



Jorge Luis Cárdenas Guillén

**Estudo de Modelos Constitutivos para Previsão da
Liquefação em Solos sob Carregamento Monotônico**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-
Rio. Área de Concentração: Geotecnia.

Orientadores: Sergio A. B. da Fontoura
Celso Romanel

Rio de Janeiro
Maio de 2004



Jorge Luis Cárdenas Guillén

Estudo de Modelos Constitutivos para Previsão da Liquefação em Solos sob Carregamento Monotônico

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

Prof. Sergio Augusto B. da Fontoura

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Deane de Mesquita Roehl

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Romero César Gomes

Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de Maio de 2004

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

Jorge Luis Cárdenas Guillén

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-Perú) em 1997. Atuou na área geotécnica do Centro de Investigações Sísmicas e Mitigação de Desastres (CISMID-UNI). Ingressou em 2002 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Cárdenas Guillén, Jorge Luis

Estudo de modelos constitutivos para a previsão da liquefação em solos sob carregamento monotônico / Jorge Luis Cárdenas Guillén; orientadores: Sergio A. B da Fontoura, Celso Romanel. - Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

137f. : il. : 29,7 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Liquefação estática. 3. Modelos constitutivos. 4. Liquefação de areias. 5. Carregamento não drenado I. Sergio A. B. da Fontoura, II. Celso Romanel. III. Pontifícia Universidade Católica. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

A Deus, por sua bênçãos e por minha existência.

A meus queridos pais, Maura e Maximo, pelo imenso amor e confiança.

A minhas irmãs, Corina, Pilar e Alicia, pelo apoio e conselhos fraternais.

A meu irmãozinho Luis Angel (in memoriam) por ser minha luz.

Considero más valiente al que conquista sus deseos que al que conquista a sus enemigos, ya que la victoria más dura es la victoria sobre uno mismo.

Aristóteles.

Agradecimentos

Não poderia começar estes agradecimentos sem expressar minha profunda e sincera gratidão ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pelos recursos fornecidos para a realização da presente dissertação, e a este grande Brasil, pela oportunidade de ter aqui vivido e conseguido realizar uma grande aspiração pessoal. Desejo também agradecer a todas as pessoas que contribuíram, de uma ou outra maneira, com o desenvolvimento deste trabalho, em particular:

Ao professor e orientador Celso Romanel, pela orientação, pela amizade demonstrada e apoio pessoal. Os seus ensinamentos, sugestões, leitura e correção do manuscrito final tornaram possível a apresentação da dissertação na presente forma;

Ao professor e orientador Sergio A. B. Da Fontoura, pela oportunidade dada com a indicação do presente tema de dissertação e sugestões ao longo do seu desenvolvimento;

Ao professor e amigo Denys Parra, da Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-Perú) por ter me incentivado a iniciar o curso de Mestrado na PUC-Rio;

A meus grandes companheiros do Mestrado, Flávio Silva, Fernando Valle e Marcos Ramidan, pela amizade e convivência durante os momentos de alegrias e de dificuldades;

Aos meus colegas e amigos da sala 608-L-Favelinha: Carlos Ataliba, Nelly, Luciana, Saré e Luis, pela amizade, confiança e respeito;

Aos meus colegas da sala 611-L-Favelinha: Leandro, Renato, Ciro, Patrício, Ricardo, Rafael, pelos momentos de agradável convivência no início do Mestrado;

A Ana Roxo, pela amizade e auxílio em todos os momentos de necessidade;

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, pelos excelentes conhecimentos transmitidos durante o curso de Mestrado;

A meus compatriotas do Perú e colegas da PUC, pela amizade, convivência e apoio nestes anos, os mesmos que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho, especialmente a: M. Verônica Rebuli, Maria S. Zarate, Betty S. Peña, Igor Otiniano, Hilda Pari, Manuel Sanchez e Jackeline R. Castañeda;

A Capes pelo apoio financeiro;

Muchas gracias a todos...

