Aplicação do Modelo Cam - clay Modificado a um Solo Arenoso

PAULO CÉSAR LODI

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientador : Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos
1998

À toda a minha família que
incessantemente ampara minhas
dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Ao grande mestre e amigo Prof. Dr. Orencio Monje Vilar pela constante dedicação, paciência e orientação;

Aos grandes amigos Marcos Rogério Malta e Benedito José Imbiriba Carneiro pela amizade e trabalho coletivo realizado;

Ao grande amigo Sandro Lemos Machado pelo apoio, estímulo, amizade e constante auxílio prestado desde o início procurando sempre corrigir, orientar e direcionar este trabalho;

A todos os professores do Departamento de Geotecnia pelo convívio e amizade;

Aos técnicos do Departamento : José Luís, Oscar, Benedito e o Sr. Antônio pela amizade e convivência nos trabalhos diários;

Às secretárias Maristela, Regina, Fabiana e ao Álvaro pela amizade e paciência;

A todos os amigos do Departamento de Geotecnia e àqueles que fazem parte de nosso convívio diário, em especial à Dona Rosa pela simpatia e carinho;

Ao Engenheiro Erivelto Moreira pela constante ajuda em todos os momentos difíceis;

Ao grande amigo Paulo G. C. A. Lins pelo incentivo e material de pesquisa;

Ao professor Dr. Benedito de Souza Bueno pela ajuda, amizade e esclarecimentos prestados;

Ao professor Dr. Alexandre B. Parreira pela paciência e esclarecimentos;

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xiv
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1 - Introdução	05
2.2 - Fundamentos de Elasticidade e Plasticidade	06
2.2.1 - Introdução	06
2.2.2 - Elasticidade nos Solos	07
2.2.3 - Plasticidade	10
2.2.3.1 - Critério de Tresca (1869)	13
2.2.3.2 - Critério de von Mises (1913)	13
2.3 - Critérios para a Identificação da Tensão de Escoamento	16
2.4 - Considerações Gerais Sobre Modelos Elastoplásticos	
para Solos	25
2.4.1 - Mecânica dos Solos dos Estados Críticos	27
2.4.1.1 - A Superfície de Roscoe	34
2.4.1.2 - A Superfície de Hvorslev	37
2.4.2- O Modelo Cam-clay	42
2.4.2.1 - Exemplos de Aplicação do Modelo Cam - clay	
Modificado	48

3 - MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 – Introdução	51
3.2 - Origem do Solo Estudado	52
3.3 - Ensaios de Compressão e Extensão Axial e Edométrica	53
3.4 - Ensaios Triaxiais com Multi-Trajatórias de Tensões	56
3.4.1 - Descrição do Equipamento	57
3.4.2 - Elementos do Sistema	58
3.4.2.1 - A câmara triaxial	58
3.4.2.2 - O "cap" para ensaios de extensão ("the extension device")	60
3.4.2.3 - O controlador digital (atuador)	61
3.4.2.4 - Medidores Locais de Deformação (Efeito Hall)	63
3.4.2.5 - O medidor de Deformação Axial	65
3.4.2.6 - O Medidor de Deformação Radial	65
3.4.3 - Operação do Sistema	66
3.4.3.1 - Trajetórias de Tensões	67
3.4.3.2 - Superfície de Plastificação	68
3.4.3.3 - Análise da lei de fluxo (Desvio da Normalidade)	68
3.5 - Simulação Numérica Utilizada	69
4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	72
4.1 - Parâmetros do Cam - clay	74
4.2 - Confronto entre Resultados Teóricos e Experimentais	82
4.2.1 - Análise das Curvas ($q \times \varepsilon_a$)	113
4.2.2 - Análise das Curvas ($\varepsilon_v \times \varepsilon_a$)	114
4.2.3 - Análise das Curvas ($p' \times \varepsilon_v$)	115

4.2.4 - Análise dos Critérios de Graham (1983) apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979)	115
4.2.5 - Análise da Superfície de Plastificação, da Lei de Fluxo e dos Desvios de Normalidade	116
 5 - CONCLUSÕES	 118
 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Relações tensão - deformação : (a) linear (b) não linear	07
Figura 2.2 -	Resultados típicos de ensaios triaxiais drenados : (a) - ($q \times \varepsilon_s$); (b) - ($\varepsilon_v \times \varepsilon_s$) e (c) - ($q \times \varepsilon_a$). (Wood, 1992)	08
Figura 2.3 -	Comportamento elastoplástico de um metal. Atkinson & Bransby (1978)	11
Figura 2.4 -	Comportamento elastoplástico de uma argila em um ensaio de compressão isotrópica. Atkinson & Bransby (1978)	12
Figura 2.5 -	Critérios de escoamento de Tresca (a) e von Mises (b) no espaço efetivo de tensões principais (Wood, 1992)	14
Figura 2.6 -	Leis de fluxo (a) potencial plástico (b) condição de normalidade. Atkinson & Bransby (1978)	15
Figura 2.7 -	(a) Trajetórias de tensões e superfície de escoamento no espaço ($q:p'$), (b) ensaio de compressão isotrópica, (c) ensaio de compressão confinada e (d) ensaio de compressão triaxial não-drenado (Wood,1992)	17
Figura 2.8 -	Trajetórias de tensões e pontos de escoamento obtidos por Tavenas et al.(1979) em argilas de St. Louis (Apud Wood, 1992)	18
Figura 2.9 -	Determinação dos pontos de escoamento através de ensaios triaxiais realizados em uma argila de St. Louis, (a) gráfico ($p' \times \varepsilon_v$), (b) gráfico de ($q \times \varepsilon_a$) e (c) gráfico de ($p' \times W$) (Apud Wood, 1992)	20
Figura 2.10 -	(a) Trabalho cumulativo (W) obtido da curva de ($\sigma_a \times \varepsilon_a$), (b) dedução dos pontos de escoamento através do gráfico de ($W \times \sigma_a$) (Apud Wood, 1992)	21
Figura 2.11 -	Superfícies de escoamento obtidas para uma amostra indeformada de argila através de ensaios triaxiais (a) diferentes superfícies de escoamento variáveis com a profundidade, (b) superfície de escoamento normalizada	

	pela tensão de pré-consolidação (Apud Wood, 1992)	22
Figura 2.12 -	Tipos de encruamento no espaço de tensões principais - (a) isotrópico (b) cinemático (Apud Arafati, 1992)	24
Figura 2.13 -	Superfície de plastificação sugerida por Drucker et al. (1955) (Apud Nader, 1993)	27
Figura 2.14 -	Resultados de ensaios triaxiais normalizados pela tensão de confinamento. Atkinson & Bransby (1978)	28
Figura 2.15 -	Resultados obtidos para a condição de estado crítico em termos de p' , q para ensaios drenados e não-drenados. Atkinson & Bransby (1978)	29
Figura 2.16 -	Comparação entre resultados obtidos para compressões isotrópica e confinada . Atkinson & Bransby (1978)	30
Figura 2.17 -	Valores de v e p' para a condição de estado crítico. Atkinson & Bransby (1978)	32
Figura 2.18 -	Resultados da figura (2.17) em escala semi-logarítmica. Atkinson & Bransby (1978)	33
Figura 2.19 -	Linha de estados críticos no espaço (p' , q , v). Atkinson & Bransby (1978)	33
Figura 2.20 -	Superfície de Roscoe com as trajetórias de tensões normalmente seguidas em ensaios triaxiais drenados e não-drenados. Atkinson & Bransby (1978)	35
Figura 2.21 -	Resultados de ensaios drenados e não-drenados acrescidos de resultados de ensaios a p' constante (os eixos estão normalizados em função de p'_e). Atkinson & Bransby (1978)	35
Figura 2.22 -	Resultados de amostras levemente pré-adensadas em eixos normalizados ($q'/p'_e \times p'/p'_e$). Atkinson & Bransby (1978)	36

Figura 2.23 -	Trajetória de tensão para um ensaio triaxial convencional drenado. Atkinson & Bransby (1978)	37
Figura 2.24 -	Valores de q e p' na ruptura, obtidos para amostras pré-adensadas (eixos normalizados). Atkinson & Bransby (1978)	38
Figura 2.25 -	Superfície de Hvorslev (reta AB), de Roscoe (linha BC), linha de estados críticos (pto B) e linha de compressão isotrópica (pto C). Atkinson & Bransby (1978)	39
Figura 2.26 -	Superfície limitante completa de estados do solo, composta da junção das superfícies de Roscoe e Hvorslev. Atkinson & Bransby (1978)	41
Figura 2.27 -	Trajetórias de tensões esperadas para ensaios não-drenados em amostras pré-adensadas. Atkinson & Bransby (1978)	42
Figura 2.28 -	Curva ($q \times (\epsilon_a - \epsilon_r)$) (Apud Nader, 1993)	44
Figura 2.29 -	Endurecimento e amolecimento no Cam - clay. (Apud Nader, 1993)	45
Figura 2.30 -	Superfícies de escoamento para o Cam - clay original e modificado (Wood, 1992).	46
Figura 3.1 -	Perfil do terreno no campo experimental experimental da EESC - USP – São Carlos (SP)	52
Figura 3.2 -	Câmara para ensaios edométricos	54
Figura 3.3 -	Prensa utilizada para ensaios edométricos	56
Figura 3.4 -	Montagem de ensaio triaxial convencional com aquisição direta de dados	56
Figura 3.5 -	Diagrama esquemático da realização de ensaios	57
Figura 3.6 -	Câmara triaxial do tipo Bishop & Wesley (7 kN/1700 kPa/38 mm/50mm)	58
Figura 3.7 -	Detalhe da câmara triaxial	59

Figura 3.8 -	Detalhe da base da câmara triaxial	60
Figura 3.9 -	Diagrama esquemático do “cap”	61
Figura 3.10 -	Atuadores de pressão	62
Figura 3.11 -	Diagrama esquemático de funcionamento dos atuadores	62
Figura 3.12 -	Medidores de deformação radial e axial	64
Figura 3.13 -	Medidores de efeito Hall montados sobre a amostra	64
Figura 3.14 -	Trajetoórias de tensões seguidas no plano ($p' \times q$)	67
Figura 3.15 -	Vetor de deformação plástica ($\delta \epsilon^p$) e desvio de normalidade (θ)	69
Figura 4.1 -	Distribuição granulométrica do solo para as cotas -3, -5 e -8m	73
Figura 4.2 -	Curva de compressão edométrica ($e \times \log p'$)	75
Figura 4.3 -	Curva de compressão isotrópica ($e \times \ln p'$)	75
Figura 4.4 -	Envoltória efetiva obtida considerando-se os ensaios de compressão axial	76
Figura 4.5 -	Gráfico ($q \times \epsilon_a$)	77
Figura 4.6 -	Gráfico de ($\epsilon_v \times \epsilon_a$)	77
Figura 4.7 -	Envoltória de resistência obtida para os ensaios triaxiais convencionais e ajuste pela origem no plano ($t' \times s'$)	78
Figura 4.8 -	Curvas de ($q \times \epsilon_s$) para a obtenção do Módulo de Deformação Cisalhante (G')	79
Figura 4.9 -	Ensaio convencional (1:3) de carga-descarga	79

Figura 4.10 -	Curva de $(q \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r))$	80
Figura 4.11 -	Resultados experimentais e calculados (planilha) para a trajetória de -30°	84
Figura 4.12 -	Resultados experimentais e calculados (planilha) para a trajetória de -50°	85
Figura 4.13 -	Resultados experimentais e calculados (planilha) para a trajetória de 30°	86
Figura 4.14 -	Resultados experimentais e calculados (planilha) para a trajetória de 40°	87
Figura 4.15 -	Resultados experimentais e calculados (planilha) para a trajetória de 50°	88
Figura 4.16 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 60°	89
Figura 4.17 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de $71,56^\circ$ (1:3) - ensaio 1	90
Figura 4.18 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de $71,56^\circ$ (1:3) - ensaio 2	91
Figura 4.19 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 100°	92
Figura 4.20 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 120°	93
Figura 4.21 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 140°	94
Figura 4.22 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 50$ kPa)	95

Figura 4.23 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 100$ kPa)	96
Figura 4.24 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 150$ kPa)	97
Figura 4.25 -	Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 200$ kPa)	98
Figura 4.26 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de -30°	99
Figura 4.27 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de -50°	99
Figura 4.28 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de 30°	99
Figura 4.29 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de 40°	100
Figura 4.30 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de 50°	100
Figura 4.31 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de 60°	100
Figura 4.32 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de $71,56^\circ$ (1)	101
Figura 4.33 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de $71,56^\circ$ (2)	101
Figura 4.34 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de 100°	101
Figura 4.35 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de 120°	102
Figura 4.36 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) para a trajetória de 140°	102
Figura 4.37 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) (ensaio triaxial c/ $\sigma_3 = 50$ kPa)	102
Figura 4.38 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) (ensaio triaxial c/ $\sigma_3 = 100$ kPa)	103
Figura 4.39 -	Gráficos de (s x W) e (p' x W) (ensaio triaxial c/ $\sigma_3 = 150$ kPa)	103

Figura 4.40 -	Gráficos de $(s \times W)$ e $(p' \times W)$ (ensaio triaxial $c/\sigma_3 = 200$ kPa)	103
Figura 4.41 -	Convenção adotada para os desvios negativos e positivos	106
Figura 4.42 -	Correlação obtida para os valores de p' obtidos pelos critérios de Graham (1983) apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979)	110
Figura 4.43 -	Ajuste da superfície teórica de plastificação do Cam - clay modificado juntamente com os pontos experimentais de escoamento e a linha de estados críticos	111
Figura 4.44 -	Ajuste da superfície teórica de plastificação do Cam - clay modificado juntamente com as inclinações teóricas e experimentais dos vetores de deformação plástica	112
Figura 4.45 -	Desvios de normalidade obtidos para o Cam - clay modificado	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Normas utilizadas e tipos de ensaios realizados	53
Tabela 4.1 -	Resultados obtidos dos ensaios de caracterização	73
Tabela 4.2 -	Resultados obtidos dos ensaios de compressão	76
Tabela 4.3 -	Valores obtidos para o módulo de deformação cisalhante (G')	80
Tabela 4.4 -	Valores dos Parâmetros de Estado Crítico utilizados	81
Tabela 4.5 -	Comparação de Parâmetros do Cam - clay modificado	81
Tabela 4.6 -	Pontos de escoamento e parcelas de deformação obtidas dos ensaios realizados	107
Tabela 4.7 -	Desvios de normalidade obtidos e comparação entre os critérios de Graham (1983) Apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979)	109

LISTA DE SÍMBOLOS

σ - Tensão total

σ' - Tensão efetiva

σ_a - Tensão axial

σ_r - Tensão radial

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - Tensões totais principais

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ - Tensões efetivas principais

p' - Tensão efetiva octaédrica

$q' = q$ - Tensão desviatória

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - Deformações principais

ε_a - Deformação axial

ε_r - Deformação radial

ε_v - Deformação volumétrica

ε_s - Deformação cisalhante

E' - Módulo de Young

ν' - Coeficiente de Poisson

K' - Módulo de deformação volumétrica

G' - Módulo de deformação cisalhante

e - índice de vazios

e_c - índice de vazios críticos

p'_e - Tensão equivalente

p_0 - Tensão de confinamento

P'_a - Pressão de sobre-adensamento

M - Inclinação da projeção da linha de estados críticos no plano (q x p') para os ensaios de compressão e extensão

v - Volume específico

- N - Volume específico do solo para um valor unitário de p' no plano ($v \times \ln p'$)
- κ - Coeficiente de recompressão do solo
- λ - Inclinação da linha de compressão normal no plano ($e \times \ln p'$)
- C_c - Coeficiente de compressão do solo na reta virgem de adensamento no plano ($e \times \log p'$)
- C_s - Coeficiente de recuperação elástica do solo no plano ($e \times \log p'$)
- v_k - Volume específico do solo para um valor unitário de p' no plano ($v \times \ln p'$)
- K_0 - Coeficiente de empuxo em repouso do solo
- $\delta \varepsilon_v^e$ - Incremento de deformação elástica volumétrica
- $\delta \varepsilon_s^e$ - Incrementos de deformação elástica cisalhante
- $\delta \varepsilon_v^p$ - Incremento de deformação plástica volumétrica
- $\delta \varepsilon_s^p$ - Incremento de deformação plástica cisalhante
- $\delta \varepsilon^p$ - Vetor de deformação plástica
- $\delta \varepsilon_v^T$ - Incremento de deformação volumétrica total
- $\delta \varepsilon_s^T$ - Incremento de deformação cisalhante total
- W - Energia de deformação
- s - Escalar definido como $s^2 = (\delta p^2 + \delta q^2)$
- I - $3p$ (1º invariante de tensor desviatória)
- J - $q^2 / 3$ (2º invariante de tensões)
- η - Inclinação da linha de estados críticos ($\eta = q/p$)
- θ - Desvio de normalidade
- α_T - Inclinação teórica dos vetores de deformação plástica
- α_e - Inclinação experimental dos vetores de deformação plástica
- q_c - Resistência de ponta do cone
- f_c - Atrito lateral do cone

$\phi'_{\text{crít}}$ - Ângulo de atrito crítico efetivo do solo

ϕ' - Ângulo de atrito efetivo do solo

c' - Intercepto de coesão

RESUMO

LODI, P. C. (1998) - Aplicação do Modelo Cam - clay Modificado a um Solo Arenoso. São Carlos (1998). 124 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O modelo Cam - clay modificado foi aplicado aos resultados experimentais obtidos para um solo arenoso típico da cidade de São Carlos. Os ensaios de compressão triaxial foram conduzidos em equipamento moderno, com instrumentação interna, segundo distintas trajetórias de carregamento. Verificou-se que os resultados obtidos em termos de modelagem foram satisfatórios, principalmente quando a tensão octaédrica (p') foi diminuída durante os carregamentos. Nesse caso, tanto em termos de modelagem como de resultados experimentais, houve expansão de volume do solo. Com o aumento da tensão octaédrica, verificou-se a ocorrência de compressão volumétrica do solo. Observou-se que o modelo apresenta uma previsão de deformações axiais maiores do que as observadas experimentalmente nas trajetórias de -30° , -50° , 30° , 40° , 50° , 60° , 120° e no ensaio triaxial convencional com $\sigma_3 = 100$ kPa. Além disso, determinou-se a superfície inicial de plastificação do solo utilizando-se dois critérios que tenderam a fornecer valores de tensão de cedência aproximadamente iguais, notando-se que a condição de fluxo associado não é obedecida.

