

GLÁUCIO NERY HENRIQUE

MODELAGEM DO COMPORTAMENTO TENSÃO x DEFORMAÇÃO x
RESISTÊNCIA DE UM SOLO RESIDUAL DA REGIÃO DE VIÇOSA
(MINAS GERAIS)

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil para a obtenção do título de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2001

AGRADECIMENTO

Esta foi, sem dúvidas, uma das partes mais difíceis deste trabalho. Não que ela tenha custado horas de laboratório ou cansativas noites em frente ao computador. O problema é que uma grande parte das pessoas passam tão rapidamente por nossas vidas que até parecem que tinham um objetivo pré definido em nossa existência, aí vão embora e a lembrança física começa a se dissipar, mesmo que a gratidão pela convivência ou pela ajuda teimem em permanecer. Dessa forma o primeiro agradecimento vai para aquelas pessoas que não vão aparecer explicitamente nas próximas linhas mas que nem por isso são menos importantes para a realização deste.

Para aquelas que estão presentes constantemente ou que por um motivo ou outro ficaram mais fixadas na memória, gostaria de começar agradecendo a meus pais e minhas irmãs, por razões óbvias, aos professores Roberto e Izabel, pela compreensão, carinho e paciência que me dispensaram, principalmente no final deste trabalho, aos técnicos de laboratório, Júlio, Paulo Capelão, Paulo P3, à Cristina, secretária da pós-graduação, à CAPES pelo suporte financeiro, à Universidade

Federal de Viçosa (UFV), pela possibilidade de desenvolvimento deste trabalho, aos meus colegas de mestrado, Cebola, Mário, Alex, Débora, Plínio, Israel, Urango, Rodrigão, Erisius, Marco Antônio e todos os outros sem exceção, além, sem dúvidas, ao Daniel e ao Gustavo.

Não podia deixar de fora aqui um grande incentivador e amigo, de desde os tempos de graduação, Prof. Márcio Marangon, e gostaria de deixar um agradecimento especial à Raquel Velloso do CENPES pela ajuda na otimização dos parâmetros do modelo Lade-Kim e ao Prof. Alexandre Parreira, pela boa vontade em nos enviar seu programa do modelo Lade-Kim. Bom, fica aqui o meu MUITO OBRIGADO, a todos.

BIOGRAFIA

GLÁUCIO NERY HENRIQUE, filho de Antônio Paulo Henrique e Marinalva Bonfim Nery Henrique, nasceu em 19 de fevereiro de 1975, na cidade de Juiz de Fora, MG.

Em janeiro de 1998, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

Em março de 1998, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa (UFV), concentrando seus estudos na área de Geotecnia.

CONTEÚDO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da Tese	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1. Introdução	6
2.2. Ensaio triaxiais em solos	7
2.3. Modelos Constitutivos	17
2.3.1. Introdução	17
2.3.2. Modelagem elástica	17
2.3.3. Modelagem na plasticidade	19

2.4.	Comparações entre resultados experimentais e analíticos Encontrados na literatura nacional	23
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1.	Equipamento triaxial cúbico utilizado	27
3.1.1.	Célula triaxial	27
3.1.2.	Sistema de aplicação de pressão e medição do Deslocamento	30
3.1.3.	O sistema de aquisição de dados	31
3.2.	O solo utilizado	32
3.2.1.	Características do solo utilizado	32
3.2.2.	Programa de ensaios	35
3.2.3.	Metodologia de ensaio	38
3.2.4.	Resultado dos ensaios	40
4.	MODELOS CONSTITUTIVOS UTILIZADOS NA TESE	47
4.1.	Modelo Hiperbólico	47
4.1.1.	Introdução	47
4.1.2.	Relação tensão x deformação	49
4.1.3.	Deformação volumétrica	53
4.2.	Cam-Clay Modificado	54
4.2.1.	Introdução	54
4.2.2.	Função de plastificação	55
4.2.3.	Deformações	56
4.3.	O modelo de Lade-Kim	59
4.3.1.	Introdução	59
4.3.2.	Deformações	60
5.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	64
5.1.	Modelo Hiperbólico	64
5.1.1.	Calibração	64
5.1.2.	Comparações	68
5.2.	Cam-Clay modificado	76

5.2.1. Calibração	76
5.2.2. Comparações	78
5.3. Modelo de Lade-Kim	85
5.3.1. Calibração	85
5.3.2. Comparações	93
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	104
6.1. Conclusões	104
6.2. Sugestões	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

RESUMO

HENRIQUE, Gláucio Nery, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2001. **Modelagem do Comportamento Tensão x Deformação x Resistência de um Solo Residual da Região de Viçosa (Minas Gerais)**. Orientadora: Izabel Cristina Duarte de Azevedo. Conselheiros: Roberto Francisco de Azevedo e Maria Lúcia Calijuri.

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a aplicabilidade dos modelos constitutivos Hiperbólico, Cam-Clay e Lade-Kim na reprodução de ensaios triaxiais, seguindo várias trajetórias de tensão, realizados em um solo residual da região de Viçosa, Zona da Mata mineira. Para tanto desenvolveu-se um programa de ensaios executado com o equipamento triaxial cúbico do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, que constou de ensaios drenados, de compressão triaxial convencional, compressão hidrostática e no plano octaédrico com variação do ângulo de Lode. De posse dos resultados dos ensaios, procedeu-se à calibração dos modelos e à reprodução dos ensaios realizados através de cada um dos modelos, tendo-se concluído que o modelo de Lade-Kim foi o que melhor representou o comportamento experimental.

ABSTRACT

HENRIQUE, Gláucio Nery, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2001. **Modeling of stress x strain x strength behavior of a gneiss residual soil in Viçosa region.** Adviser: Izabel Cristina Duarte de Azevedo. Committee members: Roberto Francisco de Azevedo and Maria Lúcia Calijuri.

The main objective of this study was to verify the applicability of the Hyperbolic, Cam-Clay and Lade Kim constitutive models in the reproduction of drained triaxial testing, following several stress paths, of a residual gneiss soil of the Viçosa region. The testing program included conventional triaxial compression tests, hydrostatic compression and tests in octahedral plane, varying the Lode's angle, using the cubic triaxial equipment of Federal University of Viçosa. With the testing results, the calibration of the models and the reproduction of the tests using each model was made, giving rise to the conclusion that Lade-Kim was the model that best represented the observed experimental behavior.