Resumo

Guillén, Jorge Cárdenas; da Fontoura, Sergio A. B.; Romanel, Celso. **Estudo de Modelos Constitutivos para Previsão da Liquefação em Solos sob Carregamento Monotônico**. Rio de Janeiro, 2004. 137 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Historicamente é sabido que muitas das rupturas ocorridas em barragens ou taludes naturais podem ser atribuídas ao fenômeno da liquefação de solos arenosos, causada pela ação de carregamentos dinâmicos gerados por explosão ou, mais freqüentemente, por terremotos. Quando liquefação ocorre, um súbito aumento da poropressão faz decrescer a resistência ao cisalhamento do solo e sua capacidade de suportar pontes e edifícios é significativamente reduzida. Solo liquefeito também pode exercer altas pressões sobre estruturas de contenção, causando inclinações da mesma e movimentos do solo que, por sua vez, originam recalques e destruição de estruturas localizadas sobre a superfície do terreno. O termo liquefação tem sido empregado para descrever fenômenos relacionados, que produzem efeitos similares, mas cujos mecanismos de formação são bastante diferentes. Estes fenômenos são modernamente descritos como fluxo por liquefação e mobilidade cíclica. Fluxo por liquefação é o fenômeno no qual o equilíbrio estático é destruído por carregamentos estáticos ou dinâmicos em um depósito de solo com baixa resistência residual. Colapsos causados por fluxo por liquefação são freqüentemente caracterizados por movimentos rápidos e de grande extensão. Mobilidade cíclica, por outro lado, é causada por carregamentos cíclicos em solos sob tensões cisalhantes estáticas inferiores à resistência ao cisalhamento do material, com as deformações desenvolvendo-se gradualmente. A execução de barragens de rejeito usando a técnica de construção à montante pode levar à ocorrência de liquefação estática se a velocidade de construção for suficientemente alta para causar o desenvolvimento de excessos de poropressão. A resposta de liquefação pode ser observada em amostras de solo fofo quando as tensões de cisalhamento atingem um pico seguido por uma fase de amolecimento aparente que, no caso de carregamento não drenado, é associado com a tendência

do material em contrair de volume. Para alguns estados iniciais, a parte descendente da resposta do material pode ser seguida por uma fase crescente que se atenua à medida que o estado permanente ou crítico for atingido. Nesta dissertação, a modelagem da resposta de liquefação por carregamento estático, foi feita considerando-se modelos propostos na literatura por Juárez-Badillo (1999b) e Gutierrez e Verdugo (1995). Este último, principalmente após modificação introduzida pela dependência de alguns parâmetros em relação à tensão de confinamento, levou a resultados bastante satisfatórios nas retroanálises consideradas, apesar da relativa simplicidade da formulação.

Palavras-chave

Liquefação estática, Modelos constitutivos, Liquefação de areias, Carregamento não drenado.

Abstract

Guillén, Jorge Cárdenas; da Fontoura, Sergio A. B.; Romanel, Celso (Advisors). **Study of Constitutive Models to Predict Soil Liquefaction under Monotonic Loading**. Rio de Janeiro, 2004. 137 p . MSc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Historically it is known that many failures in earth dams and natural slopes can be attributed to the phenomenon of sand liquefaction, caused by dynamic loads generated by earthquake shaking or other rapid loading, such as blasts. When liquefaction occurs, the strength of the soil decreases and its ability to support foundations for buildings and bridges is significantly reduced. Liquefied soil can also exert higher pressure on retaining walls, which can cause them to tilt or slide, yielding settlement of the retained soil with risks of destruction of structures on the ground surface. The term liquefaction has actually been used to describe a number of related phenomena, which produce similar effects but whose mechanisms are quite different in nature. These phenomena can be divided into two main categories: flow liquefaction and cyclic mobility. Flow liquefaction is a phenomenon in which the static equilibrium is destroyed by static or dynamic loads in a soil deposit with low residual strength. Failures caused by flow liquefaction are often characterized by large and rapid movements. Cyclic mobility, on the other hand, is a liquefaction phenomenon triggered by cyclic loading, occurring in soil deposits with static shear stresses lower than the soil strength. Deformations due to cyclic mobility develop incrementally because of static and dynamic stresses that exist during an earthquake. The rising of tailing dams using the upstream construction technique can lead to static liquefaction failure if the rate of construction is sufficiently high to cause excess pore pressure to develop in the tailings. The liquefaction response is observed for loose specimens when the shear stress exhibits a peak followed by a phase of apparent softening that, in undrained loading, is associated with the tendency of the material to contract (densify). For some initial loading states, the descending part of the response is followed by an increasing part, leveling-off eventually when the material reaches the final,

critical (steady) state. In this thesis, the modeling of the phenomenon of static liquefaction is carried out considering the constitutive models proposed in the literature by Juárez-Badillo (1999b) and Gutierrez & Verdugo (1995). The latter, mainly after introducing the assumption that some material parameters are stress dependent and not simple constants, as in the original version, produced good matching between experimental and predicted results, in spite the simplicity of the mathematical formulation.