Palavras - Chave: modelo Cam - clay; mecânica dos solos dos estados críticos; ensaios de laboratório; trajetórias de tensões; plastificação.

ABSTRACT

LODI, P. C. (1998) - Application of the Modified Cam - clay Model to a Sandy Soil. São Carlos (1998). 124 p. Dissertation (Msc.) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The modified Cam - clay model was used to model experimental results of a sandy soil from São Carlos - SP. Triaxial compression tests were performed using Bishop - Wesley cell with internal transducers to measure axial and radial strains. It was observed that the model fairly fitted experimental results, specially when medium effective stress (p') is reduced during loading. In this case, both the model and the experimental results, showed volume increase. When (p') increases the model and the tests showed a tendency to give volumetric compression, although the values were different. The model yielded strains larger than that measured in the tests when the stress-paths were of -30° , -50° , 30° , 40° , 50° , 60° , 120° and in axial compression test with 100 kPa of confining pressure. Besides that, initial yield surface of soil was calculated from test results using two different criteria which gave about the same yield stress and it is show that normality rule was not satisfied in this soil.

Keywords: cam - clay model; critical state soil mechanics; laboratory tests; stress-paths; yielding.

1 - INTRODUÇÃO

Dentro do campo da Engenharia Geotécnica, encontram-se problemas que requerem análise de deformação dos maciços de solo, como o cálculo de recalques induzidos na superfície do terreno por uma obra qualquer. A qualidade das previsões feitas está condicionada à proximidade entre a realidade e as idealizações adotadas. O refinamento de um modelo constitutivo, utilizado para representar o comportamento mecânico do solo, acarreta sensível ganho de qualidade nas previsões.

É importante examinar-se a resposta geral de um solo e seu padrão de comportamento frente a ensaios de laboratório. Na formulação de um modelo constitutivo qualquer, o ideal seria que este representasse o mais próximo possível a realidade do comportamento do material, necessitando apenas de poucos parâmetros.

Sabe-se que, até 1950, ainda não existia um esforço direcionado à modelagem do comportamento tensão-deformação do solo. Drucker e Prager (1952), foram os primeiros a proporem uma função de plastificação, derivada do critério de Mohr-Coulomb, para os solos (idealizados como material elástico perfeito). Drucker et al. (1955) publicaram um artigo, relacionado com a plasticidade, de grande importância para o âmbito da Mecânica dos Solos. Nesse artigo, os autores relataram a diferença existente entre plastificação e ruptura e o comportamento que poderia ser representado por um material elastoplástico com endurecimento ou amolecimento.

No entanto, para a elaboração de modelos constitutivos, deve-se levar em conta algumas características particulares do solo tais como sua natureza dilatante, friccional e a ausência de limites definidos entre a zona de deformações plásticas e de deformações elásticas, características estas que não são incorporadas nas propostas de Drucker e outros.

O comportamento tensão-deformação dos solos pode ser descrito por modelos similares àqueles que descrevem o comportamento tensão-deformação dos metais. Quando um solo deforma-se, ocorrem variações volumétricas significativas e irreversíveis devido às mudanças experimentadas por suas partículas. Uma boa descrição da resposta do solo deve obviamente incorporar a possibilidade de mudanças volumétricas.

Um modelo elastoplástico deve contemplar quatro aspectos do comportamento do material : a) deve permitir conhecer as propriedades elásticas, ou seja, a quantidade de deformação elástica envolvida no processo de deformação; b) deve fornecer as deformações plásticas e a superfície de escoamento; c) a maneira como ocorrem as deformações plásticas, quando o solo está em processo de escoamento. Para tanto, um potencial plástico é necessário para especificar o valor dos componentes de deformação plástica; e d) deve incorporar uma lei de encruamento que descreve a expansão da superfície de escoamento (Wood, 1992).

Na resolução de problemas dentro da área de geotecnia, costuma-se adotar comumente, de forma implícita, pelo menos dois modelos de comportamento para o solo, sendo estes bastante diferenciados. Utiliza-se a teoria da elasticidade, por exemplo, para a previsão de recalques imediatos de uma determinada fundação (modelo elástico-linear), enquanto que para os problemas relacionados à ruptura, pode-se considerar somente os parâmetros de resistência, como a coesão e ângulo de atrito do solo (modelo rígido-plástico). Em síntese, pode-se afirmar que o estudo da distribuição de tensões assim como das deformações que ocorrem em um

solo, é feito considerando-se este como um material elástico linear, e para os problemas relacionados à estabilidade e ruptura, como um material de comportamento rígido-plástico.

Apesar da confiabilidade e relativa segurança que estes métodos apresentam, diversas formas de estudo do comportamento do solo têm sido desenvolvidas no sentido de se possibilitar uma abordagem teoricamente sustentada em termos de deformações e resistência, permitindo uma visão geral no espaço (p' , q , v), sendo p' a tensão octaédrica, q a tensão desviatória e v o volume específico do solo.

Neste trabalho, procura-se avaliar a capacidade de representação do modelo elastoplástico Cam - clay modificado frente a ensaios de laboratório realizados com um solo arenoso da região de São Carlos. Basicamente, o material foi ensaiado segundo várias trajetórias de tensões onde ensaios de compressão e extensão triaxial foram conduzidos em equipamento moderno, com instrumentação interna. A comparação entre os resultados teóricos do modelo e os resultados experimentais obtidos foi feita através de gráficos de tensão desviatória x deformação axial ($q \times \varepsilon_a$), deformação volumétrica x deformação axial ($\varepsilon_v \times \varepsilon_a$) e tensão octaédrica x deformação volumétrica ($p' \times \varepsilon_v$). Utilizou-se nesse trabalho, para a modelagem com o Cam - clay modificado, o programa "CRIS" apresentado por Ortigão (1993).

Procurou-se determinar também, a superfície inicial de plastificação do solo e ajustar aos dados experimentais a superfície de plastificação proposta pelo modelo Cam - clay modificado. Para a obtenção dos pontos de escoamento procurou-se avaliar a potencialidade dos critérios de Graham (1983), apud (Wood, 1992), e de Tavenas et al. (1979).

O modelo Cam - clay modificado admite a condição de fluxo associado, ou seja, a condição de normalidade. Uma análise da lei de fluxo é feita neste trabalho através da comparação entre as inclinações teóricas e práticas dos vetores de deformação plástica, onde é possível avaliar-se os desvios de normalidade apresentados.

Em suma, além da avaliação da capacidade de representação do modelo, este trabalho tem também por objetivo analisar dois critérios que permitam a determinação do início do escoamento e avaliar a condição de normalidade (fluxo associado) verificando-se a diferença de inclinação entre o vetor de deformação plástica, normal à superfície de plastificação, e o mesmo vetor calculado a partir dos dados experimentais.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

Este capítulo apresenta uma revisão concisa dos conceitos de elasticidade e plasticidade do ponto de vista geotécnico, assim como dos conceitos abordados pela mecânica dos solos dos estados críticos, e as características e particularidades que os solos apresentam quando submetidos aos critérios de modelagem elastoplástica.

Apresenta-se inicialmente, os fundamentos da elasticidade e plasticidade onde o cálculo de deformações elásticas e plásticas é explicitado, enfocando-se as características essenciais da plasticidade (critério de escoamento, lei de fluxo e lei de encruamento). Procura-se mostrar as diferenças existentes entre o comportamento dos metais e dos solos, verificando-se que os metais obedecem aos preceitos da normalidade tendo seus limites de escoamento facilmente determináveis. Entretanto, nota-se que para os solos, além da dificuldade de definição dos limites entre as zonas de deformações plásticas e elásticas, existe uma grande influência da tensão octaédrica média (p') nos valores de escoamento e ruptura, assim como nas deformações volumétricas ocorridas.

Os critérios de Graham (1983), apud Wood (1992), e de Tavenas et al. (1979), para a obtenção dos pontos de escoamento dos solos, são apresentados. Algumas considerações sobre os modelos elastoplásticos são feitas, enfocando-se o trabalho realizado por Drucker -

Prager (1952) e Drucker et al. (1955), que introduziram novos conceitos da teoria da plasticidade na mecânica dos solos.

Apresenta-se a mecânica dos solos dos estados críticos que descreve o comportamento do solo quando este experimenta deformações cisalhantes plásticas sem que ocorra variação volumétrica ou acréscimo de tensão. São apresentadas a linha de estado crítico e as superfícies de Roscoe e Hvorslev que, juntamente com a linha de compressão isotrópica, constituem superfícies limitantes dos estados possíveis de serem atingidos pelo solo. Descreve-se o modelo “Cam - clay” que caracteriza-se por utilizar superfícies de escoamento definidas pela mecânica dos solos dos estados críticos (superfície de Roscoe e Hvorslev) e que, em conjunto com o estabelecimento de leis de fluxo e de encruamento, formam um modelo elastoplástico completo. Tal modelo é resultado dos trabalhos realizados por Roscoe et al. (1958), Roscoe & Burland (1968) e Schofield & Wroth (1968).

2.2 - Fundamentos de Elasticidade e Plasticidade

2.2.1 - Introdução

Sabe-se que o comportamento de um material elástico pode ser descrito pela lei de Hooke, onde as tensões são determinadas pelas deformações, ou seja, existe uma relação única entre tensões e deformações.

Através da figura (2.1), percebe-se que podem ocorrer relações elásticas lineares e não-lineares entre tensão e deformação, mas devemos considerar também que muitos estados de deformação podem corresponder

a um único estado de tensão ou que muitos estados de tensões correspondem a um único estado de deformação.

Será discutido nesse item, a teoria da plasticidade inicialmente exemplificando sua aplicação aos metais, e posteriormente será exposto sua aplicação aos solos, explicitando suas restrições e dificuldades.

Figura 2.1 - Relações tensão - deformação : (a) linear (b) não linear

2.2.2 - Elasticidade nos Solos

A figura (2.2) apresenta resultados típicos de um ensaio triaxial drenado, onde a tensão confinante é mantida constante e ocorrem acréscimos de tensões axiais. A resposta elástica do solo ao acréscimo de tensões pode ser interpretada através dos gráficos de $(q \times \epsilon_s)$, $(q \times \epsilon_a)$ e $(\epsilon_v \times \epsilon_s)$ de onde pode-se obter os valores das constantes elásticas do material.

Figura 2.2 - Resultados típicos de ensaios triaxiais drenados : (a) - ($q \times \epsilon_s$); (b) - ($\epsilon_v \times \epsilon_s$) e (c) - ($q \times \epsilon_a$). (Wood, 1992)

As equações que descrevem a resposta elástica do solo à variação de tensões efetivas podem ser apresentadas como (Wood, 1992) :

$$\delta \epsilon_a = (1/E')[\delta \sigma_a' - 2\nu' \delta \sigma_r'] \quad (2.1)$$

$$\delta \epsilon_r = (1/E')[\delta \sigma_r' (1 - \nu') - \nu' \delta \sigma_a'] \quad (2.2)$$

onde E' é o módulo de Young e ν' é o coeficiente de Poisson.

Para o caso de ensaio de compressão triaxial, pode-se calcular a tensão octaédrica efetiva média (p') e a tensão desviatória (q ou q') pelas seguintes equações :

$$p' = 1/3.(\sigma_a' + 2\sigma_r') \quad (2.3)$$

$$q' = (\sigma_a' - \sigma_r') \quad (2.4)$$

onde σ_a' é a tensão axial e σ_r' a tensão radial ou confinante.

Os incrementos de deformação volumétrica (ϵ_v) e cisalhante (ϵ_s) são :

$$\delta\varepsilon_v = (\delta\varepsilon_a + 2\delta\varepsilon_r) \quad (2.5)$$

$$\delta\varepsilon_s = 2/3(\delta\varepsilon_a - \delta\varepsilon_r) \quad (2.6)$$

onde ε_a é a deformação axial e ε_r , a deformação radial.

Utilizando-se os conceitos da teoria da elasticidade, os incrementos de deformação volumétrica ($\delta\varepsilon_v$) e cisalhante ($\delta\varepsilon_s$), para o caso triaxial, podem ser expressos por (Atkinson & Bransby, 1978) :

$$\delta\varepsilon_v = [(1 - 2\nu') / E'] \cdot (\delta\sigma_a' + 2\delta\sigma_r') \quad (2.7)$$

com a equação (2.3), tem-se :

$$\delta\varepsilon_v = [3.(1 - 2\nu') / E'] \cdot \delta p' \quad (2.8)$$

Similarmente,

$$\delta\varepsilon_s = [2.(1 + \nu') / 3E'] \cdot (\delta\sigma_a' - \delta\sigma_r') \quad (2.9)$$

com a equação (2.4), tem-se :

$$\delta\varepsilon_s = [2.(1 + \nu') / 3E'] \cdot \delta q' \quad (2.10)$$

As equações (2.8) e (2.10) podem ser escritas (Atkinson & Bransby, 1978) :

$$\delta\varepsilon_v = \delta p' / K' \quad (2.11)$$

$$\delta\varepsilon_s = \delta q' / 3G' \quad (2.12)$$

onde : $K' = E' / 3.(1 - 2\nu')$ é o módulo de deformação volumétrica e
 $G' = E' / 2.(1 + \nu')$ é o módulo de deformação cisalhante.

O gradiente inicial da curva tensão deformação ($q \times \varepsilon_s$) da figura (2.2a) é $3G'$ e o gradiente inicial da curva de variação de volume ($\varepsilon_v \times \varepsilon_s$), figura (2.2b), é dado por :

$$\delta\varepsilon_v / \delta\varepsilon_s = (3G'\delta p') / (K'\delta q') \quad (2.13)$$

que, para um ensaio triaxial convencional (compressão axial) drenado, torna-se :

$$\delta\varepsilon_v / \delta\varepsilon_s = G' / K' \quad (2.14)$$

pois,

$$\delta q' / \delta p' = 3 \quad (2.15)$$

2.2.3 - Plasticidade

As três características essenciais da plasticidade são : um critério de escoamento ou plastificação, uma lei de fluxo (que engloba o conceito de potencial plástico), e uma lei de endurecimento ou encruamento. Serão apresentados alguns exemplos de ensaios aplicados aos metais para melhor conceituação das características acima.

Em primeiro lugar, é necessário fazer-se uma distinção entre deformações elásticas (recuperáveis) e deformações plásticas (irrecuperáveis). Isso comumente é feito na discussão do comportamento

dos metais. O comportamento de um metal com trecho de escoamento definido, é ilustrado na figura (2.3) seguinte.

Figura 2.3 - Comportamento elastoplástico de um metal. Atkinson & Bransby (1978)

Para tensões uniaxiais menores do que σ_y , a deformação é linear elástica, e se o material é carregado e descarregado, as deformações ocorridas são totalmente recuperadas no descarregamento. Contudo, se o material é carregado com valor superior a σ_y , deformações plásticas adicionais ocorrem, e o estado do metal pode ser representado pelo ponto G. Após o descarregamento, o metal segue a trajetória GB, e alguma deformação (elástica) é recuperada. Contudo, no ponto B, o metal sofreu grande parte de deformação plástica irreversível. As tensões σ_y e σ_g , para as quais o comportamento do metal torna-se plástico, são chamadas de tensões de escoamento. Um efeito da deformação plástica ocorrida entre Y e G é a ascensão da tensão de escoamento de σ_y para σ_g . Este efeito é conhecido como “strain hardening” (encruamento).

Para solos, a distinção entre deformação recuperável e irreversível é melhor ilustrada pelo comportamento que se observa durante uma compressão isotrópica.

A figura (2.4) ilustra o comportamento de uma argila sob carregamento e descarregamento isotrópico. Nota-se através desta figura, que a linha ABC corresponde à linha normal de consolidação (LNC). Se o

material é descarregado em B, pode atingir o ponto D, movendo-se através da linha de descarregamento BD. Após novo carregamento em D, atingirá o ponto B caminhando novamente sobre a linha normal de consolidação até o ponto C. Analogamente, se ocorrer descarregamento em C, este atingirá o ponto E através da linha de descarregamento CE. Nota-se que o material apresenta um menor volume específico em E do que em D, isto é, ocorreram deformações plásticas irreversíveis na trajetória DBCE. Já que somente deformações recuperáveis ocorrem ao longo das linhas de descarregamento DB e EC. As deformações plásticas devem ter ocorrido ao longo da trajetória BC. Pode-se fazer uma analogia direta do comportamento apresentado na figura (2.4) com aquele mostrado na figura (2.3).