LISTA DE SÍMBOLOS

B = módulo volumétrico

C = coesão do solo

c = parâmetro adimensional do modelo Lade-Kim

E = módulo de elasticidade longitudinal (módulo de Young)

e = índice de vazios

F = função de plastificação

G = módulo de elasticidade transversal

g = função potencial plástico

K = parâmetro adimensional

K_{ur} = parâmetro adimensional relacionado ao descarregamento
recarregamento

K_b = parâmetro adimensional relacionado a deformações volumétricas

M = parâmetro do modelo Cam-Clay

m = parâmetro adimensional

n = parâmetro adimensional

p = componente de tensão normal

q = componente de tensão desviadora

s = componente de tensão $\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)$

$t = \text{componente de tensão } \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)$

$U_0 = \text{energia interna de deformação}$

$u_a = \text{poro pressão no ar}$

$u_w = \text{poro pressão na água}$

$u_{ij} = \text{vetor dos deslocamentos}$

$W_p = \text{trabalho plástico}$

$\sigma_{ij} = \text{tensor das tensões}$

$\varepsilon_{ij} = \text{tensor das deformações}$

$\alpha_i = \text{constantes do material}$

$\varepsilon_e = \text{deformações elásticas}$

$\varepsilon_p = \text{deformações plásticas}$

$\lambda = \text{escalar relacionado à lei de fluxo da plasticidade}$

$\phi = \text{ângulo de atrito interno do solo}$

$\theta = \text{ângulo de Lode}$

$\delta_{ij} = \text{delta de Kronecker}$

$\nu = \text{coeficiente de Poisson}$

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A construção de obras geotécnicas como barragens, fundações, escavações, túneis, etc., altera o estado de tensão, σ_{ij} , e provoca deslocamentos, u_{ij} , e deformações, ε_{ij} , no maciço adjacente e na própria obra, afetando o seu desempenho. Dessa forma, no desenvolvimento destes projetos interessa a determinação do vetor dos deslocamentos, $u_i(x_1, x_2, x_3, t)$, do tensor das deformações, $\varepsilon_{ij}(x_1, x_2, x_3, t)$, e do tensor das tensões, $\sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3, t)$, perfazendo um total de quinze incógnitas em que x_1 , x_2 e x_3 são coordenadas que determinam a posição de um ponto e t é o tempo.

Caso o solo se encontre parcialmente saturado, ainda deve-se determinar duas incógnitas adicionais, a poro-pressão na água (u_w) e a pressão no ar (u_a).

Para resolver este tipo de problema conta-se com:

- Equações de equilíbrio de forças - totalizando 3 equações já que, sendo $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, as equações de equilíbrio de momentos são automaticamente satisfeitas;
- Relações tensão x deformação x resistência (relações do comportamento do material) - fornecendo mais seis equações;
- Relações deformação x deslocamento (relações geométricas) - fornecendo mais seis equações;
- Equações de continuidade da água e do ar, o que fornece mais duas equações;

Portanto, em geral, os problemas geotécnicos têm dezessete funções incógnitas e dezessete equações para determiná-las. Estes problemas, normalmente bastante complexos para serem resolvidos exatamente, podem ser mais facilmente determinados caso sejam introduzidas simplificações, tais como:

- Equilíbrios mais simples, como de deformação plana e axissimetria;
- Análises drenadas, ou não drenadas considerando-se tensões totais;
- Linearidade física (comportamento tensão x deformação linear) e geométrica (deslocamentos e deformações infinitesimais);

Além disso, é comum dividir-se o problema em duas análises (Chen e Mizuno, 1990). Na primeira, análise de deslocamentos, calculam-se os deslocamentos admitindo-se um comportamento tensão x deformação linear e elástico (lei de Hooke) para os solos e não se considera a possibilidade de ocorrência de ruptura. Na segunda, análise de estabilidade, empregam-se métodos (equilíbrio limite, análise limite, etc.) que se baseiam na teoria da plasticidade e que supõem os solos

como rígido-perfeitamente plásticos. Teorias de empuxo de terra, estabilidade de taludes e capacidade de carga de fundações são exemplos destas análises de estabilidade.

No entanto, o grande desenvolvimento dos métodos numéricos e da capacidade computacional ocorridos nas últimas duas décadas, tornou possível a obtenção de soluções para os problemas geotécnicos sem a necessidade de se recorrer às simplificações apontadas acima. Persiste, contudo, a necessidade de se determinar e modelar mais corretamente as propriedades, tensão x deformação x resistência dos solos, uma vez que estes materiais raramente apresentam um comportamento susceptível de ser modelado através da teoria da elasticidade linear (lei de Hooke), principalmente, em situações complexas como as que ocorrem nos diversos tipos de obras geotécnicas.

Para tratar esse assunto adequadamente, é necessário determinar, através de ensaios, o comportamento dos solos e estabelecer formulações matemáticas que modelem esse comportamento. Estas formulações, denominadas modelos constitutivos, são estabelecidas no sentido de se predizer o comportamento de um material (concreto, aço, solo, etc.) sob determinadas condições, a partir de parâmetros obtidos através de ensaios de laboratório e/ou campo.

1.2. Objetivos

Em função do exposto acima, o primeiro objetivo desta tese consiste em se determinar o comportamento tensão x deformação x resistência de um solo residual de gnaiss, típico na região da cidade de Viçosa, através de ensaios triaxiais cúbicos. O segundo objetivo consiste em se utilizar alguns modelos constitutivos para tentar representar o

comportamento experimental observado. Finalmente, o último objetivo consiste em se apontar os méritos e deficiências dos modelos constitutivos empregados na modelagem do solo residual.

1.3. Organização da Tese

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, a tese foi organizada da seguinte forma:

No segundo capítulo faz-se, primeiramente, uma revisão bibliográfica dos equipamentos triaxiais utilizados em laboratório, no ensaio de solos. Em seguida, procede-se a uma revisão sobre modelos constitutivos, considerando-se as teorias da elasticidade e da plasticidade necessárias ao desenvolvimento deste assunto. No desenrolar deste capítulo comenta-se alguns trabalhos, realizados no Brasil, relacionados ao que aqui se apresenta em termos de resultados experimentais e analíticos.

No terceiro capítulo abordam-se os detalhes do equipamento triaxial utilizado, em termos de características e funcionamento. Descreve-se o equipamento em partes, ilustrando-se a célula triaxial, os sistemas de aplicação de pressão e medição dos deslocamentos e o sistema de aquisição de dados. Faz-se, também, uma descrição do solo utilizado visando ilustrar a caracterização física do mesmo. Por fim, ilustra-se o programa de ensaios realizados, a metodologia para a execução dos mesmos e os resultados obtidos.

No quarto capítulo faz-se uma descrição da teoria dos modelos constitutivos utilizados neste trabalho e dos procedimentos necessários à obtenção dos parâmetros dos mesmos a partir dos resultados dos ensaios de laboratório. Dessa forma, são descritos os modelos hiperbólico, Cam-Clay e o modelo de Lade e Kim.

No quinto capítulo apresentam-se a calibração para cada um dos modelos utilizados a partir dos dados de e os resultados da reprodução destes ensaios obtidas com a utilização de cada um dos modelos.

