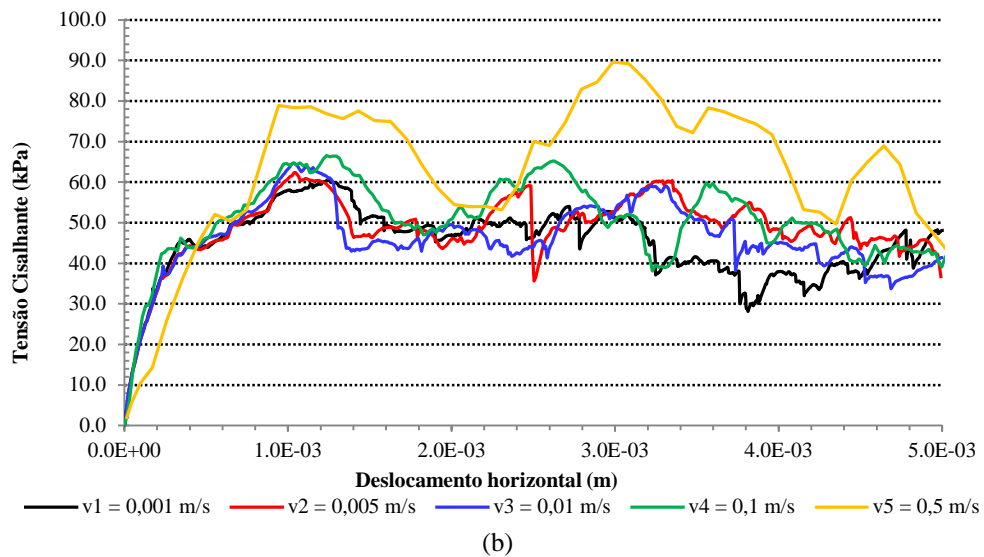
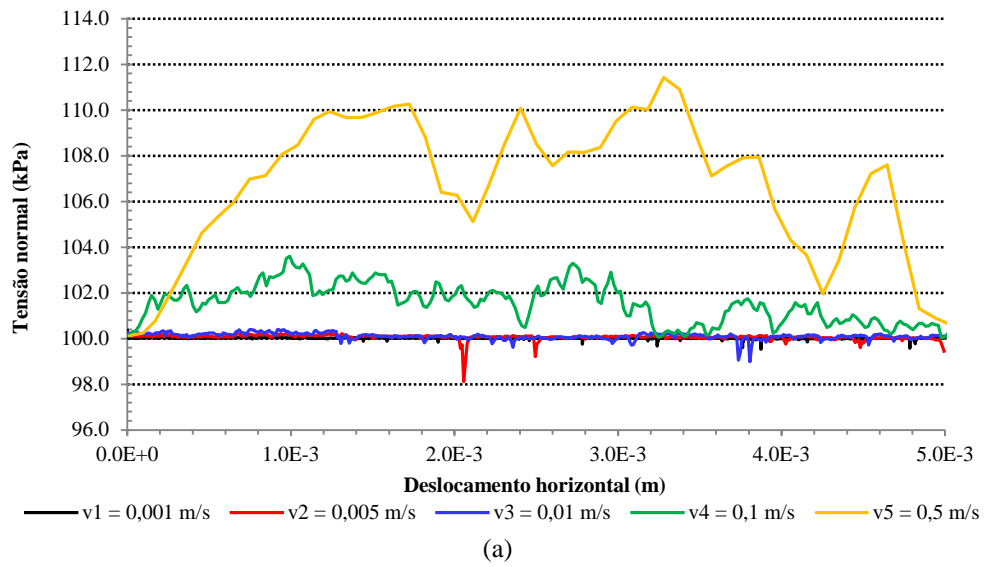
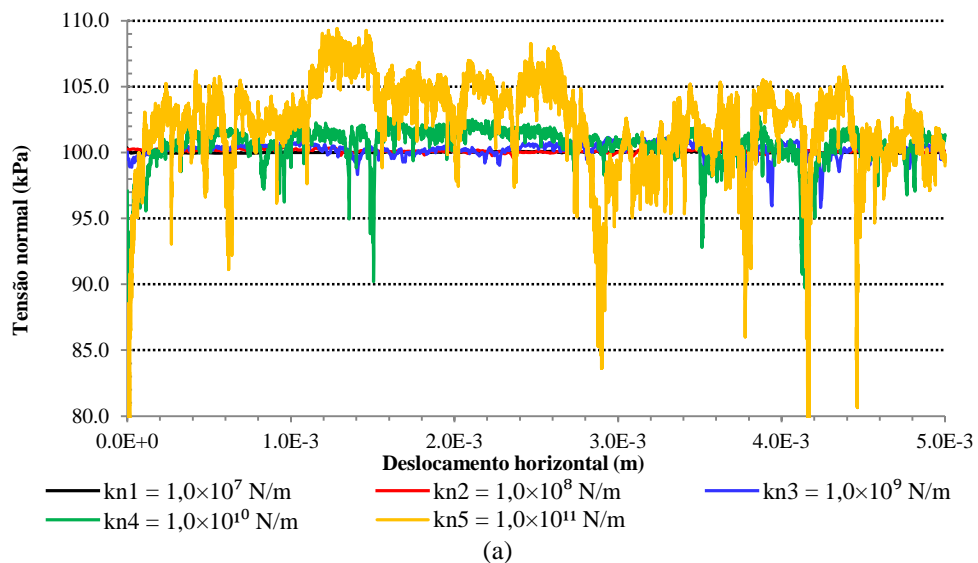


Figura 5.4 Variação da velocidade no ensaio de cisalhamento direto: (a) tensão normal versus deformação axial; (b) tensão cisalhante versus deformação axial.



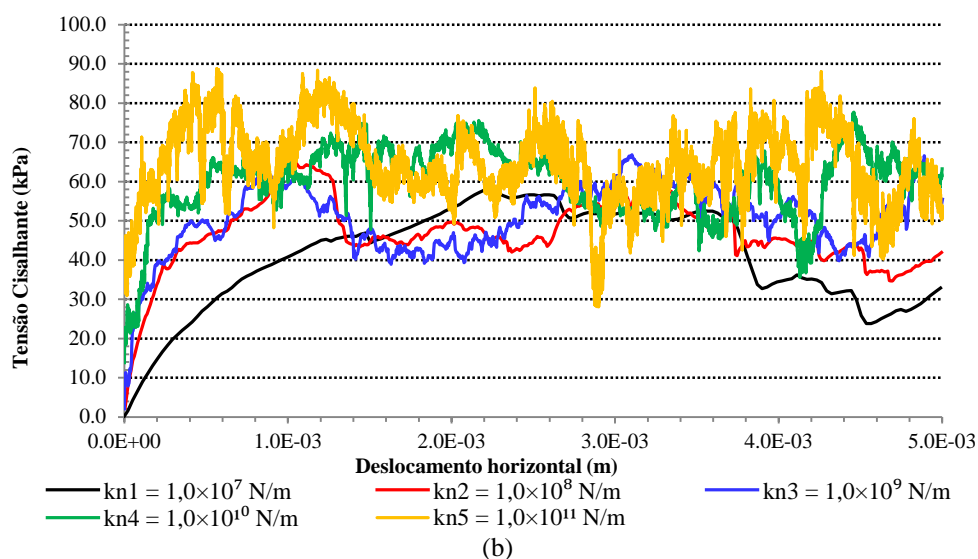


Figura 5.5 Variação da rigidez no ensaio de cisalhamento direto: (a) tensão normal versus deformação axial; (b) tensão cisalhante versus deformação axial.

Na Figura 5.4 é possível verificar que a velocidade de cisalhamento também influencia significativamente no comportamento da amostra submetida ao cisalhamento direto. Nesta figura a tensão vertical se apresenta tão mais estável quanto menor for a velocidade de cisalhamento. Para os ensaios de cisalhamento adotou-se, como padrão, a velocidade  $v_3 = 0,01$  m/s que foi o mesmo valor obtido para os ensaios biaxiais.

Na análise da rigidez do contato constatou-se também, nos ensaios de cisalhamento, o mesmo padrão de comportamento dos ensaios biaxiais, como pode ser visto na Figura 5.5. Nesta figura fica bastante evidenciada a hipótese de que quanto maior a rigidez mais instável é o comportamento da amostra, sendo que no caso da rigidez  $kn_5$  ( $1,0 \cdot 10^{11}$  N/m) esta instabilidade se refletiu também na resistência. Logo, optou-se por verificar esta hipótese e para isso foi executada mais uma simulação para a rigidez  $kn_5$  ( $1,0 \cdot 10^{11}$  N/m), entretanto a velocidade do ensaio foi reduzida para 0,001 m/s. O resultado desta simulação pode ser visto no gráfico da Figura 5.6, no qual também foram plotados os resultados para rigidez  $kn_5$  ( $1,0 \cdot 10^{11}$  N/m) com velocidade de 0,01 m/s e os resultados para rigidez  $kn_2$  ( $1,0 \cdot 10^8$  N/m) adotada como referência.

Pôde-se então verificar, na Figura 5.6, que para a velocidade de 0,001 m/s a amostra se apresentou mais estável do que para a velocidade de 0,01 m/s. Tem-se então que a curva tensão-deformação  $kn_5$  ( $1,0 \cdot 10^{11}$  N/m) obtida com a velocidade de 0,001 m/s apresentou resultados mais próximos aos da curva  $kn_2$  ( $1,0 \cdot 10^8$  N/m) do que a curva tensão-deformação  $kn_5$  ( $1,0 \cdot 10^{11}$  N/m) obtida com a velocidade de 0,01 m/s.

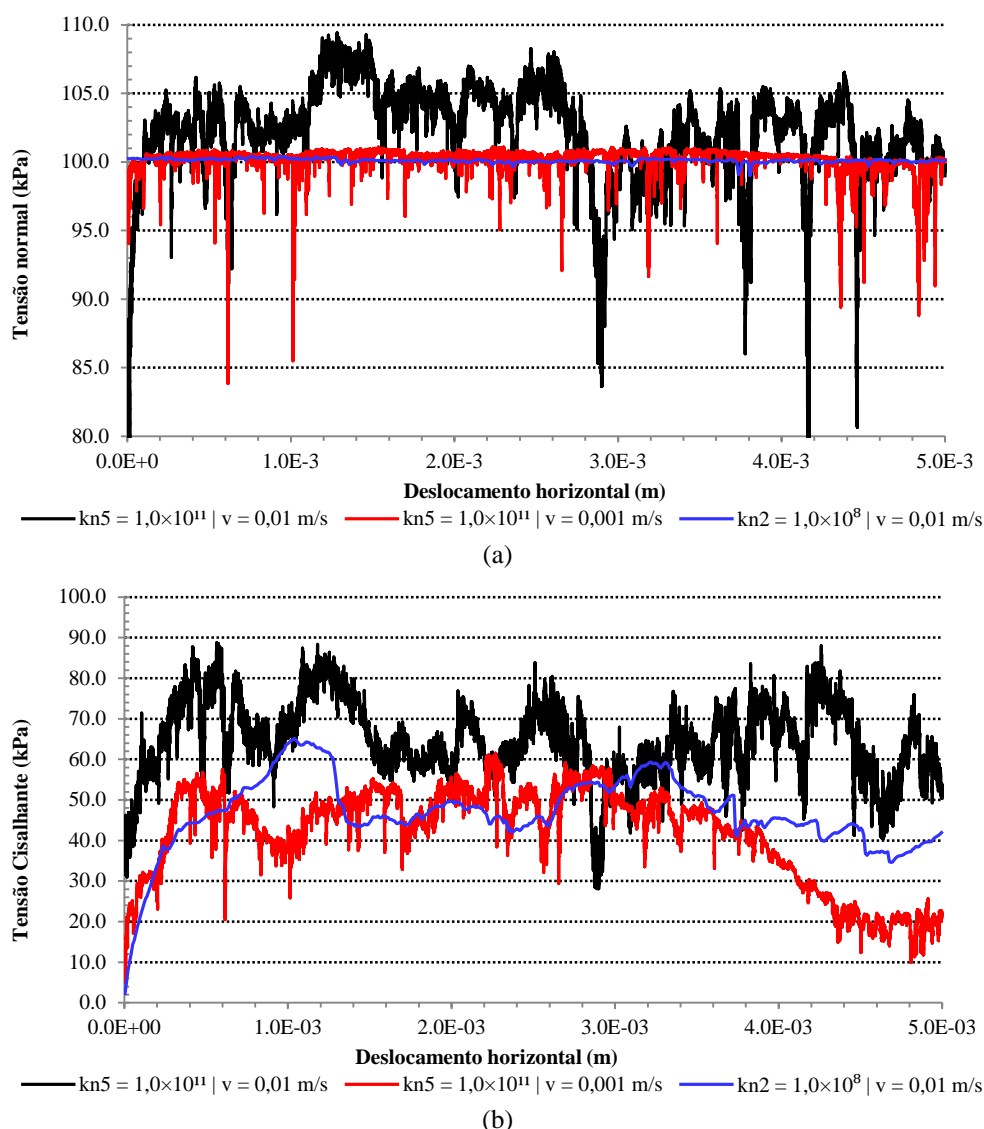


Figura 5.6 Influencia da rigidez e velocidade de carregamento no ensaio de cisalhamento direto: (a) tensão normal versus deformação axial; (b) tensão cisalhante versus deformação axial

Definidas a velocidade e a rigidez do contato, foram realizadas simulações a fim de se verificar a relação entre o ângulo de atrito microscópico e o ângulo de atrito macroscópico. Os parâmetros utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 4.10 e os parâmetros de resistência obtidos são mostrados na Tabela 5.3. Os resultados completos dos ensaios de cisalhamento direto encontram-se no Apêndice G.

Tabela 5.3 Parâmetros de resistência obtidos nas simulações dos ensaios biaxiais.

Coef. de atrito ( $\phi_\mu$ )	Parâmetros de Resistência	$\phi$	c
0,00		11,9°	0,0
0,36		32,0°	0,0
0,50		34,9°	0,0

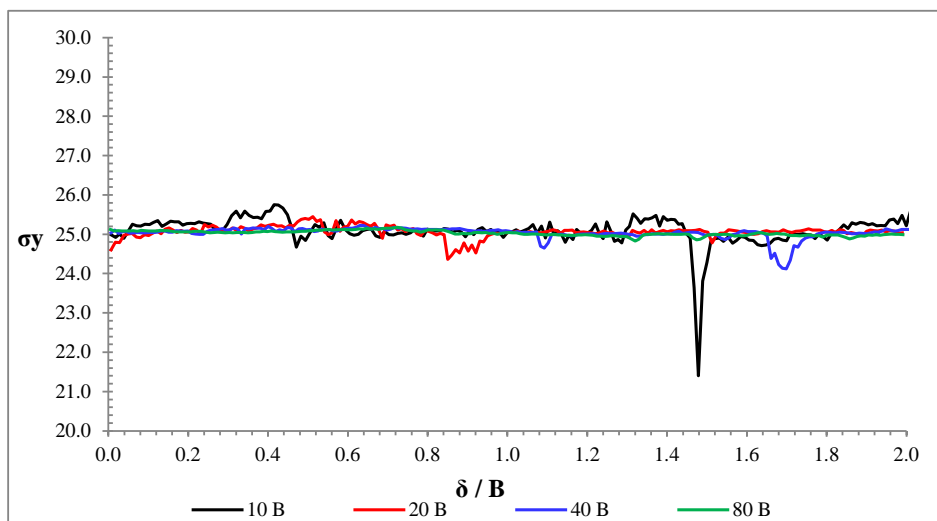
Observou-se nas simulações dos ensaios de cisalhamento direto um comportamento similar ao apresentado nas simulações dos ensaios biaxiais, ou seja, o ângulo de atrito macroscópico é diretamente proporcional ao microscópico. Foi verificada também a existência do entrosamento entre as partículas, visto que para a amostra sem atrito entre as partículas o ângulo de atrito macroscópico possui um valor de  $11,9^\circ$ , o que também foi observado nas simulações dos ensaios biaxiais e nas simulações realizadas por Neves (2009).

Segundo Palmeira (1987), a areia de Leighton Buzzard, na graduação simulada (7/14), possui um ângulo de atrito de  $48,2^\circ$  obtido por meio de ensaios de cisalhamento direto. Os valores obtidos para o ângulo de atrito macroscópico, nas simulações dos ensaios de cisalhamento direto, foram um pouco superiores aos valores obtidos nas simulações dos ensaios biaxiais, contudo estes valores ainda são inferiores aos obtidos por Palmeira (1987). Conforme discutido anteriormente, os baixos valores de ângulo de atrito obtidos nas simulações realizadas são devidos, principalmente, à abordagem bidimensional dos ensaios estudados e à utilização de partículas circulares.

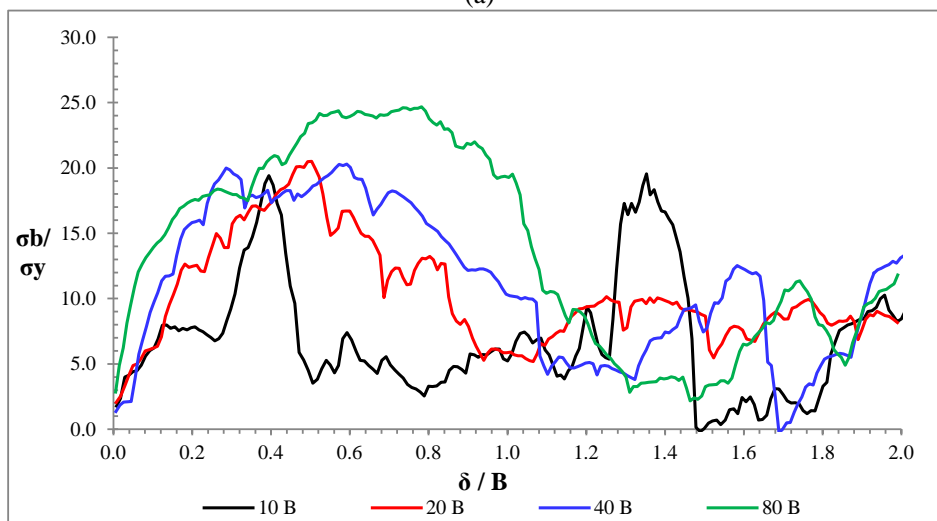
## 5.2 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Conforme demonstrado no Capítulo 4, para os ensaios de arrancamento objetivou-se eliminar as complexidades advindas da interação entre várias barras transversais optando-se, inicialmente, por utilizar uma única barra transversal nas simulações. Assim foram realizadas análises dos principais fatores influentes na simulação do ensaio de arrancamento, sendo eles: o tamanho da caixa de ensaio, as propriedades da barra transversal, o atrito nas paredes da caixa de ensaio e a dimensão da barra transversal.

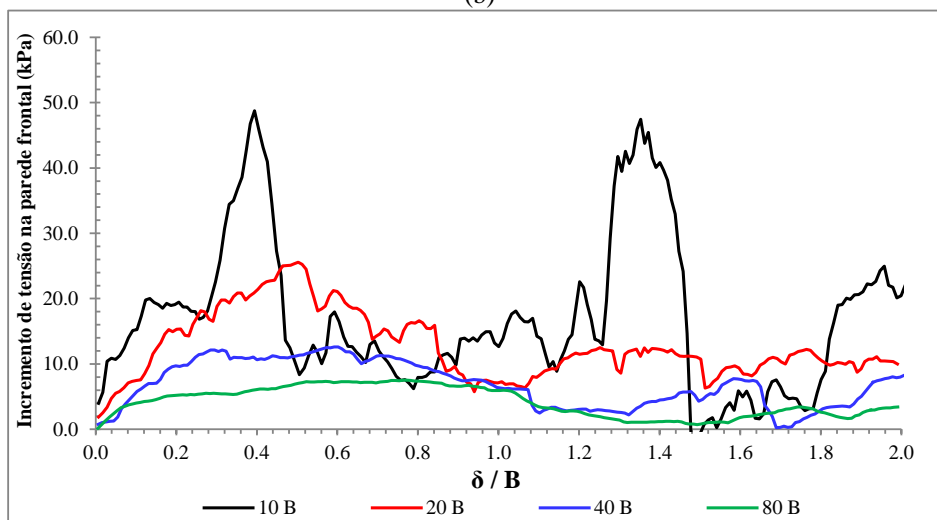
A distância entre a barra transversal e a parede frontal influencia nos resultados das simulações dos ensaios de arrancamento, sendo que uma distância mínima deve existir de modo a minimizar esta influência. Contudo, esta distância não deve ser muito grande, pois aumentaria o tamanho da caixa de ensaio, implicando em um aumento do número de partículas e no tempo de ensaio. Assim, foram realizadas simulações variando-se o tamanho da caixa de ensaio e da barra transversal (Tabela 4.12) a fim de se verificar a distância mínima entre a barra transversal e a parede frontal. Os resultados destas análises, para barras transversais com espessura,  $B$ , de 2 mm, 4 mm e 8 mm, encontram-se na Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9, respectivamente.



(a)

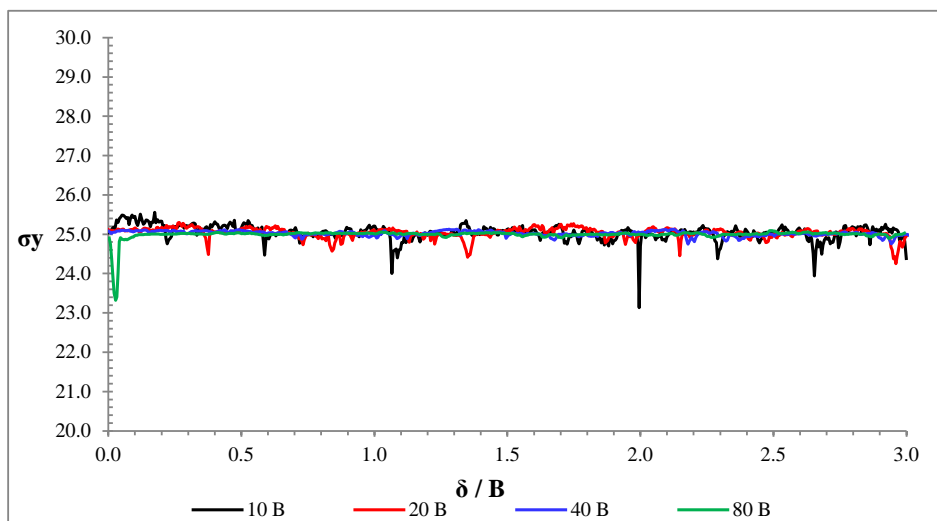


(b)

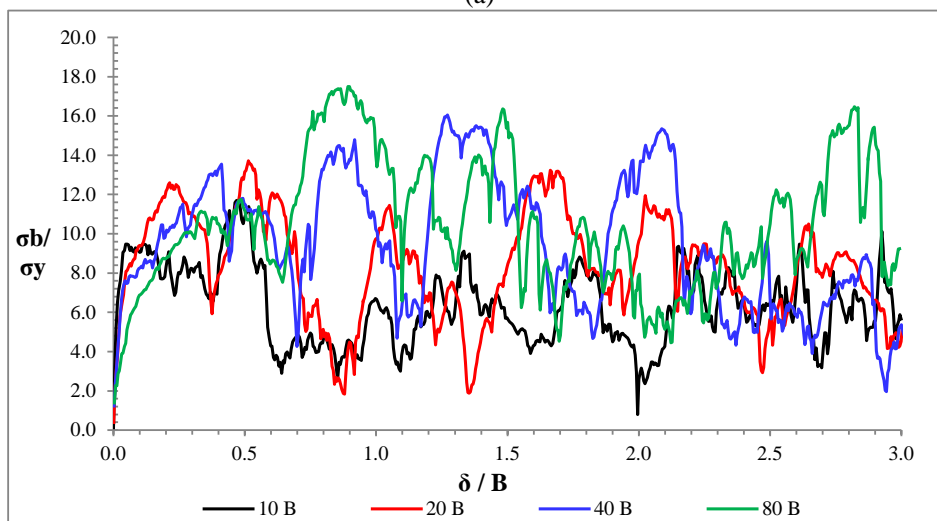


(c)

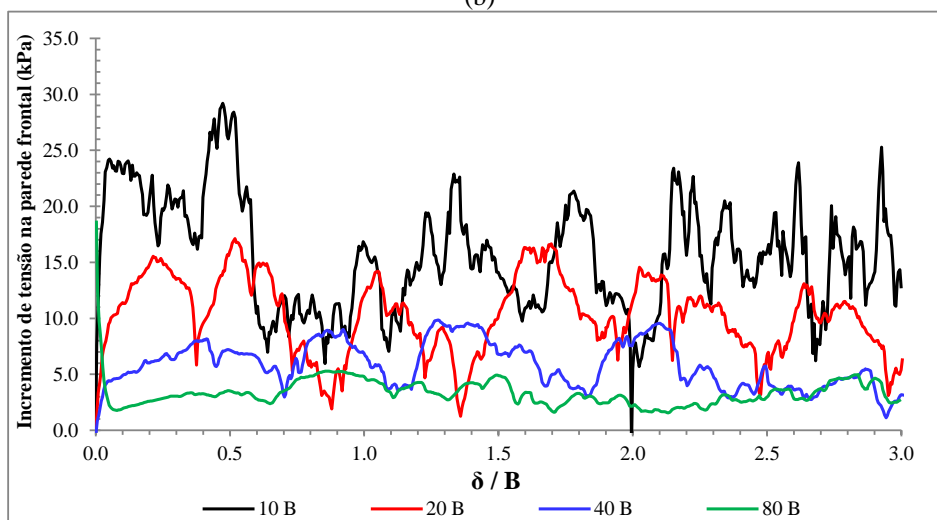
Figura 5.7 Influência do tamanho da caixa de ensaio -  $B = 2 \text{ mm}$ : (a) Tensão vertical versus deslocamento horizontal normalizado; (b) Resistência passiva normalizada versus deslocamento horizontal normalizado (c) Incremento de tensão na parede versus deslocamento horizontal normalizado



(a)



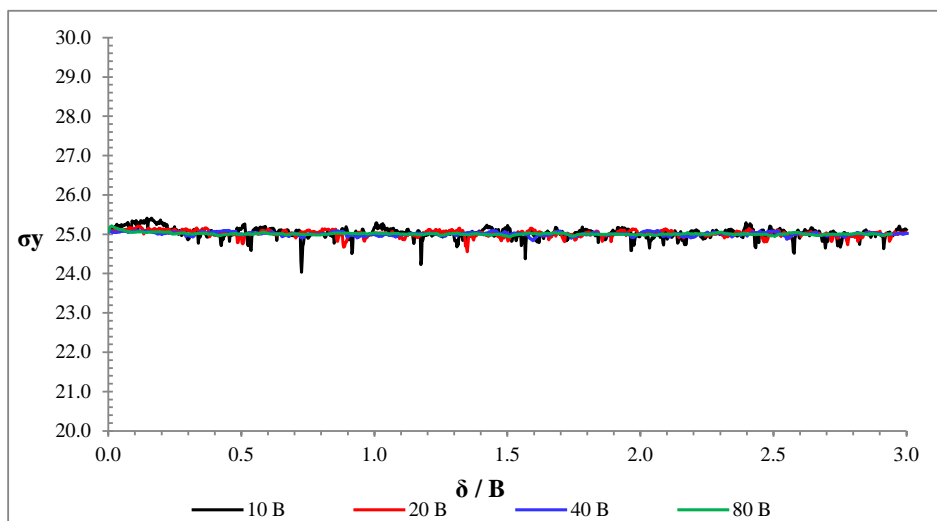
(b)



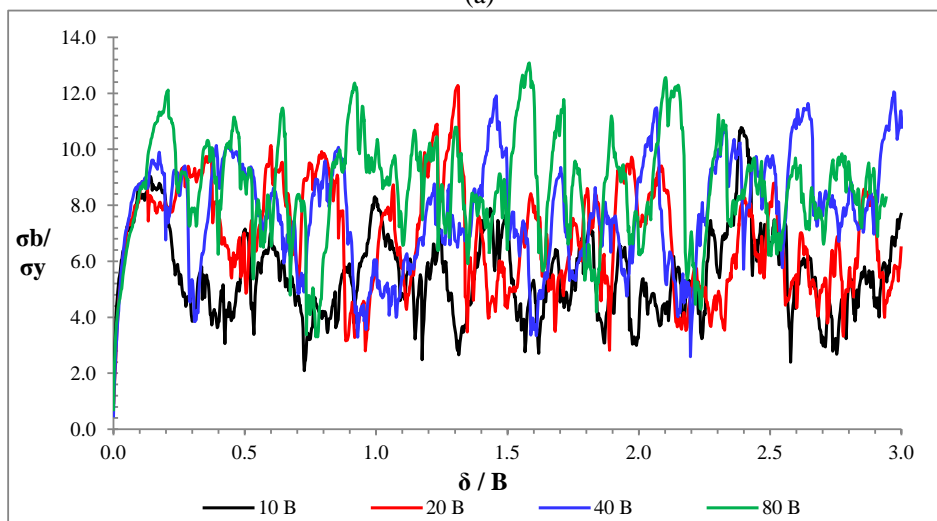
(c)

Figura 5.8 Influência do tamanho da caixa de ensaio -  $B = 4$  mm: (a) Tensão vertical versus deslocamento horizontal normalizado; (b) Resistência passiva normalizada versus deslocamento horizontal normalizado (c) Incremento de tensão na parede versus deslocamento horizontal normalizado

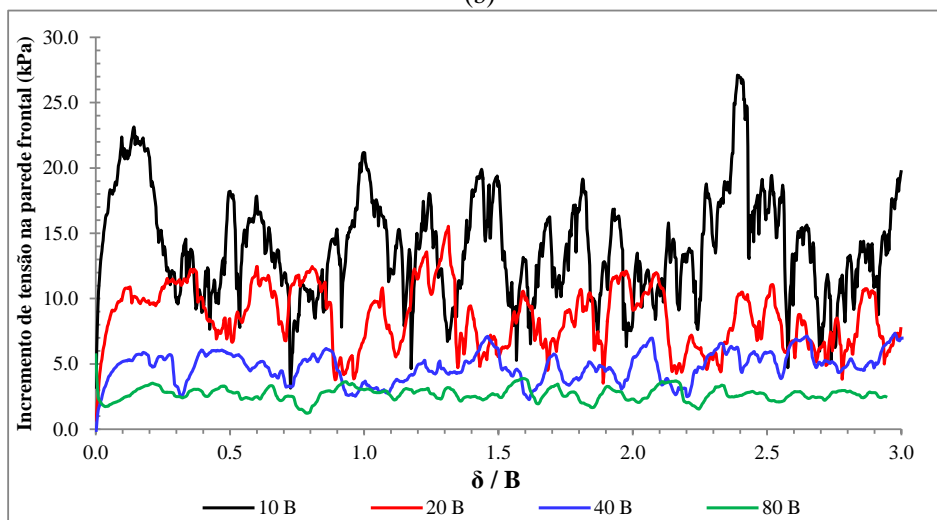




(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 Influência do tamanho da caixa de ensaio -  $B = 8 \text{ mm}$ : (a) Tensão vertical versus deslocamento horizontal normalizado; (b) Resistência passiva normalizada versus deslocamento horizontal normalizado (c) Incremento de tensão na parede versus deslocamento horizontal normalizado

Nas Figuras 5.7(a), 5.8(a) e 5.9(a) é possível perceber que quanto maior a caixa de ensaio mais estável permanece a tensão vertical. A fim de se quantificar esta estabilização foi calculado o Coeficiente de Variação (CV) da tensão vertical para todas simulações realizadas e seu valores são apresentados na Tabela 5.4. Nesta tabela verificou-se a mesma tendência observada nas Figuras 5.7(a), 5.8(a) e 5.9(a), sendo que o CV tendeu a diminuir com o aumento das dimensões da caixa de ensaios. Algumas exceções ocorreram como no caso da simulação com a barra de 4 mm e caixa de ensaio com  $80 \cdot B$ , em que o CV foi maior do que o CV para a caixa de ensaio com  $40 \cdot B$ , entretanto este valor foi influenciado por um pico de tensão vertical isolado que não caracteriza o comportamento da simulação como um todo.