Figura 2.4 - Comportamento elastoplástico de uma argila em um ensaio de compressão isotrópica. Atkinson & Bransby (1978)

A seguir são apresentados os dois principais critérios de plastificação utilizados para descrever o comportamento dos metais :

2.2.3.1 - Critério de Tresca (1869) :

De acordo com Tresca (1869), o escoamento ocorre quando o máximo valor de tensão cisalhante no material atinge um valor crítico. Em termos de tensões principais, tem-se :

$$\max (\sigma_i - \sigma_j) = 2c \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2.16)$$

onde $2c$ é a tensão de escoamento na tensão uniaxial e σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais maior, intermediária e menor respectivamente. O espaço de tensões principais é obtido fazendo-se com que cada eixo esteja alinhado com uma direção principal. A equação (2.16) anterior define um prisma hexagonal regular nesse espaço. Tal prisma está centrado na diagonal espacial do plano de tensões principais, onde $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ e corresponde à superfície de escoamento do critério de Tresca.

2.2.3.2 - Critério de von Mises (1913) :

Esse critério considera que o escoamento ocorrerá quando o segundo invariante de tensões atingir um valor crítico, ou de outra forma, quando o estado de tensões principais atingir uma distância crítica da diagonal espacial. A superfície de escoamento definida é um cilindro centrado sobre a diagonal espacial :

$$(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 8c^2 \quad (2.17)$$

Tal critério é conhecido como “Teoria da Energia de Distorção” por assumir que o escoamento tem início quando a energia de distorção atinge um valor igual à energia de distorção no escoamento, ou seja, quando esta atinge um valor crítico (Desai e Siriwardane, 1984).

A figura (2.5) ilustra as superfícies de escoamento para os critérios de Tresca (1869) e von Mises (1913). Como pode-se observar, as superfícies de escoamento diferem apenas em sua forma no plano desviatório.

Deve-se lembrar que as condições de plastificação para os solos difere daquelas utilizadas para descrever o comportamento dos metais. Os resultados triaxiais convencionais realizados em amostras de solo, mostram que estes sofrem grande influência da tensão octaédrica ao iniciarem os processos de plastificação, o que não se observa em metais.

Figura 2.5 - Critérios de escoamento de Tresca (a) e von Mises (b) no espaço efetivo de tensões principais (Wood, 1992).

A figura (2.6)a,b seguinte apresenta estados de tensões e de deformações plásticas, com eixos σ'_a , σ'_c superpostos aos eixos $\delta\epsilon_a^p$, $\delta\epsilon_c^p$.

O vetor de tensão σ' (OQ), dado por σ'_a e σ'_c , representa o estado de tensão de uma amostra em Q (figura (2.6)a). A amostra então sofre um incremento de deformação plástica $\delta\epsilon^p$ (QR), dado pelas componentes $\delta\epsilon_a^p$ e $\delta\epsilon_c^p$. O gradiente $\delta\epsilon_a^p / \delta\epsilon_c^p$ do vetor de incremento de

vetores de incrementos de deformação plástica. Para um material com lei de fluxo associada, os vetores de plastificação são ortogonais à superfície de plastificação (figura (2.6)b).

Vale ainda ressaltar, que quando o material está a sofrer plastificação, a distribuição das parcelas relativas de deformação não é função das mudanças no tensor de tensões, mas sim da posição do estado de tensões sobre o critério de escoamento, no instante imediatamente anterior a este.

2.3. - Critérios para a Identificação da Tensão de Escoamento

Anteriormente, viu-se no item (2.2.1) as características essenciais da plasticidade e sua aplicação aos metais. Neste tópico, será discutido o comportamento elastoplástico dos solos englobando-se os conceitos aplicados aos metais mas levando-se em conta que os solos apresentam certas particularidades que diferem do comportamento dos metais.

Um fato importante, para o estudo do comportamento dos solos, é justamente a dificuldade de definir-se um limite preciso entre a zona de deformações elásticas e de deformações plásticas, ou seja, os pontos onde começa a ocorrer o escoamento do material. Deve-se levar em conta, também, a influência da tensão octaédrica média (p') nos valores de escoamento e ruptura e considerar-se as deformações volumétricas ocorridas.

A tensão de pré-consolidação observada nos ensaios edométricos constitui o melhor exemplo do escoamento apresentado pelos

solos. Wood (1992) apresenta resultados típicos de ensaios de laboratório com amostras de solo retiradas de uma mesma profundidade. A figura (2.7) mostra tais resultados:

Figura 2.7 - (a) Trajetórias de tensões e superfície de escoamento no espaço ($q:p'$), (b) ensaio de compressão isotrópica, (c) ensaio de compressão confinada e (d) ensaio de compressão triaxial não-drenado (Wood,1992)

As curvas obtidas nas figuras (2.7)b,c,d correspondem, respectivamente, às curvas de compressão isotrópica, compressão confinada e curva tensão x deformação típica de um ensaio triaxial convencional não-drenado. Os pontos Y_1 , Y_2 e Y_3 são os pontos de escoamento obtidos para tais curvas. Pode-se notar que os pontos Y_1 e Y_2 correspondem à tensão de pré-consolidação obtida em seus respectivos ensaios. A figura (2.7)a apresenta a trajetória de tensões seguida em cada ensaio e nos fornece uma idéia da superfície de escoamento formada pelos pontos Y_1 , Y_2 e Y_3 . A superfície assim formada pode ser considerada como uma pressão de pré-consolidação generalizada, e o ponto Y_1 , por exemplo, corresponde a um único ponto dessa superfície.

Conforme foi relatado, para o caso específico dos metais, os pontos de escoamento são facilmente obtidos. Entretanto, para os solos, existe uma certa dificuldade em se definir tais pontos, visto que as curvas tensão-deformação não apresentam limites bem definidos da região elastoplástica. A figura (2.8) apresenta diferentes trajetórias de tensões e seus respectivos pontos de escoamento, obtidos por Tavenas et al. (1979) de ensaios triaxiais sobre uma amostra de argila de St. Louis.

Figura 2.8 - Trajetórias de tensões e pontos de escoamento obtidos por Tavenas et al. (1979) em argilas de St. Louis (Apud Wood, 1992)

As figuras (2.9)a e (2.9)b, mostram que Tavenas et al. (1979) utilizaram gráficos de tensão octaédrica (p') versus deformação volumétrica (ε_v) e de tensão desviatória (q) versus deformação axial (ε_a) para fornecer alternativas de estimativa dos pontos de escoamento. Considera-se que o escoamento ocorre quando houver uma mudança brusca de inclinação nas curvas (passagem do trecho elástico para o plástico).

Uma estimativa alternativa dos pontos de escoamento é possível ainda segundo Tavenas et al. (1979), a partir da consideração da energia requerida para deformar uma amostra. Através de um carregamento uniaxial simples, gerando deformações na amostra, pode-se obter sua curva

$(\sigma_a \times \varepsilon_a)$. O trabalho (W) realizado na deformação da amostra pode ser calculado para um estágio, a partir da área ilustrada na figura (2.10)a :

$$W = \int \sigma_a d\varepsilon_a \quad (2.18)$$

onde : σ_a = Tensão axial
 ε_a = Deformação axial
W = Energia de deformação

E, em termos de compressão triaxial,

$$W = \int (\sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3) \quad (2.19)$$

onde : $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ e $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ são as tensões e deformações principais, respectivamente.

Figura 2.9 - Determinação dos pontos de escoamento através de ensaios triaxiais realizados em uma argila de St. Louis, (a) gráfico ($p' \times \epsilon_p$), (b) gráfico de ($q \times \epsilon_a$) e (c) gráfico de ($p' \times W$) (Apud Wood, 1992)

Lançando-se em gráfico este trabalho cumulativo (W) versus a tensão (figura (2.10b)), mostra-se que um ponto de escoamento pode ser deduzido da mudança na inclinação da curva de trabalho.

Uma terceira alternativa de estimativa da posição dos pontos de escoamento foi obtida por Tavenas et al. (1979), através do gráfico de p' versus W (figura (2.9)c). Os pontos de escoamento deduzidos através desses três métodos, foram muito semelhantes.

Figura 2.10 - (a) Trabalho cumulativo (W) obtido da curva de $(\sigma_a \times \epsilon_a)$, (b) dedução dos pontos de escoamento através do gráfico de $(W \times \sigma_a)$ (Apud Wood, 1992).

Graham et al.(1983), apud Wood (1992), usaram o trabalho acumulado (W) como uma quantidade que incorpora todos os componentes de incrementos de deformação e como variável de tensão, um escalar “ s ”, onde :

$$\delta s = (\delta p'^2 + \delta q'^2)^{1/2} \quad (2.20)$$

Os pontos de escoamento são obtidos pela mudança de inclinação apresentada na curva quando “plota-se” o trabalho cumulativo

(W), no eixo das abscissas, versus (s) no eixo das ordenadas. Graham et al. (1983), apud Wood (1992), ensaiando amostras de argila de Winnipeg, encontraram superfícies de escoamento que variaram apenas em tamanho, preservando a mesma forma. Isto é melhor ilustrado quando os resultados são normalizados pela tensão vertical de campo. Conforme também pode-se notar através da figura (2.11), as superfícies de escoamento obtidas não são centralizadas em torno do eixo p' , possivelmente como decorrência de uma história de carregamento fortemente anisotrópica em campo.

Figura 2.11 - Superfícies de escoamento obtidas para uma amostra indeformada de argila através de ensaios triaxiais (a) diferentes superfícies de escoamento variáveis com a profundidade, (b) superfície de escoamento normalizada pela tensão de pré-consolidação. (Apud Wood, 1992)

Foi observado anteriormente, que as superfícies de escoamento originadas pelos critérios de Tresca e von Mises diferem somente em sua forma, quando são analisadas no plano desviatório,

refletindo a pouca influência de p' . Por outro lado, quando se analisa as superfícies de escoamento obtidas para os solos, percebe-se a grande influência de p' nestas, onde mesmo na completa ausência de tensões desviatórias, o escoamento pode vir a ocorrer pelos incrementos gerados em p' .

Como foi relatado anteriormente, as deformações plásticas ocorrem quando há uma mudança da zona elástica para a zona plástica, e há uma lei de encruamento (endurecimento) que correlaciona mudanças na superfície de escoamento com uma dada quantidade de deformações plásticas. A maioria das leis de encruamento para os solos associam-se às mudanças das deformações plásticas volumétricas. Viu-se também que as superfícies de escoamento variam em tamanho conservando sua forma; diz-se que o escoamento é isotrópico quando não ocorre deslocamento do centro da superfície de plastificação após sucessivos encruamentos. Por outro lado, quando ocorre translação do centro da superfície de escoamento, diz-se que o encruamento é cinemático.

A figura (2.12) ilustra os modos de encruamento no espaço das tensões principais.

Para o caso específico dos metais, viu-se que estes obedecem aos preceitos da normalidade, ou seja, seu comportamento pode ser descrito por uma lei de fluxo associada. Dentro da formulação dos modelos elastoplásticos, a adoção de leis de fluxo associadas é preferível, por reduzir em grande parte o número de funções geradas. Entretanto, para o caso dos solos, geralmente ocorrem limitações na aplicabilidade do modelo.

Figura 2.12 -

Tipos de encruamento no espaço de tensões principais - (a) isotrópico (b) cinemático (Apud Arafati, 1992)

Graham et al. (1983), apud Wood (1992), verificaram através de ensaios triaxiais em amostras indeformadas de argila ("Winnipeg clay") que os desvios de uma lei de fluxo associada podem chegar até 30° aproximadamente. Uma abordagem alternativa para o uso de leis de fluxo associadas em solos é apresentada por Roscoe et al. (1958). Segundo esses autores, é possível estabelecer-se uma função que correlacione o potencial plástico de um solo com a sua superfície de plastificação. Assume-se que a normalidade é satisfeita apenas na condição de estado crítico e que qualquer desvio de uma lei de fluxo associada está relacionado com a posição do estado de tensões do solo com respeito à linha de estados críticos.

2.4 - Considerações Gerais Sobre Modelos Elastoplásticos para Solos

A partir de trabalhos pioneiros como o de Drucker - Prager (1952), os conceitos da teoria da plasticidade passaram a ser desenvolvidos e adaptados para uso em mecânica dos solos, com o intuito de se fazer previsões mais realistas das deformações decorrentes das cargas impostas às obras geotécnicas.

Neste item, apenas os modelos do tipo elastoplástico, serão abordados. Não se menciona o estudo do comportamento viscoso do solo (deformações diferidas no tempo com tensão efetiva constante), exibido em graus variados por diferentes tipos de solos.

Drucker e Prager (1952), foram os primeiros a propor uma função de plastificação para os solos (idealizados como material elastoplástico perfeito). Tal função deriva-se do critério de Mohr-Coulomb, e é expressa por :

$$f(I, J) = \sqrt{J} - \alpha I - k \quad (2.21)$$

onde : $J = (\sigma_a - \sigma_r)^2 / 3 = q^2 / 3$ é o 2º invariante de tensões

$I = (\sigma_a + 2\sigma_r) = 3p$ é o 1º invariante de tensor desviatória

α e k são constantes características do solo e guardam semelhança com o ângulo de atrito do solo e com a coesão, respectivamente.

Os critérios de ruptura de Drucker-Prager e de Mohr-Coulomb utilizados como potencial plástico, levaram a previsões de expansões exageradas, ou seja, de vetores taxa de deformação plástica, com componente volumétrica negativa.

Como o modelo proposto por Drucker & Prager (1952) é do tipo elastoplástico perfeito, este não leva em conta o encruamento sofrido pelo solo, responsável por deslocar eventuais superfícies de plastificação até a superfície de ruptura.

Dessa forma, pode-se dizer que a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb ou de qualquer outra superfície usada para definir estados de ruptura, é somente uma coleção de pontos finais, não consistindo em uma superfície de escoamento completa. Pode-se dizer que esta constitui apenas uma superfície de escoamento obtida para uma condição última.

Um trabalho de grande importância, relacionado com a plasticidade e dirigido à Mecânica dos Solos, foi o de Drucker et al. (1955). Esses autores relatam, principalmente a diferença existente entre plastificação e ruptura, o comportamento similar do solo com materiais elastoplásticos, com endurecimento ou amolecimento; e, o fato da superfície de plastificação dos solos obrigatoriamente interceptar a diagonal do espaço das tensões (plastificação por compressão isotrópica).

A figura (2.13) ilustra a superfície de plastificação sugerida por Drucker et al. (1955).

A forma como evolui a superfície de plastificação à medida em que deformações plásticas ocorrem, é uma característica importante dos modelos. O tipo mais comum de endurecimento adotado nos modelos, é o isotrópico, onde o centro da superfície de plastificação mantém-se indeslocável após sucessivos encruamentos. Pode-se utilizar combinações de endurecimento isotrópico e cinemático para melhorar-se a capacidade de previsão em trajetórias de tensões complexas.

Figura 2.13 - Superfície de plastificação sugerida por Drucker et al. (1955)
(Apud Nader, 1993)

No final da década de 60, Roscoe juntamente com o grupo de Mecânica dos Solos da Universidade de Cambridge, elaboram o modelo “Cam - clay”, incorporando a este o conceito de estado crítico de um solo e o trabalho desenvolvido por Drucker et al. (1955).

2.4.1 - Mecânica dos Solos dos Estados Críticos

Quando um solo tende a uma condição na qual o cisalhamento pode continuar ocorrendo sem que apresente variações de volume ou de seu estado efetivo de tensões, diz-se que este atingiu sua condição de estado crítico. Em termos algébricos tem-se :

$$(\partial p'/\partial \varepsilon_s) = (\partial q/\partial \varepsilon_s) = (\partial v/\partial \varepsilon_s) = 0 \quad (2.22)$$

onde ε_s é a deformação cisalhante, v é o volume específico e p' e q são as tensões octaédrica e desviatória, respectivamente.

No desenvolvimento que se apresenta a seguir, segue-se de perto a forma como estes conceitos são apresentados por Atkinson & Bransby (1978).

A figura (2.14) apresenta os resultados de ensaios triaxiais consolidados não-drenados em uma argila normalmente adensada. Tais resultados estão normalizados pela tensão de confinamento (p_0), que neste caso é igual à tensão equivalente (p'_e). A tensão equivalente (p'_e), corresponde ao valor de p' tomado sobre a reta virgem de compressão isotrópica do solo, para o qual este apresenta um volume específico v independente do histórico de tensões ao qual foi submetido. Para amostras normalmente adensadas, $p_0 = p'_e$, e para amostras pré-adensadas, $p_0 < p'_e$.

Figura 2.14 - Resultados de ensaios triaxiais normalizados pela tensão de confinamento. Atkinson & Bransby (1978)

Na figura (2.14), observa-se que o solo alcança a condição de estado crítico para valores de deformação axial de aproximadamente 10%.