Finalmente, no sexto capítulo, apresentam-se as conclusões gerais deste trabalho, bem como algumas sugestões para a continuidade desta linha de pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Introdução

Neste capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes à tese. Inicialmente, apresentam-se os principais ensaios triaxiais cúbicos, dando-se particular ênfase aos trabalhos já realizados no Brasil. Em seguida, discutem-se os principais aspectos das teorias da elasticidade e da plasticidade com vista ao desenvolvimento de modelos constitutivos. Finalmente, são apresentados alguns trabalhos semelhantes, em a nível nacional, ao desenvolvido nesta tese, nos quais foram feitas comparações entre resultados experimentais e resultados analíticos obtidos através de modelos constitutivos.

2.2. Ensaio triaxiais em solos

De uma forma geral, para se estabelecer e fazer uso de um determinado modelo constitutivo, faz-se necessária a mensuração de uma série de parâmetros extraídos a partir de dados obtidos em experimentações de laboratório e/ou de campo.

Os ensaios de laboratório têm por vantagem o fato de se conseguir a medição de um considerável número de grandezas e apresentam como desvantagem o fato de que o solo não se encontra mais em suas condições naturais de campo.

Azevedo e Sayão (1988) dividem os ensaios triaxiais, basicamente, nos seguintes grupos: ensaios triaxiais axissimétricos, ensaios triaxiais sob condições de deformação plana, ensaios triaxiais cúbicos e ensaios do tipo cilindro vazado.

Os ensaios triaxiais axissimétricos do tipo convencional, isto é, deformação controlada no topo e na base da amostra e tensão controlada na superfície lateral da amostra, são os mais comuns e mais utilizados. Em equipamentos desse tipo, amostras cilíndricas sólidas são colocadas no interior de uma câmara, também cilíndrica, a qual é preenchida com líquido. As pressões horizontais são iguais e são aplicadas perpendicularmente às faces laterais do corpo-de-prova, através da pressurização do líquido da câmara. A tensão vertical, perpendicular ao topo e à base do corpo-de-prova, é aplicada indiretamente através de uma prensa, que, ao se deslocar, faz a haste rígida fixa no topo da amostra pressionar o topo.



(a) Prensa e célula



(b) Célula

Figura 1 – Equipamento Triaxial Convencional da UFV.

Estes ensaios apresentam como principais vantagens: conhecimento do estado de tensão aplicado na amostra, possibilidade de medição da poro-pressão e da variação de volume do corpo-de-prova, controle da saturação da amostra, e medição do amolecimento do corpo-de-prova, ou seja, a diferença entre tensão de pico e tensão residual. As principais desvantagens são, primeiro, a limitação de se ter, forçosamente, duas das três tensões principais iguais e, segundo, ser difícil realizar ensaios com trajetórias diferentes da convencional (aumento da tensão vertical com a tensão horizontal permanecendo constante). A tensão vertical não é controlada é, apenas, medida e surge

como uma reação ao movimento da prensa. Para contornar esta limitação, Bishop e Wesley (1975) desenvolveram uma câmara triaxial de tensão controlada na qual é possível realizar ensaios segundo diferentes trajetórias de tensão, uma vez que tanto as tensões horizontais quanto as verticais são diretamente controladas. O princípio de funcionamento desta câmara é semelhante ao da triaxial convencional, permanecendo a limitação de ser possível controlar somente duas das três componentes das tensões principais.



Figura 2 – Equipamento Triaxial de Tensão Controlada da UFV

Com o intuito de se poder aplicar três tensões principais diferentes e independentes nas amostras de solos, durante as décadas de 60 e 70 foram desenvolvidos equipamentos denominados triaxiais cúbicos. De acordo com as condições de contorno impostas às faces da amostra, pode-se dividir estes equipamentos em três grupos: equipamentos de tensão controlada, equipamentos de deformação controlada e equipamentos mistos.

Pearce (1971), na Universidade de Cambridge, desenvolveu um equipamento triaxial capaz de aplicar tensões normais independentes e diferentes em cada par de faces de uma amostra inicialmente cúbica, através de placas rígidas e polidas sob condições de deformação controlada ou tensão controlada. Este equipamento emprega um princípio inicialmente descrito por Hambly (1969), no qual placas rígidas podem ser encaixadas e movimentadas umas em relação às outras sem que nunca haja espaços apreciáveis ou interferência entre as placas. Em cada par de faces, uma é ativa, enquanto a outra serve de reação. Cada placa ativa contém uma célula de carga do tipo Cambridge embutida em sua face interna, que mede a carga normal da placa.

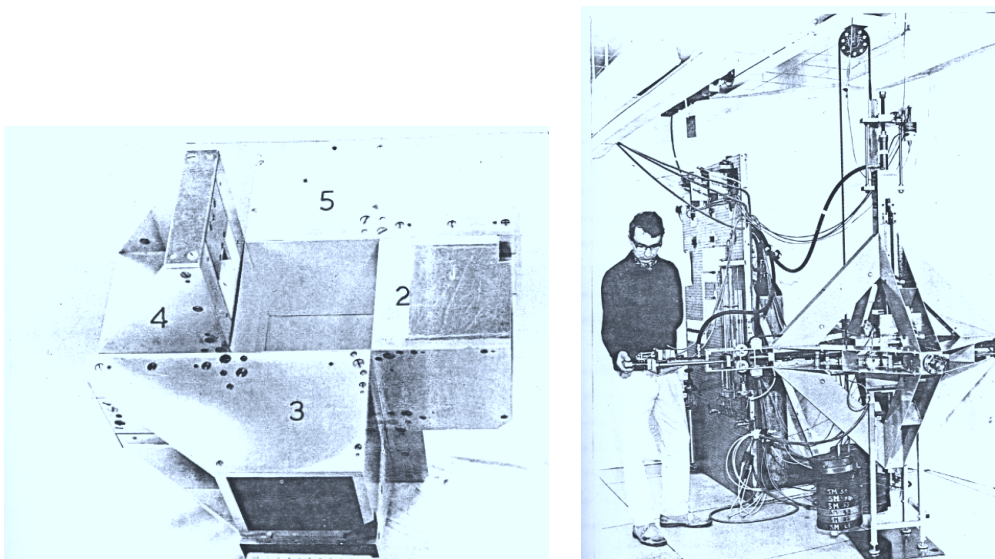


Figura 3 – Equipamento Triaxial Cúbico de Deformação Controlada (Pearce, 1971)

As principais vantagens desse tipo de equipamento são: distribuição uniforme das deformações nas faces (fronteiras rígidas); possibilidade de medir o amolecimento; e facilidade de adaptação para ensaios drenados ou com medição de poro pressão, através da conexão de dispositivos nas próprias placas de carregamento. As principais

desvantagens são: distribuição não uniforme das tensões nas faces; dificuldade de realizar ensaios segundo trajetórias de tensão pré-determinadas; faces da amostra não constituindo planos principais, devido ao atrito entre as faces do corpo-de-prova e as placas rígidas; amostra não podendo distorcer-se livremente; e aparelho de grandes dimensões, de difícil construção, e cuja operação é muito complicada.