Tabela 5.4 Coeficiente de variação da tensão vertical na análise da influência do tamanho da caixa de ensaio.

Dimensão da caixa de ensaio	Coeficiente de Variação			Média
	B = 2 mm	B = 4 mm	B = 8 mm	
10·B	1,48%	0,77%	0,54%	0,93%
20·B	0,60%	0,54%	0,31%	0,48%
40·B	0,62%	0,25%	0,18%	0,35%
80·B	0,26%	0,52%	0,12%	0,30%

Na Figura 5.7(b), Figura 5.8(b) e Figura 5.9(b) verificou-se uma ocorrência de ruídos nas curvas plotadas, os quais surgiram com mais intensidade nas barras transversais com dimensões maiores. Para o caso da simulação do ensaio de arrancamento em barra única, a força resultante (e conseqüentemente a resistência passiva) é medida como um somatório das componentes horizontais das forças de contato atuantes na barra transversal, logo, com o aumento do diâmetro da barra transversal aumenta-se também o número de contatos. Os contatos, por sua vez, a cada ciclo de cálculo, são formados e destruídos em função da velocidade aplicada à barra transversal e da posição atualizada das outras partículas. Assim, a força de arrancamento resultante não varia seguindo uma tendência suave, mas sim em incrementos que dependem das forças de contato existentes.

Os contatos formados entre as partículas e a barra transversal são mostrados na Figura 5.10 como retas que unem os centros das partículas. É possível perceber então, que para a barra transversal com  $B = 2$  mm foram formados, em um passo de tempo qualquer, dois contatos, para  $B = 4$  mm foram formados sete contatos e para  $B = 8$  mm onze contatos foram formados. Assim, os ruídos surgiram com mais intensidade nas barras transversais com dimensões maiores devido ao maior número de contatos existentes nestas.

Os ruídos percebidos nas curvas da Figura 5.7(b), Figura 5.8(b) e Figura 5.9(b) dificultaram a análise dos resultados para  $B = 4$  mm e  $B = 8$  mm. Entretanto, é possível

visualizar mais claramente, nos resultados para  $B = 2 \text{ mm}$ , que a resistência passiva tende a apresentar menores valores em simulações com a caixa de ensaio maior.

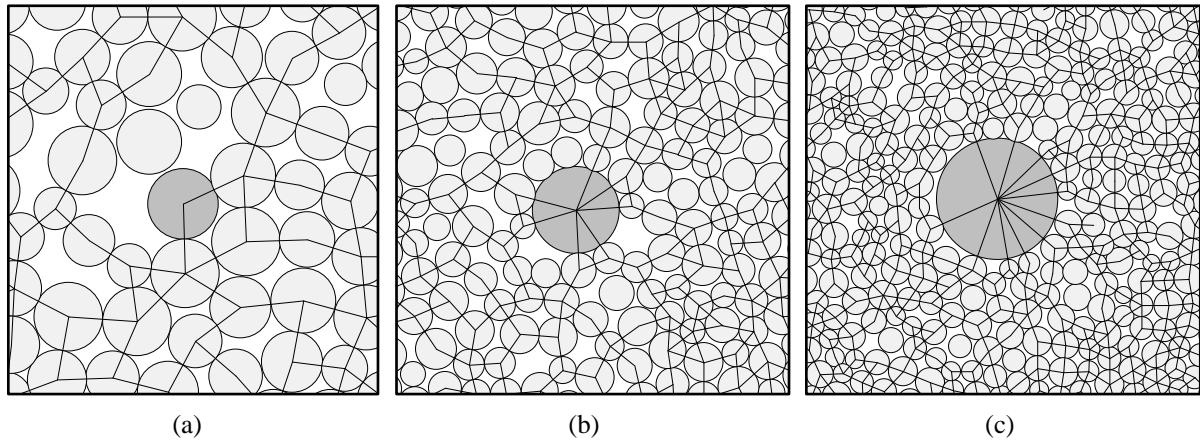
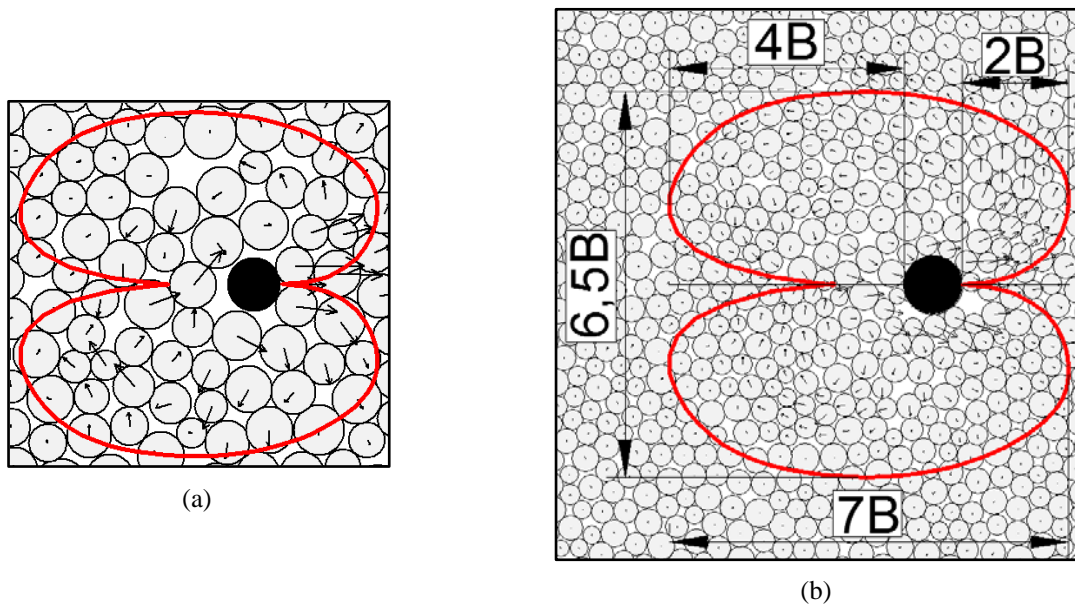
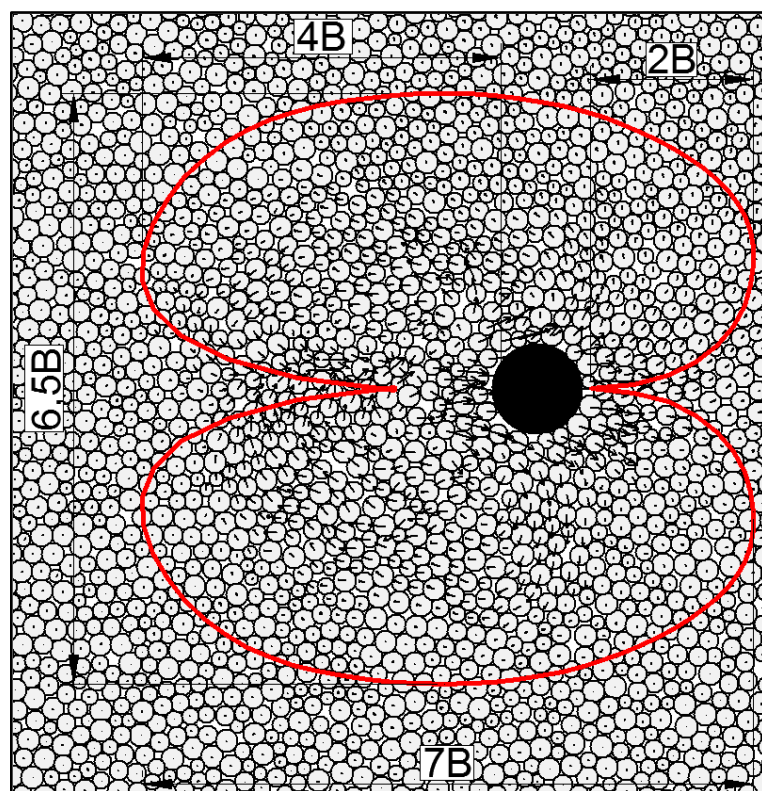


Figura 5.10 Número de partículas em contato com a barra transversal: (a)  $B = 2 \text{ mm}$ ; (b)  $B = 4 \text{ mm}$  (c)  $B = 8 \text{ mm}$

Na Figura 5.11 foram plotados os vetores de deslocamento de cada partícula, os quais possuem o tamanho proporcional ao deslocamento ocorrido. Assim, foi possível observar a formação de um mecanismo de ruptura com a forma, aproximadamente, delineada pela curva vermelha na Figura 5.11(a)-(c). Este mecanismo se apresentou de forma similar independentemente da espessura da barra transversal, embora para o caso em que  $B = 2 \text{ mm}$  o mecanismo não tenha se esboçado de forma tão perceptível. Este comportamento para a barra transversal de  $2 \text{ mm}$  provavelmente ocorreu devido ao fato das dimensões da barra transversal e das partículas que representam o solo serem semelhantes.

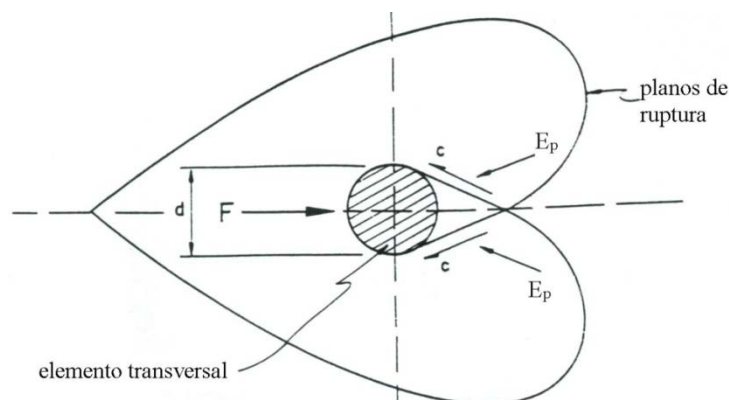




(c)

 Figura 5.11 Mecanismo de ruptura no ensaio de arrancamento: (a)  $B = 2$  mm; (b)  $B = 4$  mm; (c)  $B = 8$  mm.

O mecanismo de ruptura observado nas simulações dos ensaios de arrancamento (Figura 5.11) apresentou grandes semelhanças com o mecanismo de Peterson e Anderson (1980 *apud* Becker, 2006), o qual parte do pressuposto de que as rupturas ocorrem de maneira generalizada no solo em frente ao elemento transversal semelhante ao que acontece com um elemento de fundação em um meio contínuo (Figura 5.12). Todavia, destacam-se pequenas diferenças entre ambos os mecanismos de ruptura, onde na presente pesquisa a superfície de ruptura não apresentou o prolongamento na extremidade posterior ao membro transversal.


 Figura 5.12 Mecanismo de ruptura generalizada dos elementos transversais da geogrelha em ensaios de arrancamento (Peterson e Anderson, 1980 *apud* Becker, 2006)

Mesmo as dimensões do mecanismo de ruptura verificado nesta pesquisa (Figura 5.11), sendo inferiores às dimensões da menor caixa de ensaios utilizada, não se recomenda a realização de simulações com as dimensões obtidas por meio do referido mecanismo de ruptura, pois a Figura 5.7(c), Figura 5.8(c) e Figura 5.9(c) revelam que o incremento de tensões na parede frontal foi influenciado pela variação do tamanho das caixas. Este incremento de tensões é tanto maior quanto menor for a caixa utilizada, pois nos casos em que a caixa de ensaios possui pequenas dimensões a dissipação da força de contato é dificultada, conforme mostrado na Figura 5.13. Nesta figura, as forças de contato estão representadas por retas que unem os centros das partículas que se tocam, sendo a espessura da reta proporcional à magnitude das referidas forças de contato. Com base no exposto, adotou-se nas simulações subsequentes as dimensões de  $40 \cdot B$  para a caixa de ensaios como padrão para os ensaios de arrancamento em barra única.

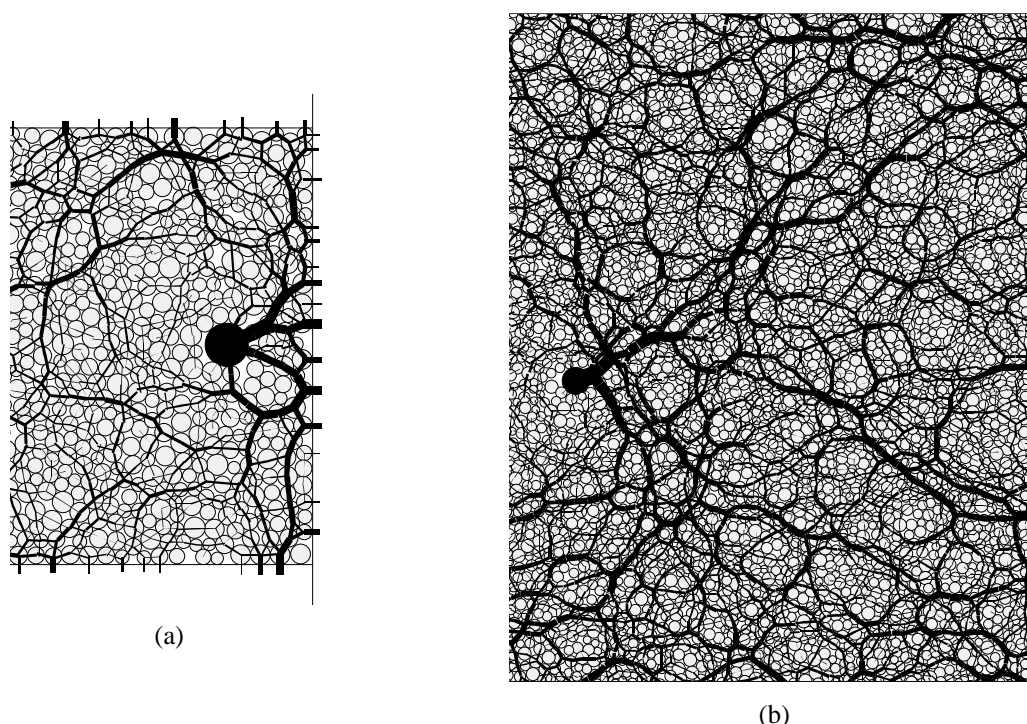


Figura 5.13 Representação das forças de contato no ensaio de arrancamento para uma caixa de ensaio com dimensões de: (a)  $10 \cdot B$ ; (b)  $40 \cdot B$ .

Após a definição do tamanho ideal de caixa foram realizadas simulações para verificar a influência das propriedades da barra transversal no comportamento da amostra ensaiada. As propriedades verificadas foram massa específica, rigidez normal e coeficiente de atrito cujos resultados estão apresentados na Figura 5.14(a) a (c).

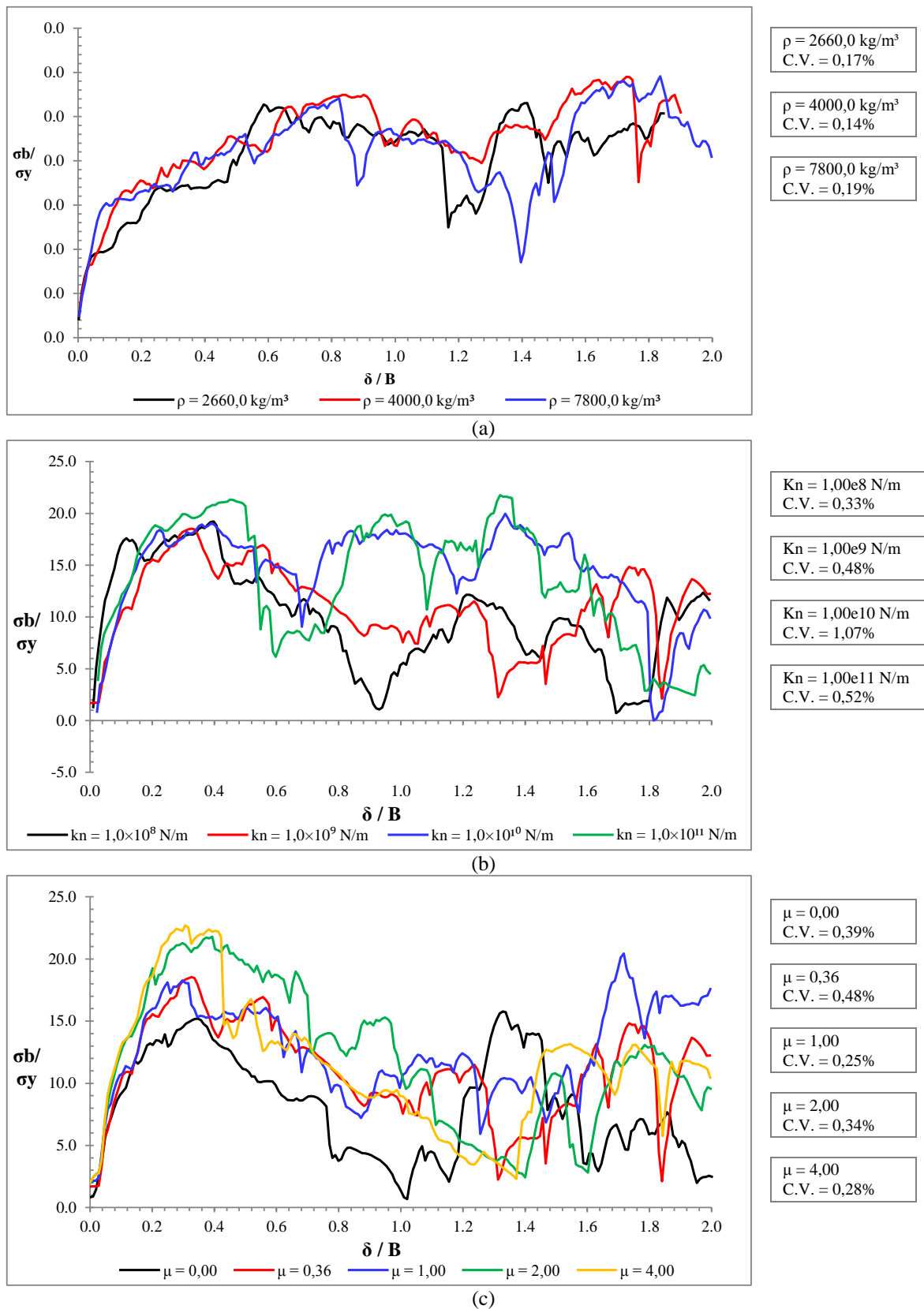


Figura 5.14 Influência das propriedades da barra transversal: (a) Densidade; (b) Rigidez normal; (c) Coeficiente de atrito microscópico.



Na Figura 5.14(a) observou-se que a amostra apresenta comportamento semelhante para todas as densidades testadas. Já na Figura 5.14(b) verificou-se que a resistência passiva de pico foi semelhante para todos os valores de rigidez normal testados, contudo a resistência passiva a grandes deslocamentos apresentou maiores valores para  $K = 1,00 \cdot 10^{10}$  e  $K = 1,00 \cdot 10^{11}$  e menores valores para  $K = 1,00 \cdot 10^8$  e  $K = 1,00 \cdot 10^9$ . Quanto ao coeficiente de atrito microscópico, a Figura 5.14(c) demonstra que houve um acréscimo da resistência de pico com o aumento dos valores do coeficiente de atrito microscópico. Todavia, no que se refere à resistência passiva a grandes deslocamentos ocorreu uma grande incidência de ruídos.

Constata-se, portanto, que a variação das propriedades da barra transversal não influenciou significativamente o comportamento das amostras ensaiadas, excetuando-se o coeficiente de atrito microscópico cuja variação resultou em comportamentos distintos. Vale ressaltar que para todas as propriedades não foram consideradas as resistências passivas a grandes deslocamentos.

Conforme enfatizado no Capítulo 4, o atrito na parede frontal durante o ensaio de arrancamento pode causar a formação de uma zona de alta resistência próxima a esta parede. Diante disso, decidiu-se, verificar a influência da presença do atrito nas paredes da caixa de ensaio, sendo os resultados dessas simulações apresentados na Figura 5.15.

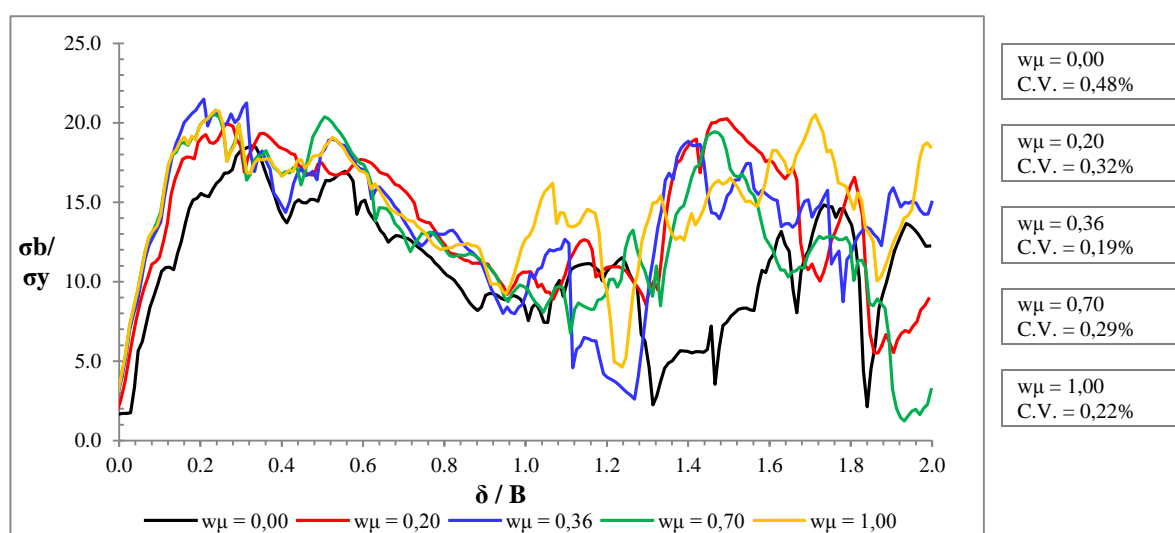


Figura 5.15 Influência do atrito nas paredes da caixa de ensaio.

Quanto ao atrito da parede, a Figura 5.15 demonstra que na ausência de atrito a resistência passiva de pico apresentou menores valores. Com o aumento dos valores de ângulo de atrito da parede da caixa de ensaios a resistência passiva de pico também aumentou, sendo que para valores do coeficiente de atrito da parede maiores do que 0,20 este incremento foi

menor, tendendo a se estabilizar. A resistência passiva a grandes deslocamentos apresentou uma incidência de ruídos de forma similar ao verificado no teste do ângulo de atrito microscópico. Diante do verificado, tem-se que um pequeno acréscimo no coeficiente de atrito da parede pode influenciar significativamente no comportamento da amostra ensaiada.

Para analisar a influência da forma e tamanho do membro transversal foram realizadas simulações de arrancamento em barras circulares e quadradas com diferentes dimensões. Os resultados dessas simulações estão apresentados na Figura 5.16, ilustrando cada dimensão adotada para a barra transversal.

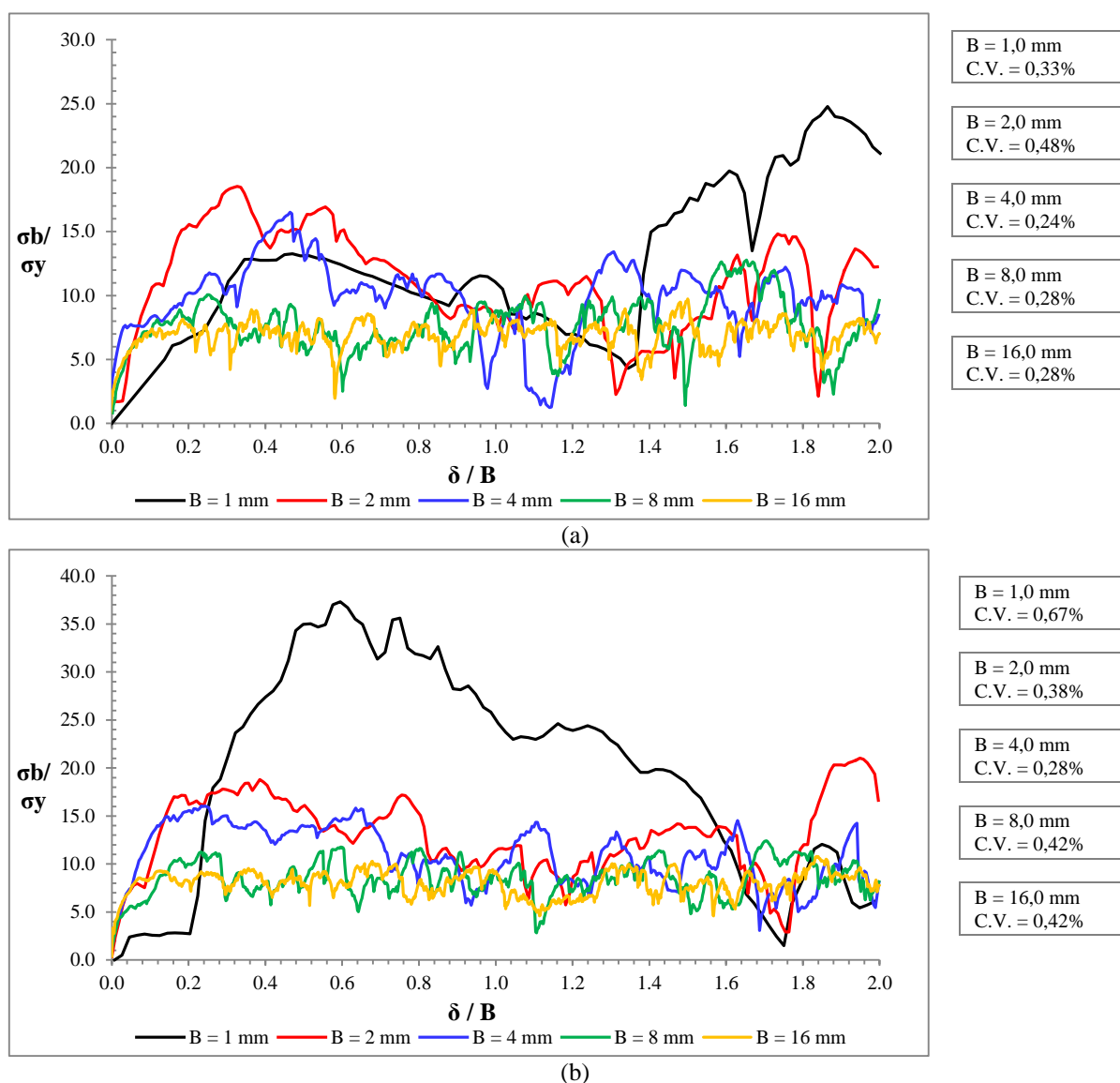


Figura 5.16 Influência da forma e tamanho da barra transversal: (a) Barra transversal circular; (b) Barra transversal quadrada.

Tanto para barra circular como para a barra quadrada observou-se uma tendência de comportamento na curva de resistência passiva normalizada *versus* deslocamento horizontal



normalizado. Nesta curva o aumento da espessura da barra resultou na diminuição da resistência passiva normalizada. Destaca-se que não é possível observar grandes diferenças entre a resistência passiva de pico e a resistência passiva a grandes deslocamentos nas barras com 8 mm e 16 mm, sendo que para a barra de 2 mm e 4 mm a resistência passiva de pico é sutilmente mais acentuada. Ambas as barras com 1 mm de diâmetro apresentam-se como exceção nessa análise, demonstrando um comportamento anômalo, no qual o início da trajetória sempre ocorreu com valores muito baixos de resistência passiva seguidos de um aumento abrupto nesta resistência. Isso pode ter sido consequência da pequena dimensão da barra em relação à dimensão dos grãos circundantes. Além disso, salienta-se que na barra quadrada a resistência de pico apresentou valores superiores aos valores apresentados pelas barras circulares, como também observado por Palmeira (1987) em ensaios de arrancamento em barras isoladas.

### 5.3 RETROANÁLISE DOS ENSAIOS DE PALMEIRA (1987)

No âmbito da realização das retroanálises e com o intuito de validar os resultados obtidos nas simulações dos ensaios de arrancamento, foram realizadas comparações desses resultados com os obtidos em ensaios reais por Palmeira (1987). As referidas simulações dos ensaios de arrancamento foram realizadas para areia de Leighton Buzzard nas graduações 7/14 e 14/25, sendo que para cada graduação foram utilizadas uma, duas e três barras transversais, de acordo com o exposto na Tabela 4.15. Os resultados das simulações realizadas com uma barra e para a areia na graduação 7/14 é apresentado na Figura 5.17. Já nas Figuras 5.18 e 5.19 são apresentados os resultados das simulações realizadas para a areia na graduação 14/25 para barra transversal circular e quadrada, respectivamente.

Em todos os gráficos apresentados neste trabalho com resultados de ensaios de arrancamento, as curvas suaves referem-se aos resultados dos ensaios reais (realizados por Palmeira (1987)) e as curvas com ruído dizem respeito aos resultados obtidos por meio das simulações realizadas.