A figura (2.15) apresenta resultados obtidos (em termos de q e p') para a condição de estado crítico do solo, para ensaios drenados e não-drenados, de um solo normalmente adensado. Pode-se observar que estes resultados ajustam-se através de uma reta com “intercepto nulo de coesão”.

O valor da relação q/p' , para a qual o solo alcança a condição de estado crítico, é denominada de “ M ”, que representa a inclinação da projeção da linha de estados críticos no plano ($p' \times q$).

Figura 2.15 - Resultados obtidos para a condição de estado crítico em termos de p' , q para ensaios drenados e não-drenados. Atkinson & Bransby (1978)

A expressão que correlaciona “ M ” com o ângulo de atrito interno do solo (ϕ_c) pode ser expressa, para ensaios triaxiais de compressão pela equação (2.23), e, para ensaios de extensão triaxial, pela equação (2.24).

$$M = 6 \cdot \sin \phi_{\text{crít}} / (3 - \sin \phi_{\text{crít}}) \quad (2.23)$$

$$M = 6 \cdot \sin \phi_{\text{crít}} / (3 + \sin \phi_{\text{crít}}) \quad (2.24)$$

Conforme ilustra a figura (2.16) seguinte, os resultados de ensaios de compressão confinada, no espaço ($p' \times v$), resultam em retas aproximadamente paralelas, deslocadas para a esquerda daquelas obtidas a partir de ensaios de compressão isotrópica. Isso pode ser justificado pelo fato de existirem tensões desviatórias não nulas durante a realização dos ensaios de compressão confinada. Se o ensaio edométrico é realizado com medidas de tensões laterais, tem-se:

$$p' = \sigma_a \cdot (1 + 2K_o)/3 \quad (2.25)$$

$$q = \sigma_a \cdot (1 - K_o), \quad (2.26)$$

onde :

$$K_o = \sigma_r / \sigma_a \quad (2.27)$$

para a condição de $\varepsilon_r = 0$

Figura 2.16 - Comparação entre resultados obtidos para compressões isotrópica e confinada . Atkinson & Bransby (1978)

A equação da reta virgem de compressão é dada pela seguinte expressão :

$$v = N - \lambda \cdot \ln(p') \quad (2.28)$$

onde:

N = Volume específico do solo para um valor de p' unitário (no sistema de medidas utilizado)

λ = coeficiente de compressão do solo, o qual, por ser adimensional, é o mesmo qualquer que seja o sistema dimensional utilizado.

O valor de λ é calculado pela seguinte expressão :

$$\lambda = dv/d\ln(p') \quad (2.29)$$

A reta de descompressão-recompressão do solo pode ser fixada no espaço (v x $\ln p'$) pela expressão abaixo :

$$v = v_k + \kappa \cdot \ln(p') \quad (2.30)$$

onde : v_k = valor do volume específico do solo para p' unitário

κ = coeficiente de recompressão do solo

Note-se que enquanto N , λ e κ são valores característicos do solo, o valor de v_k depende apenas da tensão de pré-consolidação do solo (valor máximo de p' em seu histórico de tensões).

A seguir, apresentam-se os resultados de (p' x v) para a condição de estado crítico do solo (em escala linear e semi-logarítmica, respectivamente). Nota-se da figura (2.17), em escala linear, que as curvas

de compressão isotrópica e a linha contendo os pares (p', v) para a condição de estado crítico, possuem formas bastante semelhantes, e que na figura (2.18), em escala semi-logarítmica, para o caso de amostras normalmente adensadas, a linha contendo os valores de (p', v) , para a condição de estado crítico, é paralela à reta de compressão virgem do solo, a despeito do ensaio ter permitido ou não a drenagem.

Pode-se encarar a linha de compressão isotrópica como uma linha limite entre os estados de tensões possíveis e dos estados de tensões impossíveis para o solo, ou seja, qualquer estado do solo em termos de $(p', q, e v)$ deve ter sua projeção no espaço (p', v) situada à esquerda da linha de compressão isotrópica.

Portanto, pode-se concluir que existe no espaço (p', q, v) uma única relação entre essas variáveis, para a qual o solo encontra-se em uma condição crítica. Esta linha, cujo esboço é apresentado na figura (2.19), é denominada de linha dos estados críticos dos solos (LEC) ou, “Critical State Line” (CSL).

Figura 2.17 - Valores de v e p' para a condição de estado crítico
Atkinson & Bransby (1978)

Figura 2.18 - Resultados da figura (2.17) em escala semi-logarítmica
Atkinson & Bransby (1978)

Figura 2.19 - Linha de estados críticos no espaço (p', q, v) . Atkinson & Bransby (1978)

2.4.1.1 - A Superfície de Roscoe

Através da realização de ensaios triaxiais drenados e não-drenados, com medidas de pressão neutra, Henkel (1960), com os dados colhidos dos ensaios triaxiais drenados, traçou no espaço $\sigma_a \times \sigma_r \sqrt{2}$, contornos de igual umidade e os comparou com as trajetórias de tensões seguidas durante a realização de ensaios triaxiais não-drenados. Observou então que há uma concordância bastante acentuada entre as isolinhas de umidade e as trajetórias de tensões obtidas de ensaios triaxiais não-drenados. Diversos outros dados de ensaios publicados, confirmam as conclusões de Henkel (1960).

Dessa forma, pode-se supor que existe, para o caso de solos normalmente adensados, uma superfície que une a linha de compressão isotrópica à linha de estados críticos, a qual contém, com unicidade, as ordenadas p' , q e v , de modo independente da trajetória de tensões adotada. Esta superfície é denominada de Superfície de Roscoe e é ilustrada pela figura (2.20) seguinte.

A figura (2.21) apresenta os resultados de trajetórias de tensões obtidas de ensaios drenados e não-drenados, assim como os resultados obtidos de ensaios realizados com p' constante. Os valores estão normalizados em termos de p'_e .

Nota-se através da figura (2.21) que, independentemente de como o ensaio tenha sido realizado, a trajetória seguida é a mesma em termos de $(q'/p'_e \times p'/p'_e)$. Isso confirma mais uma vez a existência da superfície de Roscoe.

Figura 2.20 - Superfície de Roscoe com as trajetórias de tensões normalmente seguidas em ensaios triaxiais drenados e não-drenados. Atkinson & Bransby (1978)

Figura 2.21 - Resultados de ensaios drenados e não-drenados acrescidos de resultados de ensaios a p' constante (os eixos estão normalizados em função de p'_e). Atkinson & Bransby (1978)

A figura (2.22) seguinte, apresenta resultados de ensaios em termos de $(q'/p'_e \times p'/p'_e)$ para amostras normalmente adensadas e levemente sobre-adensadas.

Nota-se que as trajetórias das amostras levemente sobre-adensadas partem de um valor p'/p'_e menor do que a unidade, seguindo de maneira quase vertical até tocar a superfície de Roscoe, acompanhando-a até a linha de estados críticos.

Figura 2.22 - Resultados de amostras levemente pré-adensadas em eixos normalizados $(q'/p'_e \times p'/p'_e)$. Atkinson & Bransby (1978)

Deve-se observar pois, que a superfície de Roscoe e a linha de compressão isotrópica podem se encaradas como limitantes dos estados possíveis de serem atingidos pelo solo, sendo esta última (linha de compressão isotrópica), apenas um ponto da projeção da superfície de Roscoe (obtida para $q/p'_e = 0$ e $p'/p'_e = 1$).

2.4.1.2 - A Superfície de Hvorslev

Viu-se até aqui, que a superfície de Roscoe e a linha de compressão isotrópica podem ser encaradas como limitantes de estado do solo, inclusive para solos levemente pré-adensados. Tratar-se-á agora de solos pré-adensados. Para ensaios triaxiais convencionais, nota-se para estes solos que a condição de estado crítico não é facilmente atingida. A figura (2.23) apresenta resultados em termos de trajetórias de tensões de um ensaio triaxial convencional drenado. Através desta, pode-se observar que o corpo de prova ao ser cisalhado alcança pontos no espaço (p', q, v) cujas projeções no espaço (p', q) situam-se acima da linha de estados críticos. Após o valor de pico ser alcançado, o valor de q diminui, e a trajetória tende à linha de estados críticos (LEC).

Figura 2.23 - Trajetória de tensão para um ensaio triaxial convencional drenado. Atkinson & Bransby (1978)

Para solos altamente pré-adensados, poder-se-ia considerar uma família de testes triaxiais drenados para se obter maiores informações acerca da forma da superfície de estado limitante. Contudo, a dificuldade com tal família de testes, é que o volume específico das amostras está

mudando durante a realização dos mesmos. A projeção das trajetórias de tensões no espaço (q', p') deste modo, refere-se a diferentes seções de volume específico constante. Com uma analogia com a superfície de Roscoe, espera-se que somente o tamanho de tal superfície limite mude com mudanças em “ v ”, não sua forma. Adotando o conceito de tensão equivalente (p'_e) , Hvorslev foi o primeiro a utilizar o método de escalonar-se tensões de modo a permitir mudanças em “ v ”.

A figura (2.24) apresenta valores de q e p' na ruptura “plotados” em eixos normalizados $(q/p'_e, p'/p'_e)$ obtidos para amostras pré-adensadas através de ensaios triaxiais realizados por Parry (1960). Notar que os valores de pico para a amostra pré-adensada definem uma reta e situam-se à esquerda da superfície de Roscoe.

Figura 2.24 - Valores de q e p' na ruptura, obtidos para amostras pré-adensadas (eixos normalizados). Atkinson & Bransby (1978)

Os dados de ensaios drenados e não-drenados, situam-se em uma única linha no espaço (q'/p'_e ; p'/p'_e), a qual é limitada em seu lado direito pela interseção do ponto que representa a linha de estados críticos, situado no topo da superfície de Roscoe. O maior valor de q'/p' que poderá ser observado, corresponde a $\sigma_3 = 0$, pois supõe-se que o solo não pode suportar estados de tração. A reta OA corresponde à trajetória seguida em um ensaio de compressão simples. Logo, para um teste triaxial convencional (em que $q'/p' = 3$), a localização dos pontos de ruptura pode ser idealizada como àquela que corresponde à linha OA da figura (2.25).

A equação que representa a reta AB é dada por :

$$q = gp_e + hp' \quad (2.31)$$

onde : g e h são constantes do solo (guardam semelhança com a coesão e o ângulo de atrito do solo respectivamente).

Figura 2.25 - Superfície de Hvorslev (reta AB), de Roscoe (linha BC), linha de estados críticos (pto B) e linha de compressão isotrópica (pto C). Atkinson & Bransby (1978)

Admitindo-se a linha de estados críticos como parte da superfície de Hvorslev, tem-se :

$$g = (M - h)e^{[(\Gamma - N)/\lambda]} \quad (2.32)$$

Substituindo-se o valor de g na equação (2.29) anterior, obtém-se :

$$q = (M - h)e^{[(\Gamma - v)/\lambda]} + hp' \quad (2.33)$$

Tal expressão mostra que a tensão desviatória na ruptura de uma amostra pré-adensada é composta por duas componentes : o termo hp' que é proporcional à tensão efetiva média normal, e o termo $(M - h)e^{[(\Gamma - v)/\lambda]}$ que depende somente do valor do volume específico corrente e dos valores de determinadas variáveis. O valor da resistência aumenta quando o volume específico diminui.

Dentro do contexto das informações discutidas até aqui, pode-se descrever a superfície de Hvorslev como sendo a limitante de estados de solos altamente pré-adensados, do mesmo modo que a superfície de Roscoe o é para solos normalmente adensados.

Através da junção das superfícies de Roscoe e Hvorslev, obtém-se uma completa superfície limitante de estados possíveis para solos normalmente adensados e pré-adensados. A figura (2.26) ilustra tal superfície onde pode-se perceber que as superfícies de Roscoe e Hvorslev unidas pela linha de estados críticos, formam uma espécie de invólucro, dentro do qual situam-se todos os estados possíveis de serem atingidos pelo solo no espaço (p', q', v) .

Figura 2.26 - Superfície limitante completa de estados do solo, composta da junção das superfícies de Roscoe e Hvorslev. Atkinson & Bransby (1978)

Para o caso do solo encontrar-se dentro da superfície formada, este sofrerá deformações do tipo elásticas. Deformações do tipo elastoplásticas ocorrerão para situações em que o solo venha a se deslocar sobre a superfície limitante.

As trajetórias de tensões esperadas para ensaios realizados em amostras pré-adensadas sem drenagem, são mostradas na figura (2.27). Com o aumento da razão de pré-adensamento R_p , estas trajetórias passam a tocar a superfície de Hvorslev, dirigindo-se à linha de estados críticos.

Figura 2.27 - Trajetórias de tensões esperadas para ensaios não-drenados em amostras pré-adensadas. Atkinson & Bransby (1978)

2.4.2 - O Modelo Cam-clay

Tal modelo, como relatado anteriormente, é resultado de investigações laboratoriais minuciosas feitas pelo grupo de Mecânica dos Solos da Universidade de Cambridge (Roscoe et al. (1958), Roscoe & Burland (1968) e Schofield & Wroth (1968)) utilizando também resultados de outros pesquisadores, tais como : Hvorslev (1937), Rendulic (1937), Parry (1956) e Henkel (1956). Em 1968, o Cam - clay recebe modificações e estende-se para o caso triaxial de tensão e deformação. Nas últimas décadas, modificações em tal modelo foram propostas por Atkinson & Bransby (1978), Mróz, Norris e Zienkiewicz (1979) e Houlsby, Wroth e Wood (1984). Wood (1992), apresenta em seu livro uma abordagem atual e ilustrativa do Cam - clay juntamente com a mecânica dos solos dos estados críticos.

As equações constitutivas do Cam - clay original superestimavam os valores de incrementos de deformação, para valores pequenos de tensão cisalhante, além de que sua forma original de superfície de escoamento, juntamente com a hipótese de fluxo associado, acabavam por prever deformações cisalhantes em compressão isotrópica. Roscoe & Burland (1968) modificaram a versão original do Cam - clay de modo a superar tais falhas.

O Cam - clay é um modelo elastoplástico com endurecimento isotrópico e potencial plástico coincidente com a função de plastificação,

cuja s relações tensão-deformação envolvem quatro parâmetros característicos do material : λ , κ , M e G' .

Os parâmetros λ e κ , definidos anteriormente, correspondem respectivamente às inclinações do trecho virgem de compressão e da curva de recuperação elástica de descarregamento / recarregamento. A constante de fricção (M) define a inclinação da linha de estado crítico no plano (p' x q). O Cam - clay supõe a existência do estado crítico para o qual tende o solo se submetido à distorção crescente, com $\eta > M$, sendo $\eta = q/p'$. No estado crítico, o material continua a apresentar deformações cisalhantes crescentes sem variação do índice de vazios ou da tensão desviatória (Roscoe et al., 1958).

O módulo de deformação cisalhante (G') pode ser obtido através do trecho linear de uma curva (q x ε_s), onde o coeficiente angular deste trecho é $3G'$. Outra forma utilizada para a obtenção de (G') é através de uma curva de (q x $(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$) do ensaio triaxial de compressão com ciclo de descarga-recarga. Define-se ε_a e ε_r como deformações axial e radial, respectivamente, sendo $2G$ o coeficiente angular da reta de descarga-recarga. A figura (2.28) ilustra a forma de uma curva (q x $(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$).

Figura 2.28 - Curva ($q \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r)$) (Apud Nader, 1993)

Nota-se da figura (2.29) a diferença de comportamento do Cam-clay a partir de estados de tensões representados por pontos abaixo (X) e acima (Y) da superfície do estado crítico. Se o carregamento ocorrer pela trajetória XX' , o material apresentará comportamento plástico com endurecimento, ampliando a superfície de plastificação até que se atinja o estado crítico em X' . Por outro lado, caso se imponha a continuação da deformação a partir de Y, o comportamento será de material plástico com amolecimento (a superfície de plastificação se contrairá) até que o estado crítico em Y' seja alcançado. O ponto Y está associado a um pico na curva tensão-deformação (Apud Nader, 1993).

Figura 2.29 - Endurecimento e amolecimento no Cam - clay. (Apud Nader, 1993)

O Cam - clay é um modelo desenvolvido para condição de carregamento axissimétrico, com base na observação experimental, e pode ser melhor descrito no espaço (q, p') . A figura (2.30) ilustra as superfícies do Cam - clay original e modificado.

A função de plastificação do Cam-clay modificado é representada por :

$$f = q^2 - M^2[p'(p'_0 - p')] = 0 \quad (2.34)$$

Como os solos obedecem à condição de normalidade, pode-se dizer que os potenciais plásticos (g) são expressos pela mesma família de curvas de (f) :

$$g = f = q^2 - M^2[p'(p'_0 - p')] = 0 \quad (2.35)$$

Figura 2.30 - Superfícies de escoamento para o Cam - clay original e modificado (Wood, 1992).