Keywords

Static liquefaction, Constitutive models, Sand liquefaction, Undrained loading.

Lista de símbolos

ALFABETO ROMANO

a	– constante da equação hiperbólica (Modelo Gutierrez e Verdugo)
b	– constante da equação hiperbólica (Modelo Gutierrez e Verdugo)
B	– modulo de deformação volumétrica (Modelo Gutierrez e Verdugo)
B_0	– modulo de deformação volumétrica inicial (Modelo Gutierrez e Verdugo)
B_s	– parametros do material (Modelo Gutierrez e Verdugo)
CPT	– ensaio de Cone
DMT	– ensaio de Dilatômetro
Dr	– densidade relativa
e	– índice de vazios
e_a	– deformação natural de desvio
e_c	– índice de vazios critico
e_0	– índice de vazios no estado inicial
e_{ss}	– índice de vazios no estado permanente
$f(q)$	– função simples da tensão de desvio
$f^I(e_a)$	– função propria da deformação natural de desvio (função invertida)
$f^D(q)$	– função propria da tensão de desvio (função de ductilidade)
$f^S(q)$	– função propria da tensão de desvio (função de sensibilidade)
$f^S(u)$	– função propria de sensibilidade da poropressão
FLS	– superfície de fluxo por liquefação
G	– inclinação da tangente da curva $\eta : \varepsilon_s$ (Modelo Gutierrez e Verdugo)
G_0	– inclinação da tangente inicial da curva $\eta : \varepsilon_s$ (Modelo Gutierrez e Verdugo)
G_r	– parâmetros do material (Modelo Gutierrez e Verdugo)
m	– parâmetro do material (Modelo Gutierrez e Verdugo)
N	– numero de golpes do SPT

N^{corr}	– correção do numero equivalente do SPT
N^{eq}	– numero de golpes equivalentes do SPT
LL	limite de liquidez
p	– tensão total media
p_a	– pressão atmosférica
p'	– tensão efetiva media
p'_{cr}	– tensão efetiva no estado permanente
q	– tensão de desvio
r	– constante (Modelo Gutierrez e Verdugo)
s	– constante (Modelo Gutierrez e Verdugo)
S_u	– resistência residual não drenada
SPT	– ensaio standar de penetração
SSL	– linha de estado permanente
u	– poropressão
w	– teor de umidade
y_I	– função de sensibilidade invertida em termos da deformação natural de desvio
y_N	– função de normal em termos da deformação natural de desvio
y^e	– função de sensibilidade da poropressão em termos da deformação natural de desvio
y^η	– função de sensibilidade da poropressão em termos da deformação natural cisalhante
y_e^e	– função de sensibilidade equivalente da poropressão em termos da deformação natural de desvio
y_e^η	– função de sensibilidade equivalente da poropressão em termos da deformação natural cisalhante
y_D^e	– função de ductilidade em termos da deformação natural de desvio
y_S^e	– função de sensibilidade em termos da deformação natural de desvio
y_D^η	– função de ductilidade em termos da deformação natural cisalhante
y_S^η	– função de sensibilidade em termos da deformação natural cisalhante

ALFABETO GREGO

α	– constante (Modelo Gutierrez e Verdugo)
α	– parâmetro da função de sensibilidade da poropressão
α_e	– parâmetro da função de sensibilidade equivalente da poropressão
β	– constante (Modelo Gutierrez e Verdugo)
β	– expoente da função de sensibilidade da poropressão
β_e	– expoente da função de sensibilidade equivalente da poropressão
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	– deformações principais
ε	– deformação axial
ε_a	– deformação axial de Cauchy
ε_v	– deformação volumétrica
ε_s	– deformação cisalhante
ε_r	– deformação radial
ε_v^p	– deformação plástica volumétrica
ε_s^p	– deformação plástica cisalhante
ε_a^p	– deformação plástica axial
ε_{vs}^p	– componente de desvio da deformação plástica volumétrica
ε_{vp}^p	– componente isotropico da deformação plástica volumétrica
ε_r^p	– deformação plástica radial
$\ln(1 + \varepsilon_a)$	– deformação axial natural
$\delta \varepsilon_{vd}^p / \delta \varepsilon_s^p$	– dilatância plástica
ϕ'_{cr}	– ângulo de atrito efetivo no estado permanente
η	– razão de tensão
η_c	– deformação cisalhante natural
η_f	– razão de tensão no pico (Modelo Gutierrez e Verdugo)
η_{cr}	– razão de tensão no estado permanente (Modelo Gutierrez e Verdugo)