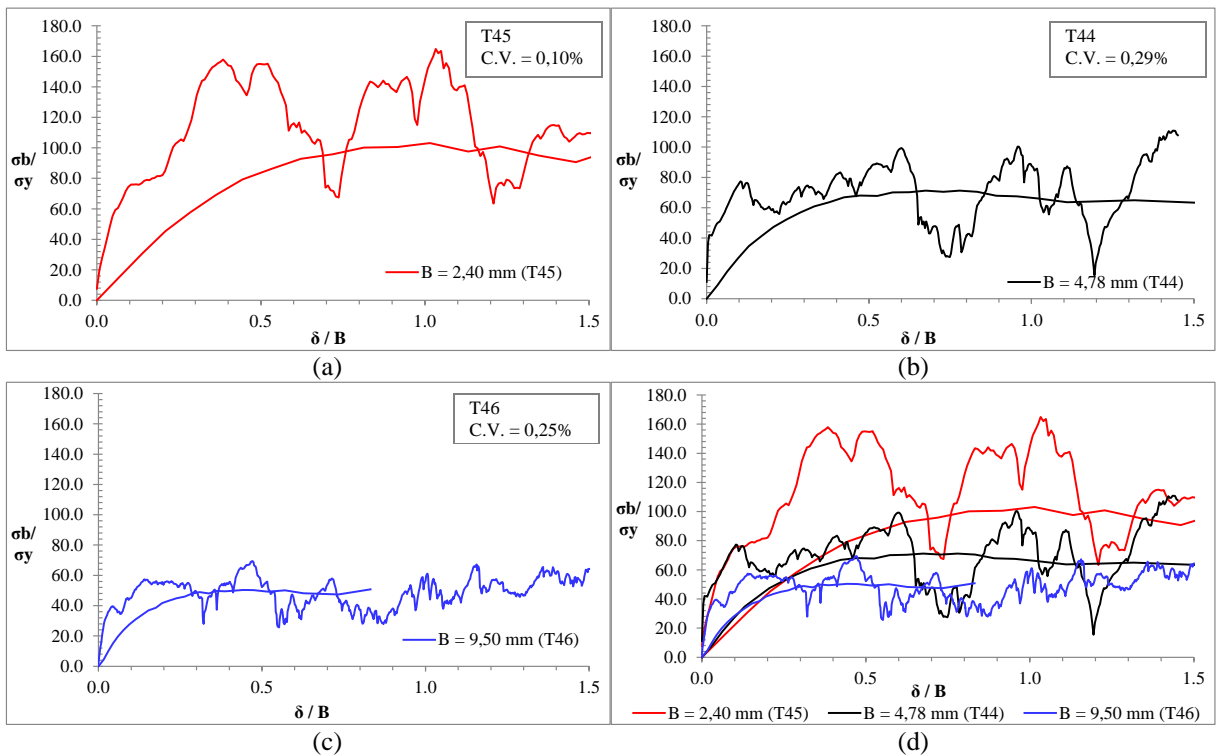
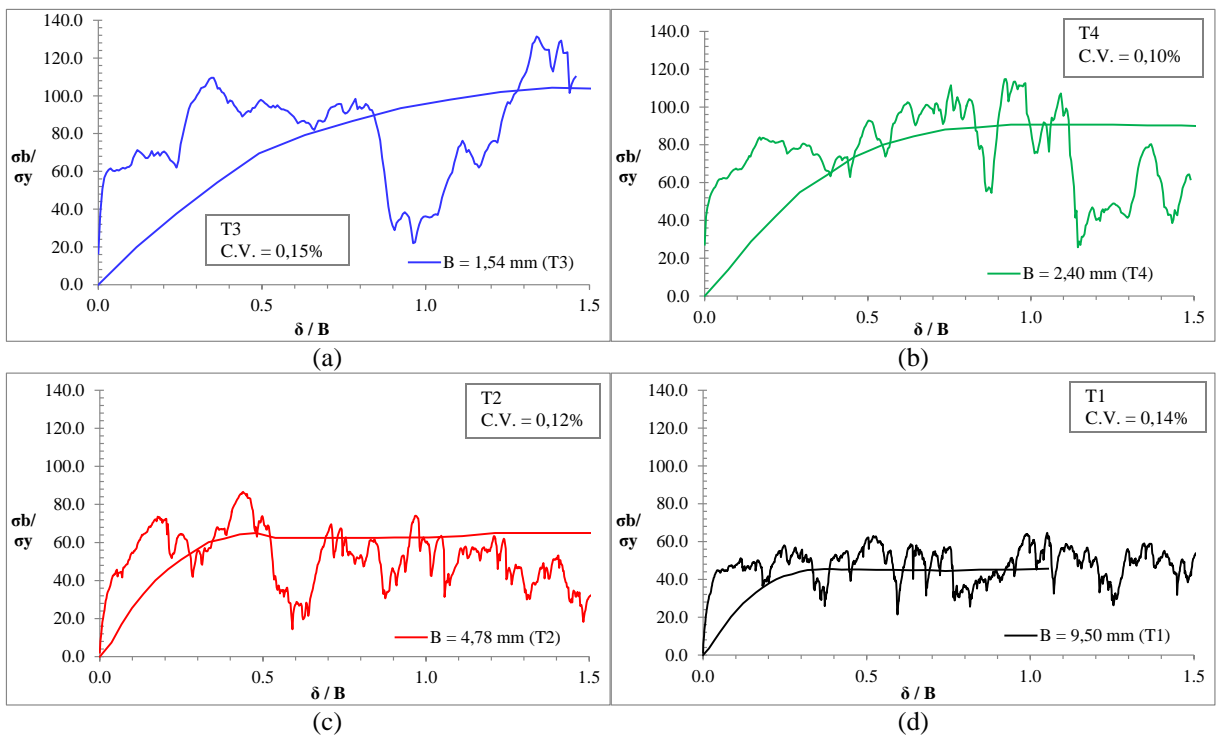


Figura 5.17 Simulações do ensaio de arrancamento em 1 barra - Areia de Leighton Buzzard graduação 7/14: (a) B = 2,40 mm; (b) B = 4,78 mm; (c) B = 9,50 mm; (d) Comparativo.



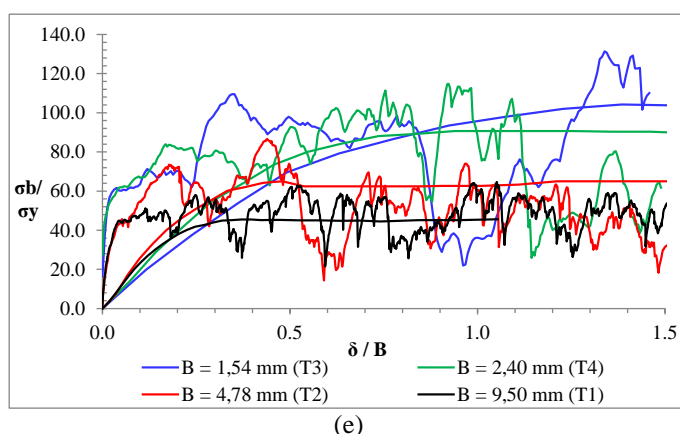


Figura 5.18 Simulações do ensaio de arrancamento em 1 barra circular - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25: (a) B = 1,54 mm; (b) B = 2,40 mm; (c) B = 4,78 mm; (d) B = 9,50 mm; (e) Comparativo.

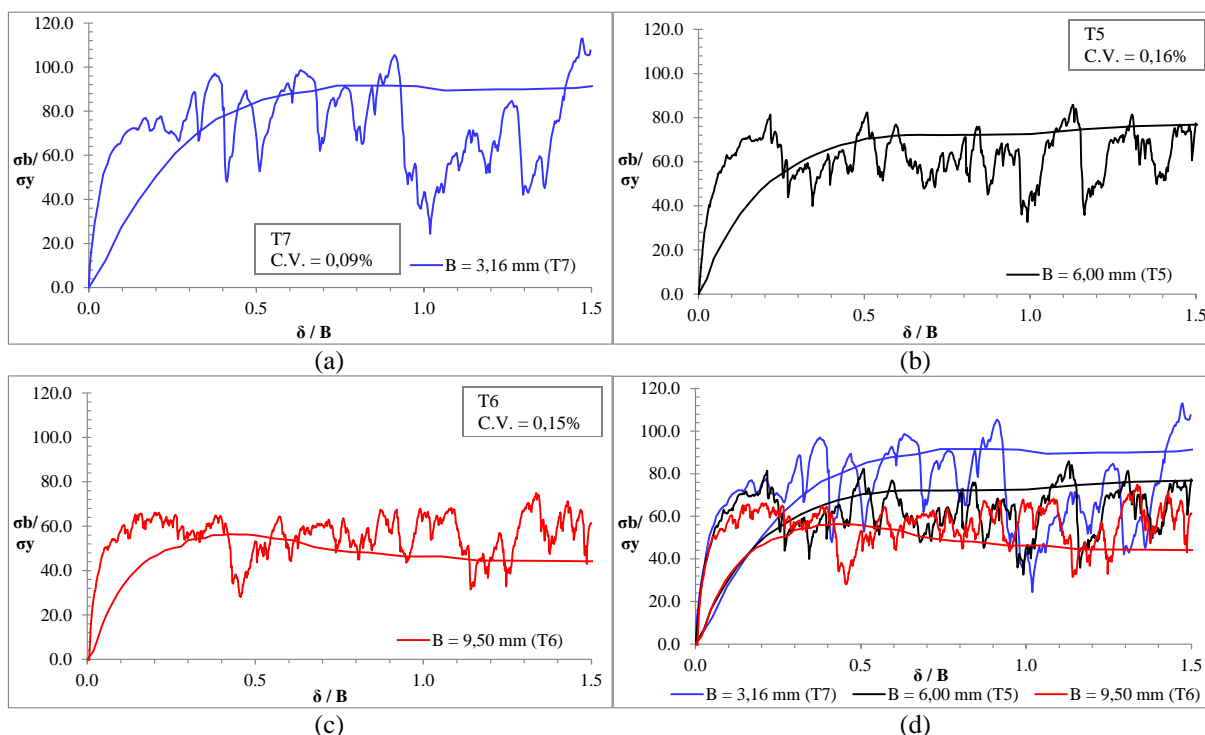


Figura 5.19 Simulações do ensaio de arrancamento em 1 barra quadrada - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25: (a) B = 3,16 mm; (b) B = 6,00 mm; (c) B = 9,50 mm; (d) Comparativo.

Conforme verificado anteriormente nas análises da influência do tamanho da barra transversal (Figura 5.16), os gráficos da Figura 5.17 e da Figura 5.19 apresentaram o mesmo padrão de comportamento, em que a resistência passiva normalizada diminui com o aumento da espessura da barra transversal tanto para os ensaios simulados como para os ensaios reais. Ambos os ensaios apresentaram uma grande coerência na trajetória e na magnitude dos valores de resistência passiva. Esta coerência foi verificada independentemente da graduação da areia e da forma das barras transversais utilizadas.

Foram plotadas na Figura 5.20 as curvas de resistência para barras transversais circulares e quadradas com as mesmas dimensões, demonstrando que a forma da barra influencia na resistência. O uso da barra quadrada resultou em uma resistência passiva de pico maior do que a apresentada pela barra circular. Já a resistência a grandes deslocamentos se manteve no mesmo patamar para ambas as formas utilizadas.

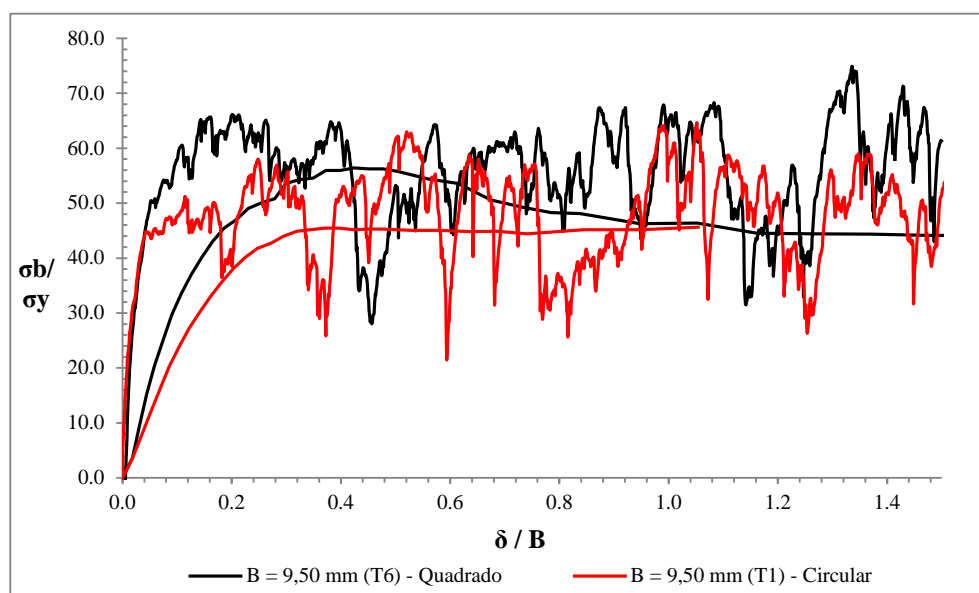


Figura 5.20 Influência da forma da barra transversal no ensaio de arrancamento em 1 barra.

Os resultados das simulações realizadas com duas barras para a areia na graduação 7/14 e 14/25 são apresentados nas Figuras 5.21 e 5.22. Já os resultados das simulações realizadas com três barras para a areia na graduação 14/25 são apresentados na Figura 5.23. Nestas figuras os resultados são expressos em termos de força *versus* deslocamento, sendo que as curvas suaves referem-se aos resultados dos ensaios reais e as curvas com ruído dizem respeito aos resultados dos ensaios simulados. Além disso, são apresentados nos Apêndices H e I os resultados detalhados destas simulações para duas e três barras, respectivamente. Salienta-se que os resultados são expressos em termos da resistência passiva normalizada *versus* deslocamento horizontal normalizado para cada barra.

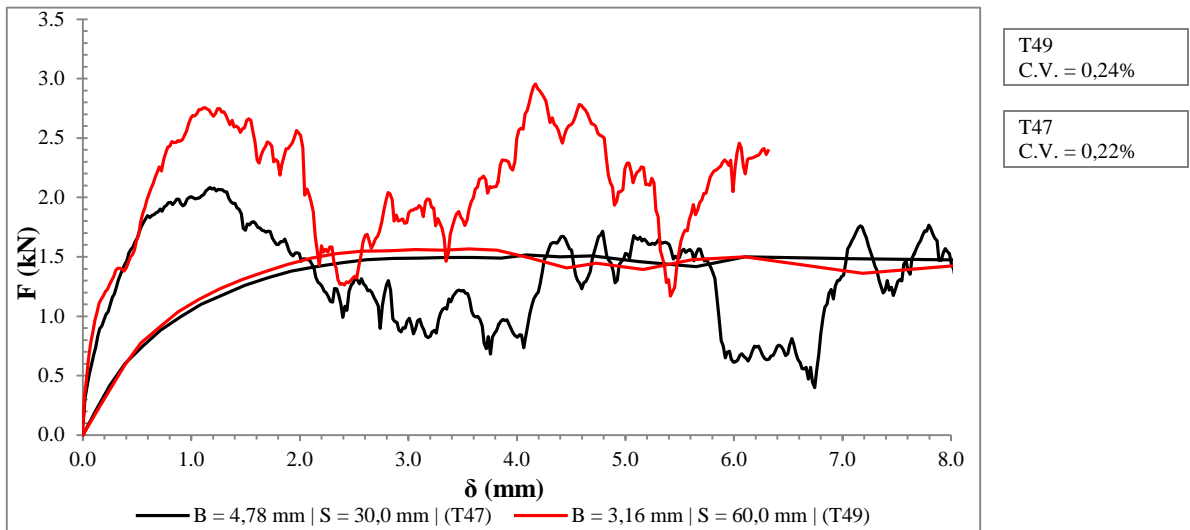
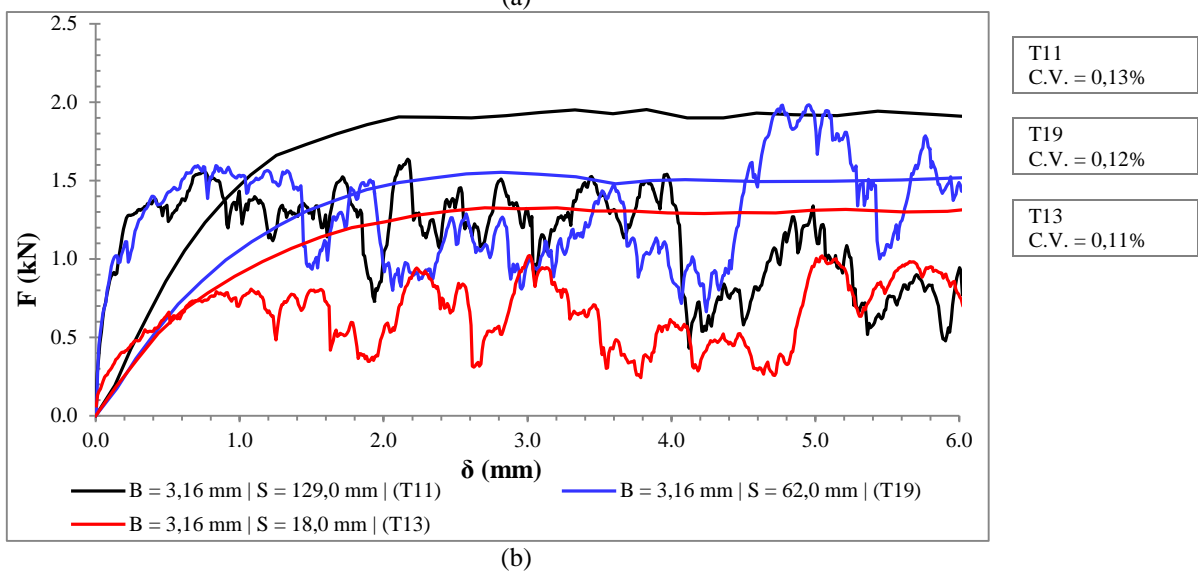
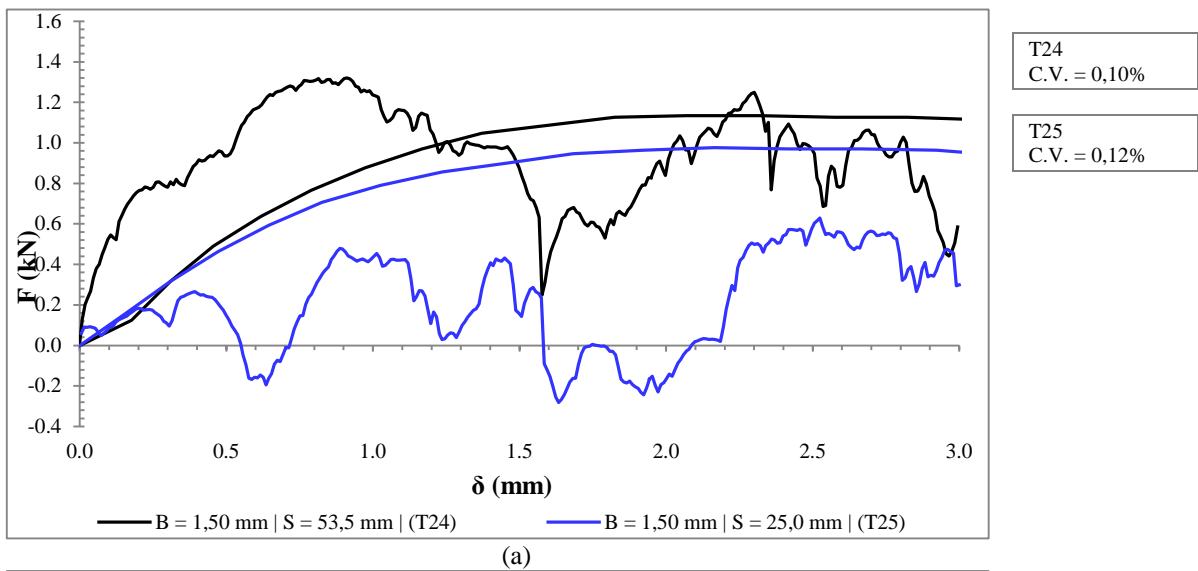
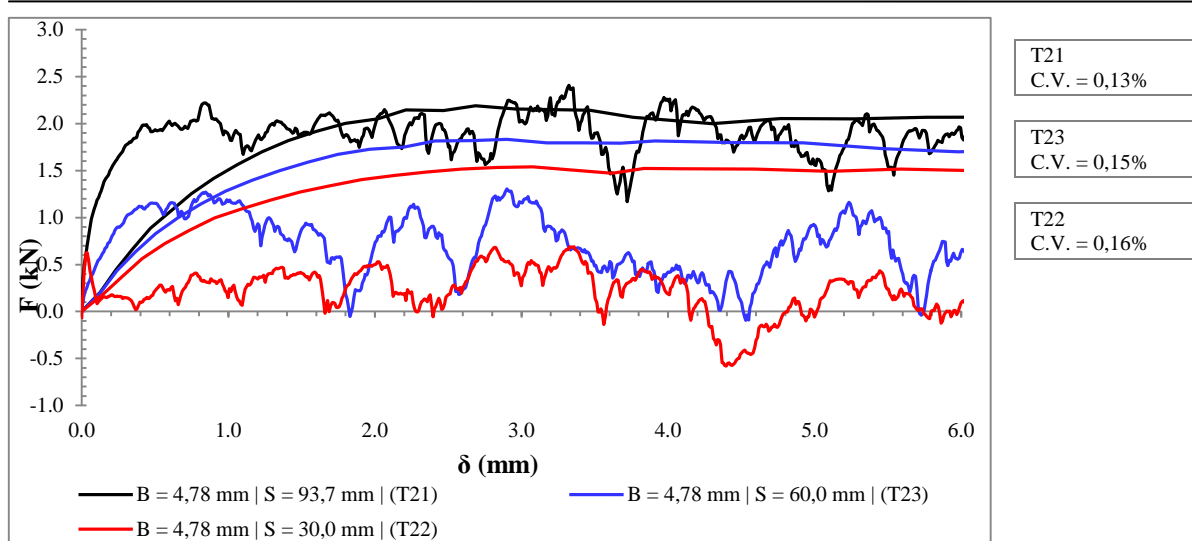


Figura 5.21 Simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras - Areia de Leighton Buzzard graduação 7/14.





(c)

Figura 5.22 Simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25: (a) B = 1,50 mm; (b) B = 3,16 mm; (c) B = 4,78 mm.

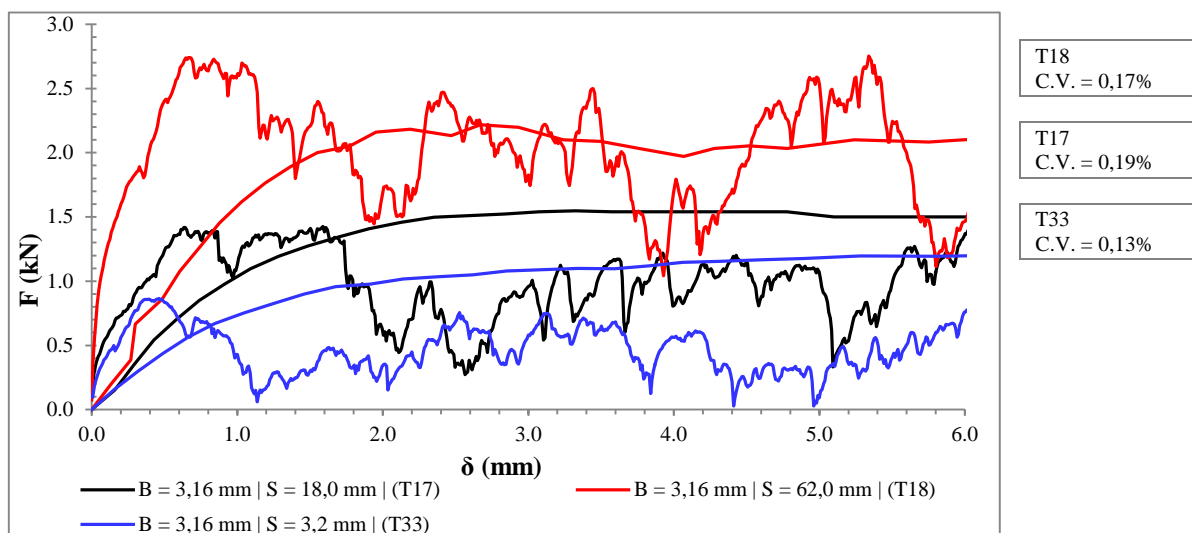
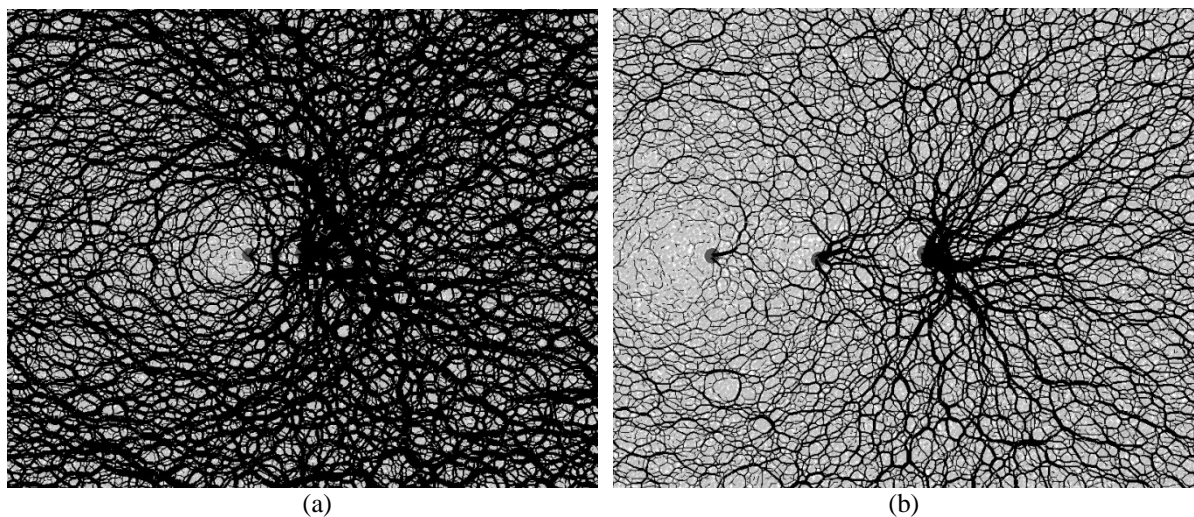


Figura 5.23 Simulações do ensaio de arrancamento em 3 barras - Areia de Leighton Buzzard graduação 14/25.

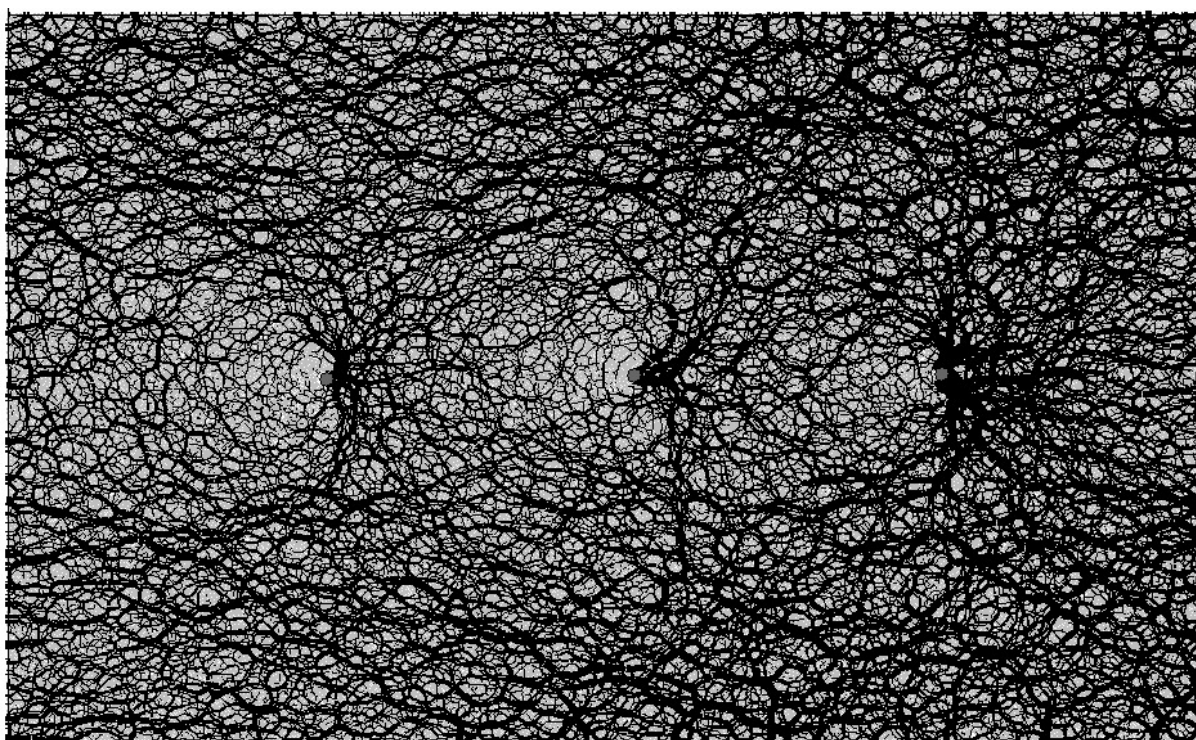
Na Figura 5.21 e na Figura 5.23 é possível observar que, independentemente da areia utilizada, os resultados das simulações apresentam trajetórias coerentes com as trajetórias dos ensaios reais. Em todos os gráficos verificou-se que a força de arrancamento é tanto maior quanto maior for o espaçamento entre as barras, o qual é medido entre as faces das barras. Por outro lado, no que tange à magnitude das forças verificou-se que quando o espaçamento entre as barras transversais diminui ocorre, em comparação com o ensaio real, uma queda acentuada da força de arrancamento prevista pelas simulações. Esta queda acentuada da força de arrancamento se dá, provavelmente, devido à queda da resistência passiva apresentada pelos membros transversais posteriores à barra transversal frontal. É possível observar até mesmo valores negativos nas simulações realizadas, conforme mostrado nos Apêndices H e I.

Embora valores negativos para a resistência passiva sejam fisicamente impossíveis, em um modelo de elementos discretos os valores negativos indicam apenas que a força resultante atuante na barra transversal não se dá no sentido contrário ao da velocidade de arrancamento, mas sim no mesmo sentido.

O aumento da força de arrancamento devido a maiores espaçamento entre as barras pode ser explicado pelo fato de que a interferência entre as barras diminui com o aumento do espaçamento. Desta forma, a barra posterior deixa de ser afetada pela zona de baixa resistência gerada pela barra transversal frontal, como pode ser visualizado na Figura 5.24. Esta figura, assim como no caso das análises paramétricas quanto à influência da parede frontal (Figura 5.13), apresenta as forças de contato por meio de retas que unem os centros das partículas que se tocam, sendo a espessura da reta proporcional à magnitude das referidas forças de contato.







(c)

Figura 5.24 Forças de contato para simulações do ensaio de arrancamento em três barras: (a)  $B = 3,16\text{mm}$ , espaçamento de  $3,2\text{ mm}$ ; (b)  $B = 3,16\text{mm}$ , espaçamento de  $18\text{ mm}$ ; (c)  $B = 3,16\text{mm}$ , espaçamento de  $62\text{ mm}$ .

A rede de forças de contatos obtidas nas simulações (Figura 5.24) se assemelha aos ensaios foto-elásticos realizados por Dyer (1985) (Figura 2.12), sendo possível observar, em ambas as figuras, uma maior concentração de forças à frente da barra transversal frontal do que nas barras posteriores. Também é possível visualizar a zona de baixa tensão formada atrás dos membros transversais.