Quando deformações cisalhantes plásticas ($\delta\epsilon_s^p$) ocorrem, tem-se a seguinte relação :

$$\delta\epsilon_v^p / \delta\epsilon_s^p = (\partial g / \partial p') / (\partial g / \partial q) = M^2(2p' - p'_0) / 2q = (M^2 - \eta^2) / 2\eta \quad (2.36)$$

onde $\eta = q/p$, $\delta\epsilon_v^p$ é a deformação volumétrica plástica e p'_0 é um parâmetro de encruamento. Caso não existam tensões cisalhantes, este será a pressão isotrópica de pré-adensamento na curva de compressão isotrópica virgem no espaço (p' , e). (Wood, 1992)

As equações (2.37) e (2.38) fornecem respectivamente o valor das deformações elásticas volumétrica e cisalhante :

$$\delta \varepsilon_v^e = \kappa \delta p' / v p' \quad (2.37)$$

$$\delta \varepsilon_s^e = \delta q / 3G' \quad (2.38)$$

O valor das deformações volumétricas plásticas é dado por :

$$\delta \varepsilon_v^p = [(\lambda - \kappa) / v] \delta p' / p'_0 \quad (2.39)$$

Combinando-se as equações (2.37) e (2.38), pode-se expressar a resposta elástica tensão-deformação na forma matricial :

$$\begin{bmatrix} \delta \varepsilon_v^e \\ \delta \varepsilon_s^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\kappa}{v p'} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3G'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

E de forma análoga, a resposta plástica tensão-deformação torna-se :

$$\begin{bmatrix} \delta \varepsilon_v^p \\ \delta \varepsilon_s^p \end{bmatrix} = \frac{(\lambda - \kappa)}{v p' (M^2 + \eta^2)} \begin{bmatrix} (M^2 + \eta^2) & 2\eta \\ 2\eta & \frac{4\eta}{(M^2 + \eta^2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

As equações (2.40) e (2.41) são gerais e pertinentes para todas as trajetórias de tensões efetivas que podem ser seguidas no espaço ($p' : q$).

Deve-se levar em conta, que o modelo Cam-clay foi desenvolvido para representar o comportamento de argilas levemente pré-adensadas, que apresentam diminuição de volume durante a plastificação, ou em outras palavras, encruamento positivo. Isto faz com que para solos altamente pré-adensados, o modelo apresente diversas limitações para reproduzir seu comportamento.

2.4.2.1 - Exemplos de Aplicação do Modelo Cam - clay Modificado

O modelo Cam - clay modificado possui grande aplicabilidade na área geotécnica. Seu uso tem resultados satisfatórios nos trabalhos em que foi utilizado. Como exemplo citar-se-ão os trabalhos de Nader (1993), Almeida et al. (1996) e Brugger e Lopes (1994).

O trabalho de Nader (1993) consistiu na utilização do modelo para a avaliação de sua representatividade frente aos ensaios de laboratório realizados com um silte (solo residual de migmatito) submetido a diferentes trajetórias de tensões. Esse solo possui a seguinte caracterização : fração silte = 63%, fração areia = 27%, fração argila = 10%, LL = 47%, IP = 18% e massa específica dos sólidos = 26,5 kN/m³. O material utilizado foi remoldado em laboratório e os ensaios foram conduzidos com drenagem (CD). As trajetórias de tensão foram obtidas no plano ($p \times q$), onde $p = (\sigma_a + \sigma_r)/2$ e $q = (\sigma_a - \sigma_r)/2$. Tais trajetórias são de : 37°, 45°, 72°, 90°, 108° e 135°. Os parâmetros do modelo obtidos foram : $\lambda = 0,070$; $\kappa = 0,016$; $M = 1,46$

($\phi'_{\text{crít}} = 36^\circ$) e $G' = 16.700$ kPa. Nader (1993) observou que em termos de deformação volumétrica, os resultados experimentais e teóricos apresentaram como resultado global a ocorrência de aumento de volume sendo que, este aumento foi maior na previsão teórica (da ordem de duas vezes e meia o do ensaio no final da curva). Os resultados obtidos mostraram que o modelo foi melhor sucedido nas trajetórias em que houve aumento da tensão octaédrica (p') enquanto que com a diminuição desta, houve uma diferença acentuada entre o comportamento previsto e observado.

Almeida et al. (1996) fizeram uma análise comparativa entre o desempenho dos modelos Cam - clay modificado e do modelo de Mohr - Coulomb sob o ponto de vista da simulação numérica da construção de um túnel em solo normalmente adensado. O material utilizado foi uma argila porosa vermelha da região de Brasília (DF). Os parâmetros obtidos para o modelo Cam - clay foram os seguintes : $\lambda = 0,175$; $\kappa = 0,019$ e $M = 1,027$ ($\phi'_{\text{crít}} = 26^\circ$). Os resultados obtidos pelo modelo em termos de deslocamentos foram comparados com os resultados obtidos em campo através de instrumentação (marcos superficiais, tassômetros e inclinômetros). Verificou-se que o modelo forneceu deslocamentos da mesma ordem de grandeza que os maiores deslocamentos verificados em campo. Almeida et al. (1996) concluem que o modelo de estado crítico fornece melhores resultados do que o modelo de Mohr-Coulomb para a simulação de túneis, especialmente no caso de solos normalmente adensados.

Brugger e Lopes (1994) utilizaram o modelo Cam - clay modificado para a análise numérica de estacas submetidas a esforços de compressão. O material utilizado para o estudo foi um solo argiloso (considerado normalmente adensado) com as propriedades do Caulim. Os parâmetros de estado crítico obtidos foram os seguintes : $\lambda = 0,25$; $\kappa = 0,05$ e $M = 0,90$ ($\phi'_{\text{crít}} = 23^\circ$). Foram estudados carregamentos drenados e não-

drenados. O problema de uma estaca submetida a esforços de compressão não é um problema de tensão controlada, mas sim de deformação controlada onde a grande rigidez da estaca em relação ao solo impõe as deformações ao longo do seu fuste. Os autores concluíram que o atrito lateral em estacas é um problema basicamente cinemático de deformação imposta e que o modelo Cam - clay simula a contento o problema.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Introdução

Este capítulo descreve o material utilizado assim como as etapas de trabalho realizadas em campo (amostragem) e os posteriores ensaios realizados em laboratório. A saber, estes ensaios são os de caracterização (massa específica dos sólidos, granulometria conjunta e limites de Atterberg), Proctor normal, adensamento edométrico, triaxiais convencionais drenados e triaxiais drenados utilizando-se uma prensa do tipo "stress-path", para a obtenção de várias trajetórias de tensões para os corpos de prova ensaiados. Sobre este último tipo de ensaio, maiores detalhes serão apresentados dentro do item metodologia utilizada.

Inicialmente, procedeu-se à abertura de um poço com profundidade até a cota -9,5 m no campo experimental de fundações da EESC - USP. Fez-se a retirada de duas amostras cúbicas indeformadas a cada metro de profundidade. Essas amostras foram parafinadas em campo e posteriormente transportadas para a câmara úmida do Laboratório de Mecânica dos Solos. A figura (3.1) ilustra o perfil do terreno experimental, onde q_c = resistência de ponta do cone, f_c = atrito lateral do cone e N = número de golpes do ensaio de penetração dinâmica (SPT).

Após a amostragem feita em campo, procedeu-se aos ensaios descritos anteriormente. Deve-se ressaltar, que, apesar da disponibilidade de material, este trabalho restringe-se somente aos ensaios com o solo

saturado e na umidade natural realizados entre as cotas -8 m e -9 m. Isso justifica-se pelo fato de que esse trabalho insere-se numa pesquisa conjunta realizada na EESC - USP sendo abordado aqui somente uma modelagem numérica que servirá de complemento para outros fins de pesquisa.

Figura 3.1 - Perfil do terreno no campo experimental da EESC - USP – São Carlos (SP)

3.2 - Origem do Solo Estudado

O material utilizado consiste em um solo residual de arenito Bauru, predominando a fração areia fina. Segundo Paraguassú & Röhm

(1990), este solo contém os seguintes minerais : quartzo, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, caolinita e gibsit.

As normas utilizadas estão listadas na tabela (3.1) conforme o tipo de ensaio realizado.

Tabela 3.1 - Normas utilizadas e tipos de ensaios realizados

TIPO DE ENSAIO	NORMAS
Amostras de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	ABNT - NBR - 6457/86
Análise granulométrica conjunta	ABNT - NBR - 6502/80
Determinação do limite de liquidez	ABNT - NBR - 6459/84
Determinação do limite de plasticidade	ABNT - NBR - 7180/84
Grãos de solos que passam na # de 4,8 mm - Determinação de massa específica	ABNT - NBR - 6508/84
Ensaio de compactação	ABNT - NBR - 7182/86

3.3 - Ensaios de Compressão e Extensão Axial e Edométrica

Descrevem-se aqui os ensaios e as técnicas utilizadas para a obtenção dos parâmetros de resistência e de deformabilidade do solo.

Para a série de ensaios de compressão edométrica, foram realizados quatro ensaios. Dois destes ensaios foram realizados na umidade natural e os outros dois com saturação e medida do coeficiente de empuxo em repouso ("Ko"). As amostras utilizadas possuíam altura de 2,55 cm e diâmetro de 7 cm.

A figura (3.2) ilustra o equipamento utilizado para este tipo de ensaio, desenvolvido por MACHADO (1995). Com tal equipamento, é possível determinar o coeficiente de empuxo em repouso ("Ko") através de medidores internos de deformação lateral, além de poder também efetuar o controle de sucção durante o ensaio.

Figura 3.2 - Câmara para ensaios edométricos

A sequência de carregamento, num total de oito, foi a mesma para os quatro ensaios. Como a estabilização das deformações ocorria em torno de 30 minutos, cada ciclo de carregamento durou apenas 100 min e iniciou-se com uma tensão vertical de 14,30 kPa dobrando-se seu valor até atingir a tensão vertical final de 1371,30 kPa. O descarregamento foi feito até atingir-se a tensão inicial de carregamento. Para o caso dos ensaios com medida de "Ko", sua leitura foi feita ao final de cada estágio de carregamento e descarregamento.

Realizaram-se dois ensaios de compressão isotrópica. Um destes ensaios foi realizado utilizando-se o equipamento de ensaio triaxial convencional com aquisição direta de dados. Tal aquisição de dados é feita por meio de transdutores acoplados à prensa de ensaio e conectados a uma caixa de leitura da Wykeham Farrance. Nessa caixa pode-se fazer as leituras digitais da variação de volume, de pressão neutra e deslocamento

axial do corpo de prova (cp) que são transmitidas ao microcomputador acoplado ao sistema. À medida em que os dados vão sendo gerados, estes vão sendo automaticamente arquivados pelo micro e o acompanhamento visual gráfico do ensaio pode ser feito.

O outro ensaio foi feito utilizando-se uma câmara do tipo "stress-path", fornecida pela (GDS), que também permite aquisição automática de dados e possui instrumentação interna, a saber, medidores de deslocamento radial e axial. Maiores detalhes sobre o funcionamento desse tipo de aparelho serão fornecidos no sub-item Ensaio Triaxiais com Multi-Trajelórias de Tensões.

Para esses dois tipos de ensaios de compressão isotrópica, utilizaram-se amostras com alturas e diâmetros iniciais de 10,10 e 4,76 cm, respectivamente. A tensão confinante foi aumentada gradativamente segundo a sequência : 0, 20, 40, 80, 120, 180, 240, 300, 400, 500, 700, 900 e 1300 kPa.

Os ensaios de compressão triaxial convencionais foram realizados com corpos de prova que possuíam alturas e diâmetros iniciais de 10,10 e 4,76 cm, respectivamente.

Realizaram-se quatro ensaios com tensões confinantes de 50, 100 , 150 e 200 kPa. Nos ensaios com o equipamento da GDS, a tensão confinante foi de 80 kPa. Todos os ensaios foram drenados (CD) e inicialmente adensados isotropicamente. Após o adensamento isotrópico, aumentava-se gradativamente a tensão desviatória até que o corpo de prova atingisse a ruptura. A aquisição de dados foi feita automaticamente como descrito anteriormente.

As figuras (3.3) e (3.4) ilustram respectivamente a prensa utilizada para os ensaios de adensamento e uma vista da câmara e da prensa usada nos ensaios triaxiais convencionais.

Figura 3.3 - Prensa utilizada para ensaios edométricos

Figura 3.4 - Montagem de ensaio triaxial convencional com aquisição direta de dados

3.4 - Ensaios Triaxiais com Multi-Trajétórias de Tensões

Essa série de ensaios foi realizada utilizando-se uma câmara de ensaios triaxiais ("stress - path") acoplada a três atuadores de pressão com sistema de servo-controle (GDS). Essa câmara é do tipo da desenvolvida por Bishop - Wesley (1975).

3.4.1 - Descrição do Equipamento

A figura (3.5) mostra um diagrama esquemático da realização de ensaios onde um microcomputador está conectado à câmara triaxial hidráulica por meio de três microprocessadores que funcionam como atuadores hidráulicos controlados chamados de controladores digitais.

Figura 3.5 - Diagrama esquemático da realização de ensaios

Os controladores regulam a pressão e a troca de volume de água deaerada que é enviada para a câmara, onde pode-se fazer o controle de carga e deformação axial, pressão da câmara (confinante) e pressão

neutra. A pressão neutra é medida pelo controlador de pressão neutra (atuador).

3.4.2 - Elementos do Sistema

3.4.2.1 - A câmara triaxial

A câmara triaxial (compressão/extensão) é baseada no projeto "*A Hydraulic Triaxial Apparatus for Controlled Stress Path Testing*" (Bishop & Wesley - 1975) desenvolvido no "Imperial College of Science and Technology", London.

As figuras (3.6) e (3.7) ilustram a câmara triaxial do tipo Bishop & Wesley (7 kN / 1700 kPa / 38 mm / 50 mm).

Figura 3.6 - Câmara triaxial do tipo Bishop & Wesley (7 kN / 1700 kPa / 38 mm / 50 mm)

Figura 3.7 - Detalhe da câmara triaxial

Através da figura (3.7), nota-se que a força axial é exercida sobre a amostra pelo movimento da base. O pistão que movimentava a base move-se verticalmente para cima e para baixo e é acionado hidráulicamente pela pressão exercida na câmara inferior da base, que contém água deaerada. A fricção axial é muito pequena e, normalmente, muito menor que 5 kPa.

Por equilíbrio de forças na direção vertical, a seguinte relação é obtida :

$$\sigma_a = p (a/A) + \sigma_r (1 - a/A) - W/A \quad (3.1)$$

onde : σ_a = Tensão axial total média aplicada à amostra

σ_r = Tensão radial total

p = Pressão na câmara inferior (base) aplicada ao pistão

W = Peso do conjunto

A = Área média da seção transversal da amostra

a = Área do pistão de carga incluindo o diafragma (Bellofram)

A figura (3.8) apresenta em detalhe a base da câmara triaxial.

Figura 3.8 - Detalhe da base da câmara triaxial

3.4.2.2 - O "cap" para ensaios de extensão (*"the extension device"*)

O objetivo do "cap" para testes de extensão é de permitir que tensões axiais sejam reduzidas abaixo das tensões radiais. Em câmaras triaxiais convencionais, isso normalmente não é possível porque a tensão radial (confinante) age verticalmente no topo da amostra.

A figura (3.9) apresenta um diagrama esquemático do cap para ensaios de extensão.

Figura 3.9 - Diagrama esquemático do “cap”

3.4.2.3 - O controlador digital (atuador)

A figura (3.10) ilustra os controladores digitais que nada mais são do que atuadores hidráulicos que regulam as pressões e trocas de volume do líquido.

Para os ensaios realizados, utilizou-se um atuador com capacidade volumétrica de 200 cm^3 para o controle da pressão neutra dentro do corpo de prova. Para aplicar-se a tensão confinante e axial, utilizaram-se dois atuadores com capacidade volumétrica de 1000 cm^3 . O alcance de pressão dos atuadores varia de 0 a 2000 kPa possuindo uma resolução de

0,2 kPa e um controle de pressão a cada 0,5 kPa. As variações volumétricas são medidas e controladas a cada mm^3 .

Figura 3.10 - Atuadores de pressão

O diagrama esquemático mostrado na figura (3.11) ilustra o processo de funcionamento dos atuadores.

Figura 3.11 - Diagrama esquemático de funcionamento dos atuadores

Basicamente, a água deaerada no cilindro é pressurizada e deslocada pelo pistão que, ao movimentar-se, aciona um transdutor de pressão. Os algoritmos vão então sendo construídos na memória programável do atuador para que o controlador busque um determinado valor de pressão ou passos para uma variação de volume.

Em síntese, os atuadores podem constituir-se em fontes de alimentação, medidores de pressão e de variação volumétrica. Nos ensaios realizados, os três atuadores (pressão neutra, tensão axial e tensão radial) estavam conectados entre si e seu controle foi feito através de um computador acoplado ao sistema.

3.4.2.4 - Medidores Locais de Deformação (Efeito Hall)

Convencionalmente, nos ensaios triaxiais, as deformações axiais são determinadas por deflectômetros externos que medem a variação de altura da amostra. Nesse processo de medida, a qualidade e precisão é prejudicada intensamente por efeitos de acomodação e compressibilidade do sistema. "As medidas de pequenas deformações em ensaios triaxiais requerem a eliminação de tais efeitos. Isso significa que as deformações devem ser medidas localmente nas amostras " (Clayton & Khatrush, 1986).

Os medidores de efeito Hall têm sido utilizados para medida local de deformação axial e radial em ensaios triaxiais. Os pesquisadores da Universidade de Surrey são os pioneiros desse trabalho. O "chip" semicondutor utilizado é muito leve, pequeno e protegido contra eventuais mudanças de temperatura ambiente e/ou oscilações na alimentação elétrica.