Aparelhos triaxiais com condições de contorno mistas foram desenvolvidos por Bishop (1967), Sutherland e Mesdray (1969), Green (1971) e Lade (1972), entre outros. Todos eles consistem basicamente de uma célula cilíndrica convencional, à qual se adaptou um sistema de carregamento horizontal para aplicar uma terceira tensão normal independente à face de uma amostra cúbica.

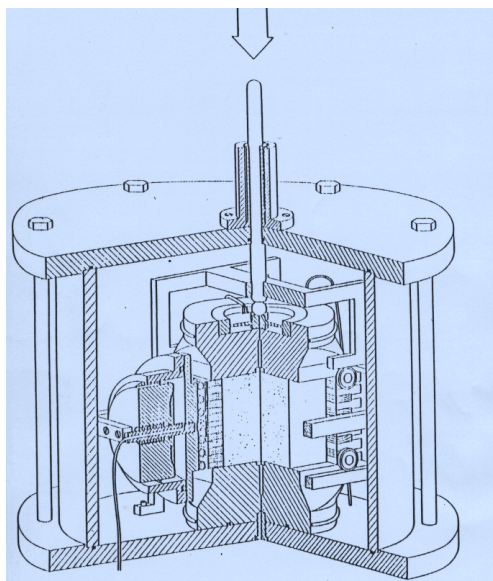


Figura 4 – Equipamento Triaxial Cúbico Misto (Lade, 1972)

Neste tipo de aparelho, a amostra é carregada axialmente de forma convencional, aplicando-se uma deformação controlada a uma haste vertical que age sobre a amostra através de placas rígidas no topo e na base do corpo-de-provas. Uma tensão horizontal é aplicada

diretamente à membrana da amostra pela pressão no líquido contido na câmara cilíndrica. A segunda tensão horizontal é aplicada pela pressão no líquido somada à pressão exercida pelo sistema de carregamento horizontal.

As principais vantagens dos equipamentos pertencentes a este grupo são: o amolecimento pode ser medido, e a adaptação para ensaios drenados ou com medição de poro pressão é relativamente simples. As principais desvantagens são: distribuição não uniforme de tensões nas faces em que as deformações são controladas; distribuição não uniforme de deformações nas faces em que as tensões são controladas; ensaios difíceis de ser executados para caminhos de tensão ou deformação pré-determinados; faces da amostra, onde as tensões são aplicadas através de peças rígidas, não constituindo planos principais; amostra não podendo distorcer-se livremente; e aparelho de difícil construção e operação.

Em termos de equipamentos de tensão controlada, Ko e Scott (1967) desenvolveram um aparelho capaz de aplicar tensões normais e independentes às faces de uma amostra cúbica. Esse tipo de equipamento consiste, basicamente, de um quadro de reação com formato de um cubo vazado, de tal forma que no seu interior existam uma cavidade cúbica para alojar a amostra; seis membranas de borracha que se encaixam em cada uma das faces do quadro cúbico, de forma que encostem nas faces da amostra, e seis peças que são aparafusadas nas faces do quadro, fixando as membranas. Durante o ensaio, aplicam-se tensões independentes em cada par de faces opostas, através de um sistema de ar-comprimido, manômetros e reguladores de pressão. O sistema concebido por Ko e Scott (1967) foi posteriormente aperfeiçoado em diversos trabalhos, inclusive no Brasil, conforme descrito em parágrafos posteriores.

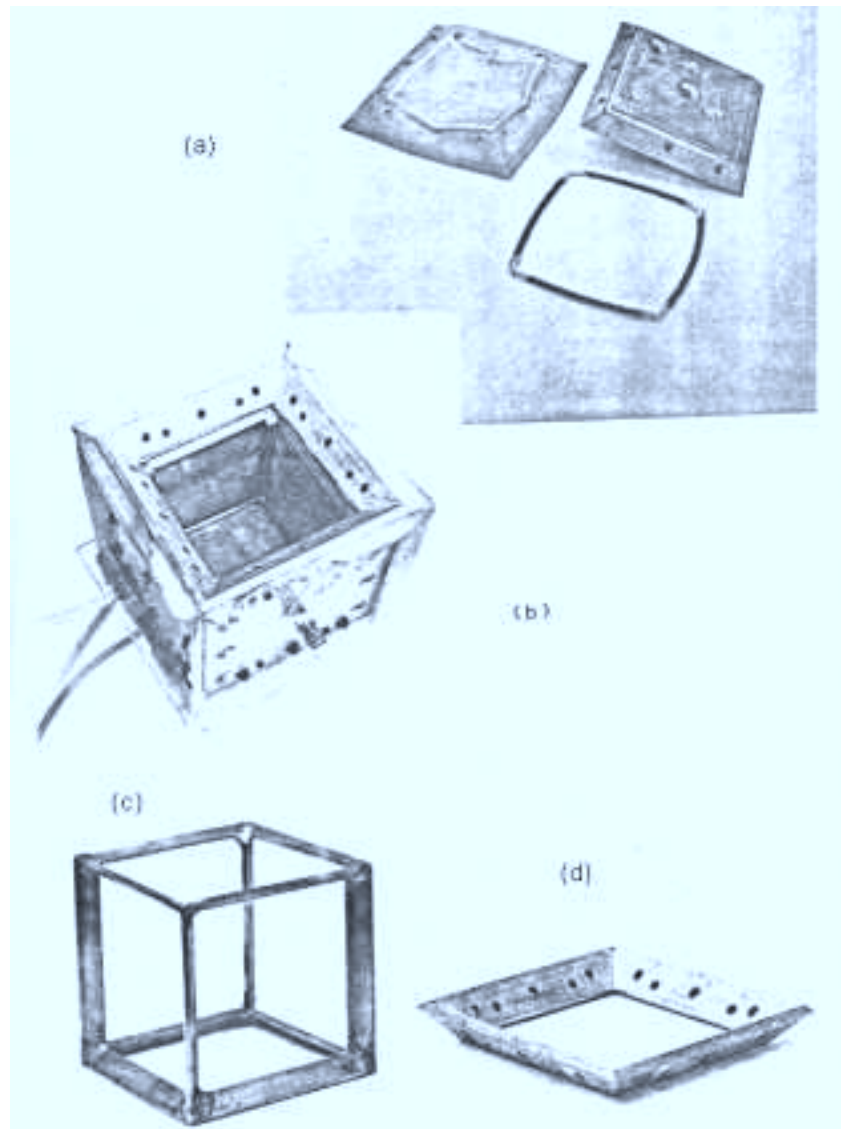


Figura 5 – Equipamento Triaxial Cúbico de Tensão Controlada (Ko e Scott, 1967).