Em todos os gráficos utilizados para ilustrar os resultados da retroanálise verificou-se que as trajetórias das simulações apresentaram uma maior rigidez do que as trajetórias dos ensaios realizados por Palmeira (1987). Em parte isso ocorre devido ao procedimento adotado na realização do ensaio real, no qual foi utilizado o método de chuva de areia na preparação da amostra. Neste método a areia que cai diretamente sobre a barra metálica tende a repicar, o que pode formar uma região de menor compacidade adjacente à barra, resultando, portanto, em uma diminuição da rigidez.



## Capítulo 6

### Conclusões

Verificou-se na presente pesquisa que o MED pode ser utilizado para avaliar, de forma qualitativa, a interação solo-geogrelha. Neste sentido foram realizadas, inicialmente, análises paramétricas para se estudar a influência de fatores como a velocidade do ensaio e os parâmetros micromecânicos, tais como rigidez normal, cisalhante e atrito microscópico. Para isso foram simulados ensaios biaxiais e de cisalhamento direto sob diversas condições, sendo realizados inicialmente os ensaios biaxiais como uma forma de se validar os códigos desenvolvidos. Quanto às análises paramétricas, cabem as seguintes conclusões:

- Tanto nos ensaios biaxiais como nos ensaios de cisalhamento direto, a velocidade do ensaio influenciou significativamente no comportamento da amostra, de modo que velocidades mais altas resultaram em uma resistência mais alta para a amostra. Para as simulações realizadas foi verificado que uma velocidade de 0,01 m/s foi suficiente para garantir a estabilização do modelo e assegurar um tempo de processamento adequado. Além disso, verificou-se que o monitoramento da tensão confinante ou tensão vertical é uma boa forma de avaliar a estabilização da simulação, tendo em vista que picos de tensão se mostraram mais evidentes nas velocidades mais altas testadas.
- Quanto à rigidez normal foi observado para ambos os ensaios que para valores elevados da rigidez no contato o modelo torna-se mais instável. Contudo, a variação deste parâmetro não influenciou significativamente as resistências de pico e a grandes deformações da amostra. Percebeu-se, porém, no ensaio de cisalhamento direto que para uma rigidez normal de  $1,0 \cdot 10^{11}$  N/m a instabilidade foi refletida na resistência. Tem-se então que para casos em que for utilizada uma rigidez normal acima da mencionada a velocidade do ensaio deve ser reduzida para se garantir a estabilização do modelo.
- Em ambos os ensaios, na comparação do ângulo de atrito macroscópico com o microscópico verificou-se uma proporcionalidade entre esses parâmetros. Já quando o ângulo de atrito microscópico é nulo existe a ocorrência de um ângulo de atrito macroscópico com cerca de  $10^\circ$ , sendo tal fato explicado por causa do

---

entrosamento entre as partículas. Isso comprova que parte do atrito macroscópico da amostra se deve ao entrosamento e outra parte ao atrito microscópico.

- Verificou-se que os valores obtidos nas simulações para o ângulo de atrito macroscópico apresentaram valores menores que os comumente observados em materiais granulares com propriedades semelhantes. Isso se deve a dois fatores principais: a utilização de partículas circulares e a simulação do modelo em duas dimensões. As partículas circulares, por não possuírem arestas vivas, tendem a diminuir o entrosamento entre si e, a simulação em duas dimensões não é capaz de reproduzir plenamente o comportamento de um material granular, notoriamente tridimensional.

Definidos os parâmetros micromecânicos foram simulados ensaios de arrancamento em uma barra transversal única no sentido de se evitar as complexidades advindas da interação entre várias barras transversais. Foram testadas, então, propriedades como: as dimensões da caixa de ensaio, as propriedades da barra transversal, o atrito nas paredes da caixa de ensaio e o tamanho da barra transversal. Nestes testes concluiu-se o seguinte:

- No que se refere ao tamanho da caixa de ensaio verificou-se que quanto maior a caixa de ensaio mais estável se apresenta o modelo, o que se refletiu no coeficiente de variação médio observado para cada tamanho da caixa de ensaio. Nas amostras ensaiadas foi identificado um mecanismo de ruptura semelhante ao apresentado por Peterson e Anderson (1980). Este mecanismo possui dimensões de aproximadamente  $7 \cdot B$ , contudo não se recomenda a utilização desses valores como referência para o tamanho da caixa de ensaios devido ao fato de que o incremento de tensões na parede frontal aumenta com a diminuição das dimensões da caixa de ensaios. Assim, foi observado que caixas de ensaios com dimensões de, pelo menos,  $40 \cdot B$  garantem uma boa estabilização do modelo apresentando um CV médio de 0,35%, valor muito próximo ao da caixa com  $80 \cdot B$ , que foi de 0,30%.
- Quanto às propriedades da barra transversal verificou-se que a variação da densidade e da rigidez normal não influenciou significativamente no comportamento da amostra. Já o aumento do ângulo de atrito microscópico proporcionou uma elevação da resistência passiva de pico. Foram testados até mesmo valores extremamente elevados para o atrito microscópico, sendo verificado que para  $\varphi_{\mu} > 2,00$  o incremento na resistência passiva tende a se estabilizar.

- A presença do atrito nas paredes da caixa de ensaios deve ser evitada, principalmente na parede frontal, conforme evidenciado na literatura. Esta condição pode ser facilmente imposta em um modelo de elementos discretos. Contudo, desejou-se verificar qual a influência da presença do atrito nestas paredes, sendo verificado que a resistência passiva aumenta com o aumento do atrito. Verificou-se também que este incremento na resistência passiva atinge um patamar máximo para valores de ângulo de atrito de aproximadamente  $11^\circ$  ( $w\mu = 0,20$ ).
- Quanto à forma e dimensões da barra transversal, pode-se concluir que, tanto para uma barra circular como para uma barra quadrada, a resistência passiva normalizada de pico diminui com o aumento das dimensões da barra transversal. Para barras com 2 mm e 4 mm foi verificada uma resistência de pico ligeiramente maior do que a resistência residual, já para barras com 8 mm e 16 mm tanto a resistência de pico como a residual permaneceram no mesmo patamar. Para barras transversais com dimensões próximas às das partículas (grãos) foi verificado um comportamento anômalo, o qual se deve ao baixo número de contatos existentes entre a barra e o solo, acarretando em incrementos abruptos na resistência.

Em seguida foi realizada a retroanálise dos ensaios realizados por Palmeira (1987). Foram simulados ensaios de arrancamento em uma, duas e três barras transversais para a areia de Leghton Buzzard nas graduações 7/14 e 14/25. A partir das retroanálises concluiu-se que:

- Para os ensaios com uma barra transversal foi verificado que a resistência passiva normalizada de pico diminui com o aumento das dimensões da barra transversal, independentemente da graduação da areia e da forma das partículas. Os resultados das simulações se mostraram coerentes com os resultados reais, inclusive quantitativamente, apresentando valores da mesma magnitude para a resistência passiva.
- A barra transversal quadrada levou à obtenção de valores superiores para a resistência passiva de pico quando comparados aos obtidos com o uso de uma barra circular. Já a resistência passiva a grandes deslocamentos apresentou valores semelhantes, independente da forma da barra.
- Os ensaios das simulações com duas e três barras transversais também se mostraram coerentes com os ensaios reais, sendo observado que a força de arrancamento apresentou menores valores quando o espaçamento entre os membros

transversais diminui. Isto se deve ao fato de que a interferência entre barras transversais é maior para espaçamentos pequenos, o que pôde ser observado por meio de uma rede de forças nos contatos.

- Nos casos em que o espaçamento entre membros transversais foi pequeno ( $S/B < 6$ ) os modelos simulados não apresentaram uma boa coerência no sentido da magnitude das forças, sendo que os resultados simulados apresentaram valores para a força de arrancamento abaixo dos obtidos por ensaios reais.

Apesar das vantagens apresentadas, algumas ressalvas devem feitas com relação ao MED:

- Apesar da utilização de recursos computacionais robustos o tempo de processamento se mostrou como um grande limitador para a realização das análises em tempo hábil. As maiores amostras geradas, em 2D, consistiram de 175.261 partículas e levaram 141 horas para serem concluídas. Assim, a realização das análises em três dimensões, com o número de partículas requerido, foi impossibilitada devido ao tempo necessário para sua conclusão.
- A velocidade de ensaio foi um fator de grande influência nas simulações, sendo necessário determinar uma velocidade pequena o suficiente para não mascarar os resultados e ao mesmo tempo não gerar um tempo de processamento inviável.
- A extrapolação do comportamento micromecânico para o macromecânico ainda é complexa e consiste em um dos grandes desafios para o MED.
- Verificou-se nas simulações realizadas uma grande ocorrência de ruídos que dificultaram a interpretação de alguns ensaios. Estes ruídos são inerentes aos modelos elementos discretos, contudo sua mitigação fugiu do escopo deste trabalho.

## 6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A utilização do MED em pesquisas na área da Geomecânica vem aumentando significativamente em função da evolução computacional nos últimos anos. Este panorama também se reflete no Brasil, sendo que este trabalho representa um passo na continuidade de uma linha de pesquisa, ainda incipiente, utilizando o MED dentro do Programa de Pós-Graduação em geotecnia da Universidade de Brasília. No contexto deste trabalho destaca-se a seguir algumas sugestões para pesquisas futuras:

- 
- Expandir as análises realizadas neste trabalho, realizando as simulações em três dimensões;
  - Simular em 3D ensaios de arrancamento de grandes dimensões, mediante a utilização de da computação paralela;
  - Utilizar, quando disponível, clusters para a análise de problemas de contorno, com um grande número de partículas;
  - Desenvolver estudos que avaliem as metodologias de homogeneização de ruídos em simulações que utilizem o MED;
  - Realizar as análises utilizando-se de modelos que contemplem a presença de fluidos intersticiais;
  - Simular materiais com a granulometria não-uniforme e com formas diferentes das circulares ou esféricas;
  - Avaliar a influência da anisotropia no comportamento dos materiais granulares.

## Referências Bibliográficas

- ABRAMENTO, M. (1998). Geossintéticos em estruturas de contenção e taludes íngremes. Curso sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia e meio ambiente, São Paulo, 1:1-32.
- AGUIAR, R. A. & VETERMATTI, J.C. (2004). Introdução. Manual Brasileiro de Geossintéticos. J. C Vetermatti (coord.), Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP, pp. 1-12.
- ALFARO, M.C., MIURA, N. & BERGADO, D.T. (1995). Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests. *Geotechnical Testing Journal*, 18 (2): 157-167.
- ALVARADO, L. A. S. (2006). Simulação bidimensional de corridas de detritos usando o Método de Elementos Discretos. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 154 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D6706-01: Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil. West Conshohocken.
- BAARS, VAN S. (1996). Discrete Element Analysis of Granular Materials. Doctor Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 135p.
- BAKEER, R.M., AHMED, H.A.R. & NAPOLITANO (1998). Pullout and Shear Tests on Geogrid Reinforced Lightweight Aggregate. *Geotextiles and Geomembranes* 16: 119-133.
- BELHEINE, N., PLASSIARD, J.P., DONZÉ, F.V., DARVE, F. & SERIDI, A. (2009). Numerical Simulation of Drained Triaxial Test Using 3D Discrete Element Modeling. *Computers and Geotechnics*, 36(1- 2): 320-331.
- BERGADO, D.T., CHAI, J. (1994). Pullout force displacement relationship of extensible grid reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(5):295-316.
- CASTRO, D.C. (1999). Ensaios de Arrancamento de Geogrelhas no Campo e no Laboratório. Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, 135p.
- CAVARRETTA, I. (2009). The influence of particle characteristics on the engineering behavior of granular materials. PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, UK, 420p.
- COLLIOS, A., DELMAS, P., GOURC, J.P. & GIROUD J.P. (1980). Experiments on soil reinforcement with Geotextiles. The use of geotextiles for soil improvement, ASCE National Convention, Portland, Oregon, UK, pp. 53-73.
- CHANG, D.T., SUN, T.S. & HUNG, F. (1995). Pullout mechanism of geogrid under confinement by sand and clayey soils. *Transportation Research Record*, New York, 1474:64-72.
- CHRISTOPHER, B.R. & BERG, R.R. (1990). Pullout evaluation of geosynthetics in cohesive soils. *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Den Hoedt, A.A. Balkema, Rotterdam, 2: (673-676).

CUNDALL, P.A. & STRACK, O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29: 47-65.

CUNDALL, P.A. (2002). A discontinuous future for numerical modeling in soil and rock. In Proc of the third international conference, Discrete Element Methods, Numerical Modelling of Discontinua, Edited by Cook and Jensen, Santa Fe, 3-4.

DELANEY, G, INAGAKI, S. & ASTE, T. (2007). Fine tuning DEM simulations to perform virtual experiments with three dimensional granular packings. *Granular and Complex Materials*, Y. Aste, T. Di Matteo & A. Tordesillas (eds.), World Scientific, Singapore, pp. 141-168.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.DIN. EN 13738: Geotextiles and geotextile-related products - Determination of pullout resistance in soil. Berlin, Germany.

DIAS, A.C. (2004). Análise Numérica da Interação Solo-Geossintético em Ensaios de arrancamento. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-121/04. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 102p.

DONZÉ, F.V., RICHEFEU, V. & MAGNIER, S. (2008). Advances in Discrete Element Method Applied to Soil, Rock and Concrete Mechanics. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 13.

DURAND, R. (2007). Análise tridimensional de estruturas geotécnicas submetidas a reforço e drenagem. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-054/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 137 p.

DURAN, J. (2000). Sands, powders, and grains: An introduction to the physics of granular materials, Springer, New York, NY, 245 p.

DYER, M.R. (1985). Observation of the Stress Distribution in Crushed Glass with Applications to Soil Reinforcement. Ph.D. thesis, University of Oxford, UK.

FARRAG, K., ACAR, Y.B., JURAN, I. (1993). Pull-out resistance of geogrid reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 12 (2), pp. 133-160.

HUANG, Z., YANG, Z.X. & WANG, Z. (2008). Discrete element modelling of sand behavior in a biaxial shear test. *Journal of Zhejiang University, SCIENCE A*, 9:1176-1183.

IBAÑEZ, J.P. (2008). Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 394 p.

INGOLD, T. S. (1983). Geotextiles: specification and testing. *Ground Engineering. Journal Geotechnical Engineering, ASCE*, 6 (109): 45-51.

ITASCA (1998). UDEC Universal Distinct Element Code v. 3.00. Minneapolis, Minnesota.

ITASCA (2004). PFC2D - Particle Flow Code in 2 Dimensions. Itasca Consulting Group Inc., Minnesota.

- JING, L. & STEPHANSSON, O. (2007). *Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 562 p.
- KAKUDA, F. M. (2005). Estudo de ensaios de arrancamento de geogrelha com utilização de um equipamento reduzido. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 124p.
- KOZICKI, J. & DONZÉ, F.V. (2008). Applying Open-Source software for numerical simulations using finite element or discrete element modeling methods. *Computer Methods in Applied Mechanics in Engineering*, 197(49-50): pp. 4429-4443.
- KUHN, M. R. (2006). *Oval and OvalPlot: Programs for analyzing dense particle assemblies with the Discrete Element Method*. Portland, USA. 98 p. Disponível em: <[http://faculty.up.edu/kuhn/oval/doc/oval\\_0618.pdf](http://faculty.up.edu/kuhn/oval/doc/oval_0618.pdf)> Acesso em: 21/11/2011.
- LADEIRA, M.A.S.A. & LOPES, M.L. (1995). Estudo dos fenômenos de interação solo-geossintéticos através de ensaios de arranque. *Geotecnia*, 74: 39-49.
- LOBO-GUERRERO, S. (2006). *Evaluation of Crushing in Granular Materials using Discrete Element Method and Fractal Theory*. PhD Thesis, School of Engineering, Pittsburgh, USA, 151 p.
- LOPES, M.L., LADEIRA, M. (1996). Influence of the confinement, soil density and displacement ratio on soil-geogrid interaction. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 14 (10), pp. 543-554.
- MAEDA, K. & HIRABAYASHI, H. (2006). Critical State of fabric in simulated granular media under shearing. *New Frontiers in Computational Geotechnics*, Xi'an, China, pp. 103-108.
- MCDOWELL, G.R., THOM, N.H., BROWN, S.F., KONIETZKY, H. & HARIRECHE, O. (2006). Discrete element modelling of geogrid-reinforced aggregates. *Geotechnical Engineering - ICE*, 159(1): 35-48.
- MECHSYS (2011). *Open Programming Library for Mechanical Systems*. Acesso em: 02/02/2011, < <http://mechsys.nongnu.org>>.
- MIYATA, K. (1996). Walls reinforced with fiber reinforced plastic geogrid in Japan. *Geosynthetics International*, 3: 1-11.
- NAKAMURA, T., MITACHI, T. & IKEURA, I. (2003). Estimating method for the in-soil deformation behavior of geogrid based on the results of direct box shear test. *Soil and Foundations*, 43 (1): 47-57.
- NEVES, C.E.V. (2009). *Comportamento de Materiais Granulares usando o Método dos Elementos Discretos*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-173/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 166 p.
- OCHIAI, H., OTANI, J., HIYASCHIC, HIRAI, T. (1996). The pullout resistance of geogrids in reinforced soils: *Geotextiles and Geomembranes*, 14(1): 19-42.



- O'SULLIVAN, C. (2002). The application of Discrete Element Modelling to Finite Deformation Problems in Geomechanics. Ph.D Thesis, University of California, Berkeley.
- O'SULLIVAN, C. (2011). Particulate Discrete Element Modeling: A Geomechanics Perspective (Applied Geotechnics). Spon Press, New York, NY, 576 p.
- PALMEIRA, E.M. (1987). The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests. PhD Thesis, Magdalen College, University of Oxford, UK, 238p.
- PALMEIRA, E.M. & MILLIGAN G. W. E. (1989). Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand. *Geotechnique*, 39(3): 511-524.
- PALMEIRA, E.M. (2004). Bearing force mobilization in pull-out tests on geogrids. *Geotextiles and Geomembranes*, 22 (6): 481-509.
- PALMEIRA, E.M. (2009). Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5): 368-390.
- PEDROSO, D. M. (2006). Representação matemática do comportamento mecânico cíclico de solos saturados e não saturados. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-039/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 224 p.
- PETROBRÁS (2011). PetroDEM - Petrobras Discrete Element Method. Acesso em: 03/02/2011, <petrodem.lccv.ufal.br>.
- SANDRONI, S.S., MELLO, L.G., GOMES, R.C. & VILAR, O.M. (2010). Brazilian research and practice with geosynthetics. 9th International Conference on Geosynthetics, IGS, Guarujá, Brazil, vol. 1: pp. 3-41.
- SHUKLA, S.K. & YIN, J. (2006). Fundamentals of geosynthetic engineering. Taylor & Francis/Balkema, AK Leiden, Netherlands, 401p.
- SIEIRA, A.C.C.F. (2003). Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha. Tese de Doutorado em Geotecnia, PUC, Rio de Janeiro, 363p.
- SUGIMOTO, M., ALAGIYAWANN, A. M. N., KADOGUCHI, K. (2001). Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests. *Geotextiles and Geomembranes* (19): 257-277.
- TEIXEIRA, S. H. C. (2003). Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados. Tese de Doutorado, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 214p.
- TEIXEIRA, S.H.C. & BUENO, B.S. (1999). Um equipamento para ensaios de arrancamento em geossintéticos. *Geossintéticos' 99*. Rio de Janeiro, 215-222.
- TUPA, N. (1994). Estudo da Aderência e Interação Solo-Geossintético. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, DF, 148p.
- ZEGHAL, M. (2004). Discrete-Element Method Investigation of the Resilient Behavior of Granular Materials. *Journal of Transportation Engineering-ASCE*, 130(4):503-509.

---

ZHANG, J., YASUFUKU, N. & OCHIAI, H. (2007). A few considerations of pullout test characteristics of geogrid reinforced sand using DEM analysis. *Geosynthetics Engineering Journal*, vol. 22 (1): pp. 103-110.

ZHU, H., ZHOU, Z., YANG, R. & YU, A. (2007). Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, vol. 62(13), pp. 3378-3396.

## Apêndice A

### Códigos - Teste de velocidade

```
;fname: memtest.FIS (Example of ball-generation procedure.)
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
; DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004) E NEVES (2009)
; =====
; Works for both PFC2D and PFC3D.
;
; =====
def bg_fillbox
;
; ----- Implements the ball-generation algorithm.
;
; INPUT: bg_h - height of sample
;         bg_w - width of sample
;         bg_l - length of sample (PFC3D only)
;         bg_n - final porosity of sample
;         bg_rmin - minimum ball radius
;         bg_rmax - maximum ball radius
;
; if dim = 2 then
;   _bg_makewalls2d
; else
;   _bg_makewalls3d
; end_if

; --- Compute number of balls to generate
; using the expression:
;         N = A(1 - n) / (pi*Rbar^2) (PFC2D)
;         N = 3V(1 - n) / (4*pi*Rbar^3) (PFC3D)
;
; _rbar = 0.5*( bg_rmin + bg_rmax )
; if dim = 2 then
;   _numballs = bg_h*bg_w*( 1.0 - bg_n ) / (pi*_rbar^2)
; else
;   _numballs = 3.0*bg_h*bg_w*bg_l*( 1.0 - bg_n ) / (4.0*pi*_rbar^3)
; end_if
; _rlo = 0.25 * bg_rmin
; _rhi = 0.25 * bg_rmax
; if dim = 2 then
;   _xl = 0.0
;   _xu = bg_w
;   _yl = 0.0
```

```

_yu = bg_h
command
  GENERATE x=( _xl, _xu) y=( _yl, _yu) &
           rad=( _rlo, _rhi)           &
           tries=10000000             &
           id=(1, _numballs)
end_command
else
  _xl = -0.5*bg_w
  _xu = 0.5*bg_w
  _yl = -0.5*bg_h
  _yu = 0.5*bg_h
  _zl = -0.5*bg_l
  _zu = 0.5*bg_l
command
  GENERATE x=( _xl, _xu) y=( _yl, _yu) z=( _zl, _zu) &
           rad=( _rlo, _rhi)           &
           tries=10000000             &
           id=(1, _numballs)
end_command
end_if

; --- Determine radius multiplier, [_m], so that we
;   achieve desired porosity, [bg_n].
;
_n0 = bg_poros
if dim = 2 then
  _m = ( (1.0 - bg_n) / (1.0 - _n0) )^(1.0/2.0)
else
  _m = ( (1.0 - bg_n) / (1.0 - _n0) )^(1.0/3.0)
end_if
command
  change rad mult _m
end_command
end

; =====
def bg_poros
;
; ----- Return the porosity of the current model.
;
_totval = 0.0
bp = ball_head
loop while bp # null
  if dim = 2 then
    _totval = _totval + pi*b_rad(bp)^2
  else
    _totval = _totval + (4.0/3.0)*pi*b_rad(bp)^3
  end_if
;
  bp = b_next(bp)
end_loop

if dim = 2 then
  _boxval = bg_h * bg_w
else
  _boxval = bg_h * bg_w * bg_l
end_if
bg_poros = 1.0 - ( _totval / _boxval )
end
; =====

```

```

def bg_setballprops
;
  bg_dens = bg_dens
  bg_kn = bg_kn
  bg_ks = bg_ks
  bg_fric = bg_fric
  command
    prop dens=bg_dens kn=bg_kn ks=bg_ks fric=bg_fric
  end_command
end
; =====
def _bg_makewalls2d
;
; --- Generate the four bounding walls
;
  _x0 = 0.0
  _y0 = 0.0
  _x1 = bg_w
  _y1 = 0.0
  command
    wall id=1 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
              nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
  end_command
  _x0 = bg_w
  _y0 = 0.0
  _x1 = bg_w
  _y1 = bg_h
  command
    wall id=2 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
              nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
  end_command
  _x0 = bg_w
  _y0 = bg_h
  _x1 = 0.0
  _y1 = bg_h
  command
    wall id=3 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
              nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
  end_command
  _x0 = 0.0
  _y0 = bg_h
  _x1 = 0.0
  _y1 = 0.0
  command
    wall id=4 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
              nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
  end_command
end
; =====
def _bg_makewalls3d
;
; --- Generate the six bounding walls
;
  _ptAx = -0.5 * bg_w
  _ptAy = -0.5 * bg_h
  _ptAz = 0.5 * bg_l
  _ptBx = 0.5 * bg_w
  _ptBy = -0.5 * bg_h
  _ptBz = 0.5 * bg_l
  _ptCx = 0.5 * bg_w

```

```

_ptCy = 0.5 * bg_h
_ptCz = 0.5 * bg_l
_ptDx = -0.5 * bg_w
_ptDy = 0.5 * bg_h
_ptDz = 0.5 * bg_l
_ptEx = -0.5 * bg_w
_ptEy = -0.5 * bg_h
_ptEz = -0.5 * bg_l
_ptFx = 0.5 * bg_w
_ptFy = -0.5 * bg_h
_ptFz = -0.5 * bg_l
_ptGx = 0.5 * bg_w
_ptGy = 0.5 * bg_h
_ptGz = -0.5 * bg_l
_ptHx = -0.5 * bg_w
_ptHy = 0.5 * bg_h
_ptHz = -0.5 * bg_l
command
  wall id=1 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
    face _ptHx,_ptHy,_ptHz &
        _ptDx,_ptDy,_ptDz &
        _ptAx,_ptAy,_ptAz &
        _ptEx,_ptEy,_ptEz
end_command
;
command
  wall id=2 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
    face (_ptCx,_ptCy,_ptCz) &
        (_ptGx,_ptGy,_ptGz) &
        (_ptFx,_ptFy,_ptFz) &
        (_ptBx,_ptBy,_ptBz)
end_command
;
command
  wall id=3 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
    face (_ptEx,_ptEy,_ptEz) &
        (_ptAx,_ptAy,_ptAz) &
        (_ptBx,_ptBy,_ptBz) &
        (_ptFx,_ptFy,_ptFz)
end_command
;
command
  wall id=4 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
    face (_ptCx,_ptCy,_ptCz) &
        (_ptDx,_ptDy,_ptDz) &
        (_ptHx,_ptHy,_ptHz) &
        (_ptGx,_ptGy,_ptGz)
end_command
;
command
  wall id=5 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
    face (_ptGx,_ptGy,_ptGz) &
        (_ptHx,_ptHy,_ptHz) &
        (_ptEx,_ptEy,_ptEz) &
        (_ptFx,_ptFy,_ptFz)
end_command
;
command
  wall id=6 fric=0.0 kn=1e8 ks=1e8 &
    face (_ptDx,_ptDy,_ptDz) &

```

```

                (_ptCx, _ptCy, _ptCz) &
                (_ptBx, _ptBy, _ptBz) &
                (_ptAx, _ptAy, _ptAz)

    end_command
end
; =====
def set_tim
    tim0 = clock/100.0
end
; =====
def get_tim
    get_tim = clock/100.0 - tim0
end
; =====
return
;EOF: memtest.FIS

```

```

;fname: memtest_2D.DAT
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004) E NEVES (2009)
; =====
set logfile memtest_2D_100k.LOG
set log on
; =====
new
set random
;
set echo off
    call memtest.FIS
    set_tim
    SET bg_h=202.25 bg_w=202.25 bg_l=202.25 bg_n=0.4 bg_rmin=0.5 bg_rmax=2.0
;N=5,000
    bg_fillbox
    SET bg_dens=2660.0 bg_kn=1e8 bg_ks=1e8 bg_fric=0.0
    bg_setballprops
set echo on
;
print get_tim
print info
print mem
cycle 1000
print get_tim
print info
print mem
cycle 1000
print get_tim
print info

```

```

print mem
; =====

;fname: memtest_3D.DAT
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
; DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004) E NEVES (2009)
; =====
set logfile memtest_3D_100k.LOG
set log on
; =====
new
set random
;
set echo off
  call memtest.FIS
  set_tim
  SET bg_h=40.85 bg_w=40.85 bg_l=40.85 bg_n=0.4 bg_rmin=0.5 bg_rmax=2.0
;N=5,000
  bg_fillbox
  SET bg_dens=2660.0 bg_kn=1e8 bg_ks=1e8 bg_fric=0.0
  bg_setballprops
set echo on
;
print get_tim
print info
print mem
cycle 1000
print get_tim
print info
print mem
cycle 1000
print get_tim
print info
print mem
; =====

```



## Apêndice B

### Códigos - Ensaio biaxial

```
;fname: biax.fis
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
; DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004) E NEVES (2009)
; =====
def set_tim
  tim0 = clock/100.0
end
;
;=====
def get_tim
  tot_runtime = clock/100.0 - tim0
end
;
;=====
def biax_setup
  n_stiff = n_stiff
  s_stiff = s_stiff
  w_kfac = w_kfac
  width = width
  height = height
  extend = extend
  rhi = rhi
  rlo = rlo
  poros = poros
  density = density
  fin_fric = fin_fric
  ini_fric = ini_fric
  _vmax = _vmax
;
  make_walls
  gen_balls
  install_meas_circle
end
;
;=====
def make_walls
;
  _x0 = -extend*width
  _y0 = 0.0
  _x1 = width*(1.0 + extend)
  _y1 = 0.0
```

```

command
  wall id=1 kn=n_stiff nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
end_command
wadd1 = find_wall(1)
;
_x0 = width
_y0 = -extend*height
_x1 = width
_y1 = height*(1.0 + extend)
command
  wall id=2 kn=n_stiff nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
end_command
wadd2 = find_wall(2)
;
_x0 = width*(1.0 + extend)
_y0 = height
_x1 = -extend*width
_y1 = height
command
  wall id=3 kn=n_stiff nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
end_command
wadd3 = find_wall(3)
;
_x0 = 0.0
_y0 = height*(1.0 + extend)
_x1 = 0.0
_y1 = -extend*height
command
  wall id=4 kn=n_stiff nodes (_x0,_y0) (_x1,_y1)
end_command
wadd4 = find_wall(4)
end
;
;=====
def gen_balls
;--- generate the balls and give them their properties
tot_vol = width*height
rbar    = 0.5 * (rlo + rhi)
num      = int((1.0 - poros) * tot_vol / (pi * rbar^2))
mult     = 1.6
rlo_0    = rlo / mult
rhi_0    = rhi / mult
command
  gen id=1,num rad=rlo_0,rhi_0 x=0,width y=0,height no_shadow tries
1000000
  prop dens=density kn=n_stiff ks=s_stiff fric=ini_fric
end_command
; Calculates porosity
_vp = 0.0
bp  = ball_head
loop while bp # null
  _vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
  bp  = b_next(bp)
end_loop
pmeas = 1.0 - (_vp / (width * height))
;
mult = sqrt((1.0 - poros) / (1.0 - pmeas))
command
  ini rad mul mult
end_command