A figura (3.12) apresenta os transdutores de deformação axial e radial, e a figura (3.13) apresenta-os montados diretamente sobre a amostra a ser ensaiada.

Figura 3.12 - Medidores de deformação radial e axial

Figura 3.13 - Medidores de efeito Hall montados sobre a amostra

3.4.2.5 - O medidor de Deformação Axial

O medidor de deformação axial é constituído por duas partes : a primeira que possui um tipo de pêndulo com um ímã em uma das extremidades, onde a parte superior é fixada na membrana que envolve a

amostra por meio de um determinado tipo de cola, no caso específico, utilizou-se silicone; e a segunda, que é a parte inferior do medidor, que consiste de um suporte metálico que segura o semiconductor de efeito Hall. Este suporte foi fixado também com silicone sobre a amostra.

3.4.2.6 - O Medidor de Deformação Radial

Este tipo de medidor é semelhante ao desenvolvido por Bishop & Henkel (1962) e tem sido usado para medidas de deformação lateral em amostras triaxiais. Sua montagem é feita sobre a amostra por meio de dois cotovelos diametralmente opostos que são colados na amostra. O transdutor de efeito Hall é posicionado através da abertura do medidor onde são feitas as medidas de deformação radial, de acordo com a abertura ou fechamento dos cotovelos.

Os medidores de deformação axial e radial são projetados de modo que seu peso próprio não interfira no processo de leitura dos deslocamentos. A aquisição das medidas fornecidas pelos transdutores de efeito Hall é feita diretamente através de suas conexões que são ligadas a uma central de controle com 8 canais e que as envia em seguida a um microcomputador.

3.4.3 - Operação do Sistema

O programa fornecido pela GDS juntamente com o equipamento, permite que os ensaios sejam realizados com um maior grau de precisão e facilidade : armazena leituras dos atuadores assim como as leituras de deformação axial e medida de pressão neutra; calcula e

armazena os parâmetros correntes de ensaios e permite que novos comandos sejam dados aos atuadores, para que se mantenha o tipo de ensaio selecionado.

Para a realização dos ensaios triaxiais com multi-trajetórias de tensões foram seguidos os seguintes passos :

- a) - Montagem do ensaio com a instrumentação interna (transdutores de efeito Hall);
- b) - Confinamento, fluxo de água pela amostra e saturação;
- c) - Após um período de 24 h, aplicava-se a saturação por contra-pressão e avaliava-se o parâmetro B de pressão neutra;
- d) - Adensamento do corpo de prova sob uma tensão efetiva de 80 kPa para todos os ensaios. Esse valor constitui metade do valor da pressão de pré-adensamento obtida no ensaio de consolidação isotrópica;
- e) - Imposição das trajetórias de tensões (ensaio drenados).

3.4.3.1 - Trajetórias de Tensões

Para a realização de uma trajetória de tensão, basta fornecer ao programa as coordenadas iniciais e finais das tensões axial e radial. Para a estimativa das tensões finais e para garantir que o material atingiria a plastificação, admitiu-se a hipótese de uma forma circular para a superfície de plastificação do modelo. Como a superfície do Cam - clay modificado é de forma elipsoidal, considera-se seu maior eixo como sendo o diâmetro do

círculo adotado. Dessa forma, a superfície circular circunscreve a superfície elipsoidal. Portanto, o material atinge a plastificação, numa determinada trajetória, quando percorre o raio da superfície adotada com forma circular.

A figura (3.14) ilustra no plano (p' x q), as diferentes trajetórias de tensões aplicadas nos ensaios realizados.

Figura 3.14 - Trajetórias de tensões seguidas no plano (p' x q)

3.4.3.2 - Superfície de Plastificação

Um dos objetivos deste trabalho, foi a determinação da superfície de plastificação inicial do material através das diferentes trajetórias de tensões obtidas. Isso foi feito, ajustando-se os resultados experimentais à superfície de plastificação proposta pelo modelo Cam - clay modificado. Como foi visto anteriormente na revisão bibliográfica, os critérios que foram utilizados nesse trabalho para a determinação dos pontos de

escoamento, foram aqueles propostos por Graham (1983), apud Wood (1992), e Tavenas et al. (1979).

3.4.3.3 - Análise da lei de fluxo (Desvio da Normalidade)

Admite-se a condição de normalidade quando um material plástico apresentar sua função de escoamento coincidente com sua função potencial plástico. Em outras palavras, traçando-se os vetores de deformação plástica do material, estes deverão ser normais à curva de escoamento do material.

Através da figura (3.15), observa-se que ao se traçar um vetor de deformação plástica $\delta\epsilon^P$ em seu ponto correspondente à curva de escoamento, este apresenta um certo desvio (θ) em relação à normal com a curva, ou seja, o ângulo que este vetor faz com a normal à curva é diferente de 90° .

Figura 3.15 - Vetor de deformação plástica ($\delta\epsilon^P$) e desvio de normalidade (θ)

3.5 - Simulação Numérica Utilizada

Utilizou-se nesse trabalho, o programa “Cris” que simula ensaios triaxiais através dos modelos Cam - clay e Cam - clay modificado. Esse programa cuja linguagem computacional é o “Quick Basic” e que é distribuído em forma executável para microcomputadores IBM - PC, foi apresentado por Ortigão (1993).

A entrada de dados pode ser feita pelo teclado ou pela criação de um arquivo. O programa necessita saber dos seguintes valores dos parâmetros do estado crítico :

ϕ' (ângulo de atrito); C_c e C_s (coeficientes de compressão e descompressão); G' (módulo de deformação cisalhante) e e_{cs} (índice de vazios crítico).

Para a definição do ensaio, foi necessário especificar-se :

- a) - O tipo de diagrama desejado : ($p' \times q$)
- b) - O valor inicial de p' (isto é, o valor correspondente ao início da trajetória de tensões efetivas (TTE) do ensaio) : 80 kPa, sendo que nos ensaios triaxiais convencionais utilizou-se o valor de p' igual ao valor da respectiva tensão confinante.
- c) - O valor da pressão de pré - adensamento do material : $P'_a = 165$ kPa
- d) - O tipo de drenagem do ensaio : ensaio drenado
- e) - A inclinação da trajetória de tensões totais (dq/dp) : esse valor depende da trajetória a ser imposta.

- f) - O incremento de deformação cisalhante $d\varepsilon_s$ a ser aplicado internamente pelo programa a cada passo de cálculo : 0,2 %.
- g) - O tipo de ensaio : compressão
- h) - O modelo adotado : Cam - clay modificado.

Os resultados obtidos foram gravados em um arquivo de saída e tratados no utilitário “Quatro - Pró”.

Deve-se ressaltar que o programa “CRIS” não conseguiu reproduzir as trajetórias de 30°, 40° e 50° pois as inclinações dessas trajetórias estão abaixo da inclinação crítica com $M = 1,26$. As trajetórias de -30° e -50° também não foram reproduzidas pois estão acima da inclinação crítica com $M = 0,89$. Para que se pudesse confrontar os resultados práticos com os obtidos pelo modelo, para essas trajetórias, recorreu-se a uma planilha eletrônica. Esta planilha emprega as equações (2.40) e (2.41) do modelo Cam - clay modificado apresentadas no capítulo 2 (Revisão Bibliográfica). O objetivo principal dessa planilha de cálculo é a comparação das curvas experimentais e das obtidas pelo uso das equações elastoplásticas do modelo até o nível de carregamento atingido pelo ensaio.

Essa simulação via planilha eletrônica foi feita seguindo-se a orientação de Desai & Siriwardane (1984)¹.

¹ DESAI, C.S. & SIRIWARDANE, H.J. (1984) - Constitutive laws for Engineering materials (with emphasis on geologic materials), Cap. 11 pgs 249 – 314 - New Jersey.

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Apresentam-se neste capítulo, os resultados obtidos e sua posterior análise para os ensaios de compressão edométrica e isotrópica, ensaios triaxiais convencionais e com multi-trajetória de tensões. Inicialmente comentam-se os parâmetros λ , κ , M e G' do modelo Cam-clay obtidos através dos ensaios de compressão edométrica, isotrópica e triaxial. A seguir, avalia-se a resistência efetiva obtida para o material através dos ensaios triaxiais convencionais. A comparação entre os resultados teóricos obtidos pelo modelo e os resultados experimentais é feita através dos gráficos de $(q \times \varepsilon_a)$, $(\varepsilon_v \times \varepsilon_a)$ e $(p' \times \varepsilon_v)$, onde q é a tensão desviatória, p' é a tensão octaédrica e ε_a e ε_v as deformações axial e volumétrica respectivamente. Para a obtenção dos pontos de escoamento, apresentam-se os gráficos de $(s' \times W)$ e $(p' \times W)$, comentando-se a potencialidade dos critérios de Graham (1983) e Tavenas et al. (1979). A superfície de plastificação ajustada aos pontos experimentais utilizando-se o Cam - clay modificado é apresentada, mostrando-se o confronto entre a previsão teórica e os resultados obtidos experimentalmente. Comenta-se a lei de fluxo assim como a inclinação dos vetores de deformação plástica e os desvios de normalidade apresentados.

Os resultados obtidos para a caracterização do material estão apresentados na tabela (4.1) :

Nesta tabela temos :

LL = Limite de Liquidez

γ_{nat} = Peso específico natural

LP = Limite de Plasticidade

γ_s = Peso específico dos sólidos

IP = Índice de Plasticidade

W_{nat} = Umidade natural

γ_d = Peso específico seco

e_o = Índice de vazios inicial

$W_{ót}$ = Umidade ótima (Proctor normal)

$\gamma_{dmáx}$ = Peso específico seco máximo (Proctor normal)

Tabela 4.1 - Resultados obtidos para os ensaios de caracterização

LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	W_{nat} (%)	γ_d (kN/m ³)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	$W_{ót}$ (%)	γ_s (kN/m ³)	e_o
29	17	12	19,34	16	16,67	18,92	11,18	27,09	0,65

A curva granulométrica é apresentada na figura (4.1) seguinte.

Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo para as cotas -3, -5 e -8m.

A granulometria é de uma areia fina argilosa, com a seguinte composição :

Areia fina (%) = 57; Areia média (%) = 16; Argila (%) = 17; Silte (%) = 10

4.1 – Parâmetros do Cam - clay

Apresentam-se inicialmente, os parâmetros λ e κ fornecidos pelas curvas de compressão edométrica e compressão isotrópica.

Os coeficientes das retas virgem de compressão e descompressão-recompressão para o estado crítico, são $-\lambda$ e $-\kappa$ respectivamente e são obtidos através da curva $e \times \ln(p')$. Os coeficientes de compressão (C_c) e de expansão (C_e), análogos a $-\lambda$ e $-\kappa$, são obtidos através da curva $e \times \log(p')$. Os valores de λ e κ são obtidos dividindo-se o valor de C_c e de C_e por 2,3, ou seja, $\lambda = C_c / 2,3$ e $\kappa = C_e / 2,3$.

A figura (4.2) apresenta um dos ensaios de compressão edométrica no espaço ($e \times \log p'$).

A figura (4.3) ilustra a curva obtida no espaço ($e \times \log p'$) para o ensaio de compressão isotrópica realizado com o equipamento da GDS.

Figura 4.2 - Curva de compressão edométrica (e x $\log p'$)

Figura 4.3 - Curva de compressão isotrópica (e x $\log p'$)

Os valores médios obtidos para os parâmetros dos ensaios de compressão edométrica e isotrópica estão apresentados na tabela (4.2).

O coeficiente de empuxo em repouso (K_0) foi determinado nos ensaios de compressão edométrica, em equipamento desenvolvido por Machado (1995).

Tabela 4.2 - Resultados obtidos para os ensaios de compressão

Compressão	Cc	Ce	λ	κ	K_o	P_a' (kPa)
Confinada	0,1907	0,017	0,0828	0,0078	0.55	171
Isotrópica	0,1538	0,0124	0,0670	0,0054	-	165

Para a aplicação do modelo Cam-clay modificado, utilizou-se os valores de λ e κ obtidos no ensaio de compressão isotrópica.

A figura (4.4) apresenta a envoltória de resistência efetiva obtida para os ensaios triaxiais (compressão axial) realizados com tensões confinantes de 50, 100, 150 e 200 kPa.

Figura 4.4 - Envoltória efetiva de Mohr-Coulomb obtida considerando-se os ensaios de compressão axial.

Os resultados das curvas tensão desviatória e variação volumétrica versus deformação axial, ($q \times \varepsilon_a$) e ($\varepsilon_v \times \varepsilon_a$), são apresentados nas figuras (4.5) e (4.6), respectivamente.

Figura 4.5 - Gráfico ($q \times \epsilon_a$)

Figura 4.6 - Gráfico de ($\epsilon_v \times \epsilon_a$)

$= (\sigma_a - \sigma_r)/2$ e
r dos ensaios
a origem.

Figura 4.7 - Envoltória de resistência obtida para os ensaios triaxiais convencionais e ajuste pela origem no plano (t' x s')

Para definir-se o parâmetro M , ajustou-se uma envoltória passando pela origem no plano (t' x s'). Isto forneceu uma inclinação $\alpha' = 27,63^\circ$, donde o ângulo de atrito crítico (ϕ'_{crit}) corresponde a $31,5^\circ$. O valor do parâmetro M correspondente a este ângulo de atrito crítico é de 1,26 para os ensaios de compressão e de 0,89 para os ensaios de extensão.

O Módulo de Deformação Cisalhante (G') foi obtido através das curvas de (q x ε_s) onde ε_s é a deformação cisalhante, e também através de ensaios de carga-descarga. Sabe-se que existe uma relação de $1:3G'$ no trecho linear das curvas (q x ε_s) e que o coeficiente angular do trecho de descarga-recarga de uma curva (q x ($\varepsilon_a - \varepsilon_r$)) é $2G'$. A figura (4.8) apresenta as curvas de (q x ε_s) referentes às trajetórias 1:3, 100° , 120° e 140° . A figura (4.9) ilustra um ensaio convencional (1:3) de carga-descarga realizado no equipamento da GDS, onde o descarregamento ocorreu com 50 % da carga de ruptura. Na figura (4.10) apresenta-se a curva (q x ($\varepsilon_a - \varepsilon_r$)) obtida através do ensaio de carga-descarga.

Figura 4.8 - Curvas de ($q \times \varepsilon_s$) para a obtenção do Módulo de Deformação Cisalhante (G').

Figura 4.9 - Ensaio convencional (1:3) de carga-descarga

Figura 4.10 - Curva de $(q \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r))$

Através dos valores dos módulos de deformação cisalhante determinados a partir das curvas de $(q \times \varepsilon_s)$ e de $(q \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r))$, obteve-se o valor médio de $G' = 24.800$ kPa. Os valores de (G') estão apresentados na tabela (4.3).

Tabela 4.3 -Valores obtidos para o módulo de deformação cisalhante (G')

Curva	G' (kPa)
$(q \times \varepsilon_s)$	26.000
$(q \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r))$	23.580
$G'_{\text{MÉDIO}} = 24.800$ kPa	

Os parâmetros de estado crítico utilizados no programa “CRIS” estão apresentados na tabela (4.4) :

Tabela 4.4 - Valores dos Parâmetros de Estado Crítico utilizados

Parâmetros de Estado Crítico	Valor
ϕ'	31,5°
M (compressão)	1,26
M (extensão)	0,89
C_c	0,1541
C_s	0,0124
e_{cs}	0,84
G' (kPa)	24.800

Apresenta-se a seguir, uma comparação dos parâmetros do modelo Cam - clay modificado obtidos nesse trabalho com outros existentes na literatura.

Tabela 4.5 - Comparação de Parâmetros do Cam - clay modificado

Material	λ	κ	M	ϕ'_{cr}	ν	G' (kPa)
Argila porosa vermelha - (1)	0,175	0,019	1,027	26°	0,23	-
Argila porosa vermelha - (2)	0,22	0,18	1,20	30°	0,23	-
Silte residual (3)	0,070	0,016	1,46	36°	-	16.700
Areia fina argilosa - (4)	0,067	0,0054	1,26 / 0,89	31,5°	0,25	24.800

(1) Almeida et al. (1996); (2) Ruiz (1997); (3) Nader (1993); (4) Este trabalho

Deve-se ressaltar que a diferença existente entre os parâmetros obtidos para os diferentes trabalhos está relacionada com o tipo de solo e condições de ensaios a que foram submetidos. Almeida et al. (1996) utilizaram em seu trabalho um solo poroso normalmente adensado. Ruiz (1997) utilizou o mesmo solo poroso referido anteriormente ajustando para o modelo os parâmetros que melhor descreviam o comportamento do solo frente a ensaios triaxiais convencionais de compressão. Nader (1993) utilizou um silte remoldado em laboratório. O presente trabalho utiliza um material arenoso cujos parâmetros foram obtidos no trecho de pré-adensamento do mesmo.

4.2 – Confronto entre Resultados Teóricos e Experimentais

As figuras (4.11) a (4.21) apresentam os resultados obtidos para as diferentes trajetórias de tensões no plano ($p' \times q$), a saber : -30° , -50° , 30° , 40° , 50° , 60° , $71,56^\circ$ (1:3), 100° , 120° e 140° . As figuras (4.22) a (4.25) ilustram os resultados obtidos para os ensaios triaxiais convencionais. Para cada trajetória de tensões assim como para os ensaios triaxiais convencionais, os resultados são apresentados nos gráficos em termos de $(q \times \varepsilon_a)$, $(\varepsilon_v \times \varepsilon_a)$, e $(p' \times \varepsilon_v)$.