μ_c	– coeficiente cisalhante
ν_D	– expoente cisalhante da função de ductilidade pos-pico
ν_I	– expoente cisalhante da função invertida
ν_N	– expoente cisalhante da função normal
ν_p	– constante de proporcionalidade geral ou expoente cisalhante
ν_S	– expoente cisalhante da função de sensibilidade
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	– tensões principais totais
$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$	– tensões principais efetivas
σ	– tensão normal
σ_a	– tensão axial
σ_{eo}	– tensão inicial de confinamento equivalente devido ao intertravamento das partículas sólidas
σ_i	– tensão normal isotropica
σ_r	– tensão radial
σ'	– tensão normal efetiva
σ'_a	– tensão axial efetiva
σ'_r	– tensão radial efetiva
σ'_{v0}	– tensão efetiva vertical de campo
σ'_{1c}	– tensão efetiva vertical do ensaio de consolidação
σ'_{3c}	– tensão de confinamento efetivo
σ_{co}	– tensão inicial de consolidação
$(\sigma_1 - \sigma_3)$	– tensão de desvio
τ	– tensão de cisalhamento
ψ	– parâmetro de estado
ψ'	– inclinação da linha de estado constante
ψ'_L	– inclinação da superfície de fluxo por liquefação

Sumário

1 Introdução	23
2 O Fenômeno da liquefação	29
2.1 Noções sobre fluxo por liquefação e mobilidade cíclica	29
2.2 Critérios de suscetibilidade à liquefação	33
2.2.1 Critério geológico	33
2.2.2 Critério de composição de material	33
2.2.3 Critérios de estado	34
2.3 Iniciação do fluxo por liquefação	40
2.4 Resistência ao cisalhamento de solos liquefeitos	43
2.4.1 Ensaios de laboratório para determinação da resistência no estado permanente	44
2.4.2 Correlação com ensaios SPT para cálculo da resistência residual em solos arenosos no estado permanente	45
2.4.3 Resistência residual normalizada em solos coesivos	46
3 Modelo de Juárez-Badillo (1999b)	48
3.1 Introdução	48
3.2 Equações gerais para a região pré-pico	48
3.2.1 Função de sensibilidade	48
3.2.2 Função normal	51
3.2.3 Função de sensibilidade invertida	53
3.3. Equações gerais para a região pós-pico	55
3.3.1 Função dutilidade	55
3.4 Equação geral de variação da poropressão	58
3.4.1 Função de sensibilidade da poropressão	58
3.5 Obtenção dos parâmetros do modelo	60
4 Modelo de Gutierrez e Verdugo (1995)	69
4.1 Hipóteses do modelo	70
4.2 Deformação volumétrica plástica	70
4.3 Variação de poropressão	73
4.4. Razão de tensão no pico da resistência	74

4.5 Variação da razão de tensão com a deformação cisalhante plástica	75
4.6 Retroanálise de ensaio triaxial não drenado em areia	77
4.6.1. Procedimento geral de cálculo	78
4.6.2. Proposta original	78
4.6.3. Proposta modificada	79
5 Aplicação dos modelos constitutivos	84
5.1. Características do material	84
5.2 Retroanálise com o modelo de Juárez-Badillo (1999b)	88
5.3. Retroanálise com a versão modificada do modelo de Gutierrez e Verdugo (1995)	92
5.4 Comentários sobre o desempenho dos modelos constitutivos investigados	100
6. Conclusões e sugestões	109
7 Referências bibliográficas	111
Apêndice A	122
Apêndice B	133
Apêndice C	136

Lista de figuras

Figura 1.1 Liquefação do solo de fundação em Niigata, Japão, 1964, causando colapso do conjunto habitacional Kawagishi-cho (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Figura 1.2 Recalque do terreno por liquefação junto a uma estrutura de contenção da Great Hanshin Bridge. (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Figura 1.3 Deslizamento na barragem Lower San Fernando, em 1971 (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Figura 1.4 Escorregamentos laterais (*lateral spreading*) ao longo do rio Motagua, Guatemala, durante terremoto em 1976, notando-se fraturas paralelas ao rio. (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Figura 1.5 Escorregamentos laterais (*lateral spreading*) ao redor do lago Merced, 1957 (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Figura 1.6 Ocorrência de erupções de areia (*sand boils*) na rodovia 98 durante o terremoto de El Centro, 1979 (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Figura 1.7 Ocorrência de erupções de areia (*sand boils*) durante o terremoto de Loma Prieta (Santa Cruz, California) em 1979. (United States Geological Survey).