- (a) Parede superior, membrana e o'ring
- (b) Cubo montado sem a parede superior
- (c) Quadro espaçador
- (d) Quadro fixador

As principais vantagens deste tipo de equipamento são: distribuição uniforme de tensões nas faces; ensaio segundo caminhos de tensão pré-determinados são facilmente executáveis; faces da amostra

cúbica constituindo planos principais; amostra com possibilidade de se distorcer livremente; e aparelho pequeno, de fácil construção e implementação. As principais desvantagens são: ensaios difíceis de serem executados para caminhos de deformação pré-determinados; amolecimento não pode ser medido; e, distribuição não uniforme de deformação nas faces.

No Brasil, Farias (1986) foi o precursor no que diz respeito à implementação e utilização de células triaxiais cúbicas com tensão controlada para ensaios em amostras de solo. Com o novo equipamento, desenvolvido na PUC-Rio, foram realizados ensaios triaxiais convencionais, ensaios de compressão hidrostática e no plano octaédrico, com o ângulo de Lode variando de 0° a 60° , em amostras secas e com densidade relativa de 58% de uma areia extraída do fundo da Lagoa de Itaipú (Niterói-RJ). No final do trabalho, o autor sugere algumas modificações na célula triaxial cúbica para melhorar seu desempenho, assim como a automatização do sistema de aquisição de dados.

Em 1987, Velloso acrescentou um sistema automático de aquisição de dados para o monitoramento dos ensaios realizados na célula triaxial cúbica desenvolvida por Farias (1986). Em linhas gerais, acoplou-se um microcomputador a um conversor analógico/digital que por sua vez foi ligado a um seletor de canais que recebia e transmitia os sinais oriundos dos medidores de deslocamento e dos transdutores de pressão. Este sistema foi chamado de SAAD (sistema automático de aquisição de dados) (Velloso e Azevedo, 1989). Velloso (1987) também realizou quatro tipos de ensaio em amostras secas da mesma areia retirada do fundo da Lagoa de Itaipú (Niterói-RJ): compressão hidrostática, triaxiais convencionais, compressão triaxial convencional com rotação do eixo da tensão principal maior no recarregamento e ensaios no plano octaédrico, com os ângulos de Lode valendo 0° , 13° ,

30°, 47°, 60°. O autor conclui que o SAAD apresenta um rendimento satisfatório, fazendo algumas sugestões para a otimização de seu funcionamento.

Ainda, seguindo a linha de pesquisa com a célula triaxial cúbica da PUC-Rio, Carpio (1990) realizou ensaios em um solo argiloso saturado, normalmente adensado. Para tanto, introduziu modificações na célula cúbica no sentido de possibilitar a execução de ensaios drenados e não drenados em solos saturados. O material ensaiado consistiu em uma mistura de Caulim e Bentonita (montmorilonita sódica), a uma razão de 98 para 2. O programa de ensaios constou de ensaios triaxiais convencionais, com consolidação isotrópica, drenados e não drenados, ensaios com descarregamento lateral, em que se procedia ao descarregamento nas faces laterais, ensaios com carregamento lateral, em que se procedia ao carregamento nas faces laterais mantendo-se fixa a pressão na face axial e ensaios com descarregamento axial, ou ensaio com extensão.

Carpio (1990) realizou ainda comparações entre resultados obtidos na célula cúbica com resultados obtidos na célula de ensaio axissimétrica de tensão controlada (Bishop-Wesley). Neste caso, obteve uma boa concordância nas curvas de tensão-deformação e na envoltória de resistência, mas resultados um pouco divergentes nas curvas de deformações volumétricas obtidas no triaxial cúbico através da medição dos deslocamentos das faces, sobretudo quando as deformações excediam cerca de 10%. Essa divergência praticamente desaparecia quando procedia-se à leitura da variação volumétrica na célula triaxial cúbica através do volume de líquido que saía ou entrava na amostra de solo.

Quaresma (1997) realizou um estudo experimental do comportamento tensão x deformação x resistência de uma areia saturada submetida a uma condição tridimensional de carregamento. O programa

de ensaios contou com experimentos realizados no equipamento triaxial cúbico e convencional, verificando através dos resultados dos ensaios drenados que as deformações cisalhante e volumétrica são maiores na condição axissimétrica do que na de deformação plana devido a um acréscimo de poropressão mais acentuado na primeira condição.

Reis (1998), no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, desenvolveu o segundo equipamento triaxial cúbico de tensão controlada para ensaio em solos no Brasil. Seu trabalho consistiu ainda na realização de uma série de ensaios neste equipamento em um solo residual de gnaiss da região de Viçosa/MG, no sentido de estudar sua anisotropia. Foram realizados ensaios convencionais com amostras saturadas e na umidade natural, em que foram cisalhados corpos-de-prova em três direções ortogonais. Concluiu-se que o solo apresentou um comportamento transversalmente isotrópico, porém no que se refere à resistência, seu comportamento foi praticamente isotrópico.

Aleixo (1998) estudou o comportamento tensão x deformação de um solo residual proveniente de um perfil de alteração de rocha gnáissica do maciço da Tijuca, Rio de Janeiro, no sentido de determinar a relevância de se considerar a ocorrência de anisotropia nas características de resistência e deformabilidade destes solos. O programa de ensaios constou de ensaios de compressão axial e hidrostática, sob condições drenadas de carregamento, utilizando o equipamento triaxial cúbico, e ensaios oedométricos convencionais, de modo a se obter as características de compressibilidade do solo. Acaba por concluir que os solos estudados não apresentaram efeitos marcantes de anisotropia nas características de resistência, no entanto, quanto à deformabilidade, conclui que o solo residual jovem apresentou características anisotrópicas.

2.3. Modelos Constitutivos

2.3.1. Introdução

Nos últimos trinta anos, tem havido um grande esforço no sentido de se desenvolver modelos capazes de representar o comportamento de solos (Chen e Mizuno, 1990). Estes modelos têm normalmente como base as teorias da elasticidade (Atkinson, 1973) e da plasticidade (Mendelson, 1983). Ressalta-se que, apesar deste grande esforço, nenhum modelo matemático desenvolvido até o momento é capaz de reproduzir completamente o comportamento de solos reais em todas as condições. Cada um atua em uma certa classe de fenômenos, observando as características essenciais e deixando de lado o que se considera de menor importância naquele tipo de aplicação.

A seguir, faz-se uma breve exposição dos fundamentos das teorias da elasticidade e da plasticidade com vista a fornecer subsídios para compreensão dos modelos utilizados neste trabalho.