```

```

end
;
;=====
def install_meas_circle
;
; ----- Install one measurement esphere at the middle of the specimen.
;         The meas. circle radius is chosen such that it remains the max
;         ball radii from walls.
;
if width <= height then
    meas_rad = (0.35*width)
else
    meas_rad = (0.35*height)
end_if
meas_x = 0.5*width
meas_y = 0.5*height
command
    measure id 1 x meas_x y meas_y rad meas_rad
end_command
end
;
;=====
def cws ; change lateral wall stiffnesses
w_stiff = w_kfac * n_stiff
command
    wall id 2 kn=w_stiff ks=w_stiff
    wall id 4 kn=w_stiff ks=w_stiff
end_command
end
;
;=====
def get_poros
while_stepping
    _vp = 0.0
    bp = ball_head
    loop while bp # null
        _vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
        bp = b_next(bp)
    end_loop
n_wall = 1.0 - (_vp / (new_xwidth * new_height))
e_wall = ((new_xwidth * new_height) / _vp) - 1.0
end
;
;=====
def get_ss ; determine average stress and strain at walls
while_stepping
    xdif = w_x(wadd2) - w_x(wadd4)
    ydif = w_y(wadd3) - w_y(wadd1)
    new_xwidth = width + xdif
    new_height = height + ydif
    wsxx = 0.5 * (w_xfob(wadd2) - w_xfob(wadd4)) / (new_height * 1.0)
    wsyy = 0.5 * (w_yfob(wadd3) - w_yfob(wadd1)) / (new_xwidth * 1.0)
    wexx = xdif / width
    weyy = ydif / height
    wevol = wexx + weyy
    defx = 2.0 * xdif / (width + new_xwidth)
    defy = 2.0 * ydif / (height + new_height)
    defvol = defx + defy
end

```

```

;
;=====
def get_gain ; determine servo gain parameters for x and y
  alpha = 0.5 ; relaxation factor
  sum_knx = 0.0
  cp = w_clist(wadd2) ; find contacts on x-walls
  loop while cp # null
    if c_nforce(cp) # 0.0 then
      sum_knx = sum_knx + c_kn(cp)
    end_if
    cp = c_b2clist(cp)
  end_loop
  cp = w_clist(wadd4)
  loop while cp # null
    if c_nforce(cp) # 0.0 then
      sum_knx = sum_knx + c_kn(cp)
    end_if
    cp = c_b2clist(cp)
  end_loop
  sum_knx = 0.5 * sum_knx ; take average of both opposing walls
  if sum_knx # 0.0 then
    gx = alpha * (height * 1.0) / (sum_knx * tdel)
  else
    gx = 0.0
  end_if
;
sum_kny = 0.0
cp = w_clist(wadd1) ; find contacts on y-walls
loop while cp # null
  if c_nforce(cp) # 0.0 then
    sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
  end_if
  cp = c_b2clist(cp)
end_loop
cp = w_clist(wadd3)
loop while cp # null
  if c_nforce(cp) # 0.0 then
    sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
  end_if
  cp = c_b2clist(cp)
end_loop
sum_kny = 0.5 * sum_kny ; take average of both opposing walls
if sum_kny # 0.0 then
  gy = alpha * (width * 1.0) / (sum_kny * tdel)
else
  gy = 0.0
end_if
end
;
;=====
def servo
  while_stepping
  if x_servo = 1 ; switch stress servo on or off
    _sgn = sgn( wsxx - sxxreq )
    if wsxx # 0.0 then
      w_xvel(wadd2) = gx * (wsxx - sxxreq)
    else
      w_xvel(wadd2) = _sgn * _vmax
    end_if
    if abs(w_xvel(wadd2)) > _vmax then

```

```

        w_xvel(wadd2) = _sgn * _vmax
    end_if
    w_xvel(wadd4) = - w_xvel(wadd2)
end_if
if y_servo = 1 ; switch stress servo on or off
    _sgn = sgn( wsyy - syyreq )
    if wsyy # 0.0 then
        w_yvel(wadd3) = gy * (wsyy - syyreq)
    else
        w_yvel(wadd3) = _sgn * _vmax
    end_if
    if abs(w_yvel(wadd3)) > _vmax then
        w_yvel(wadd3) = _sgn * _vmax
    end_if
    w_yvel(wadd1) = - w_yvel(wadd3)
end_if
end
;
;=====
def iterate
    loop while 1 # 0
        get_gain
        if abs((wsxx - sxxreq)/sxxreq) < sig_tol then
            if abs((wsyy - syyreq)/syyreq) < sig_tol then
                exit
            end_if
        end_if
        command
            cycle 100
        end_command
    end_loop
end
;
;=====
def set_ini ; set initial strains
    weyy_0 = weyy
    wevol_0 = wevol
    defy_0 = defy
    defvol_0 = defvol
end
;
;=====
def conf ; variables for histories
    avxy = wsxx
    devi = wsyy - avxy ; deviatoric stress
    deax = weyy - weyy_0 ; axial strain
    devol = wevol - wevol_0 ; volumetric strain
    conf = avxy ; confining stress
    axstrain = defy - defy_0
    volstrain = defvol - defvol_0
end
;
;=====
def accel_platens
; ----- Accelerates the platens to achieve vel of _vfinal in _nsteps,
;         using _nchunks
    _niter = _nsteps / _nchunks
    loop _chnk (1,_nchunks)
        if _close = 1 then
            _vel = _chnk*( _vfinal/_nchunks)

```

```

else
  _vel = -_chnk*(_vfinal/_nchunks)
end_if
_mvel = -_vel
command
  wall id 1 yvel= _vel
  wall id 3 yvel= _mvel
  cycle _niter
end_command
end_loop
end
;
;=====
def run_biax
  loop while 1 # 0 ; infinite loop
    get_gain
    command
      cycle 100
    end_command
    if deax <= deax_lim then
      exit
    end_if
  end_loop
end
;
;=====
;EOF: biax.fis

```

```

;fname: 01_gen.dat   Creation of particles - biaxial sample
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004) E NEVES (2009)
; =====
; ==> Initial setup <===
new
set random ; reset random-number generator
set disk on ; treat balls as disks of unit thickness
set echo off
call 'biax.fis'
set logfile '01_gen.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <===
set pinterval 20
history reset
history nstep=20
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf

```

```

history id=10 wsxx
history id=11 wsyy
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 10 11 vs step
plot create assembly
plot add ball lorange wall black
set echo on
;
; ==> Geometric properties <==
set width   = 0.050 & ; width of box [m]
  height    = 0.100 & ; height of box [m]
  extend    = 0.20  & ; Wall offset
  rhi       = 1.00e-3 & ; maximum radii [m]
  rlo       = 0.59e-3 ; minimum radii [m]
;
; ==> Mechanical properties <==
set n_stiff = 1e9 & ; normal contact stiffness
  s_stiff   = 1e9 & ; shear contact stiffness
  w_kfac    = 0.10 & ; Wall stiffness factor (w_stiff=w_kfac*n_stiff)
  poros     = 0.15 & ; desired porosity
  density   = 2660 & ; density
  ini_fric  = 0.00 & ; friction coefficient at initial stage
  fin_fric  = 0.36  & ; friction coefficient at final stage
;
; ==> Execute <==
set_tim           ; start the clock
biax_setup        ; read the input data and generate the assembly
cycle 5000        ; cycle
prop fric fin_fric ; set final friction coef.
solve             ; cycle until eq.
get_tim           ; get runtime
get_poros         ; get porosity and void ratio
;
; ==> Create data and save files <==
print n_wall e_wall wsxx wsyy tot_runtime info
save '01_gen.sav'
set log off
;
;=====
;EOF: 01_gen.dat

```

```

;fname: 02_conf_1.dat   Packing of particles - biaxial sample
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;

```

```

; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004) E NEVES (2009)
; =====
; ==> Initial setup <===
new
set echo off
res '01_gen.sav' ; restore assembly
set logfile '02_conf_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <===
set pinterval 50
history reset
history nstep=50
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 new_xwidth
history id=4 new_height
history id=5 n_wall
history id=6 e_wall
history id=7 meas porosity id=1
history id=10 wsxx
history id=11 wsyy
history id=12 wexx
history id=13 weyy
history id=50 gx
history id=51 gy
plot current 0
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 10 11 vs step
plot create strain
plot add his 12 13 vs step
plot create assembly
plot add ball lorange wall black
set echo on
;
; ==> Required stress and servo parameters <===
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set sxxreq = 5.0e4 &
    syyreq = 5.0e4 &
    sig_tol= 0.005 &
    x_servo= 1 &
    y_servo= 1 &
    _vmax = 1.0e1
set echo off
;
; ==> Execute <===
cws
set log off
set_tim
iterate ; get all stresses to requested state
get_tim
set log on
;

```



```

; ==> Create data and save files <===
get_poros
set echo on
print n_wall e_wall tot_runtime info
set echo off
save '02_conf_1.sav'
history write 5 6 7 &
      file '02_conf_1.txt'
set log off
;
;=====
;EOF: 02_conf_1.dat

```

```

;fname: 03_rup_1.dat Determine elastic properties - biaxial sample
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
; DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004) E NEVES (2009)
; =====
; ==> Initial setup <===
new
set echo off
res '02_conf_1.sav' ; restore assembly
set logfile '03_rup_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <===
set pinterval 100
history reset
history nstep=100
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 n_wall
history id=4 e_wall
history id=5 meas porosity id=1
history id=10 wsxx
history id=11 wsyy
history id=12 wexx
history id=13 weyy
history id=14 defx
history id=15 defy
history id=50 gx
history id=51 gy
history id=100 conf
history id=101 devi
history id=102 deax
history id=103 devol
history id=104 volstrain
history id=105 axstrain
plot current 0

```

```
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot destroy 5
plot create shear
plot add his 101 vs 102
plot create def
plot add his 103 vs 102
plot create conf
plot add his 100 vs step
plot create assembly
plot add ball lorange wall black
set echo on
;
; ==> Set parameters <===
set _vfinal= 1.0e-2 _nsteps= 400 _nchunks= 10
set _close= 1 ; load
set deax_lim= -10e-2
;
; ==> Execute <===
set log off
set_ini
set y_servo = 0
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set_tim
accel_platens
run_biax
ini xvel 0 yvel 0 spin 0
get_tim
;
; ==> Create data and save files <===
get_poros
set log on
print n_wall e_wall tot_runtime info
set echo off
  save '03_rup_1.sav'
  history write 10 11 101 102 103 4 &
    file '03_rup_1.txt'
  set log off
;
;=====
;EOF: 03_rup_1.dat
```

## Apêndice C

### Códigos - Ensaio de cisalhamento direto

```
; Filename: ds2.fis
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
; DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; PURPOSE: FISH functions comprising the PFC2D direct shear test envir.
;
; =====
def ds2_setup
;
; ----- Create a parallelepiped sample bounded by a shear box of 8 walls.
;
  wlx = ds2_xlen
  wly = ds2_ylen
  extend = ds2_ext
  _rmax = ds2_rhi
  _rmin = ds2_rlo
  _n = ds2_n_req
  _ntries = ds2_numtries
;
  ds2_makewalls
  ds2_genballs
  ds2_install_meas_circle
  ds2_wss
end
;
; =====
def ds2_makewalls
;
; ----- Create the 8 bounding walls. These are made [l_ext] times
; longer in each direction than the initial specimen dimensions.
;
; --- Create the opposing x-walls
;
  _x0 = 0.5*wlx
  _y0 = 0.0
  _x1 = 0.5*wlx
  _y1 = 0.5*wly*extend
  command
    wall id=1 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
  end_command
```

```

wpx1 = find_wall(1)
_x0 = 0.5*wlx
_y0 = -0.5*wly*extend
_x1 = 0.5*wlx
_y1 = 0.0
command
  wall id=2 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpx2 = find_wall(2)
_x0 = -0.5*wlx
_y0 = 0.5*wly*extend
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = 0.0
command
  wall id=3 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpx3 = find_wall(3)
_x0 = -0.5*wlx
_y0 = 0.0
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = -0.5*wly*extend
command
  wall id=4 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpx4 = find_wall(4)
;
; --- Create the opposing y-walls
;
_x0 = 0.5*wlx
_y0 = 0.5*wly
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = 0.5*wly
command
  wall id=5 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpy1 = find_wall(5)
_x0 = -0.5*wlx
_y0 = -0.5*wly
_x1 = 0.5*wlx
_y1 = -0.5*wly
command
  wall id=6 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpy2 = find_wall(6)
;
; --- Create the edge walls
;
_x0 = 0.5*wlx*1.4
_y0 = 0.0
_x1 = 0.5*wlx
_y1 = 0.0
command
  wall id=7 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpe1 = find_wall(7)
_x0 = -0.5*wlx*1.4
_y0 = 0.0
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = 0.0
command

```

```

    wall id=8 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpe2 = find_wall(8)
end
;
;=====
def ds2_genballs
;
; ----- Generate initial particle assembly contained within 8 frictionless
;         walls.
;
tot_vol = wlx * wly
rbar    = 0.5 * (_rmin + _rmax)
num     = int((1.0 - _n) * tot_vol / (pi * rbar^2))
mult    = 1.6
rlo_0   = _rmin / mult
rhi_0   = _rmax / mult
_xl     = -0.5*wlx
_xu     = 0.5*wlx
_yl     = -0.5*wly
_yu     = 0.5*wly
command
    generate id=(1,@num) &
            rad=(@rlo_0,@rhi_0) &
            x=(@_xl,@_xu) y=(@_yl,@_yu) &
            no_shadow &
            tries = @_ntries
    prop dens=@ball_dens kn=@ball_nstiff ks=@ball_sstiff fric=0.0
end_command
;
; --- Calculates porosity.
;
_vp = 0.0
bp = ball_head
loop while bp # null
    _vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
    bp = b_next(bp)
end_loop
pmeas = 1.0 - (_vp / tot_vol)
;
; --- Determine radius multiplier, [mult], so that we
;         achieve desired porosity, [_n].
;
mult = sqrt((1.0 - _n) / (1.0 - pmeas))
command
    ini rad mul @mult
end_command
end
;
;=====
def ds2_install_meas_circle
;
; ----- Install one measurement circle at the middle of the specimen.
;         The meas. circle radius is chosen such that it remains the max
;         ball radii from walls.
;
meas_rad = (0.5*min(wlx,wly)) - _rmax
meas_x = 0.0
meas_y = 0.0
command

```

```

    measure id 1 x @meas_x y @meas_y rad @meas_rad
end_command
end
;
;=====
def ds2_bw_prop
;
; ----- Set walls and balls properties.
;
ball_dens    = ball_dens
ball_fric    = ball_fric
ball_nstiff  = ball_nstiff
ball_sstiff  = ball_sstiff
wall_fric    = wall_fric
wall_nstiff  = wall_nstiff
wall_sstiff  = wall_sstiff
;
; --- Set ball properties:
;
command
prop dens=@ball_dens kn=@ball_nstiff ks=@ball_sstiff fric=@ball_fric
end_command
;
; --- Set wall properties:
;
command
wall id=1 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
wall id=2 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
wall id=3 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
wall id=4 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
wall id=5 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
wall id=6 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
wall id=7 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
wall id=8 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
end_command
end
;
;=====
def ds2_wss
; ----- Compute gross stress and strain for sample,
;         based on wall forces divided by contact areas.
;
while_stepping
ydif = w_y(wpy1) - w_y(wpy2)
s_wly = wly + ydif
;
ds2_wsxu = (w_xfob(wpx1) - w_xfob(wpx3)) / (s_wly * 1.0)
ds2_wsxb = (w_xfob(wpx2) - w_xfob(wpx4)) / (s_wly * 1.0)
ds2_wsxx = 0.5 * (ds2_wsxu + ds2_wsxb)
ds2_wsyu = w_yfob(wpy1) / (wlx * 1.0)
ds2_wsyb = (-w_yfob(wpy2)) / (wlx * 1.0)
ds2_wsy = 0.5 * (ds2_wsyu + ds2_wsyb)
;
ds2_fhu = w_xfob(wpx1) + w_xfob(wpx3) + w_xfob(wpy1) + w_xfob(wpe1)
ds2_fhb = w_xfob(wpx2) + w_xfob(wpx4) + w_xfob(wpy2) + w_xfob(wpe2)
ds2_fh = ds2_fhu + ds2_fhb
ds2_dh = w_x(wpx4)
ds2_dv = w_y(wpy1)
end

```

```

;
;=====
def ds2_porosity
;
; ----- Return the porosity of the specimen.
;
while_stepping
tot_vol = wlx * s_wly
_vp = 0.0
bp = ball_head
loop while bp # null
_vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
bp = b_next(bp)
end_loop
ds2_n = 1.0 - (_vp / tot_vol)
ds2_e = ( tot_vol / _vp ) - 1.0
end
;
;=====
def ds2_servo_gain
;
; ----- Determine loading servo gain parameters.  If servo not yet seated,
;         set gain parameter to zero.
;
ii=pre_cycle ; insure that all contact info. is updated
;
if ds2_servo_alpha = 0 then ; set default value
ds2_servo_alpha = 0.5
end_if
;
if ds2_servo_yon = 1
sum_kny = 0.0
cp = w_clist(wpy1)
loop while cp # null
if c_nforce(cp) # 0.0 then
sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
end_if
cp = c_b2clist(cp)
end_loop
if sum_kny # 0.0 then
ds2_servo_gy = ds2_servo_alpha * (wlx * 1.0) / (sum_kny * tdel)
else
ds2_servo_gy = 0.0
end_if
end_if
if ds2_servo_yon = 2
sum_kny = 0.0
cp = w_clist(wpy1)
loop while cp # null
if c_nforce(cp) # 0.0 then
sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
end_if
cp = c_b2clist(cp)
end_loop
cp = w_clist(wpy2)
loop while cp # null
if c_nforce(cp) # 0.0 then
sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
end_if
cp = c_b2clist(cp)

```

```

end_loop
sum_kny = 0.5 * sum_kny ; take average of both opposing walls
if sum_kny # 0.0 then
  ds2_servo_gy = ds2_servo_alpha * (wlx * 1.0) / (sum_kny * tdel)
else
  ds2_servo_gy = 0.0
end_if
end_if
end
;
;=====
def ds2_servo
;
; ----- Servo-mechanism to maintain requested wall stresses.
;       (Register via "set fishcall 0 ds2_servo".)
;
if ds2_servo_yon = 1 then
  _sgn = sgn( ds2_wsyu - ds2_wsyy_req )
  if ds2_wsyu # 0.0 then
    w_yvel(wpy1) = ds2_servo_gy * (ds2_wsyu - ds2_wsyy_req)
  else
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  if abs(w_yvel(wpy1)) > _vmax then
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  w_yvel(wpy2) = 0.0
end_if
if ds2_servo_yon = 2 then
  _sgn = sgn( ds2_wsyu - ds2_wsyy_req )
  if ds2_wsyu # 0.0 then
    w_yvel(wpy1) = ds2_servo_gy * (ds2_wsyu - ds2_wsyy_req)
  else
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  if abs(w_yvel(wpy1)) > _vmax then
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  w_yvel(wpy2) = - w_yvel(wpy1)
end_if
end
;
;=====
def ds2_install_stress
;
; ----- Moves confining walls in attempt to obtain requested stress
;       [ds2_wsyy_req] w/i tolerance [sig_tol].
;       (Assumes that ds2_servo function is an active fishcall.)
;
loop while 1 # 0
  ds2_servo_gain
  ;
  _yokay = 0
  if ds2_servo_yon = 0 then
    _yokay = 1
  end_if
  if ds2_servo_yon # 0 then
    if abs((ds2_wsyu - ds2_wsyy_req)/ds2_wsyy_req) <= ds2_ws_tol then
      _yokay = 1
    end_if
  end_if
end_if

```



```

end_if
;
if _yokay = 1 then
  exit
end_if
;
command
  cycle 100
end_command
end_loop
end
;
;=====
def ds2_set_ini
  ds2_dv_0 = ds2_dv
  ds2_dh_0 = ds2_dh
  ds2_fhu_0 = ds2_fhu
  ds2_fhb_0 = ds2_fhb
end
;
;=====
def ds2_shear_his
  vdisp = ds2_dv - ds2_dv_0
  hdisp = ds2_dh - ds2_dh_0
  shear_area = wlx - hdisp
  _fhu = ds2_fhu - ds2_fhu_0
  _fhb = ds2_fhb - ds2_fhb_0
  ds2_shear_u = _fhu / (shear_area * 1.0)
  ds2_shear_b = _fhb / (shear_area * 1.0)
  ds2_shear = 0.5 * (abs(ds2_shear_u) + abs(ds2_shear_b))
end
;
;=====
def accel_walls
; ----- Accelerates the bottom walls to achieve vel of _vfinal in _nsteps,
;   using _nchunks
  _vfinal = ds2_shear_vel
  _niter = _nsteps / _nchunks
  loop _chnk (1, _nchunks)
    _vel = _chnk * (_vfinal / _nchunks)
    w_xvel(wpx2) = _vel
    w_xvel(wpx4) = _vel
    w_xvel(wpy2) = _vel
    w_xvel(wpe2) = _vel
  command
    cycle @_niter
  end_command
end_loop
end
;
;=====
def run_shear
  ds2_dh_lim = wlx * 0.1
  loop while 1 # 0 ; infinite loop
    ds2_servo_gain
  command
    cycle 100
  end_command
  if ds2_dh >= ds2_dh_lim then
    exit

```

```

    end_if
  end_loop
end
;
;=====
def ds2_change_meas_circle
;
; ----- Change the measurement circle center to the middle of the
;       sheared specimen.
;
  meas_rad = (0.5*min(wlx - ds2_dh , s_wly - ds2_dv)) - _rmax
  meas_x = ds2_dh / 2
  meas_y = 0.0
  command
    measure id 1 x @meas_x y @meas_y rad @meas_rad
  end_command
end
;
;=====
def set_t0
tim0 = clock
end
;
;=====
def get_time
tim = (clock - tim0) / 100.0
end
;
;=====
;EOF ds2.fis

```

```

;fname: 01_gen.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;       DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; ==> Initial setup <===
;
new
set random
set safe_conversion on
set disk on
set echo off
  call 'ds2.fis'
  set logfile '01_gen.log'
  set log on
; ==> Install histories and plots <===
set pinterval 100

```

```

history reset
history nstep=100
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=10 ds2_wsxx
history id=11 ds2_wsyu
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 10 11 vs step
plot create assembly
plot add ball lorange wall black
set echo on
;
; ==> Geometric properties <===
;
set ds2_xlen = 0.050 & ;Largura [m]
    ds2_ylen = 0.050 & ;Profundidade [m]
    ds2_ext  = 1.20   & ;Extensão das paredes [m]
;
; ==> Particle generation properties <===
;
set ds2_rhi      = 1.00e-3 & ;Raio máximo [m]
    ds2_rlo      = 0.59e-3 & ;Raio mínimo [m]
    ds2_n_req    = 0.15    & ;Porosidade requerida
    ds2_numtries = 500000 & ;Nº de tentativas do gerador de part.
;
; ==> Mechanical properties <===
;
set ball_dens    = 2660 &
    ball_fric    = 0.36 &
    ball_nstiff  = 1.0e8 &
    ball_sstiff  = 1.0e8 &
    wall_fric    = 0.0 &
    wall_nstiff  = 1.0e8 &
    wall_sstiff  = 0.0
;
; ==> Execute <===
;
set_t0
ds2_setup
cycle 5000
ds2_bw_prop
solve
get_time
;
; ==> Create data and save files <===
print tim
print ds2_n ds2_e meas 1 info
save '01_gen.sav'
set log off
;
;=====
;EOF: 01_gen.dat

```

```

;fname: 02_conf_1.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; ==> Initial setup <==
;
new
set echo off
res '01_gen.sav'      ; restore assembly
set logfile '02_conf_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <==
set pinterval 500
history reset
history nstep=500
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 ds2_wsxx
history id=4 ds2_wsyu
history id=5 ds2_wsyu
history id=6 s_wly
history id=7 ds2_dv
history id=8 ds2_n
history id=9 ds2_e
history id=10 meas porosity id=1
plot current 0
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 3 4 5 vs step
plot create ylen
plot add his 6 vs step
plot create assembly
plot add ball lorange wall black
set echo on
;
; ==> Required stress and servo parameters <==
;
set ds2_servo_yon    = 2      & ; 0:off, 1:upper wall only, 2:both y walls
  ds2_wsyu_req      = 5.0e4  &
  ds2_ws_tol        = 0.005  &
  ds2_servo_alpha   = 0.5    &

```

```

        _vmax = 1.0e1
;
; ==> Execute <==
;
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set fishcall 0 ds2_servo
set log off
set_t0
ds2_install_stress
solve
get_time
ds2_change_meas_circle
set log on
;
; ==> Create data and save files <==
print tim
print ds2_n ds2_e meas 1 info
save '02_conf_1.sav'
history write 7 8 10 &
        file '02_conf_1.txt'
set log off
;
;=====
;EOF: 02_conf_1.dat

```

```

;fname: 03_shear_1.dat
;
;=====
; ==> Initial setup <==
;
new
set echo off
res '02_conf_1.sav' ; restore assembly
set logfile '03_shear_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <==
set pinterval 500
history reset
history nstep=500
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 ds2_wsxx
history id=4 ds2_wsyu
history id=5 vdisp
history id=6 hdisp
history id=7 ds2_shear_u
history id=8 ds2_shear_b
history id=9 ds2_shear
history id=10 ds2_fhu
history id=11 ds2_fhb
history id=12 ds2_fh
history id=13 ds2_e
plot current 0
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot destroy 5
plot create muf

```

```
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create shear
plot add his 7 8 9 vs 6
plot create disp
plot add his 5 vs 6
plot create conf
plot add his 4 vs step
plot create hforce
plot add his 10 11 12 vs 6
plot create assembly
plot add ball lorange wall black
set echo on
;
; ==> Required stress and servo parameters <==
;
set ds2_servo_yon = 1 & ; 0:off, 1:upper wall only, 2:both y walls
  ds2_shear_vel = 1.0e-2 &
  _nsteps = 500 &
  _nchunks = 10
;
; ==> Execute <==
;
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set log off
ds2_set_ini
set fishcall 0 ds2_shear_his
set_t0
accel_walls
run_shear
get_time
ds2_change_meas_circle
set log on
;
; ==> Create data and save files <==
print tim
print ds2_n ds2_e meas 1 info
save '03_shear_1.sav'
history write 4 9 6 5 13 &
  file '03_shear_1.txt'
set log off
;
;=====
;EOF: 03_shear_1.dat
```

## Apêndice D

### Códigos - Ensaio de arrancamento em barra única

```
; Filename: pullout.fis
;
; PURPOSE: FISH functions comprising the PFC2D geogrid pullout test envir.
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
; DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
def po_setup
;
; ----- Create a parallelepiped sample bounded by 5 walls.
;
  wlx = po_xlen
  wly = po_ylen
  extend = po_ext
  _rmax = po_rhi
  _rmin = po_rlo
  _n = po_n_req
  _ntries = po_numtries
;
  po_makewalls
  po_beam
  po_genballs
  po_install_meas_circle
  po_wss
end
;
; =====
def po_makewalls
;
; ----- Create the 5 bounding walls. These are made [l_ext] times
; longer in each direction than the initial specimen dimensions.
;
; --- Create the opposing x-walls
;
  _x0 = 0.5*wlx
  _y0 = 0.0
  _x1 = 0.5*wlx
  _y1 = 0.5*wly*extend
  command
    wall id=1 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
  end_command
  wpx1 = find_wall(1)
```

```

_x0 = 0.5*wlx
_y0 = -0.5*wly*extend
_x1 = 0.5*wlx
_y1 = 0.0
command
  wall id=2 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpx2 = find_wall(2)
_x0 = -0.5*wlx
_y0 = 0.5*wly*extend
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = -0.5*wly*extend
command
  wall id=3 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpx3 = find_wall(3)
;
; --- Create the opposing y-walls
;
_x0 = 0.5*wlx
_y0 = 0.5*wly
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = 0.5*wly
command
  wall id=4 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpy1 = find_wall(4)
_x0 = -0.5*wlx
_y0 = -0.5*wly
_x1 = 0.5*wlx
_y1 = -0.5*wly
command
  wall id=5 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpy2 = find_wall(5)
end
;
;=====
def po_beam
;
; ----- Generate a single beam that represents a transversal member of the
;         geogrid.
;
  beam_dens = beam_dens
  beam_size = beam_size
  beam_nstiff = beam_nstiff
  beam_sstiff = beam_sstiff
  beam_fric = beam_fric
  x_beam = x_beam
  y_beam = y_beam
;
  case_of beam_shape
    case 1 : ;Circular Shape
      _rad = beam_size / 2
      command
        ball id=1 rad=@_rad x=@x_beam y=@y_beam
        range name beam id=1
          group beam range beam
          prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff fric=0.0
range beam

```



```

        end_command
        badd1 = find_ball(1)
        beam_vol = (pi * b_rad(badd1)^2 * 1.0)
    case 2 : ;Square Shape
        _rad = beam_size / 4
        xc = x_beam - _rad
        yc = y_beam + _rad
        idc = 0
        r2 = 2.0 * _rad
        loop row (1,3)
            loop col (1,3)
                idc = idc + 1
                command
                    ball id=@idc x=@xc y=@yc rad=@_rad
                end_command
                xc = xc + _rad
            end_loop
            yc = yc - _rad
            xc = x_beam - _rad
        end_loop
        command
            range name beam id=1,@idc
            group beam range beam
            clump id=1 perm range beam
            prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff fric=0.0 &
            range beam
        end_command
        bp = find_ball(1)
        badd1 = b_clump(bp)
        beam_vol = beam_size^2
    end_case
end
;
;=====
def po_genballs
;
; ----- Generate initial particle assembly contained within 5 frictionless
;         walls.
;
tot_vol = wlx * wly - beam_vol
rbar    = 0.5 * (_rmin + _rmax)
num      = int((1.0 - _n) * tot_vol / (pi * rbar^2)) + 1000
mult     = 1.6
rlo_0   = _rmin / mult
rhi_0   = _rmax / mult
_xl     = -0.5*wlx
_xu     = 0.5*wlx
_yl     = -0.5*wly
_yu     = 0.5*wly
command
    generate id=(1000,@num) &
            rad=(@rlo_0,@rhi_0) &
            x=(@_xl,@_xu) y=(@_yl,@_yu) &
            no_shadow &
            tries = @_ntries
    prop dens=@ball_dens kn=@ball_nstiff ks=@ball_sstiff fric=0.0 &
    range id=1000,@num
end_command
;
; --- Calculates porosity.