Figura 2.1 Ensaios não drenados em amostra de areia saturada (Castro e Poulos, 1977).

Figura 2.2 Linha de vazios crítico (Casagrande, 1936).

Figura 2.3 Comportamento típico de ensaios triaxiais não drenados realizados por Castro (1969).

Figura 2.4 Linha de estado permanente em representação tridimensional no espaço $e - \tau - \sigma'$ e nos planos $\tau - e$, $\tau - \sigma'$, e $e - \sigma'$ (Kramer, 1996).

Figura 2.5 Proporcionalidade entre a linha SSL baseada em resistência não drenada S_u e a linha SSL baseada em tensão efetiva de confinamento (em escala logarítmica).

Figura 2.6 Estimativa da suscetibilidade de liquefação pela linha de estado permanente (Kramer, 1996).

Figura 2.7 Definição do parâmetro de estado ψ .

Figura 2.8 Liquefação é iniciada nas amostras C, D, E nos pontos marcados que a superfície FLS (reta tracejada).

Figura 2.9 Superfície de fluxo por liquefação no plano $p' : q$ (Kramer, 1996).

Figura 2.10 Procedimento para estimar a resistência não drenada na condição permanente (Poulos et al., 1985).

Figura 2.11 Relação entre resistência não drenada residual e o número de golpes corrigido do ensaio SPT (Seed e Harder, 1990).

Figura 3.1 Função de sensibilidade em função da deformação natural de desvio na direção axial.

Figura 3.2 Função de sensibilidade em função da deformação cisalhante natural.

Figura 3.3 Função normal y_N para $v_N \geq 0$.

Figura 3.4 Função de sensibilidade invertida em função da deformação natural de desvio na direção axial.

Figura 3.5 Função de utilidade em termos da deformação natural de desvio na direção axial.

Figura 3.6 Função de utilidade em termos da deformação natural cisalhante.

Figura 3.7 Função de sensibilidade da poropressão em termos da deformação natural de desvio.

Figura 3.8 Influência da densidade relativa na ocorrência da liquefação monotônica (estática) na areia de Nevada (Yamamuro e Lade, 1997).

Figura 3.9 Comparação entre as curvas tensão-deformação experimentais e obtidas por retroanálise.

Figura 3.10 Curvas tensão-deformação da areia de Nevada ($Dr = 12\%$) em ensaios triaxiais não drenados (Yamamuro e Lade (1997).

Figura 3.11 Comparação entre resultados experimentais e previstos pelo modelo de Juárez-Badillo (1999b).

Figura 3.12 Retroanálise da variação da tensão confinante efetiva em amostras da areia de Nevada ($Dr = 12\%$) - Yamamuro e Lade (1997).

Figura 3.13 Variação prevista de poropressão para as amostras da areia de Nevada ($Dr = 12\%$) em ensaios triaxiais de compressão convencional não drenados.

Figura 4.1 Previsão da trajetória de tensão efetiva nos ensaios em areia com $\sigma'_3 = 1; 2$ e 3 MPa, de acordo com proposta original de Gutierrez e Verdugo (1995).

Figura 4.2 Obtenção dos parâmetros G_r e r da equação (4.27).

Figura 4.3 Obtenção dos parâmetros B_s e s da equação (4.7).

Figura 4.4 Previsão da trajetória de tensão efetiva nos ensaios em areia com $\sigma'_3 = 1, 2$ e 3 MPa, de acordo com versão modificada do modelo de Gutierrez e Verdugo.

Figura 4.5 Previsão da trajetória de tensão efetiva nos ensaios em areia com $\sigma'_3 = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ e 3 MPa, de acordo com versão modificada do modelo de Gutierrez e Verdugo.

Figura 4.6 Previsão do incremento da poropressão nos ensaios em areia com $\sigma'_3 = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ e 3 MPa, de acordo com versão modificada do modelo de Gutierrez e Verdugo.

Figura 5.1 Curva tensão de desvio-deformação axial.

Figura 5.2 Curva da poropressão-deformação axial.

Figura 5.3 Trajetória de tensões efetivas da amostra de areia siltosa CIDMID-UNI).

Figura 5.4 Curva tensão-deformação versus deformação axial da amostra de rejeito de mineração de ferro (Gomes et al. 2002).

Figura 5.5 Curva da poropressão-deformação axial da amostra de rejeito de mineração de ferro (Gomes et al. 2002).