2.3.2. Modelagem elástica

Um material tem comportamento elástico quando apresenta uma relação única entre tensão e deformação e retorna à sua configuração original quando o acréscimo de tensão volta a zero. Os modelos que representam este comportamento podem ser classificados como:

- Tipo Cauchy : neste caso, funções polinomiais são utilizadas para relacionar o estado de tensões com o estado de deformações (ou vice-versa) (Desai e Siriwardane, 1984).

$$\sigma_{ij} = \alpha_0 \delta_{ij} + \alpha_1 \varepsilon_{ij} + \alpha_2 \varepsilon_{im} \varepsilon_{mj} + \alpha_3 \varepsilon_{im} \varepsilon_{mn} \varepsilon_{nj} + \dots \quad (1)$$

Na equação (1), δ_{ij} é o delta de Kronecker e os parâmetros α_{ij} representam constantes do material. Quando se utiliza o polinômio do primeiro grau, relação linear, esta formulação recai na lei de Hooke, ou seja:

$$\sigma_{ij} = E \cdot \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

- Modelos Hiperelásticos (Green): neste tipo de modelo a idéia é definir a energia interna de deformação (ou a energia interna complementar de deformação) através de funções polinomiais ao invés de estabelecer diretamente uma função entre tensão e deformação (Desai e Siriwardane, 1984). Uma vez estabelecida esta função e derivando-se em relação às componentes de deformação, tem-se uma relação tensão x deformação.

$$U_0 = U_0(\varepsilon_{ij}) \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U_0}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (4)$$

Quando se utiliza o polinômio do segundo grau esta formulação recai na lei de Hooke, equação (2).

- Modelos Hipoelásticos: o que estes modelos fazem na realidade é estabelecer uma relação entre incremento de tensão e incremento de deformação, com as constantes elásticas variando a cada incremento (Desai e Siriwardane, 1984; Chen e Mizuno, 1990).

$$d\sigma_{ij} = E \cdot d\varepsilon_{ij} \quad (5)$$

2.3.3. Modelagem na Plasticidade

As aplicações iniciais da teoria da plasticidade foram quase que exclusivamente relacionadas com a plasticidade de metais, cujo comportamento se aproxima muito de um material elástico perfeitamente plástico (Figura 6). Para estes materiais, a plastificação confunde-se com a ruptura e, além disso, por não ter seu comportamento sensível à tensão de confinamento, o ângulo de atrito interno é zero, e com um único parâmetro define-se a resistência (ou plastificação) do material: k ou c (coesão) na terminologia usual da Mecânica dos Solos.

O desenvolvimento da teoria da plasticidade de solos foi fortemente influenciado pelos postulados da análise limite, propostos por Drucker et al. (1952). A teoria da análise limite estima limites para a carga de ruptura de um determinado problema. Além disso, Drucker et al. (1952) observaram que os solos apresentavam deformações plásticas antes da ruptura e, portanto, as superfícies de ruptura e plastificação não deveriam ser as mesmas.

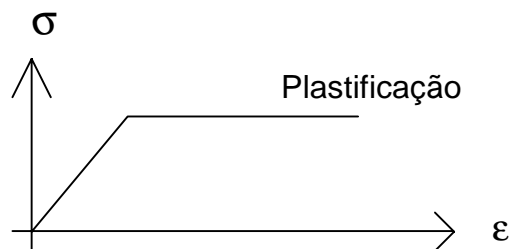


Figura 6 – Comportamento elástico- perfeitamente plástico

O solo, na realidade, se comporta como um material elasto-plástico no qual a superfície de plastificação vai se movendo à medida que ocorrem deformações plásticas (Figura 7). A este comportamento estabeleceu-se denominar teoria da plasticidade com endurecimento, base de conhecidos modelos elasto-plásticos. Tal formulação é também conhecida como teoria da deformação da plasticidade (Chen, 1982).

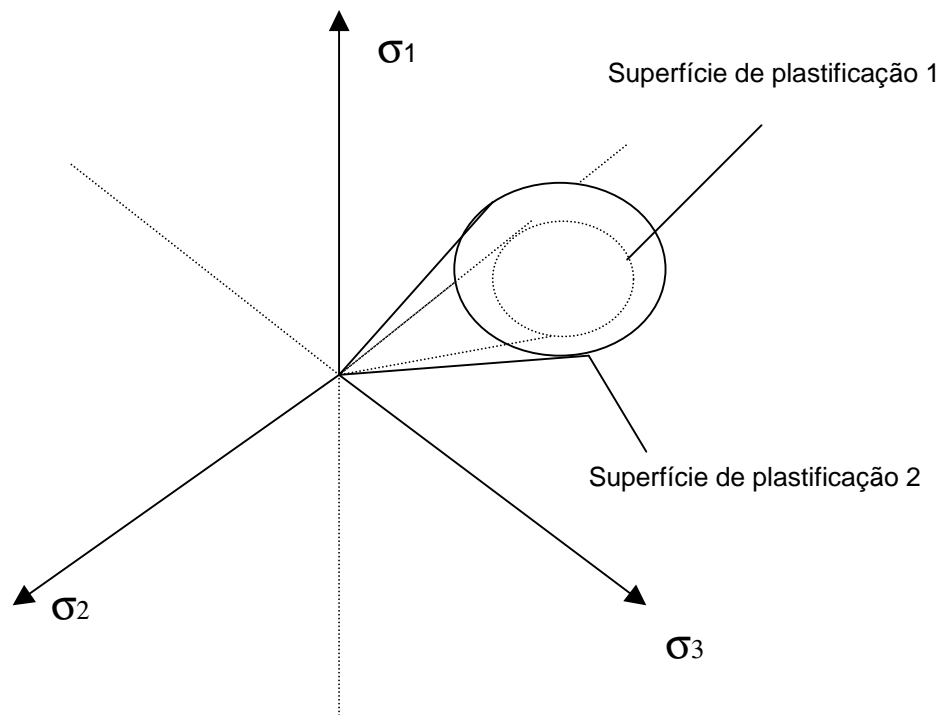


Figura 7 – Comportamento elasto-plástico com endurecimento

A diferença fundamental entre os modelos baseados nas teorias da elasticidade e da plasticidade é notada durante o descarregamento. Na teoria da elasticidade, as deformações são reversíveis e, portanto, o material recupera, durante o descarregamento, todas as deformações ocorridas no carregamento. Já na teoria da plasticidade, ocorrem deformações irreversíveis (plásticas), irrecuperáveis durante o descarregamento.

Na teoria da plasticidade faz-se, primeiramente, necessário definir o ponto a partir do qual ocorrem deformações plásticas. Este ponto, definido por uma função das componentes de tensão, é chamado de *função ou critério de plastificação* F .

$$F(\sigma_{ij}, \kappa) = 0 \quad (6)$$

em que κ é chamado de parâmetro de endurecimento e serve para determinar o movimento da superfície de plastificação à medida que as deformações plásticas ocorrem. Este parâmetro é sempre relacionado com as deformações plásticas através da chamada *função de endurecimento* ζ .

$$\kappa = \zeta(\varepsilon_{ij}^p) \quad (7)$$

Dependendo do tipo da função de endurecimento, este pode ser chamado de isotrópico, próprio para carregamentos monotônicos e materiais isotrópicos, ou cinemático, próprio para materiais anisotrópicos e carregamentos não monotônicos (cíclicos ou dinâmicos).