```

```

;
_vp = 0.0
bp = ball_head
loop while bp # null
  _vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
  bp = b_next(bp)
end_loop
pmeas = 1.0 - (_vp / tot_vol)
;
; --- Determine radius multiplier, [mult], so that we
;   achieve desired porosity, [_n].
;
mult = sqrt((1.0 - _n) / (1.0 - pmeas))
command
  ini rad mul @mult range id=1000,@num
end_command
end
;
;=====
def po_install_meas_circle
;
; ----- Install one measurement circle at the middle of the specimen.
;   The meas. circle radius is chosen such that it remains the max
;   ball radii from walls.
;
meas_rad = (0.5*min(wlx,wly)) - 2.0 * _rmax
meas_x = 0.0
meas_y = 0.0
command
  measure id 1 x @meas_x y @meas_y rad @meas_rad
end_command
end
;
;=====
def po_bw_prop
;
; ----- Set walls and balls properties.
;
ball_dens = ball_dens
ball_fric = ball_fric
ball_nstiff = ball_nstiff
ball_sstiff = ball_sstiff
wall_fric = wall_fric
wall_nstiff = wall_nstiff
wall_sstiff = wall_sstiff
;
; --- Set ball properties:
;
command
  prop dens=@ball_dens kn=@ball_nstiff ks=@ball_sstiff fric=@ball_fric &
    range id=1000,@num
end_command
;
; --- Set wall properties:
;
command
  wall id=1 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
  wall id=2 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
  wall id=3 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
  wall id=4 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric

```

```

        wall id=5 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
    end_command
;
; --- Set beam properties:
;
    command
        prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff fric=@beam_fric &
            range beam
    end_command
end
;
;=====
def po_wss
; ----- Compute gross stress and strain for sample,
;         based on wall forces divided by contact areas.
;
    while_stepping
        ydif = w_y(wpy1) - w_y(wpy2)
        s_wly = wly + ydif
;
        fw_xf = w_xfob(wpx1) + w_xfob(wpx2)
        bw_xf = w_xfob(wpx3)
        r_xf  = fw_xf + bw_xf
;
        po_wsx12 = fw_xf / (s_wly * 1.0)
        po_wsx3  = - bw_xf / (s_wly * 1.0)
        po_wsxr  = r_xf / (s_wly * 1.0)
        po_wsxx  = 0.5 * (w_xfob(wpx1) + w_xfob(wpx2) - w_xfob(wpx3)) / (s_wly *
1.0)
        po_wsyy  = w_yfob(wpy1) / (wly * 1.0)
        po_wsyyb = (-w_yfob(wpy2)) / (wly * 1.0)
        po_wsyy  = 0.5 * (po_wsyy + po_wsyyb)
        po_dv    = w_y(wpy1)
;
        if beam_shape = 1 then
            beam_fh = b_xfob(badd1)
            beam_fv = b_yfob(badd1)
            beam_dh = b_xdisp(badd1)
            beam_dv = b_ydisp(badd1)
        else
            beam_fh = cl_xfob(badd1)
            beam_fv = cl_yfob(badd1)
            beam_dh = cl_x(badd1)
            beam_dv = cl_y(badd1)
        end_if
    end
;
;=====
def po_porosity
;
; ----- Return the porosity of the specimen.
;
    while_stepping
        tot_vol = wlx * s_wly
        _vp = 0.0
        bp = ball_head
        loop while bp # null
            _vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
            bp = b_next(bp)
        end_loop
;

```

```

    po_n = 1.0 - (_vp / tot_vol)
    po_e = ( tot_vol / _vp ) - 1.0
end
;
;=====
def po_servo_gain
;
; ----- Determine loading servo gain parameters.  If servo not yet seated,
;         set gain parameter to zero.
;
; ii=pre_cycle ; insure that all contact info. is updated
;
; if po_servo_alpha = 0 then ; set default value
;     po_servo_alpha = 0.5
; end_if
;
; if po_servo_yon = 1
;     sum_kny = 0.0
;     cp = w_clist(wpy1)
;     loop while cp # null
;         if c_nforce(cp) # 0.0 then
;             sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
;         end_if
;         cp = c_b2clist(cp)
;     end_loop
;     if sum_kny # 0.0 then
;         po_servo_gy = po_servo_alpha * (wlx * 1.0) / (sum_kny * tdel)
;     else
;         po_servo_gy = 0.0
;     end_if
; end_if
; if po_servo_yon = 2
;     sum_kny = 0.0
;     cp = w_clist(wpy1)
;     loop while cp # null
;         if c_nforce(cp) # 0.0 then
;             sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
;         end_if
;         cp = c_b2clist(cp)
;     end_loop
;     cp = w_clist(wpy2)
;     loop while cp # null
;         if c_nforce(cp) # 0.0 then
;             sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
;         end_if
;         cp = c_b2clist(cp)
;     end_loop
;     sum_kny = 0.5 * sum_kny ; take average of both opposing walls
;     if sum_kny # 0.0 then
;         po_servo_gy = po_servo_alpha * (wlx * 1.0) / (sum_kny * tdel)
;     else
;         po_servo_gy = 0.0
;     end_if
; end_if
end
;
;=====
def po_servo
;
; ----- Servo-mechanism to maintain requested wall stresses.

```

```

;      (Register via "set fishcall 0 po_servo".)
;
if po_servo_yon = 1 then
  _sgn = sgn( po_wsyu - po_wsyy_req )
  if po_wsyu # 0.0 then
    w_yvel(wpy1) = po_servo_gy * (po_wsyu - po_wsyy_req)
  else
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  if abs(w_yvel(wpy1)) > _vmax then
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  w_yvel(wpy2) = 0.0
end_if
if po_servo_yon = 2 then
  _sgn = sgn( po_wsyu - po_wsyy_req )
  if po_wsyu # 0.0 then
    w_yvel(wpy1) = po_servo_gy * (po_wsyu - po_wsyy_req)
  else
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  if abs(w_yvel(wpy1)) > _vmax then
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  w_yvel(wpy2) = - w_yvel(wpy1)
end_if
end
;
;=====
def po_install_stress
;
; ----- Moves confining walls in attempt to obtain requested stress
;      [po_wsyy_req] w/i tolerance [sig_tol].
;      (Assumes that po_servo function is an active fishcall.)
;
loop while 1 # 0
  po_servo_gain
  ;
  _yokay = 0
  if po_servo_yon = 0 then
    _yokay = 1
  end_if
  if po_servo_yon # 0 then
    if abs((po_wsyu - po_wsyy_req)/po_wsyy_req) <= po_ws_tol then
      _yokay = 1
    end_if
  end_if
  ;
  if _yokay = 1 then
    exit
  end_if
  ;
  command
    cycle 100
  end_command
end_loop
end
;
;=====
def po_set_ini

```

```

fw_xf_0 = fw_xf
beam_fh_0 = beam_fh
beam_dh_0 = beam_dh
beam_dv_0 = beam_dv
po_dv_0 = po_dv
end
;
;=====
def po_his
  beam_xf = beam_fh - beam_fh_0
  bear_stress = beam_xf / (beam_size * 1.0)
  bear_stress_rat = bear_stress / po_wsyu
  vdisp = beam_dv - beam_dv_0
  hdisp = beam_dh - beam_dh_0
  hdisp_rat = hdisp / beam_size
  w_dv = po_dv - po_dv_0
end
;
;=====
def accel_beam
; ----- Accelerates the beam to achieve vel of _vfinal in _nsteps,
;       using _nchunks
  _vfinal = pullout_vel
  _niter = _nsteps / _nchunks
  loop _chnk (1,_nchunks)
    _vel = _chnk*(_vfinal/_nchunks)
    if beam_shape = 1 then
      b_xvel(badd1) = _vel
    else
      cl_xvel(badd1) = _vel
    end_if
    command
      cycle @_niter
    end_command
  end_loop
end
;
;=====
def run_pullout
  dh_over_B = dh_over_B
  loop while 1 # 0 ; infinite loop
    po_servo_gain
    command
      cycle 100
    end_command
    if hdisp_rat >= dh_over_B then
      exit
    end_if
  end_loop
end
;
;=====
def po_change_meas_circle
;
; ----- Change the measurement circle center to the middle of the
;       sheared specimen.
;
  meas_rad = (0.5*min(wlx - po_dh , s_wly - po_dv)) - 2.0 * _rmax
  meas_x = 0.0
  meas_y = 0.0

```

```

command
  measure id 1 x @meas_x y @meas_y rad @meas_rad
end_command
end
;
;=====
def beam_c_friction
;
; ----- Loop through all contacts around the beam, and
;         change the friction coefficient of the adjacent balls.
;
cp = b_clist(badd1)
loop while cp # null
  if c_ball1(cp) = badd1 then
    bp_other = c_ball2(cp)
  else
    bp_other = c_ball1(cp)
  end_if
  b_fric(bp_other) = beam_fric
  ;
  if c_ball1(cp) = badd1 then
    cp = c_b1clist(cp)
  else
    cp = c_b2clist(cp)
  end_if
end_loop
end
;
;=====
def correct_friction
;
; ----- Loop through all balls in the model and change the friction
;         coefficient of the ones that are not adjacent balls of [badd1].
;
bp = ball_head
loop while bp # null
  if bp # badd1
    if b_fric(bp) # ball_fric
      cp = b_clist(badd1)
      section
        loop while cp # null
          if c_ball1(cp) = badd1 then
            bp_other = c_ball2(cp)
            cp = c_b1clist(cp)
          else
            bp_other = c_ball1(cp)
            cp = c_b2clist(cp)
          end_if
          if bp # bp_other then
            b_fric(bp) = ball_fric
            ;ii=out(string(b_id(bp))+ ' # '+string(b_id(bp_other)))
          else
            b_fric(bp) = beam_fric
            ;ii=out(string(b_id(bp))+ ' = '+string(b_id(bp_other)))
            exit section
          end_if
        end_loop
      end_section
    end_if
  end_loop
end_if
end_if

```

```

        bp = b_next(bp)
    end_loop
end
;
;=====
def beam_contacts
;
; ----- Loop through all contacts around the beam.
;
    ii=out('*** Traversing contacts about ball with ID =
'+string(b_id(badd1)))
    cp = b_clist(badd1)
    loop while cp # null
        if c_ball1(cp) = badd1 then
            bp_other = c_ball2(cp)
        else
            bp_other = c_ball1(cp)
        end_if
        ii=out('***** adjacent ball has ID = '+string( b_id(bp_other) ))
        ii=out('***** contact has friction = '+string( c_fric(cp) ))
        ;
        if c_ball1(cp) = badd1 then
            cp = c_b1clist(cp)
        else
            cp = c_b2clist(cp)
        end_if
    end_loop
end
;
;=====
def set_t0
tim0 = clock
end
;
;=====
def get_time
tim = (clock - tim0) / 100.0
end
;
;=====
;EOF pullout.fis

```

```

;fname: 01_gen.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; ==> Initial setup <==

```



```

;
new
set random
set safe_conversion on
set disk on
set echo off
  call 'pullout.fis'
  set logfile '01_gen.log'
  set log on
; ==> Install histories and plots <===
set pinterval 100
history reset
history nstep=100
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 beam_fh
history id=4 beam_fv
history id=10 po_wsxx
history id=11 po_wsyu
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 10 11 vs step
plot create assembly
plot add ball black range id=1,999
plot add ball lorange range id=1,999 not
plot add wall black
set echo on
;
; ==> Geometric properties <===
;
set po_xlen = 0.253 & ;Largura [m]
    po_ylen = 0.152 & ;Profundidade [m]
    po_ext  = 1.20   & ;Extensão das paredes [m]
;
; ==> Geogrid generation properties <===
;
set beam_shape = 1      & ;1-Circular | 2-Square
    beam_dens  = 7800   &
    x_beam    = 0.0    &
    y_beam    = 0.0    &
    beam_size  = 4.78e-3 &
    beam_fric  = 0.36   &
    beam_nstiff = 1.0e9 &
    beam_sstiff = 1.0e9 &
;
; ==> Particle generation properties <===
;
set po_rhi      = 1.00e-3 & ;Raio máximo [m]
    po_rlo      = 0.59e-3 & ;Raio mínimo [m]
    po_n_req    = 0.15   & ;Porosidade requerida
    po_numtries = 500000 & ;Nº de tentativas do gerador de part.
;
; ==> Mechanical properties <===
;
set ball_dens  = 2660 &
    ball_fric  = 0.36 &
    ball_nstiff = 1.0e8 &

```

```

    ball_sstiff = 1.0e8 &
    wall_fric   = 0.0   &
    wall_nstiff = 1.0e8 &
    wall_sstiff = 0.0
;
; ==> Execute <===
;
set_t0
po_setup
fix s range beam
cycle 5000
po_bw_prop
solve
get_time
;
; ==> Create data and save files <===
print tim
print po_n po_e meas 1 info
save '01_gen.sav'
set log off
;
;=====
;EOF: 01_gen.dat

```

```

;fname: 02_conf_1.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; ==> Initial setup <===
;
new
set echo off
res '01_gen.sav' ; restore assembly
set logfile '02_conf_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <===
set pinterval 500
history reset
history nstep=500
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 po_wsxx
history id=4 po_wsyu
history id=5 po_dv
history id=6 po_n
history id=7 po_e
history id=8 meas porosity id=1

```

```

history id=10 po_wsxl2
history id=11 po_wsx3
history id=12 po_wsxr
history id=13 s_wly
history id=20 hdisp
history id=21 vdisp
history id=22 bear_stress
plot current 0
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 3 4 vs step
plot create beam_forces
plot add his 22 vs step
plot create assembly
plot add ball black range beam
plot add ball lorange range beam not
plot add wall black
set echo on
;
; ==> Required stress and servo parameters <===
;
set po_servo_yon      = 2      & ; 0:off, 1:upper wall only, 2:both y walls
   po_wsyy_req       = 2.5e4 &
   po_ws_tol         = 0.005 &
   po_servo_alpha    = 0.5    &
   _vmax              = 1.0e1
;
; ==> Execute <===
;
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set fishcall 0 po_servo
set log off
set_t0
po_set_ini
set fishcall 0 po_his
po_install_stress
solve
get_time
;po_change_meas_circle
set log on
;
; ==> Create data and save files <===
print tim
print po_n po_e meas 1 info
save '02_conf_1.sav'
;history write 7 8 9 &
;      file '02_conf_1.txt'
set log off
;
;=====
;EOF: 02_conf_1.dat

```

```

;fname: 03_pullout_1.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; ==> Initial setup <==
;
new
set echo off
res '02_conf_1.sav'
set logfile '03_pullout_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <==
set pinterval 1000
history reset
history nstep=1000
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 po_wsxx
history id=4 po_wsyz
history id=5 po_dv
history id=6 po_n
history id=7 po_e
history id=8 meas porosity id=1
history id=10 po_wsxl2
history id=11 po_wsxl3
history id=12 po_wsxl4
history id=13 s_wly
history id=20 hdisp
history id=21 vdisp
history id=22 bear_stress
history id=23 bear_stress_rat
history id=24 hdisp_rat
plot current 0
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot destroy 5
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create bear_resistance
plot add his 23 vs 24
plot create wall_stress
plot add his 10 11 12 vs 24
plot create conf
plot add his 4 vs 24

```

```
plot create assembly
plot add ball black range beam
plot add ball lorange range beam not
plot add wall black
set echo on
;
; ==> Required stress and servo parameters <==
;
set po_servo_yon = 1 & ; 0:off, 1:upper wall only, 2:both y walls
  pullout_vel = 1.0e-2 &
    _nsteps = 500 &
    _nchunks = 10 &
  dh_over_B = 1.5
;
; ==> Execute <==
;
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set log off
set fishcall 0 beam_c_friction
set fishcall 1 correct_friction
po_set_ini
fix x range beam
set_t0
accel_beam
run_pullout
get_time
set log on
;
; ==> Create data and save files <==
print tim
print po_n po_e meas 1 info
save '03_pullout_1.sav'
history write 4 24 23 10 11 12 &
  file '03_pullout_1.txt'
set log off
;
;=====
;EOF: 03_pullout_1.dat
```

## Apêndice E

### Códigos - Ensaio de arrancamento em múltiplas barras

```
; Filename: pullout.fis
;
; PURPOSE: FISH functions comprising the PFC2D geogrid pullout test envir.
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
; DISCRETOS
;
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
def po_setup
;
; ----- Create a parallelepiped sample bounded by 5 walls.
;
;   wlx = po_xlen
;   wly = po_ylen
;   extend = po_ext
;   _rmax = po_rhi
;   _rmin = po_rlo
;   _n = po_n_req
;   _ntries = po_numtries
;
;   po_makewalls
;   po_beam
;   po_genballs
;   po_install_meas_circle
;   po_wss
end
; ;=====
;
def po_makewalls
;
; ----- Create the 5 bounding walls. These are made [l_ext] times
; longer in each direction than the initial specimen dimensions.
;
; --- Create the opposing x-walls
;
;   _x0 = 0.5*wlx
;   _y0 = 0.0
;   _x1 = 0.5*wlx
;   _y1 = 0.5*wly*extend
;   command
;     wall id=1 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
;   end_command
;   wpx1 = find_wall(1)
```

```

_x0 = 0.5*wlx
_y0 = -0.5*wly*extend
_x1 = 0.5*wlx
_y1 = 0.0
command
  wall id=2 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpx2 = find_wall(2)
_x0 = -0.5*wlx
_y0 = 0.5*wly*extend
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = -0.5*wly*extend
command
  wall id=3 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpx3 = find_wall(3)
;
; --- Create the opposing y-walls
;
_x0 = 0.5*wlx
_y0 = 0.5*wly
_x1 = -0.5*wlx
_y1 = 0.5*wly
command
  wall id=4 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpy1 = find_wall(4)
_x0 = -0.5*wlx
_y0 = -0.5*wly
_x1 = 0.5*wlx
_y1 = -0.5*wly
command
  wall id=5 kn=@wall_nstiff nodes (@_x0,@_y0) (@_x1,@_y1)
end_command
wpy2 = find_wall(5)
end
;
;=====
def po_beam
;
; ----- Generate a single beam that represents a transversal member of the
;         geogrid.
;
  beam_dens = beam_dens
  beam_size = beam_size
  beam_nstiff = beam_nstiff
  beam_sstiff = beam_sstiff
  beam_fric = beam_fric
  beam_n = beam_n
  beam_s = beam_s
  x_beam = x_beam
  y_beam = y_beam
;
  case_of beam_shape
    case 1 : ;Circular Shape
      case_of beam_n
        case 1 : ; 1 member
          _rad = beam_size / 2
          command
            ball id=1 rad=@_rad x=@x_beam y=@y_beam

```

```

        range name beam id=1
        group beam range beam
        prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff
fric=0.0 range beam
    end_command
    badd1 = find_ball(1)
    beam_vol = (pi * b_rad(badd1)^2 * 1.0)
    case 2 : ; 2 mebers
        _rad = beam_size / 2
        xb1 = x_beam - (beam_s / 2)
        xb2 = x_beam + (beam_s / 2)
        command
        ball id=1 rad=@_rad x=@xb1 y=@y_beam
        ball id=2 rad=@_rad x=@xb2 y=@y_beam
    range name beam id=1,2
        group beam range beam
        prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff
fric=0.0 range beam
    end_command
    badd1 = find_ball(1)
    badd2 = find_ball(2)
    beam_vol = (pi * b_rad(badd1)^2 * 1.0) * 2
    case 3 : ; 3 mebers
        _rad = beam_size / 2
        xb1 = x_beam - (beam_s / 2)
        xb2 = x_beam + (beam_s / 2)
        command
        ball id=1 rad=@_rad x=@xb1 y=@y_beam
        ball id=2 rad=@_rad x=@xb2 y=@y_beam
        ball id=3 rad=@_rad x=@x_beam y=@y_beam
    range name beam id=1,3
        group beam range beam
        prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff
fric=0.0 &
        range beam
    end_command
    badd1 = find_ball(1)
    badd2 = find_ball(2)
    badd3 = find_ball(3)
    beam_vol = (pi * b_rad(badd1)^2 * 1.0) * 3
end_case
case 2 : ;Square Shape
_rad = beam_size / 4
xc = x_beam - _rad
yc = y_beam + _rad
idc = 0
r2 = 2.0 * _rad
loop row (1,3)
    loop col (1,3)
        idc = idc + 1
        command
            ball id=@idc x=@xc y=@yc rad=@_rad
        end_command
        xc = xc + _rad
    end_loop
    yc = yc - _rad
    xc = x_beam - _rad
end_loop
command
    range name beam id=1,@idc

```



```

        group beam range beam
        clump id=1 perm range beam
        prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff fric=0.0 &
        range beam
    end_command
    bp = find_ball(1)
    badd1 = b_clump(bp)
    beam_vol = beam_size^2
end_case
end
;
;=====
def po_genballs
;
; ----- Generate initial particle assembly contained within 5 frictionless
;         walls.
;
tot_vol = wlx * wly - beam_vol
rbar    = 0.5 * (_rmin + _rmax)
num     = int((1.0 - _n) * tot_vol / (pi * rbar^2)) + 1000
mult    = 1.6
rlo_0   = _rmin / mult
rhi_0   = _rmax / mult
_xl     = -0.5*wlx
_xu     = 0.5*wlx
_yl     = -0.5*wly
_yu     = 0.5*wly
command
    generate id=(1000,@num) &
            rad=(@rlo_0,@rhi_0) &
            x=(@_xl,@_xu) y=(@_yl,@_yu) &
            no_shadow &
            tries = @_ntries
    prop dens=@ball_dens kn=@ball_nstiff ks=@ball_sstiff fric=0.0 &
    range id=1000,@num
end_command
;
; --- Calculates porosity.
;
_vp = 0.0
bp = ball_head
loop while bp # null
    _vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
    bp = b_next(bp)
end_loop
pmeas = 1.0 - (_vp / tot_vol)
;
; --- Determine radius multiplier, [mult], so that we
;         achieve desired porosity, [_n].
;
mult = sqrt((1.0 - _n) / (1.0 - pmeas))
command
    ini rad mul @mult range id=1000,@num
end_command
end
;
;=====
def po_install_meas_circle
;
; ----- Install one measurement circle at the middle of the specimen.

```

```

;      The meas. circle radius is chosen such that it remains the max
;      ball radii from walls.
;
meas_rad = (0.5*min(wlx,wly)) - 2.0 * _rmax
meas_x = 0.0
meas_y = 0.0
command
  measure id 1 x @meas_x y @meas_y rad @meas_rad
end_command
end
;
;=====
def po_bw_prop
;
; ----- Set walls and balls properties.
;
ball_dens   = ball_dens
ball_fric   = ball_fric
ball_nstiff = ball_nstiff
ball_sstiff = ball_sstiff
wall_fric   = wall_fric
wall_nstiff = wall_nstiff
wall_sstiff = wall_sstiff
;
; --- Set ball properties:
;
command
  prop dens=@ball_dens kn=@ball_nstiff ks=@ball_sstiff fric=@ball_fric &
    range id=1000,@num
end_command
;
; --- Set wall properties:
;
command
  wall id=1 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
  wall id=2 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
  wall id=3 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
  wall id=4 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
  wall id=5 kn=@wall_nstiff ks=@wall_sstiff fric=@wall_fric
end_command
;
; --- Set beam properties:
;
command
  prop dens=@beam_dens kn=@beam_nstiff ks=@beam_sstiff fric=@beam_fric &
    range beam
end_command
end
;
;=====
def po_wss
; ----- Compute gross stress and strain for sample,
;      based on wall forces divided by contact areas.
;
while_stepping
ydif = w_y(wpy1) - w_y(wpy2)
s_wly = wly + ydif
;
fw_xf = w_xfob(wpx1) + w_xfob(wpx2)
bw_xf = w_xfob(wpx3)

```

```

r_xf = fw_xf + bw_xf
;
po_wsxl2 = fw_xf / (s_wly * 1.0)
po_wsxl3 = - bw_xf / (s_wly * 1.0)
po_wsxr = r_xf / (s_wly * 1.0)
po_wsxx = 0.5 * (w_xfob(wpx1) + w_xfob(wpx2) - w_xfob(wpx3)) / (s_wly *
1.0)
po_wsyu = w_yfob(wpy1) / (wlx * 1.0)
po_wsyb = (-w_yfob(wpy2)) / (wlx * 1.0)
po_wsyx = 0.5 * (po_wsyu + po_wsyb)
po_dv = w_y(wpy1)
;
if beam_shape = 1 then
  case_of beam_n
    case 1 : ; 1 member
      beam1_fh = b_xfob(badd1)
      beam1_fv = b_yfob(badd1)
      beam1_dh = b_xdisp(badd1)
      beam1_dv = b_ydisp(badd1)
    case 2 : ; 2 members
      beam1_fh = b_xfob(badd1)
      beam1_fv = b_yfob(badd1)
      beam1_dh = b_xdisp(badd1)
      beam1_dv = b_ydisp(badd1)
      beam2_fh = b_xfob(badd2)
      beam2_fv = b_yfob(badd2)
      beam2_dh = b_xdisp(badd2)
      beam2_dv = b_ydisp(badd2)
    case 3 : ; 3 member
      beam1_fh = b_xfob(badd1)
      beam1_fv = b_yfob(badd1)
      beam1_dh = b_xdisp(badd1)
      beam1_dv = b_ydisp(badd1)
      beam2_fh = b_xfob(badd2)
      beam2_fv = b_yfob(badd2)
      beam2_dh = b_xdisp(badd2)
      beam2_dv = b_ydisp(badd2)
      beam3_fh = b_xfob(badd3)
      beam3_fv = b_yfob(badd3)
      beam3_dh = b_xdisp(badd3)
      beam3_dv = b_ydisp(badd3)
    end_case
  else
    beam_fh = cl_xfob(badd1)
    beam_fv = cl_yfob(badd1)
    beam_dh = cl_x(badd1)
    beam_dv = cl_y(badd1)
  end_if
end
;
;=====
def po_porosity
;
; ----- Return the porosity of the specimen.
;
  while_stepping
    tot_vol = wlx * s_wly
    _vp = 0.0
    bp = ball_head
    loop while bp # null

```

```

    _vp = _vp + pi * b_rad(bp)^2
    bp = b_next(bp)
end_loop
po_n = 1.0 - (_vp / tot_vol)
po_e = ( tot_vol / _vp ) - 1.0
end
;
;=====
def po_servo_gain
;
; ----- Determine loading servo gain parameters.  If servo not yet seated,
;           set gain parameter to zero.
;
; ii=pre_cycle ; insure that all contact info. is updated
;
if po_servo_alpha = 0 then ; set default value
    po_servo_alpha = 0.5
end_if
;
if po_servo_yon = 1
    sum_kny = 0.0
    cp = w_clist(wpy1)
    loop while cp # null
        if c_nforce(cp) # 0.0 then
            sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
        end_if
        cp = c_b2clist(cp)
    end_loop
    if sum_kny # 0.0 then
        po_servo_gy = po_servo_alpha * (wlx * 1.0) / (sum_kny * tdel)
    else
        po_servo_gy = 0.0
    end_if
end_if
if po_servo_yon = 2
    sum_kny = 0.0
    cp = w_clist(wpy1)
    loop while cp # null
        if c_nforce(cp) # 0.0 then
            sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
        end_if
        cp = c_b2clist(cp)
    end_loop
    cp = w_clist(wpy2)
    loop while cp # null
        if c_nforce(cp) # 0.0 then
            sum_kny = sum_kny + c_kn(cp)
        end_if
        cp = c_b2clist(cp)
    end_loop
    sum_kny = 0.5 * sum_kny ; take average of both opposing walls
    if sum_kny # 0.0 then
        po_servo_gy = po_servo_alpha * (wlx * 1.0) / (sum_kny * tdel)
    else
        po_servo_gy = 0.0
    end_if
end_if
end
;
;=====

```

```

def po_servo
;
; ----- Servo-mechanism to maintain requested wall stresses.
;       (Register via "set fishcall 0 po_servo".)
;
if po_servo_yon = 1 then
  _sgn = sgn( po_wsyz - po_wsyz_req )
  if po_wsyz # 0.0 then
    w_yvel(wpy1) = po_servo_gy * (po_wsyz - po_wsyz_req)
  else
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  if abs(w_yvel(wpy1)) > _vmax then
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  w_yvel(wpy2) = 0.0
end_if
if po_servo_yon = 2 then
  _sgn = sgn( po_wsyz - po_wsyz_req )
  if po_wsyz # 0.0 then
    w_yvel(wpy1) = po_servo_gy * (po_wsyz - po_wsyz_req)
  else
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  if abs(w_yvel(wpy1)) > _vmax then
    w_yvel(wpy1) = _sgn * _vmax
  end_if
  w_yvel(wpy2) = - w_yvel(wpy1)
end_if
end
;
;=====
def po_install_stress
;
; ----- Moves confining walls in attempt to obtain requested stress
;       [po_wsyz_req] w/i tolerance [sig_tol].
;       (Assumes that po_servo function is an active fishcall.)
;
loop while 1 # 0
  po_servo_gain
  ;
  _yokay = 0
  if po_servo_yon = 0 then
    _yokay = 1
  end_if
  if po_servo_yon # 0 then
    if abs((po_wsyz - po_wsyz_req)/po_wsyz_req) <= po_ws_tol then
      _yokay = 1
    end_if
  end_if
  ;
  if _yokay = 1 then
    exit
  end_if
  ;
  command
    cycle 100
  end_command
end_loop
end

```

```

;
;=====
def po_set_ini
  fw_xf_0 = fw_xf
  po_dv_0 = po_dv
  if beam_shape = 1 then
    case_of beam_n
      case 1 : ; 1 member
        beam1_fh_0 = beam1_fh
        beam1_fv_0 = beam1_fv
        beam1_dh_0 = beam1_dh
        beam1_dv_0 = beam1_dv
      case 2 : ; 2 members
        beam1_fh_0 = beam1_fh
        beam1_fv_0 = beam1_fv
        beam1_dh_0 = beam1_dh
        beam1_dv_0 = beam1_dv
        beam2_fh_0 = beam2_fh
        beam2_fv_0 = beam2_fv
        beam2_dh_0 = beam2_dh
        beam2_dv_0 = beam2_dv
      case 3 : ; 3 member
        beam1_fh_0 = beam1_fh
        beam1_fv_0 = beam1_fv
        beam1_dh_0 = beam1_dh
        beam1_dv_0 = beam1_dv
        beam2_fh_0 = beam2_fh
        beam2_fv_0 = beam2_fv
        beam2_dh_0 = beam2_dh
        beam2_dv_0 = beam2_dv
        beam3_fh_0 = beam3_fh
        beam3_fv_0 = beam3_fv
        beam3_dh_0 = beam3_dh
        beam3_dv_0 = beam3_dv
    end_case
  else
    beam_fh_0 = beam_fh
    beam_fv_0 = beam_fv
    beam_dh_0 = beam_dh
    beam_dv_0 = beam_dv
  end_if
end
;
;=====
def po_his
  w_dv = po_dv - po_dv_0
  if beam_shape = 1 then
    case_of beam_n
      case 1 : ; 1 member
        beam1_xf = beam1_fh - beam1_fh_0
        bear_stress1 = beam1_xf / (beam_size * 1.0)
        bear_stress1_rat = bear_stress1 / po_wsyu
        vdispl = beam1_dv - beam1_dv_0
        hdispl = beam1_dh - beam1_dh_0
        hdispl_rat = hdispl / beam_size
      case 2 : ; 2 members
        beam1_xf = beam1_fh - beam1_fh_0
        bear_stress1 = beam1_xf / (beam_size * 1.0)
        bear_stress1_rat = bear_stress1 / po_wsyu
        vdispl = beam1_dv - beam1_dv_0