Para a avaliação dos pontos de escoamento do material foram utilizados dois critérios : o critério de Graham (1983) e de Tavenas et al. (1979) (Apud Wood 1992). Esses critérios baseiam-se na energia de distorção (W) requerida para deformar a amostra. Graham (1983) propõe a utilização de um gráfico $(s \times W)$, onde $(s)^2 = (p')^2 + (q)^2$. Tavenas et al. (1979) utilizam um gráfico $(p' \times W)$. Assume-se nesses dois critérios, que o escoamento ocorre no ponto de mudança de declividade da curva obtida. O

valor da energia de distorção ou trabalho cumulativo (W) é dado pela equação (4.1).

$$W = \sum_{i=1}^n (p' d\varepsilon_v + q d\varepsilon_s)_i \quad (4.1)$$

As figuras (4.26) a (4.40) ilustram os resultados obtidos em termos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para os critérios de escoamento utilizados. Nota-se que para o ensaio triaxial convencional com $\sigma_3 = 150$ kPa, o material já se encontra próximo ao limite de escoamento assim como no ensaio com $\sigma_3 = 200$ kPa onde o ensaio realiza-se no trecho normalmente adensado. Dessa forma, os pontos de escoamento desses ensaios não são considerados nas análises de escoamento e fluxo associado.

Ressalta-se que a trajetória de $71,56^\circ$ (1:3) que corresponde a um ensaio triaxial convencional com controle de deformação, foi realizada no equipamento com servo-controle da GDS.

Figura 4.11 - Resultados experimentais e calculados pelo modelo (planilha) para a trajetória de -30°

Figura 4.12 - Resultados experimentais e calculados pelo modelo (planilha) para a trajetória de -50°

Figura 4.13 - Resultados experimentais e calculados pelo modelo (planilha) para a trajetória de 30°

Figura 4.14 - Resultados experimentais e calculados pelo modelo (planilha) para a trajetória de 40°

Figura 4.15 - Resultados experimentais e calculados pelo modelo (planilha) para a trajetória de 50°

Figura 4.16 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 60°

Figura 4.17 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de $71,56^\circ$ (1:3) - ensaio 1

Figura 4.18 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 71,56° (1:3) - ensaio 2

Figura 4.19 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 100°

Figura 4.20 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 120°

Figura 4.21 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para a trajetória de 140°

Figura 4.22 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 50$ kPa)

Figura 4.23 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 100$ kPa)

Figura 4.24 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 150$ kPa)

Figura 4.25 - Resultados experimentais e calculados (programa CRIS) para o ensaio triaxial ($\sigma_3 = 200\text{kPa}$)

Figura 4.26 - Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de -30°

Figura 4.27 - Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de -50°

Figura 4.28 - Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de 30°

Figura 4.29- Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de 40°

Figura 4.30 - Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de 50°

Figura 4.31- Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de 60°

Figura 4.32 - Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de $71,56^\circ$ (1)

Figura 4.33 - Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de $71,56^\circ$ (2)

Figura 4.34 - Gráficos de ($s \times W$) e ($p' \times W$) para a trajetória de 100°

Figura 4.35 - Gráficos de $(s \times W)$ e $(p' \times W)$ para a trajetória de 120°

Figura 4.36 - Gráficos de $(s \times W)$ e $(p' \times W)$ para a trajetória de 140°

Figura 4.37 - Gráficos de $(s \times W)$ e $(p' \times W)$ (ensaio triaxial $c/\sigma_3 = 50$ kPa)

Figura 4.38 - Gráficos de $(s \times W)$ e $(p' \times W)$ (ensaio triaxial $c/\sigma_3 = 100$ kPa)

Figura 4.39 - Gráficos de $(s \times W)$ e $(p' \times W)$ (ensaio triaxial $c/\sigma_3 = 150$ kPa)

Figura 4.40 - Gráficos de $(s \times W)$ e $(p' \times W)$ (ensaio triaxial $c/\sigma_3 = 200$ kPa)

Para a análise da lei de fluxo do material, foram tomados os pontos de escoamento fornecidos nos ensaios juntamente com suas parcelas de deformação volumétrica e cisalhante. Foram tomados então, os pontos situados imediatamente acima dos pontos de escoamento para que se pudesse obter o valor dos incrementos de deformação plástica. Esses pontos são fornecidos pelos atuadores que possuem um controle de pressão a cada 0,5 kPa. Para a determinação da inclinação dos vetores de deformação plástica, é necessário conhecer-se os incrementos de deformação volumétrica plástica ($\delta\epsilon_v^p$) e cisalhante plástica ($\delta\epsilon_s^p$). Através da quantidade de deformação envolvida no intervalo considerado, é possível fazer-se a análise dos desvios de normalidade.

Através dos valores de deformação axial (ϵ_a) e radial (ϵ_r), obtidos através dos ensaios, o valor das deformações volumétricas totais (ϵ_v^T) e cisalhantes (ϵ_s^T) pode ser calculado :

$$\epsilon_v^T = (\epsilon_a + 2\epsilon_r) \quad (4.2)$$

$$\epsilon_s^T = 2/3(\epsilon_a - \epsilon_r) \quad (4.3)$$

De posse desses valores, é possível determinar-se os valores dos incrementos das parcelas de deformação volumétrica plástica ($\delta\epsilon_v^p$) e cisalhante plástica ($\delta\epsilon_s^p$) envolvidos no intervalo referido acima, e dessa forma, obter-se a inclinação dos vetores de deformação plástica. Sabe-se que

$$\delta\epsilon^T = \delta\epsilon^e + \delta\epsilon^p \quad (4.4)$$

$$\delta\epsilon_v^e = \kappa \cdot \delta p' / v \cdot p' \quad (4.5)$$

$$\delta\epsilon_s^e = \delta q' / 3G' \quad (4.6)$$

Os valores totais de deformação volumétrica e cisalhante foram obtidos experimentalmente. Os incrementos de deformação total foram obtidos pela diferença de valores de deformação do intervalo analisado. Determinou-se então, os incrementos de deformações elásticas pelas equações (4.5) e (4.6). O valor dos incrementos das deformações plásticas foi então obtido pela diferença entre os incrementos de deformações totais e elásticas.

Dessa maneira, foi possível obter-se a relação $(\delta\epsilon_s^p / \delta\epsilon_v^p)$. A inclinação teórica dos vetores de deformação plástica foi obtida calculando-se o arcotangente de $(-dp/dq)$ para a superfície ajustada aos pontos experimentais. Para os resultados práticos, as inclinações dos vetores de deformação plástica foram obtidos pelo arcotangente de $(\delta\epsilon_s^p / \delta\epsilon_v^p)$. Os ângulos obtidos pelo arcotangente de $(-dp/dq)$ e pelo arcotangente de $(\delta\epsilon_s^p / \delta\epsilon_v^p)$ correspondem aos ângulos formados com o eixo p' . Estes ângulos são positivos quando tomados com orientação no sentido anti-horário a partir do eixo p' .

Os desvios de normalidade foram obtidos pela diferença em graus entre os valores práticos e teóricos. Portanto, desvios negativos indicam que a inclinação dos vetores de deformação plástica, obtida a partir dos dados experimentais, é menor do que a teórica, ou seja, se traçarmos uma ortogonal a qualquer ponto da superfície de plastificação, os desvios negativos apresentam orientação no sentido horário a partir da ortogonal, enquanto que os desvios positivos apresentam orientação anti-horária.

A equação (4.7) fornece o valor dos desvios (θ) calculados.

$$\theta = \alpha_E - \alpha_T \quad (4.7)$$

onde :

θ (graus) = Desvio de normalidade

α_E (graus) = Inclinação experimental dos vetores de deformação plástica com relação ao eixo p'

α_T (graus) = Inclinação teórica dos vetores de deformação plástica (normal à superfície de plastificação ajustada) com relação ao eixo p'

A figura (4.41) ilustra os desvios negativos e positivos respectivamente.

Figura 4.41 - Convenção adotada para os desvios negativos e positivos

A tabela (4.6) apresenta para as trajetórias de tensões e os ensaios convencionais com tensão confinante de 50 e 100 kPa, os pontos de escoamento obtidos, as parcelas de deformações volumétrica e cisalhante e a relação $(\delta\epsilon^p_v / \delta\epsilon^p_v)$.

Através da tabela (4.7), pode-se fazer uma comparação dos pontos de escoamento obtidos através dos critérios de Graham (1983) apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979). Apresentam-se as tensões octaédricas (p') e as inclinações dos vetores de deformação plástica assim como os desvios de normalidade (θ) obtidos.

Tabela 4.6 - Pontos de escoamento e parcelas de deformação obtidas dos ensaios realizados

Trajectoria	q_{rup}	p_{rup}	q_{esc}	p_{esc}	ε_v^T	ε_s^T	$\delta\varepsilon_v^T$	$\delta\varepsilon_s^T$	$\delta\varepsilon_v^e$	$\delta\varepsilon_s^e$	$\delta\varepsilon_s^P / \delta\varepsilon_v^P$
-30°	—	—	-52,06	167,05	0,00524	-0,00288	0,00022	-0,00016	7,71E-05	-3,06E-05	-0,90431
$p' + \delta p'$	—	—	-54,86	171,01	0,00546	-0,00304	—	—	—	—	—
-50°	—	—	-73,79	140,30	0,00464	-0,00338	0,00020	-0,00048	0,00011	-7,03E-05	-4,45009
$p' + \delta p'$	—	—	-79,25	144,99	0,00484	-0,00386	—	—	—	—	—
30°	—	—	42,94	166,41	0,01255	0,00200	0,00084	0,00018	0,00013	4,62E-05	0,18842
$p' + \delta p'$	—	—	47,15	173,11	0,01339	0,00218	—	—	—	—	—
40°	47,75	150,92	47,75	150,92	0,01170	0,00665	0,00980	0,00579	0,00072	9,97E-05	0,62668
$p' + \delta p'$	—	—	56,18	184,73	0,02150	0,01244	—	—	—	—	—
50°	—	—	67,83	137,60	0,00902	0,00407	0,00108	0,00064	0,00014	9,38E-05	0,58385
$p' + \delta p'$	—	—	74,84	143,60	0,01010	0,00471	—	—	—	—	—
60°	—	—	98,31	145,77	0,00948	0,00096	0,01922	0,02203	0,00094	0,00092	1,15532
$p' + \delta p'$	—	—	174,16	189,05	0,02870	0,02300	—	—	—	—	—

Observação : ($p' + \delta p'$) indica o acréscimo de tensão imediatamente acima do ponto de escoamento

Tabela 4.6 - Pontos de escoamento e parcelas de deformação obtidas dos ensaios realizados (continuação)

71,56° (1)	252,81	164,27	106,74	115,58	0,00368	0,00280	0,01172	0,01020	0,00031	0,00051	0,84883
$p' + \delta p'$	—	—	140,45	126,81	0,01540	0,01300	—	—	—	—	—
71,56° (2)	173,88	137,96	69,06	101,32	0,01050	0,00961	0,00130	0,00169	5,83E-05	6,63E-05	1,30762
$p' + \delta p'$	—	—	72,91	103,20	0,01180	0,01130	—	—	—	—	—
100°	85,88	66,73	85,88	66,73	0,00435	0,00506	-0,00092	0,00321	-4,97E-05	3,71E-05	-3,60958
$p' + \delta p'$	—	—	87,28	65,69	0,00342	0,00827	—	—	—	—	—
120°	60,99	39,53	60,99	39,53	-0,01316	0,01210	-0,00737	0,01064	-8,76E-05	7,14E-05	-1,45057
$p' + \delta p'$	—	—	62,57	38,45	-0,02054	0,02274	—	—	—	—	—
140°	41,02	23,57	41,02	23,57	-0,00738	0,00586	-0,00126	0,00115	-0,00021	-4,05E-05	-1,14196
$p' + \delta p'$	—	—	40,49	21,99	-0,00864	0,00701	—	—	—	—	—
conv 50	109,88	86,62	109,88	86,62	0,00575	0,00668	0,00133	0,00255	5,47E-05	9,11E-05	1,92342
$p' + \delta p'$	—	—	114,26	88,09	0,00708	0,00923	—	—	—	—	—
conv 100	83,07	127,69	83,07	127,69	0,00711	0,00802	0,01433	0,01809	0,00107	0,00178	1,22932
$p' + \delta p'$	—	—	210,42	170,14	0,02144	0,02611	—	—	—	—	—

Observação : ($p' + \delta p'$) indica o acréscimo de tensão imediatamente acima do ponto de escoamento

Tabela 4.7 - Desvios de normalidade obtidos e comparação entre os critérios de Graham (1983), apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979)

Trajectoria	$p'_{esc} (1)$ (kPa)	$p'_{esc} (2)$ (kPa)	$(\delta \varepsilon_s^p / \delta \varepsilon_v^p)$	$\alpha_e (^\circ)$	$\alpha_T (^\circ)$	$\theta (^\circ)$
-30°	167,05	210,00	-0,90431	-42,12°	-28,69°	-13,43°
-50°	140,30	190,00	-4,45009	-77,33°	-47,66°	-29,67°
30°	166,41	125,00	0,18842	10,67°	16,45°	-5,78°
40°	150,92	150,00	0,62668	32,07°	25,67°	6,40°
50°	137,60	137,00	0,58385	30,28°	35,57°	-5,29°
60°	145,77	147,00	1,15320	49,12°	46,83°	2,29°
71,56° (1)	115,58	118,00	0,84883	40,32°	62,19°	-21,87°
71,56° (2)	101,32	98,00	1,30762	52,59°	62,19°	-9,60°
100°	66,73	67,00	-3,60958	105,48°	106,82°	-1,34°
120°	39,53	60,00	-1,45057	124,58°	133,58°	-9,00°
140°	23,57	25,00	-1,14196	131,20°	152,83°	-21,63°
Conv 50	86,62	89,00	1,92,342	62,53°	86,84°	-24,31°
Conv 100	127,69	153,00	1,22932	50,87°	47,47°	3,40°

α_e = inclinação experimental dos vetores de deformação plástica

α_T = inclinação teórica dos vetores de deformação plástica (normal à superfície ajustada)

θ = Desvio de normalidade

(1) - Critério de Graham (1983 apud Wood (1992)); (2) - Critério de Tavenas et al. (1979)

Através da figura (4.42) pode-se observar a boa correlação existente entre os valores de tensão octaédrica obtidos pelos critérios de Graham (1983) e de Tavenas et al. (1979).

Como dito anteriormente, optou-se em fazer-se um ajuste da superfície teórica de plastificação do Cam - clay modificado aos pontos obtidos experimentalmente. Esse ajuste forneceu uma pressão de sobre- adensamento de 162,20 kPa. A figura (4.43), apresenta a melhor superfície

obtida juntamente com os pontos experimentais de escoamento obtidos e a linha de estados críticos $q = Mp'$. Adotou-se neste trabalho, os pontos de escoamento obtidos pelo critério de Graham (1983), apud Wood (1992).

Deve-se ressaltar que os vetores teóricos de deformação plástica foram obtidos pelo arcotangente de $(-dp/dq)$ a partir da superfície ajustada aos pontos experimentais. Para obter-se os pontos onde foi aplicada a relação $(-dp/dq)$, foi necessário igualar-se a equação da superfície de plastificação ajustada à equação da reta correspondente a cada trajetória de tensão. Dessa forma foi possível obter-se os pontos onde os vetores de deformação plástica são ortogonais à superfície de plastificação.

Figura 4.42 - Correlação obtida para os valores de p' obtidos pelos critérios de Graham (1983) apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979)

Figura 4.43 - Ajuste da superfície teórica de plastificação do Cam - clay modificado juntamente com os pontos experimentais de escoamento e a linha de estados críticos.

A figura (4.44) apresenta para o Cam - clay modificado o ajuste de sua superfície teórica de plastificação juntamente com as inclinações teóricas dos vetores de deformação plástica. Estão apresentadas também, as inclinações dos vetores de deformação plástica dos pontos experimentais.

Os desvios de normalidade (θ) obtidos da figura (4.44) são apresentados na figura (4.45).

Figura 4.44 - Ajuste da superfície teórica de plastificação do Cam - clay modificado juntamente com as inclinações teóricas e experimentais dos vetores de deformação plástica.

Figura 4.45 - Desvios de normalidade obtidos para o Cam - clay modificado.

4.2.1 - Análise das Curvas ($q \times \varepsilon_a$)

Para as trajetórias de -30° , -50° , 30° , 60° e os ensaios triaxiais convencionais com tensões confinantes de 150 e 200 kPa, o valor da tensão desviatória (q) para o estado crítico previsto pelo modelo está de acordo com o valor experimental. Nas trajetórias onde ocorre o desconfinamento (100° , 120° , e 140°), inicialmente a tensão desviatória atinge um valor de pico tendendo em seguida a aproximar-se dos valores experimentais. Excetuando-se a trajetória 1:3 (ensaio 2) onde a previsão do modelo fornece um valor de (q) superior ao experimental, as demais trajetórias (40° , 50° , 1:3 (ensaio 1) e ensaios triaxiais convencionais com tensões confinantes de 50 e 100 kPa) apresentaram previsões de tensão desviatória menores do que os valores experimentais.