A função de plastificação divide o espaço dos estados de tensão em duas regiões: na primeira, $F(\sigma_{ij}, \kappa) \leq 0$, acréscimos de tensão só provocam deformações elásticas; na segunda, $F(\sigma_{ij}, \kappa) > 0$, acréscimos de tensão provocam deformações elásticas e plásticas, e o parâmetro κ deve ser modificado de forma que $F(\sigma_{ij}, \kappa) = 0$. Tal modificação é sempre feita de forma a atender a chamada *lei da consistência* que estabelece que:

$$dF = 0 \quad (8)$$

logo,

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right) \cdot d\sigma_{ij} + \left(\frac{\partial F}{\partial \kappa} \right) \cdot d\kappa = 0 \quad (9)$$

ou,

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}\right) \cdot d\sigma_{ij} + \left(\frac{\partial F}{\partial \kappa}\right) \cdot \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \varepsilon_{ij}^p}\right) \cdot d\varepsilon_{ij}^p = 0 \quad (10)$$

Na teoria da plasticidade, o incremento de deformação total é a soma do incremento de deformação elástica e do incremento de deformação plástica:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (11)$$

Os incrementos de deformação elástica são calculados através de qualquer um dos modelos apresentados em 2.3.2. Em particular, supondo-se para o material um comportamento elástico, linear e isotrópico, as deformações elásticas podem ser calculadas pela lei de Hooke, a partir de dois parâmetros, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, por exemplo.

Por outro lado, os incrementos de deformação plástica são calculados através da lei de fluxo dada por:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (12)$$

em que, $Q(\sigma_{ij})$ é uma função denominada potencial plástico. Quando $Q=F$, diz-se que a plasticidade é associada; caso contrário, diz-se que ela é não associada. O escalar $d\lambda$ define a magnitude das deformações plásticas e pode ser obtido através da substituição da equação (12) na equação (11), de modo que:

$$d\lambda = -\frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}\right) \cdot d\sigma_{ij}}{\left(\frac{\partial F}{\partial \kappa}\right) \cdot \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \varepsilon_{ij}^p}\right) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}}\right)} \quad (13)$$

2.4. Comparações entre resultados experimentais e analíticos encontrados na literatura nacional

Farias (1986) realizou uma série de ensaios com amostras de areia seca do fundo da Lagoa de Itaipú (Niterói-RJ). Com os resultados de alguns ensaios, o autor determinou os parâmetros dos modelos constitutivos de Duncan (1970) e Lade (1977), que, posteriormente foram utilizados para reproduzir todos os ensaios realizados. Em suas conclusões, o autor cita que o modelo de Duncan (1970), como era de se esperar, não conseguiu reproduzir de forma satisfatória o comportamento dilatante do material e que, sob aspecto global, o modelo de Lade (1977) teve um desempenho melhor.

Velloso (1987) e Velloso e outros (1989) realizaram uma série de ensaios triaxiais com amostras secas da mesma areia retirada do fundo da Lagoa de Itaipú (Niterói-RJ). Os ensaios visaram a determinação do comportamento do material quando submetido a trajetórias de tensão com ciclos de carregamento, descarregamento e recarregamento com rotação de 90° nas direções principais. Posteriormente, os autores utilizaram o modelo de Poorooshasb e Pietruzzak (1985 e 1986) para desenvolver um modelo elasto-plástico com endurecimento cinemático capaz de prever o comportamento de areias, tanto para carregamentos monotônicos, quanto para carregamentos cíclicos. Este modelo foi utilizado na reprodução dos ensaios realizados, tendo-se concluído que cumpriu razoavelmente o objetivo pretendido.

Iturri (1991) realiza um estudo comparativo do estado de tensões, deformações e deslocamentos originados pela construção de um canal de irrigação. Os estados de tensão, deformação e deslocamentos foram obtidos com o auxílio do método dos elementos finitos em análises elástica e elasto-plástica. Na análise elástica, o autor utiliza-se da formulação de Duncan e Chang (1970), incluindo a formulação

exponencial de Lade (1972) para o coeficiente de Poisson. Na análise elasto-plástica, faz uso das formulações de Drucker e Prager (1952) e Drucker (1953), e da formulação de Lade e Kim (1988). O autor não obtém uma boa aproximação para os modelos utilizados. No entanto, mesmo utilizando-se de parâmetros que não satisfazem à condição de irreversibilidade, na formulação de Lade e Kim (1988), não constata as divergências que, segundo os autores, deveriam aparecer em um caso como este.

Bicalho (1992) e Bicalho e Azevedo (1994) utilizaram os resultados de laboratório de Farias (1986) para comparar, em termos de vantagens e limitações, os modelos de Lade (1977) e o desenvolvido por Velloso e outros (1989). Concluem, a partir de comparações entre resultados dos ensaios triaxiais e resultados numéricos fornecidos por cada modelo, que os modelos constitutivos utilizados obtiveram sucesso em representar o comportamento tensão x deformação do material utilizado por Farias (1986), embora:

“para situações nas quais a maior parte das trajetórias de tensões não inclui carregamentos isotrópicos, o modelo desenvolvido por Velloso e outros (1989) é uma opção mais vantajosa que o modelo de Lade (1977), em virtude de sua simplicidade, por outro lado, em situações em que predominam carregamentos isotrópicos, o modelo de Lade (1977), transforma-se em uma opção melhor” (Bicallho e Azevedo, 1994)

Bagio (1995) realiza um estudo do comportamento de estacas cravadas em areia a partir de provas de carga realizadas em centrífuga. O autor utiliza o modelo de Lade e Kim (1988) para análise elasto-plástica através do método dos elementos finitos. Desenvolve um software para obtenção dos parâmetros e calibração do modelo. O autor conclui que o modelo não conseguiu representar adequadamente a característica dilatante do material e chama a atenção para a

necessidade de se estudar melhor a relação entre alguns parâmetros desse modelo.

De Melo e Azevedo (1995) fazem a descrição detalhada do modelo elásto-plástico de Lade e Kim (1988) em termos de sua teoria e obtenção de seus parâmetros através de ensaios de laboratório. Utilizam-se destes procedimentos para obter os parâmetros para reprodução do comportamento de diversos materiais que compõem o maciço da barragem de Beliche, em Portugal, concluindo que os parâmetros assim obtidos não reproduzem de forma satisfatória este comportamento. Empregam então um algoritmo de otimização na obtenção dos parâmetros, o que melhora significativamente a concordância com os resultados de laboratório. Finalizam com a apresentação dos resultados de uma análise de elementos finitos da barragem durante sua construção.