```

```

hdisp1 = beam1_dh - beam1_dh_0
hdisp1_rat = hdisp1 / beam_size
;
beam2_xf = beam2_fh - beam2_fh_0
bear_stress2 = beam2_xf / (beam_size * 1.0)
bear_stress2_rat = bear_stress2 / po_wsyu
vdisp2 = beam2_dv - beam2_dv_0
hdisp2 = beam2_dh - beam2_dh_0
hdisp2_rat = hdisp2 / beam_size
case 3 : ; 3 members
beam1_xf = beam1_fh - beam1_fh_0
bear_stress1 = beam1_xf / (beam_size * 1.0)
bear_stress1_rat = bear_stress1 / po_wsyu
vdisp1 = beam1_dv - beam1_dv_0
hdisp1 = beam1_dh - beam1_dh_0
hdisp1_rat = hdisp1 / beam_size
;
beam2_xf = beam2_fh - beam2_fh_0
bear_stress2 = beam2_xf / (beam_size * 1.0)
bear_stress2_rat = bear_stress2 / po_wsyu
vdisp2 = beam2_dv - beam2_dv_0
hdisp2 = beam2_dh - beam2_dh_0
hdisp2_rat = hdisp2 / beam_size
;
beam3_xf = beam3_fh - beam3_fh_0
bear_stress3 = beam3_xf / (beam_size * 1.0)
bear_stress3_rat = bear_stress3 / po_wsyu
vdisp3 = beam3_dv - beam3_dv_0
hdisp3 = beam3_dh - beam3_dh_0
hdisp3_rat = hdisp3 / beam_size
end_case
else
beam_xf = beam_fh - beam_fh_0
bear_stress = beam_xf / (beam_size * 1.0)
bear_stress_rat = bear_stress / po_wsyu
vdisp = beam_dv - beam_dv_0
hdisp = beam_dh - beam_dh_0
hdisp_rat = hdisp / beam_size
end_if
end
;
;=====
def accel_beam
; ----- Accelerates the beam to achieve vel of _vfinal in _nsteps,
; using _nchunks
_vfinal = pullout_vel
_niter = _nsteps / _nchunks
loop _chnk (1, _nchunks)
_vel = _chnk*(_vfinal/_nchunks)
if beam_shape = 1 then
case_of beam_n
case 1 : ; 1 member
b_xvel(badd1) = _vel
case 2 : ; 2 members
b_xvel(badd1) = _vel
b_xvel(badd2) = _vel
case 3 : ; 3 members
b_xvel(badd1) = _vel
b_xvel(badd2) = _vel
b_xvel(badd3) = _vel

```

```

        end_case
    else
        cl_xvel(badd1) = _vel
    end_if
    command
        cycle @_niter
    end_command
end_loop
end
;
;=====
def run_pullout
    dh_over_B = dh_over_B
    loop while 1 # 0 ; infinite loop
        po_servo_gain
        command
            cycle 100
        end_command
        case_of beam_shape
            case 1 : ;circular
                if hdispl_rat >= dh_over_B then
                    exit
                end_if
            case 2 : ;square
                if hdisp_rat >= dh_over_B then
                    exit
                end_if
            end_case
        end_loop
    end
end
;
;=====
def po_change_meas_circle
;
; ----- Change the measurement circle center to the middle of the
;         sheared specimen.
;
    meas_rad = (0.5*min(wlx - po_dh , s_wly - po_dv)) - 2.0 * _rmax
    meas_x = 0.0
    meas_y = 0.0
    command
        measure id 1 x @meas_x y @meas_y rad @meas_rad
    end_command
end
;
;=====
def set_t0
    tim0 = clock
end
;
;=====
def get_time
    tim = (clock - tim0) / 100.0
end
;
;=====
;EOF pullout.fis

```



```

;fname: 01_gen.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; ==> Initial setup <==
;
new
set random
set safe_conversion on
set disk on
set echo off
call 'pullout.fis'
set logfile '01_gen.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <==
set pinterval 100
history reset
history nstep=100
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 beam_fh
history id=4 beam_fv
history id=10 po_wsxx
history id=11 po_wsyu
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 10 11 vs step
plot create assembly
plot add ball black range id=1,999
plot add ball lorange range id=1,999 not
plot add wall black
set echo on
;
; ==> Geometric properties <==
;
set po_xlen = 0.253 & ;Largura [m]
    po_ylen = 0.152 & ;Profundidade [m]
    po_ext  = 1.20   & ;Extensão das paredes [m]
;
; ==> Geogrid generation properties <==
;
set beam_shape = 1      & ;1-Circular | 2-Square
    beam_dens  = 7800   &
    x_beam    = 0.0     &
    y_beam    = 0.0     &

```

```

    beam_n      = 2      &
    beam_s      = 12.9e-2 &
    beam_size   = 3.16e-3 &
    beam_fric   = 0.36   &
    beam_nstiff = 1.0e9   &
    beam_sstiff = 1.0e9
;
; ==> Particle generation properties <==
;
set po_rhi     = 0.59e-3 & ;Raio máximo [m]
    po_rlo     = 0.30e-3 & ;Raio mínimo [m]
    po_n_req   = 0.15   & ;Porosidade requerida
    po_numtries = 1000000 ;Nº de tentativas do gerador de part.
;
; ==> Mechanical properties <==
;
set ball_dens  = 2660   &
    ball_fric  = 0.36   &
    ball_nstiff = 1.0e8 &
    ball_sstiff = 1.0e8 &
    wall_fric   = 0.0   &
    wall_nstiff = 1.0e8 &
    wall_sstiff = 0.0
;
; ==> Execute <==
;
set_t0
po_setup
fix x y range beam
cycle 5000
po_bw_prop
solve
get_time
;
; ==> Create data and save files <==
print tim
print po_n po_e meas 1 info
save '01_gen.sav'
set log off
;
;=====
;EOF: 01_gen.dat

```

```

;fname: 02_conf_1.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====

```

```

; ==> Initial setup <==
;
new
set echo off
res '01_gen.sav' ; restore assembly
set logfile '02_conf_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <==
set pinterval 500
history reset
history nstep=500
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 po_wsxx
history id=4 po_wsyz
history id=5 po_dv
history id=6 po_n
history id=7 po_e
history id=8 meas porosity id=1
history id=10 po_wsxl2
history id=11 po_wsx3
history id=12 po_wsxr
history id=13 s_wly
history id=20 hdispl
history id=21 vdispl
history id=22 bear_stress1
plot current 0
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create stress
plot add his 3 4 vs step
plot create beam_forces
plot add his 22 vs step
plot create assembly
plot add ball black range beam
plot add ball lorange range beam not
plot add wall black
set echo on
;
; ==> Required stress and servo parameters <==
;
set po_servo_yon = 2 & ; 0:off, 1:upper wall only, 2:both y walls
po_wsyy_req = 2.5e4 &
po_ws_tol = 0.005 &
po_servo_alpha = 0.5 &
_vmax = 1.0e1
;
; ==> Execute <==
;
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set fishcall 0 po_servo
set log off
set_t0
po_set_ini

```

```

set fishcall 0 po_his
po_install_stress
solve
get_time
;po_change_meas_circle
set log on
;
; ==> Create data and save files <===
print tim
print po_n po_e meas 1 info
save '02_conf_1.sav'
;history write 7 8 9 &
;   file '02_conf_1.txt'
set log off
;
;=====
;EOF: 02_conf_1.dat

```

```

;fname: 03_pullout_1.dat
; =====
; UNIVERSIDADE DE BRASILIA
; FACULDADE DE TECNOLOGIA
; PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM GEOTECNIA
; MESTRADO EM GEOTECNIA
;
; TITULO: ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-GEOGRELHA PELO METODO DOS ELEMENTOS
;         DISCRETOS
;
; AUTOR: BRUNO DA SILVA BORGES, Eng.
; ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.
; CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFIRIO CORDAO NETO, DSc.
;
; CODIGO BASEADO EM ITASCA (2004)
; =====
; ==> Initial setup <===
;
new
set echo off
res '02_conf_1.sav'
set logfile '03_pullout_1.log'
set log on
; ==> Install histories and plots <===
set pinterval 1000
history reset
history nstep=1000
history id=1 diagnostic muf
history id=2 diagnostic mcf
history id=3 po_wsxx
history id=4 po_wsyz
history id=5 po_dv
history id=6 po_n
history id=7 po_e
history id=8 meas porosity id=1
history id=10 po_wsxl2
history id=11 po_wsxl3
history id=12 po_wsxl4
history id=13 s_wly
history id=20 hdispl
history id=21 vdispl

```

```

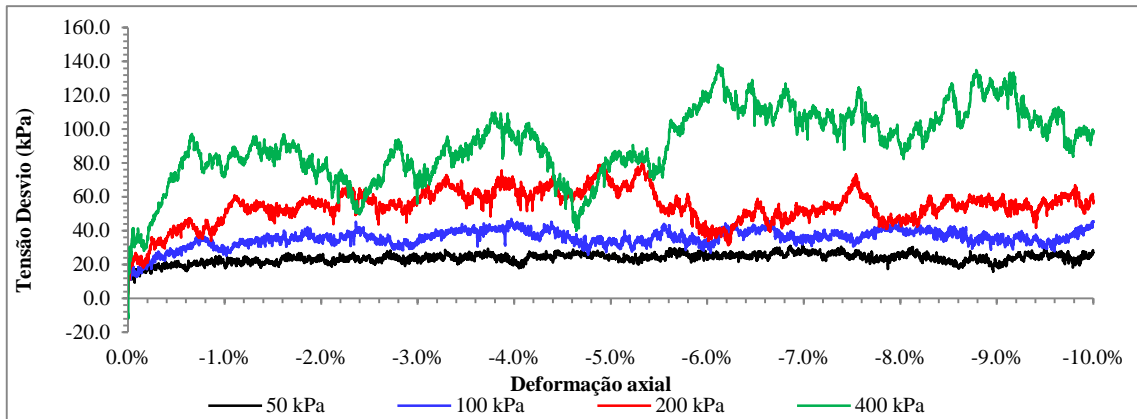
history id=22 bear_stress1
history id=23 bear_stress1_rat
history id=24 hdisp1_rat
history id=25 hdisp2
history id=26 vdisp2
history id=27 bear_stress2
history id=28 bear_stress2_rat
history id=29 hdisp2_rat
plot current 0
plot destroy 1
plot destroy 2
plot destroy 3
plot destroy 4
plot destroy 5
plot create muf
plot add his 1 vs step
plot create mcf
plot add his 2 vs step
plot create bear_resistance
plot add his 23 28 vs 24
plot create wall_stress
plot add his 10 11 12 vs 24
plot create conf
plot add his 4 vs 24
plot create assembly
plot add ball black range beam
plot add ball lorange range beam not
plot add wall black
set echo on
;
; ==> Required stress and servo parameters <==
;
set po_servo_yon    = 1          & ; 0:off, 1:upper wall only, 2:both y walls
  pullout_vel      = 1.0e-2    &
  _nsteps          = 500       &
  _nchunks         = 10        &
  dh_over_B        = 2.0
;
; ==> Execute <==
;
ini xvel 0 yvel 0 spin 0 xdisp 0.0 ydisp 0.0
set log off
po_set_ini
free y s range beam
set_t0
accel_beam
run_pullout
get_time
set log on
;
; ==> Create data and save files <==
print tim
print po_n po_e meas 1 info
save '03_pullout_1.sav'
history write 4 24 23 28 27 10 11 12 &
      file '03_pullout_1.txt'
set log off
;
;=====
;EOF: 03_pullout_1.dat

```

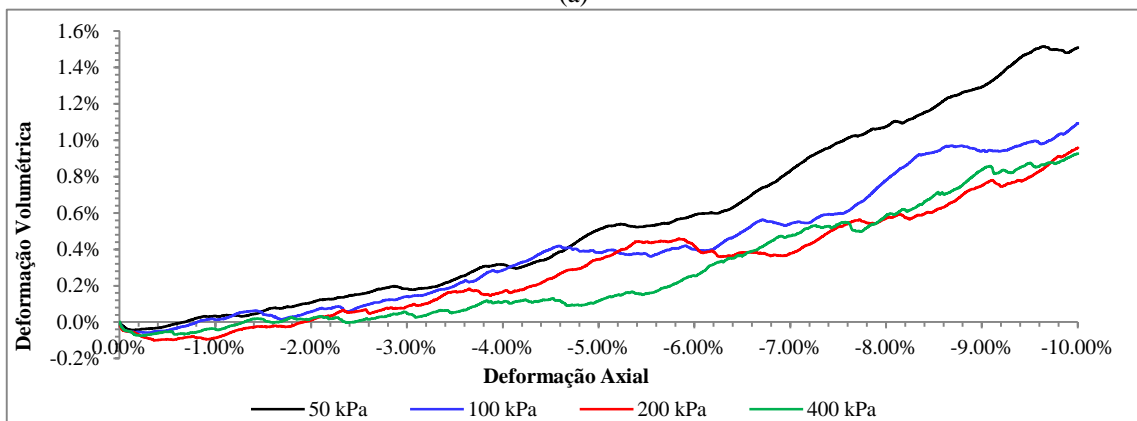


## Apêndice F

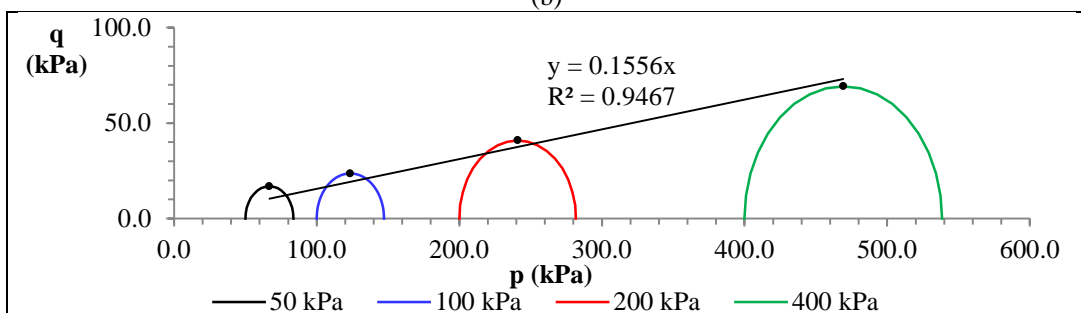
### Resultados das simulações dos ensaios biaxiais



(a)



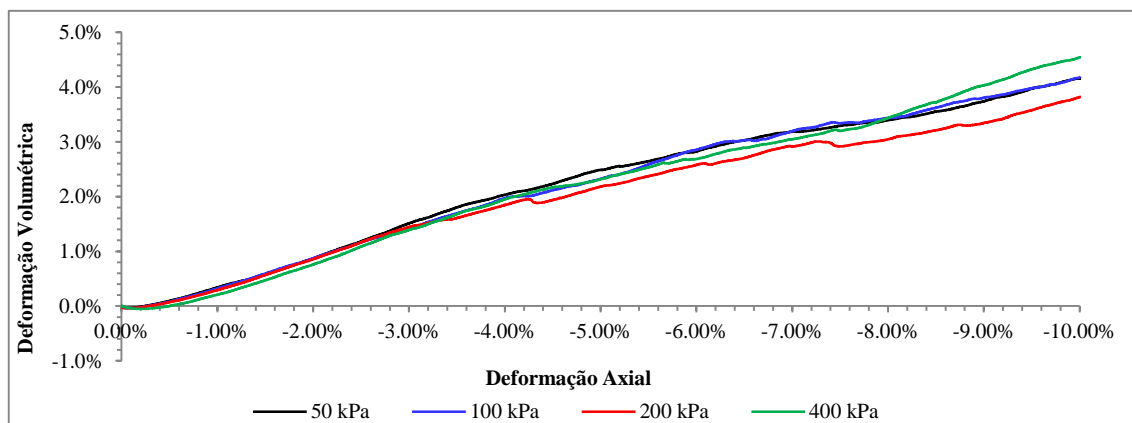
(b)



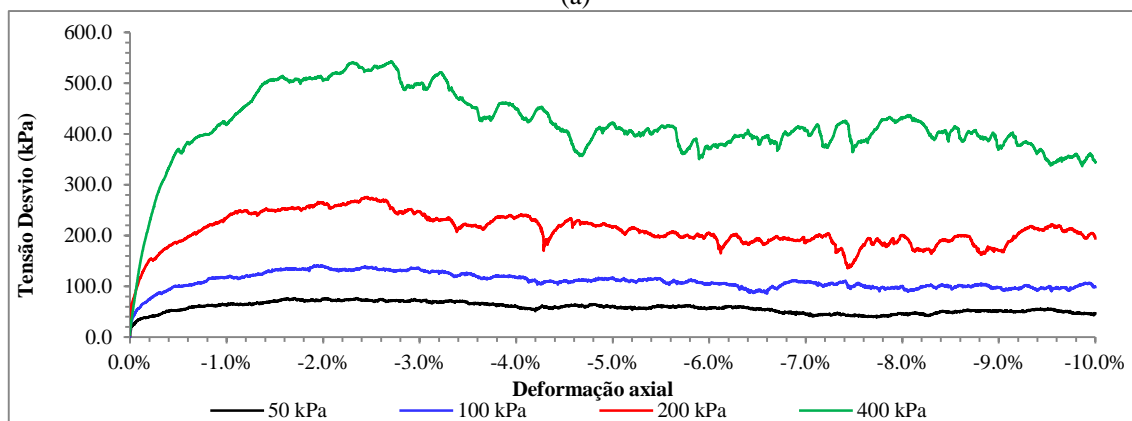
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	p	q	Parâmetros TTE	
50 kPa	83.7	66.9	16.9	$\tan \alpha = 0.1556$	$a' = 0.00$
100 kPa	147.2	123.6	23.6	$\alpha = 8.8^\circ$	
200 kPa	281.8	240.9	40.9	Parâmetros envoltória	
400 kPa	538.4	469.2	69.2	$\phi = 9.0^\circ$	$c' = 0.00$

(c)

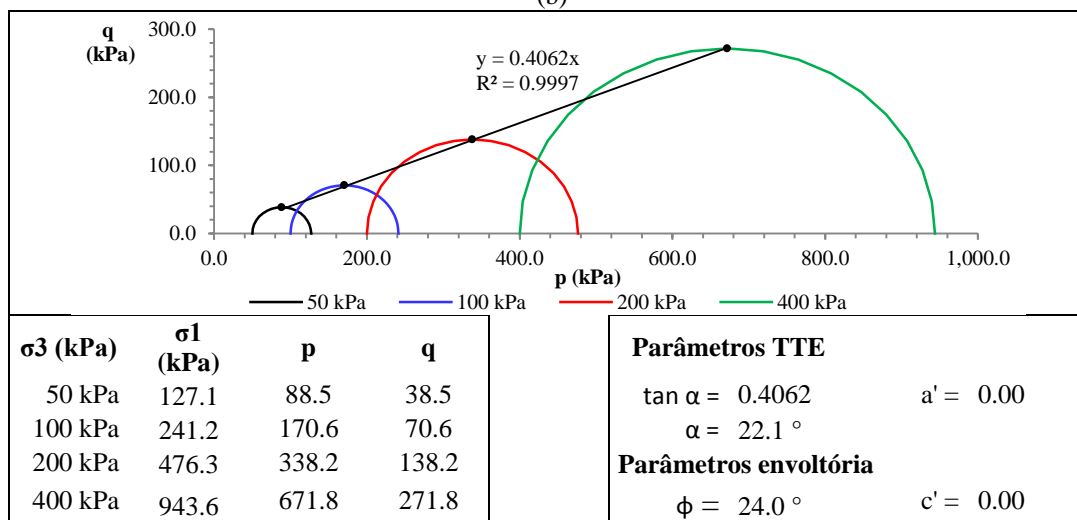
Figura F.1 Resultado da simulação do ensaio biaxial - Amostra densa -  $\phi\mu = 0,00$ .



(a)



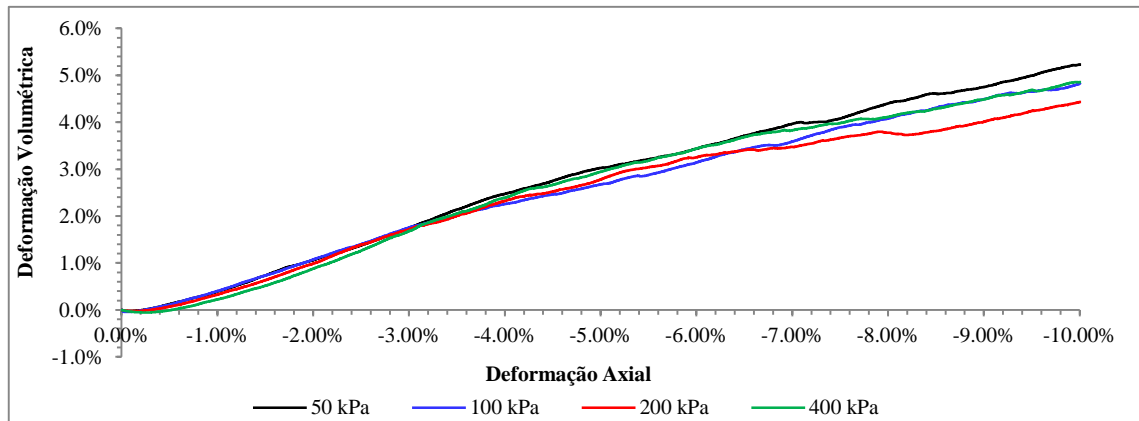
(b)



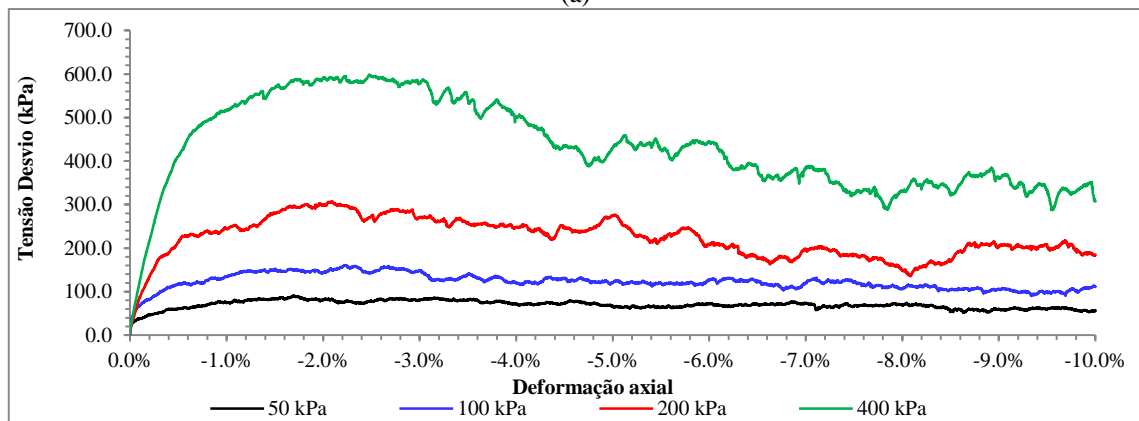
(c)

Figura F.2 Resultado da simulação do ensaio biaxial - Amostra densa -  $\phi\mu = 0,36$ .

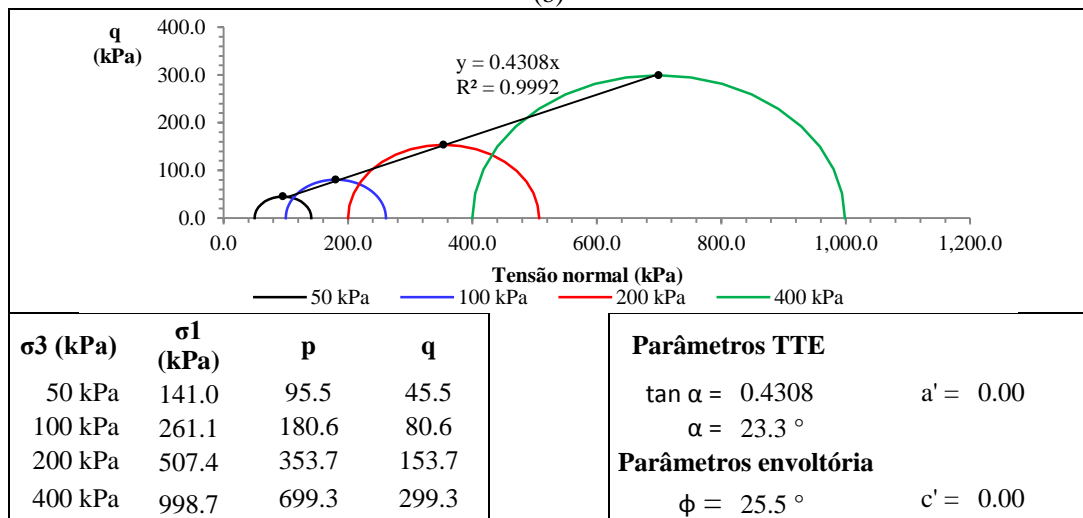




(a)



(b)

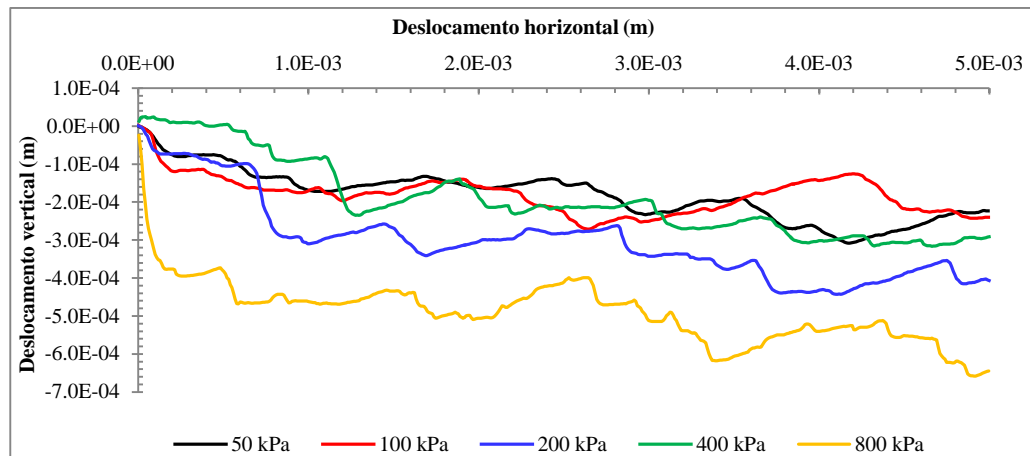


(c)

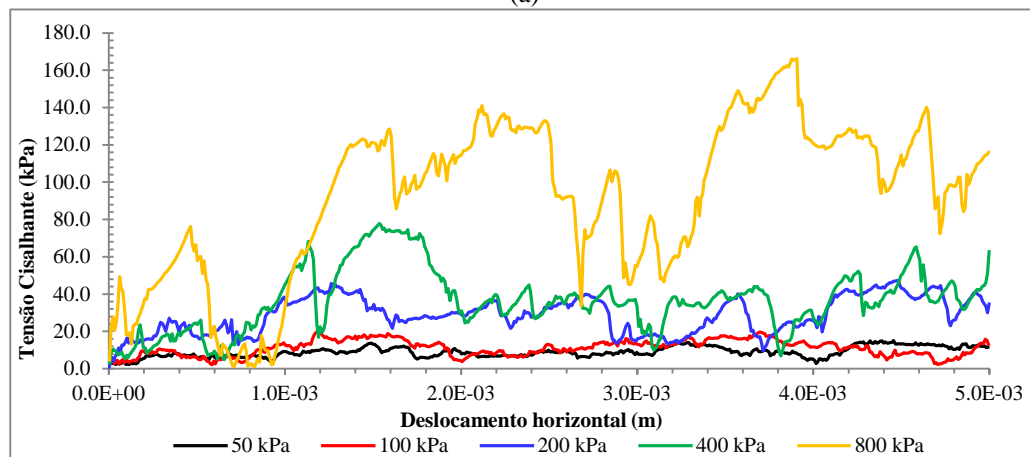
Figura F.3 Resultado da simulação do ensaio biaxial - Amostra densa -  $\phi\mu = 0,50$ .

## Apêndice G

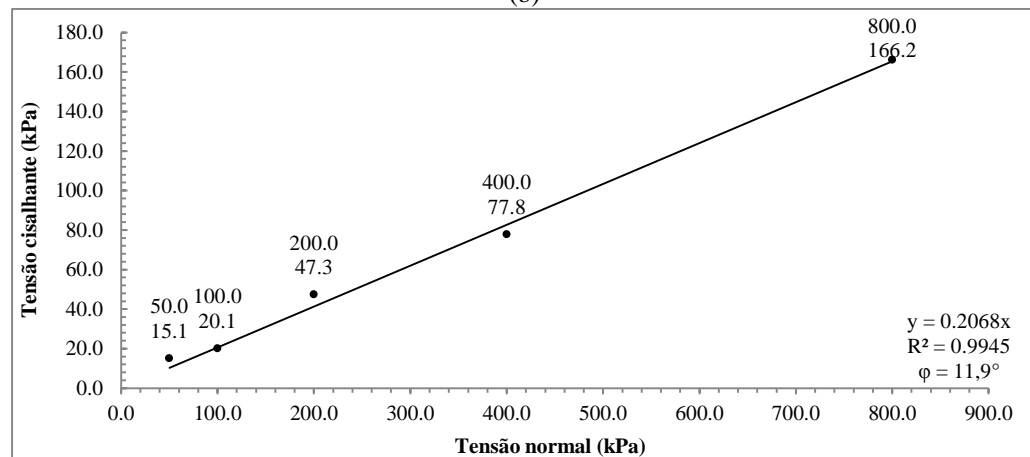
### Resultados das simulações dos ensaios de cisalhamento direto



(a)

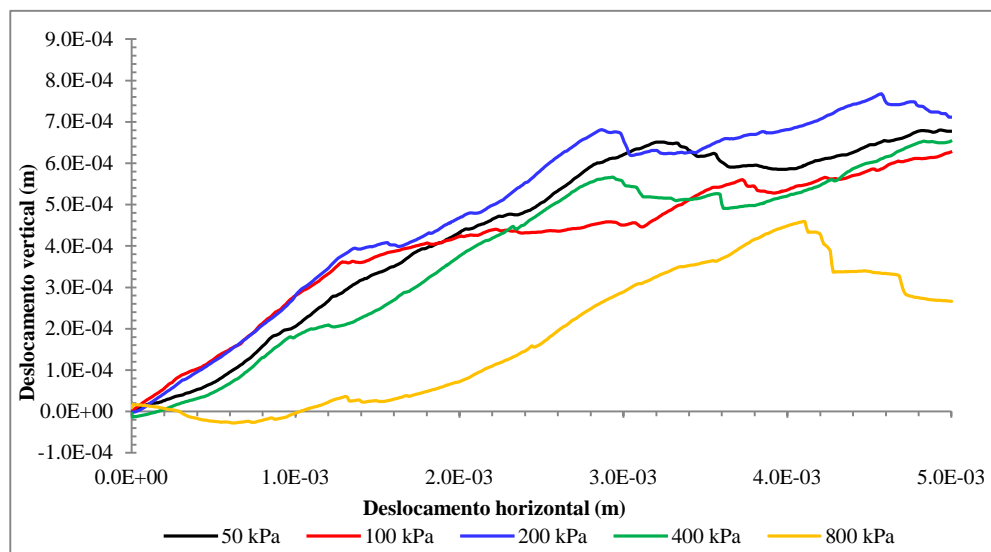


(b)

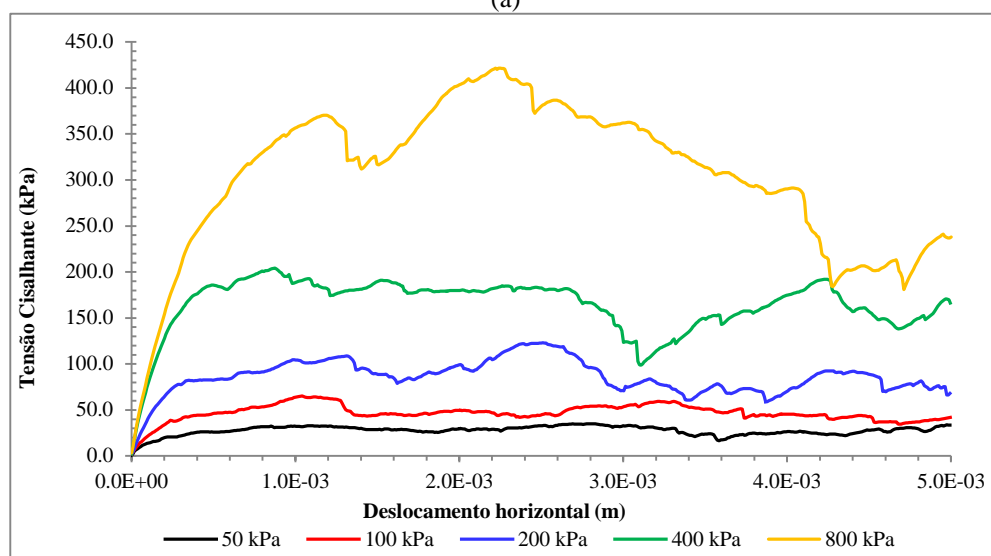


(c)

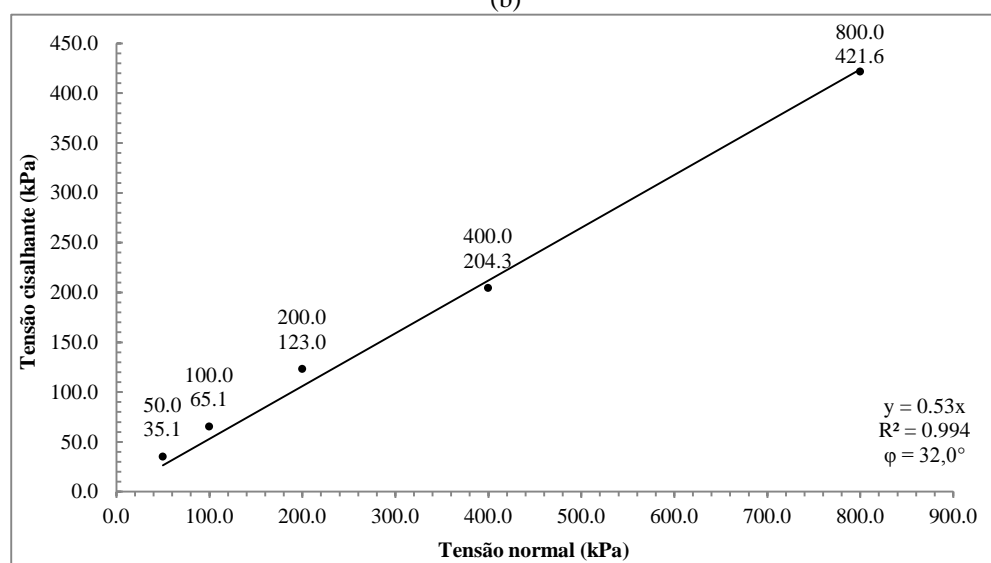
Figura G.1 Resultado da simulação do ensaio de cisalhamento direto - Amostra densa -  $\phi\mu = 0,00$ .