Nota-se que nos ensaios de compressão, as trajetórias com inclinação abaixo de 60° não apresentam uma definição precisa da condição de estado crítico, tanto em termos de modelagem como de resultados práticos. Isso justifica-se pelo fato de que o modelo não consegue boa reprodução das curvas cujas inclinações não atingem a inclinação crítica com $M = 1,26$ ($51,56^\circ$ com o eixo de p') e pelo fato de que os ensaios não foram conduzidos até a ruptura do material mas somente até o início da plastificação do mesmo, o que tende a mascarar a condição de estado crítico. O mesmo acontece nos ensaios de extensão (-30° e -50°) onde o valor de $M = 0,89$ define uma inclinação crítica de $-41,67^\circ$ com o eixo p' .

Quanto à deformabilidade, observa-se nas trajetórias de -30° e -50° uma previsão de deformações axiais no sentido de alongamento do corpo de prova (extensão) maiores do que os valores experimentais. O modelo também prevê maiores deformações nas trajetórias de 30° , 40° , 50° , 60° , 120° e no ensaio triaxial convencional com $\sigma_3 = 100$ kPa. Nas trajetórias 1:3 (ensaio 1), 100° e no ensaio triaxial convencional com $\sigma_3 = 150$

kPa, as deformações previstas pelo modelo são um pouco menores do que as experimentais. Nas demais trajetórias (1:3 (ensaio 2), 140° e ensaios triaxiais convencionais com $\sigma_3 = 50$ kPa e $\sigma_3 = 200$ kPa) as previsões estão de acordo com os valores experimentais.

Nota-se uma boa previsão para q , por parte do modelo com a diminuição da tensão octaédrica (p'), o que ocorre nas trajetórias de 100°, 120° e 140°.

4.2.2 - Análise das Curvas ($\varepsilon_v \times \varepsilon_a$)

Apesar de haver uma boa superposição inicial nas trajetórias de 30°, 40° e 50°, as previsões de deformabilidade feitas pelo modelo são maiores do que as experimentais nestas trajetórias assim como nas de -30° e -50°. Nas trajetórias de 60°, 1:3 (ensaio 1), 120°, 140° e ensaios triaxiais convencionais com $\sigma_3 = 50$ kPa e $\sigma_3 = 200$ kPa, nota-se que a previsão está de acordo com os resultados experimentais. Na trajetória 1:3 (ensaio 2) e nos ensaios triaxiais convencionais com $\sigma_3 = 100$ kPa e $\sigma_3 = 150$ kPa, houve previsão de menor deformabilidade por parte do modelo.

Com a redução da tensão octaédrica (p'), o modelo passa a prever expansão de volume, o que está de acordo com os resultados experimentais e com a teoria. De acordo com isso, o material expande-se até cruzar a linha de estado crítico (LEC) e atinge a superfície de plastificação, onde passa a contrair-se até atingir novamente a (LEC). A trajetória de 100° apresentou experimentalmente uma pequena contração de volume, enquanto que o modelo previu expansão. Porém, nota-se que as deformações previstas e observadas são muito pequenas.

4.2.3 - *Análise das Curvas ($p' \times \varepsilon_v$)*

Nota-se que nas trajetórias de -30° , -50° , 30° , 40° , 50° , 1:3 (ensaio 2) e ensaio triaxial convencional com $\sigma_3 = 100$ kPa, não há uma boa concordância entre as curvas previstas pelo modelo e aquelas obtidas experimentalmente. Isso decorre das maiores ou menores previsões de deformações volumétricas obtidas pelo modelo. Por outro lado, com a diminuição da tensão octaédrica, trajetórias de 100° , 120° e 140° , assim como nas trajetórias de 60° , 1:3 (ensaio 1) e ensaios triaxiais convencionais com $\sigma_3 = 50$ kPa, $\sigma_3 = 150$ kPa e $\sigma_3 = 200$ kPa, as curvas previstas pelo modelo aproximam-se razoavelmente bem das curvas experimentais.

Deve-se finalmente ressaltar que para os ensaios triaxiais convencionais com tensões confinantes de 150 e 200 kPa, os resultados fornecidos pelo modelo são excelentes uma vez que nestes ensaios o material está sendo solicitado por uma tensão próxima e outra acima do escoamento ($P_a' = 165$ kPa).

4.2.4 - *Análise dos Critérios de Graham (1983) apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979)*

Através das curvas obtidas, nota-se que estas não forneceram uma nítida mudança de inclinação, ou seja, o ponto de início do escoamento.

Para contornar-se o problema da falta de definição de um limite preciso, adotou-se um ajuste subjetivo para os resultados obtidos experimentalmente. Procurou-se traçar retas tangentes ao início e fim das curvas para obter-se o início da faixa de escoamento do material. Pode-se também arbitrar-se um valor qualquer a partir do início da curvatura da curva obtida (ajuste visual) uma vez que não existem para os solos meios ou critérios de se quantificar precisamente o início da fase de escoamento. Isso pode ser feito nas trajetórias obtidas por desconfinamento onde as curvas tornam-se difíceis de se analisar. Nota-se que existe uma proximidade muito grande de resultados entre o critério de Graham (1983) e o critério de Tavenas et al. (1979). Apenas nas trajetórias de -30° , -50° , 30° e 120° , houve uma certa discrepância de valores em termos de tensão octaédrica (p').

4.2.5 - Análise da Superfície de Plastificação, da Lei de Fluxo e dos Desvios de Normalidade

Os pontos experimentais que definem o escoamento para as várias trajetórias ensaiadas estão apresentados na figura (4.43). Nota-se que para as trajetórias de 30° , 40° , 50° , 60° , 1:3 (ensaio 1) e ensaios triaxiais convencionais com $\sigma_3 = 50$ kPa e $\sigma_3 = 100$ kPa, esses pontos aproximam-se razoavelmente bem da superfície teórica de escoamento. No entanto, isso não se verifica nas trajetórias de -30° e -50° . Nas trajetórias de 100° , 120° e 140° , tais pontos estão abaixo dessa superfície. Isso justifica-se pelo fato dessas trajetórias apresentarem ruptura com deformações muito pequenas. A maior diferença observada foi para a trajetória de 1:3 (ensaio 2). Através da figura (4.44), notamos a dispersão dos pontos experimentais em relação à linha teórica de inclinação dos vetores de deformação plástica (fluxo associado). Segundo a teoria, admite-se fluxo associado quando os vetores de deformação plástica são considerados ortogonais à superfície de

plastificação. Essa linha teórica de inclinação dos vetores de deformação plástica mostra as inclinações dos vetores de deformação plástica obtidos pelo valor do arcotangente da relação $(-dp/dq)$ para a superfície ajustada aos pontos experimentais. Os pontos experimentais apresentados, que são as inclinações dos vetores de deformação plástica, oscilam próximos à linha teórica, mostrando os desvios apresentados pelo modelo. Tais inclinações foram obtidas pelo valor do arcotangente da relação $(\delta\epsilon_s^p / \delta\epsilon_v^p)$.

Os desvios de normalidade (θ) foram obtidos pela diferença entre os valores obtidos a partir dos ensaios e os valores teóricos e estão apresentados na figura (4.45). Nota-se que o maior desvio apresentado é para a trajetória de -50° ($-29,67^\circ$). As trajetórias de -30° , $71,56^\circ$ (ensaio 1), 140° e ensaio triaxial convencional ($\sigma_3 = 50$ kPa), apresentam respectivamente, desvios de normalidade de $-13,43^\circ$, $-21,87^\circ$, $-21,63^\circ$ e $-24,31^\circ$.

Assume-se que a condição de fluxo associado é obedecida quando os desvios apresentados oscilarem próximos a 0° , ou seja, quando a diferença em módulo entre as inclinações teóricas e práticas (ou vice-versa) dos vetores de deformação plástica for a mínima possível. Graham et al. (1983) apud Wood (1992) verificaram através de ensaios triaxiais em amostras indeformadas de argila ("Winnipeg clay") que os desvios de uma lei de fluxo chegaram a até 30° aproximadamente. Analisando-se os desvios apresentados, depreende-se que a condição de fluxo associado não é obedecida.

5 - CONCLUSÕES

Observou-se no trabalho que com a diminuição da tensão octaédrica, os resultados obtidos pelo modelo Cam - clay modificado são muito próximos à realidade observada. O mesmo ocorreu nos ensaios triaxiais convencionais com diferentes tensões confinantes. O ajuste fornecido pelo modelo frente aos resultados práticos foi muito bom nos ensaios em que as tensões confinantes eram de 150 e 200 kPa.

Nota-se uma boa previsão de tensão desviatória nas trajetórias de -30° , -50° , 30° , 60° e nos ensaios triaxiais convencionais com $\sigma_3 = 150$ kPa e $\sigma_3 = 200$ kPa. A deformabilidade prevista pelo modelo é maior nas trajetórias de -30° , -50° , 30° , 40° , 50° , 60° , 120° e no ensaio triaxial convencional com $\sigma_3 = 100$ kPa.

Em uma análise global, conclui-se que a modelagem feita com o modelo Cam - clay modificado pode ser classificada como regular. Isso deve-se ao fato de que as previsões feitas pelo modelo nas trajetórias com inclinações abaixo da inclinação crítica não conseguiram uma boa aproximação da realidade, principalmente em termos de deformabilidade.

Através dos critérios utilizados para a definição dos pontos de escoamento do material, estabeleceu-se um critério subjetivo, em que foi possível definir-se uma “faixa de início do escoamento do solo”, de forma análoga aos métodos de determinação da pressão de pré-adensamento onde procura-se por extrapolação obter-se o ponto desejado. Dessa forma, os critérios de Graham (1983) apud Wood (1992) e de Tavenas et al. (1979)

forneem informações suficientes para buscar-se os pontos de escoamento do material.

Com relação aos desvios de normalidade, observou-se para os diversos ensaios realizados que existe uma variação considerável destes, levando-nos a admitir que a função potencial plástico não coincide com a função de plastificação, ou seja, a condição de fluxo associado não é obedecida.

Alguns dos fatores que levaram a um ajuste razoável do modelo aos dados experimentais podem estar relacionados ao fato de que o solo foi ensaiado no trecho sobre-adensado ($OCR \cong 2$), embora a relação de sobre-adensamento seja bastante baixa. Isto deveu-se ao fato de que este trabalho insere-se num programa mais amplo onde, dentre outros objetivos, procura-se definir a superfície inicial de plastificação do solo.

Outro fato pode estar relacionado ao modelo que admite a condição de fluxo associado, que como se observou não ocorre no solo em questão. No entanto, acredita-se que a principal razão esteja relacionada ao fato de estar-se trabalhando com um solo natural (arenoso), de estrutura própria, que se afasta bastante dos solos ideais (argilosos) utilizados na formulação e validação dos modelos Cam - clay.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M.S., KUWAJIMA, F.M. E QUEIROZ, P.I.B. - Simulação da construção de um túnel por mecânica dos solos de estado crítico via elementos finitos. Anais do Simpósio de Informática em Geotecnia - vol.1 pg 223 - Infogeo 1996
- ARAFATI, N. (1992) - Étude du Comportement d'une Marne sous Sollicitations Homogènes - Modélisation des Essais Triaxiaux Drainés avec le Modèle "Cam - clay" Modifié, École Centrale de Paris, Université Pierre et Marie Curie, Août, 1992.
- ATKINSON, J.H. & BRANSBY (1978) - An introduction to Critical State soil Mechanics. U. K.
- BALASUBRAMANIAM, A.S., (1969) - Some factors influencing the stress - strain behavior of clay. PhD Thesis, University of Cambridge. Apud Wood (1992).
- BISHOP, A. W., AND HENKEL, D.J. (1957) - The measurement of soil properties in the triaxial test (London). Apud Wood (1992).
- BISHOP, A. W., AND HENKEL, D.J. (1962) - The Triaxial Test. Edward Arnold, (London). Apud Wood (1992).
- BISHOP, A. W. & WESLEY, L.D. (1975) - A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. Geotechnique 25, n. 4, 657 - 670.

- BRITO, A.M. AND GUNN, M.J. (1987) - Critical State Soil Mechanics via Finite Elements, John Wiley & Sons. Apud Almeida et al. 1996.
- BRUGGER, P.J., LOPES, F.R. (1994) - Análise numérica de estacas submetidas a esforços de compressão - Simpósio de Informática em Geotecnia - Infogeo 1994 - São Paulo - ABMS - NRSP.
- CLAYTON, C.R.I. & KHATRUSH, S.A. (1986) - A new device for measuring local strains on triaxial specimens. Geotechnique 36, n° 4, 1986, pp. 593 - 597.
- DESAI, C.S., SIRIWARDANE, H.J. (1984) - Constitutive laws for Engineering materials (with emphasis on geologic materials), New Jersey.
- DRUCKER, D.C., PRAGER, W. (1952) - Soil Mechanics and plastic analysis or limit design. Quart. Appl. Math., vol.10, n.2 : 157 - 165.
- DRUCKER, D.C., GIBSON, R.E., HENKEL, D.J., (1955) - Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. Trans. ASCE : 238 - 346.
- HENKEL, D.J. (1960) - The shear strength of saturated remoulded clay. In proceedings of research conference on shear strength of cohesive soils at Boulder, Colorado, pp. 533 - 540.
- HENKEL, D.J. (1956) - The effects of overconsolidation on the behavior of clays during shear. Geotechnique, 6 : 139 - 150.
- HVORSLEV, M.J. (1937) - Über die Festigkeitseigenschaften Gestörter Bindiger Böden. Ingeniorsvidenskabelige Skrifter, A. n.45, Kobenhavn. Apud Roscoe e Burland (1968).

MACHADO, S.L. (1995) - Estudo da compressão confinada e do colapso de um solo arenoso compactado em edômetro com sucção controlada. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos - USP - São Carlos - SP.

MRÓZ, Z., NORRIS, V.A., ZIENKIEWICZ, O.C. (1979) - Application of an anisotropic hardening model in the analysis of elasto - plastic deformation of soils. *Geotechnique*, 29, n. 1 : 1 - 34.

NADER, J.J. (1993) - "Modelos Elasto-Plásticos para Solos. O Cam Clay e sua aplicação a diferentes trajetórias de tensões". Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP - São Paulo.

ORTIGÃO, J.A.R. (1993) - Mecânica dos Solos dos Estados Críticos - Rio de Janeiro - Livros técnicos e científicos - Editora Ltda, 1993.

PARAGUASSÚ, A.B. & RÖHM, S.A. (1992) - Pesquisa sobre a caracterização do latossolo vermelho amarelo constituinte do talude experimental da região de São Carlos e suas alterações quando expostos ao intemperismo (EESC -USP).

PARRY, R.H.G. - Triaxial compression and extension tests on remoulded saturated clay. *Geotechnique*, 10, 166-180, 1960.

PARRY, R.H.G. (1958) - (Discussion). *Geotechnique*, 8, 183 - 186.

PARRY, R.H.G. (1956) - Strength and deformation of clay. PhD. Thesis, London University. Apud Roscoe e Burland (1968).

RENDULIC, L. (1937) - Ein Grundgesetz der Tonmechanik und sein experimenteller Beweis, 18 : 459 - 467. Apud Roscoe e Burland (1968).

ROSCOE, K.H., AND BURLAND, J.B. (1968) - On the generalised stress-strain behavior of "wet"clay", in J. Heyman and F.A. Leckie (eds.), Engineering plasticity (Cambridge : Cambridge University Press), pp. 535-609.

ROSCOE, K.H., SCHOFIELD, A.N., AND WROTH, C. P. - On the yielding of soils. Geotechnique, 8,22-53,1958.

ROSCOE, K.H., SCHOFIELD, A.N., AND THURAIRAJAH, A. (1963) - Yielding of clays in states wetter than critical - Geotechnique, 13.

ROSCOE, K.H., SCHOFIELD, A.N., POOROOSHASB, H.B. (1963) - A theoretical and experimental study of strains in triaxial compression tests on normally consolidated clays - Geotechnique n° 1.

ROSCOE, K.H., SCHOFIELD (1970) - The influence of strains in soil mechanics - Geotechnique 20, n° 2, 129 -170.

RUIZ, A.P.T. (1997) - Análise de túneis rasos em solos porosos (Mecanismos de formação de recalques) - Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos - USP - São Carlos - SP.

SCHOFIELD, A.N. AND WROTH, C.P. - Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill Book Co, London, 1968.

TAVENAS, F., AND LEROUEIL, S. (1980) - "The behavior of embankments on clay foundations", Canadian Geotechnical Journal 17(2), 236-60.

TAVENAS, F., AND LEROUEIL, S., LAROCHELLE, P. AND ROY, M. (1978) - "Creep behavior of an undisturbed lightly overconsolidation clay", Canadian geotechnical Journal 15(3), 402-23.

TAVENAS, F., DES ROSIERS, J-P, LEROUEIL, S., LAROCHELLE, P. AND ROY, M. (1979) - "The use of strain energy as a yield and creep criterion for lightly overconsolidated clays". *Geotechnique* 29(3), 285 - 303.

WOOD, D. M. (1992) - *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics* - Cambridge University Press.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.