Figura 5.6 Trajetória das tensões efetivas da amostra de rejeito de ferro (Gomes et al. 2002).

Figura 5.7 Retroanálise das curvas tensão-deformação para as amostras de areia siltosa (CIDMID-UNI).

Figura 5.8 Poropressões experimentalmente medidas e correspondentes valores previstos através do modelo de Juárez-Badillo (1999b).

Figura 5.9 Retroanálise das trajetórias de tensão efetiva pelo modelo de Juárez-Badillo (1999b).

Figura 5.10 Em coordenadas transformadas a equação da hipérbole (4.21) se reduz à equação de uma linha reta.

Figura 5.11 Determinação dos valores dos parâmetros G_r e r (equação 4.27).

Figura 5.12 Determinação dos valores dos parâmetros B_s e s (equação 4.7).

Figura 5.13 Retroanálises das respostas observadas e previstas em ensaios triaxiais não drenados em amostras de areia siltosa (CIDMID-UNI).

Figura 5.14 Desenvolvimento de poropressões medidas e previstas nos ensaios não drenados em amostras de areia siltosa (CIDMID-UNI).

Figura 5.15 Trajetórias das tensões efetivas médias nos ensaios não drenados em amostras de areia siltosa (CIDMID-UNI).

Figura 5.16 Previsão das trajetórias das tensões efetivas médias para vários valores da tensão de confinamento do ensaio não drenado.

Figura 5.17 Equação da hipérbole (4.21) nos eixos transformados.

Figura 5.18 Retroanálise da curva tensão-deformação do material de rejeito de mineração de ferro (Gomes et al. 2002).

Figura 5.19 Poropressões nos ensaios não drenados em rejeito de mineração de ferro (Gomes et al. 2002).

Figura 5.20 Trajetórias de tensão efetiva média nos ensaios não drenados em rejeito de mineração de ferro (Gomes et al. 2002).

Figura 5.21 Previsão das trajetórias de tensão efetivas médias no material de rejeito da mineração de ferro, sob carregamento não drenado e várias tensões de confinamento.

Figura 5.22 Variação do módulo tangente com o parâmetro α .

Figura 5.23 Influência do parâmetro α na representação da curva tensão x deformação.

Figura 5.24 Variação do módulo volumétrico com o parâmetro β .

Figura 5.25 Influência do parâmetro β na curva tensão versus deformação.

Figura 5.26 Influência das tensões confinantes nas trajetórias das tensões efetivas médias.

Figura 5.27 Variação do módulo tangente com a tensão efetiva média para diversos valores da tensão de confinamento.

Figura 5.28 Variação do módulo tangente com a deformação axial para diversos valores das tensões de confinamento.

Figura 5.29 Variação do módulo tangente com as tensões efetivas médias.

Figura 5.30 Comportamento do módulo volumétrico sob diversas tensões de confinamento.

Figura 5.31 Comportamento da poropressão sob várias tensões confinantes.

Figura 5.32 Curvas evidenciando dilatância plástica.

Figura 5.33 Dilatância plástica do material sob diversos valores de tensão confinante.

Lista de tabelas

Tabela 4.1 Parâmetros do material no modelo de Gutierrez e Verdugo (1995).

Tabela 4.2 Parâmetros do material no modelo modificado, proposto nesta dissertação.

Tabela 4.3 Valores de G_0 e de B_0 , dependentes da tensão de confinamento na formulação modificada

Tabela 5.1 Parâmetros ajustados da função de sensibilidade pré-pico

Tabela 5.2 Parâmetros ajustados da função de utilidade pós-pico

Tabela 5.3 Parâmetros ajustados da função de sensibilidade para previsão de poropressões

Tabela 5.4 Parâmetros ajustados da função de sensibilidade equivalente para previsão de poropressões

Tabela 5.5 Valores dos parâmetros G e η_f para as diferentes tensões de confinamento dos ensaios CISMID-UNI

Tabela 5.6 Valores estimados do parâmetro B_0 para as diversas tensões de confinamento consideradas nos ensaios CISMID – UNI

Tabela 5.7 Parâmetros da versão modificada do modelo de Gutierrez e Verdugo (1995) para as amostras de rejeito de cobre – Perú.

Tabela 5.8 Valores dos parâmetros G e η_f para ensaios não drenados em rejeito de mineração de ferro.

Tabela 5.9 Valores do parâmetro B_0 para as tensões de confinamento dos ensaios triaxiais não drenados analisados.

Tabela 5.10 Parâmetros da versão modificada do modelo de Gutierrez e Verdugo.