(a)

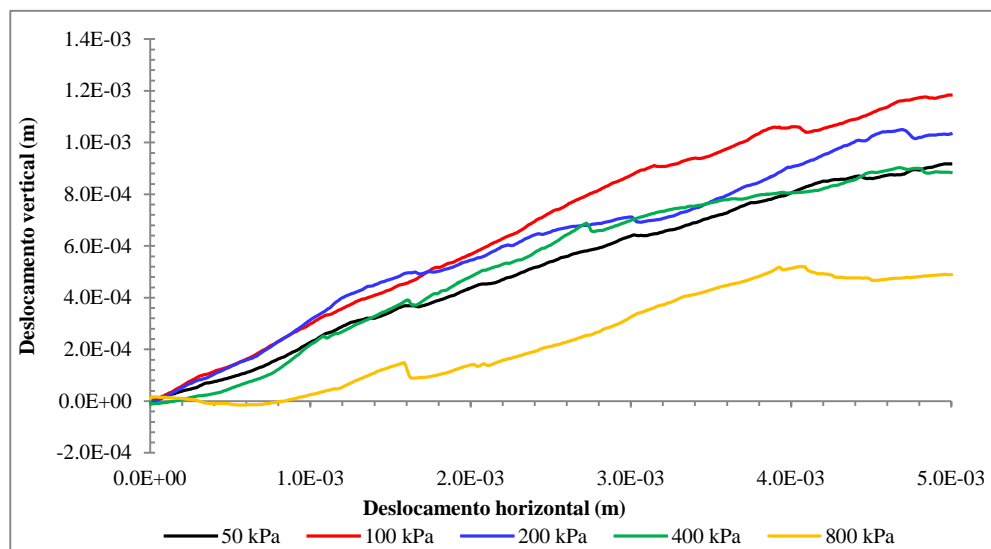


(b)

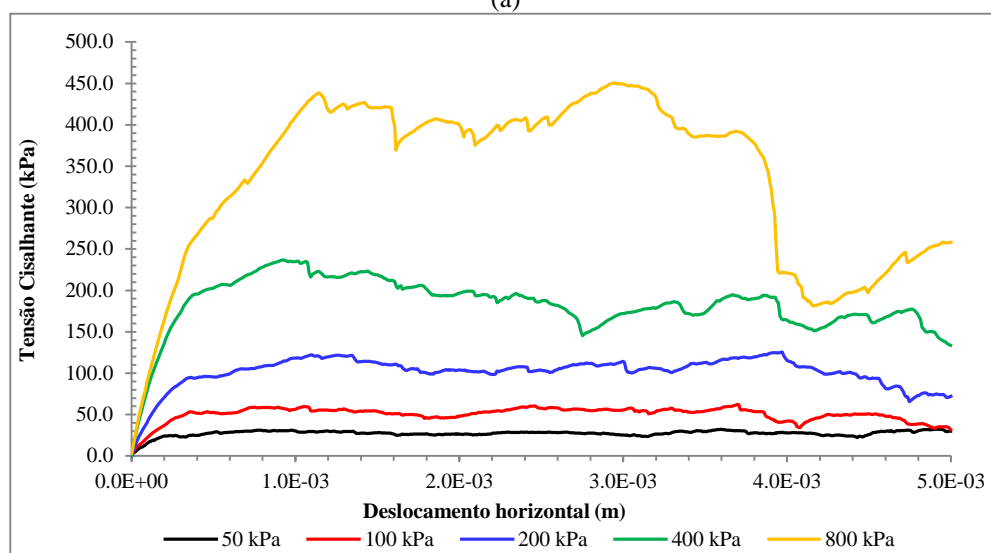


(c)

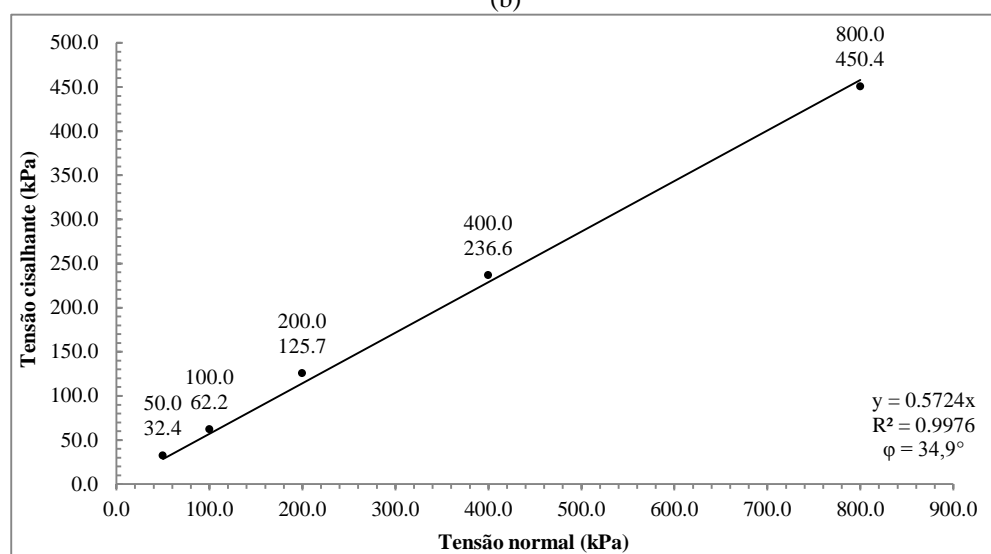
Figura G.2 Resultado da simulação do ensaio de cisalhamento direto - Amostra densa -  $\phi\mu = 0,36$ .



(a)



(b)

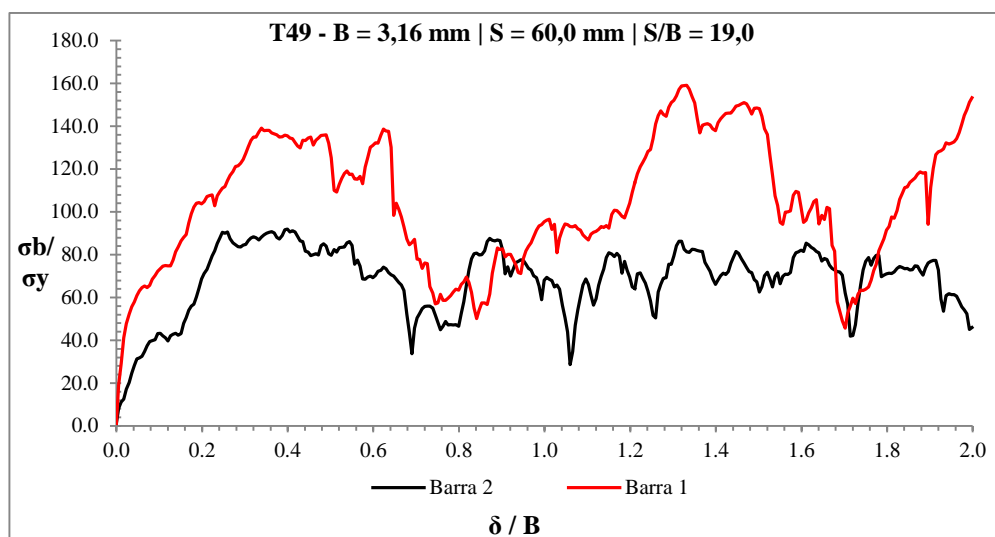


(c)

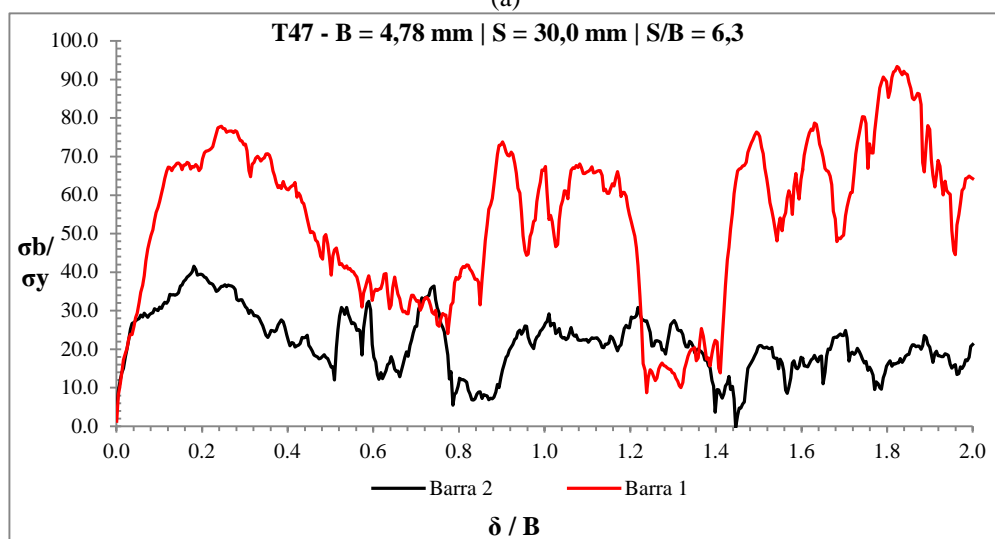
Figura G.3 Resultado da simulação do ensaio de cisalhamento direto - Amostra densa -  $\phi\mu = 0,50$ .

## Apêndice H

### Resultados das simulações dos ensaios de arrancamento em duas barras

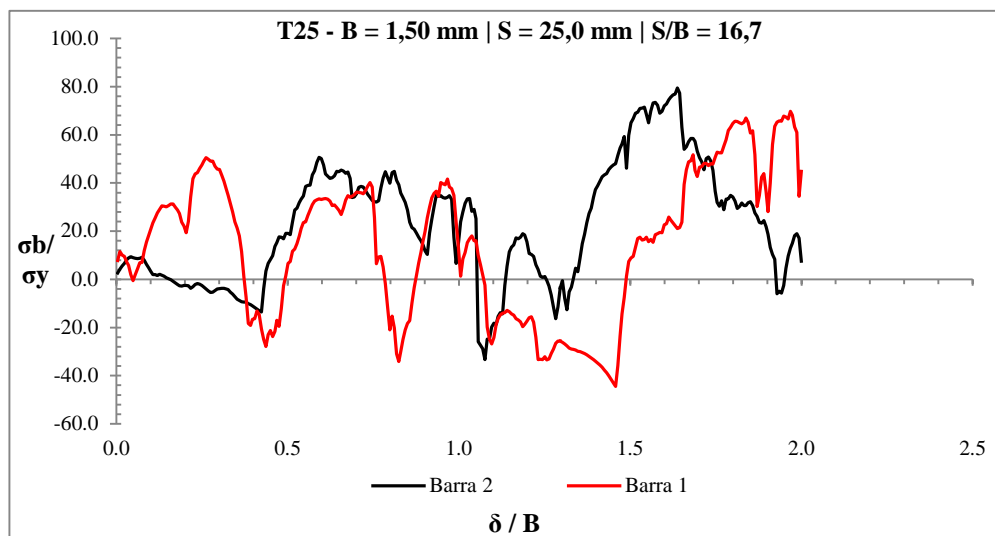


(a)

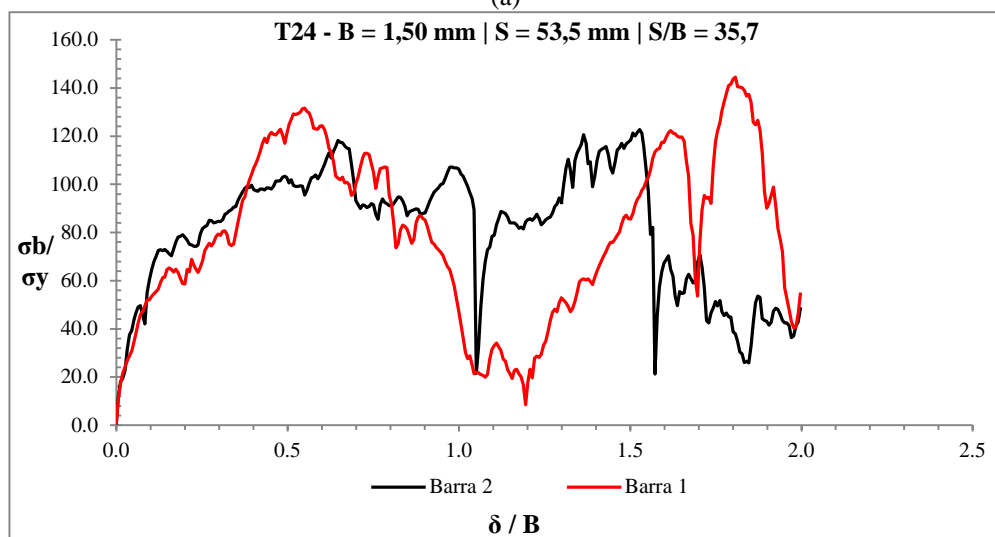


(b)

Figura H.1 Resultados das simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras Areia Leighton Buzzard graduação 7/14.



(a)



(b)

Figura H.2 Resultados das simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras - Areia Leighton Buzzard graduação 14/25 - B = 1,50 mm.

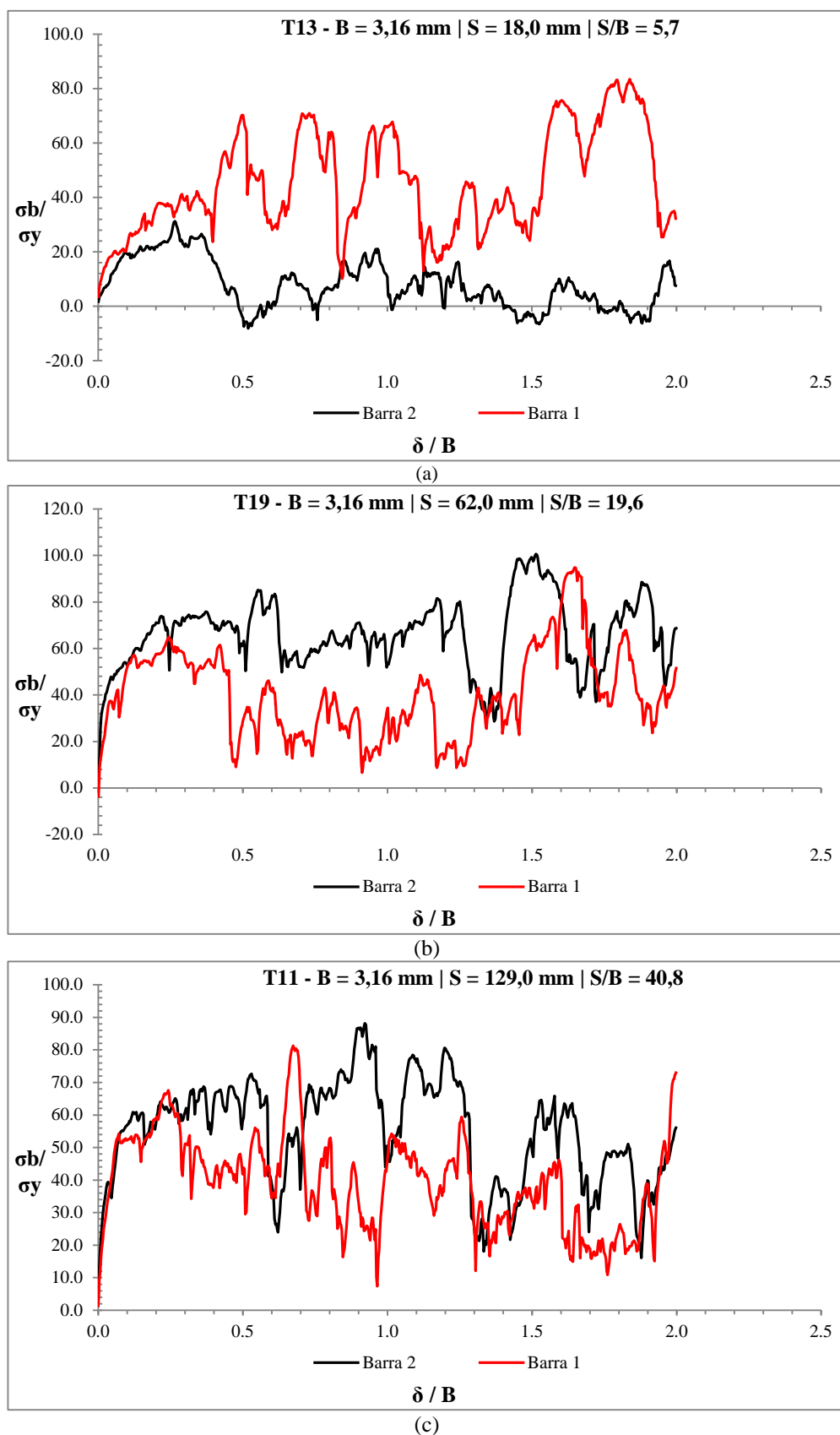
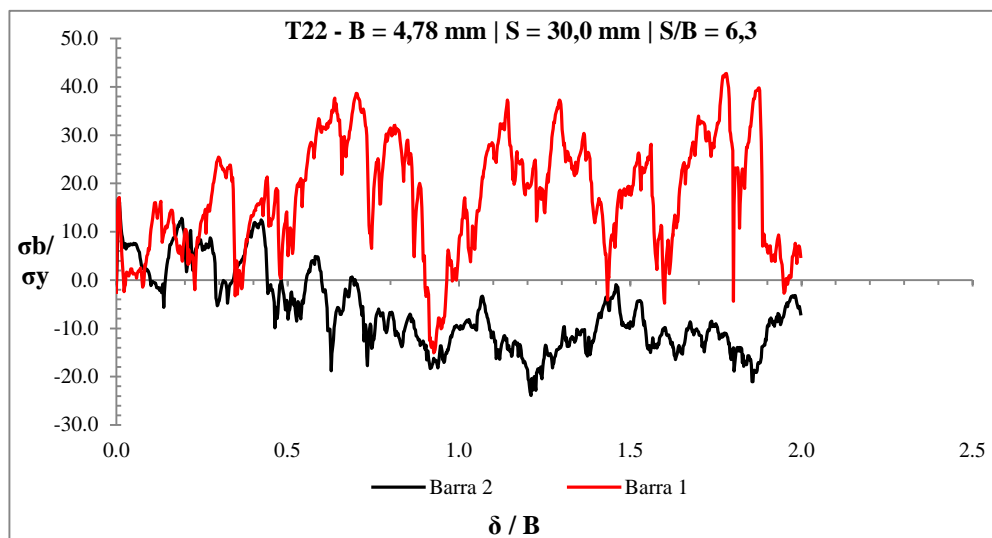
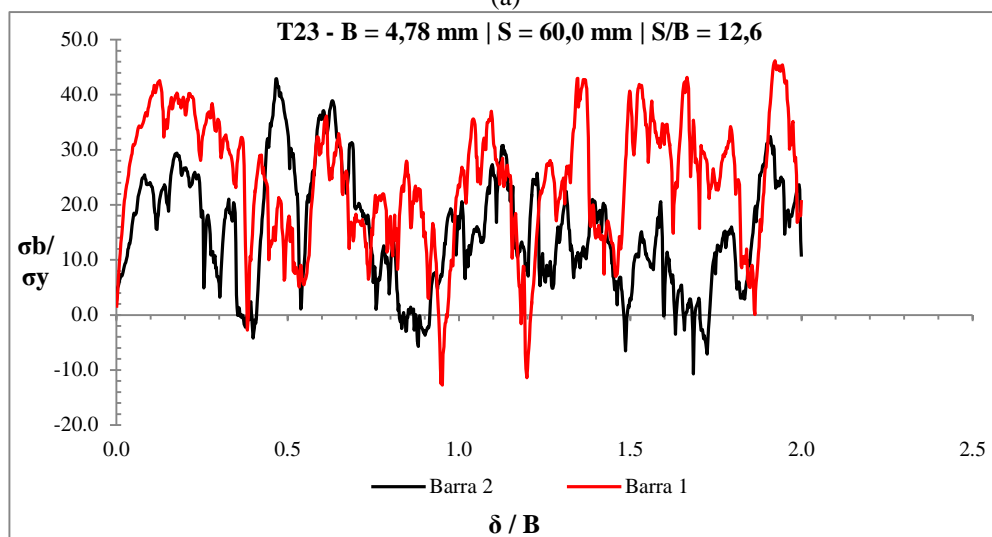


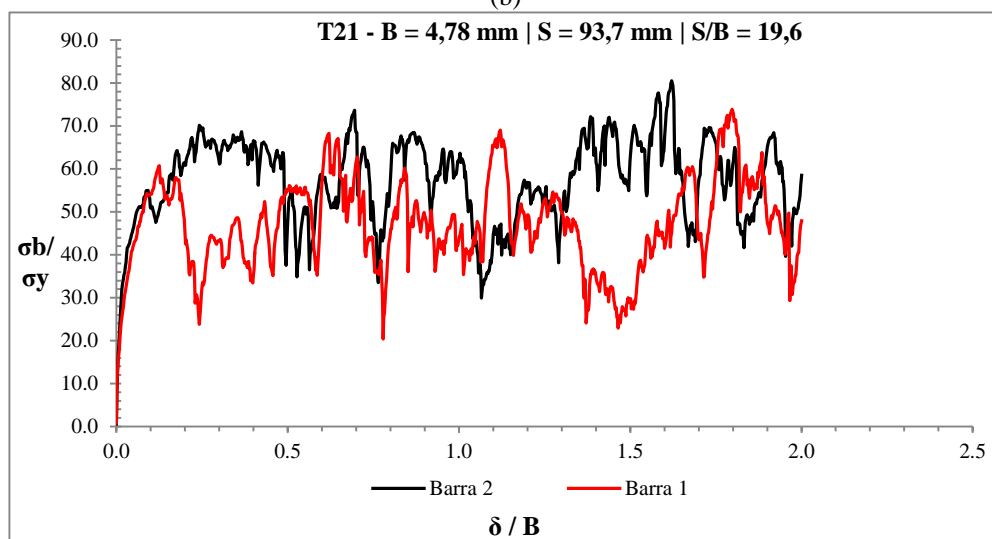
Figura H.3 Resultados das simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras - Areia Leighton Buzzard graduação 14/25 - B = 3,16 mm.



(a)



(b)



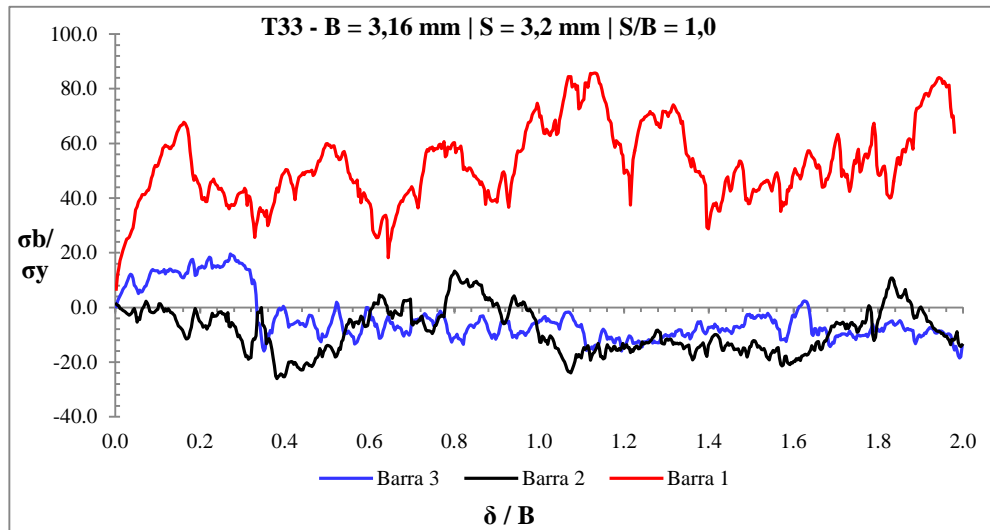
(c)

Figura H.4 Resultados das simulações do ensaio de arrancamento em 2 barras - Areia Leighton Buzzard graduação 14/25 - B = 4,78 mm.

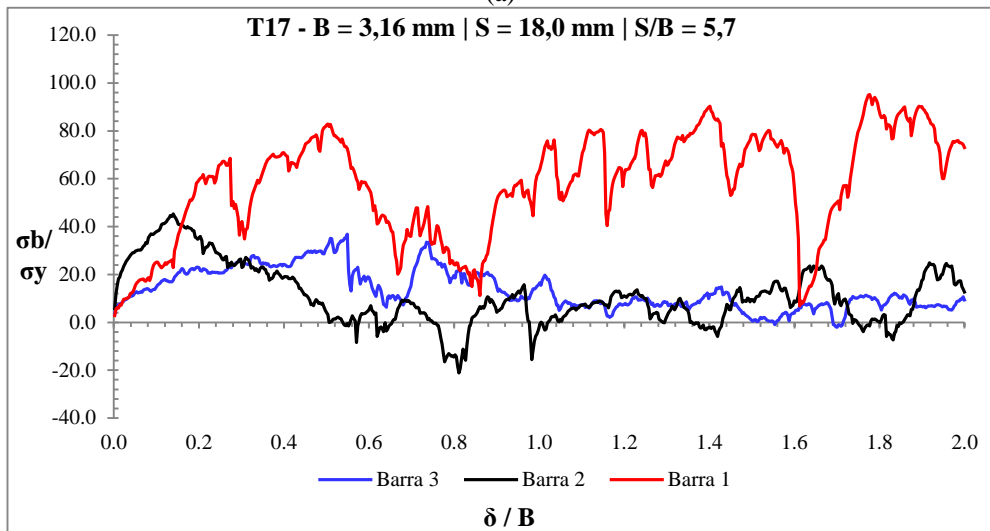


## Apêndice I

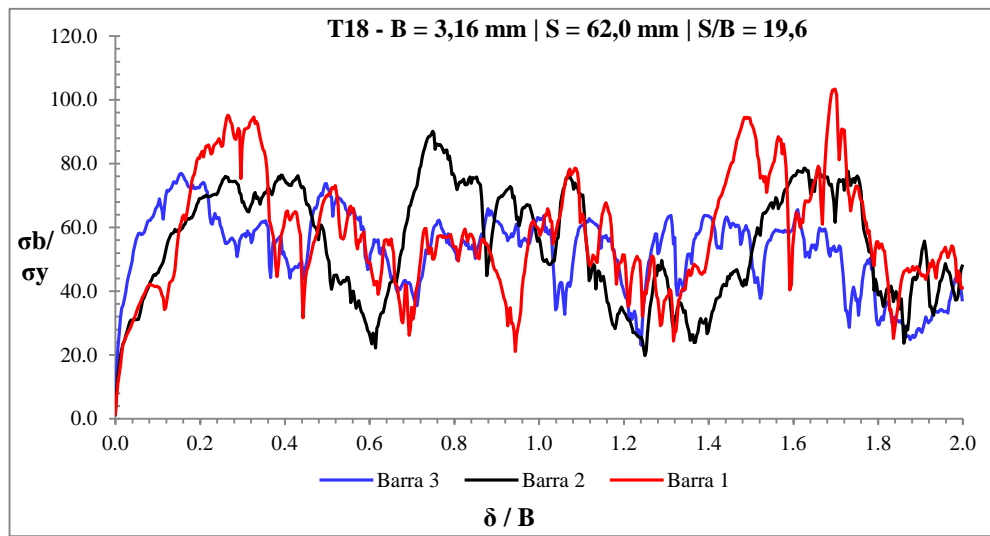
### Resultados das simulações dos ensaios de arrancamento em três barras



(a)



(b)



(c)

Figura I.1 Resultados das simulações do ensaio de arrancamento em 3 barras - areia leighton buzzard graduação 14/25