Levada (1996) utilizou-se do modelo de Lade e Kim (1998) na representação do comportamento de argilas da cidade de São Paulo (SP). O autor calibra o modelo através de ensaios de compressão hidrostática e convencional realizados por Parreira (1991). Em uma fase posterior, realiza uma simulação numérica da construção de um túnel considerando o método proposto por Parreira (1991) para simular os efeitos da tridimensionalidade do problema. Realiza ainda uma comparação entre os resultados obtidos através do modelo de Lade e Kim (1988) e da instrumentação de campo, concluindo que o modelo é capaz de reproduzir adequadamente o comportamento dos solos analisados.

Lodi, Machado e Vilar (1998) aplicaram o modelo Cam-clay modificado na reprodução dos resultados experimentais obtidos a partir de ensaios de compressão triaxial, segundo distintas trajetórias, para um solo arenoso típico da cidade de São Carlos (SP). Concluem que o modelo Cam-clay modificado, para o caso em questão, apresentou uma

razoável reprodução dos resultados dos ensaios realizados. Segundo os autores:

“ embora não tenha havido uma perfeita superposição entre as curvas do modelo e as experimentais, os valores para a condição de estado crítico foram próximos” (Lodi, Machado e Vilar, 1998).

Nader (1998) apresenta a hipoplasticidade como uma alternativa à elastoplasticidade para a descrição do comportamento mecânico dos solos. Este autor realiza um estudo teórico introduzindo a hipoplasticidade por meio de comparação com a hipoelasticidade e a elastoplasticidade, apresentando a base comum sobre a qual se apoiam essas teorias. Propõe ainda um novo modelo hipoplástico para a previsão do comportamento mecânico de solos, aplicando-o à descrição do comportamento de um silte, situação na qual o desempenho do novo modelo se mostra bastante satisfatório.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Equipamento Triaxial Cúbico Utilizado

Neste trabalho, utilizou-se o equipamento triaxial desenvolvido por Reis (1998). Trata-se de um equipamento de tensão controlada, projetado para ensaiar amostras cúbicas de 6 cm de lado submetidas a uma tensão hidrostática máxima de 1.000 kPa.

O equipamento triaxial cúbico é composto dos seguintes elementos: a célula triaxial, o sistema de aplicação de pressão e de medição de deslocamentos e o sistema de aquisição de dados (Reis, 1998).

3.1.1. Célula Triaxial

A célula triaxial é composta de três elementos: o quadro de reação, as faces laterais e as membranas de aplicação de pressão.

A função do quadro é servir de base de reação às cargas aplicadas. Este quadro possui uma cavidade cúbica em seu interior de 6,5 cm de lado, onde se posiciona a amostra a ser ensaiada e uma depressão cilíndrica de 10,05 cm de diâmetro e 1,65 cm de profundidade, cuja função é comprimir as bordas das membranas quando as faces laterais são aparafusadas no quadro de reação. A Figura 8 ilustra uma perspectiva desta parte do aparelho.

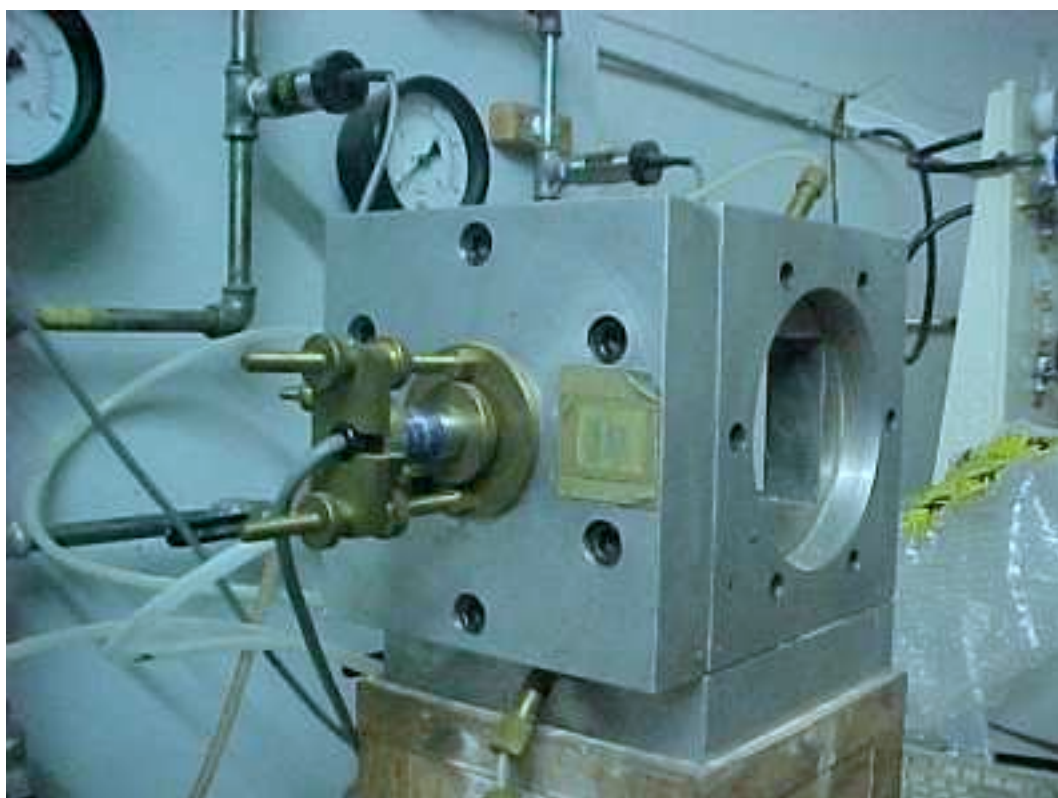


Figura 8 – Perspectiva do quadro de reação.

As faces laterais são os elementos que têm a função de transmitir as cargas para o quadro de reação assim como servir de suporte para os transdutores de deslocamento. Essas faces possuem uma parte cilíndrica onde são encaixadas as membranas de borracha para aplicação da pressão, conduzida até estas por tubos flexíveis.

As membranas de aplicação de pressão são de borracha, cuja flexibilidade garante uma distribuição uniforme da tensão sobre as faces

da amostra. São características desejáveis a estes elementos: capacidade de transmissão uniforme de tensão sem restringir a deformação da amostra, não absorver parte das pressões aplicadas durante o carregamento, não interferir significativamente com membranas adjacentes e não se romper durante o carregamento. De acordo com Reis (1998), as membranas utilizadas no equipamento da UFV foram moldadas com borracha de silicone vulcanizada, impermeável ao ar. A Figura 9 ilustra a face lateral e seus componentes, como a membrana de borracha.

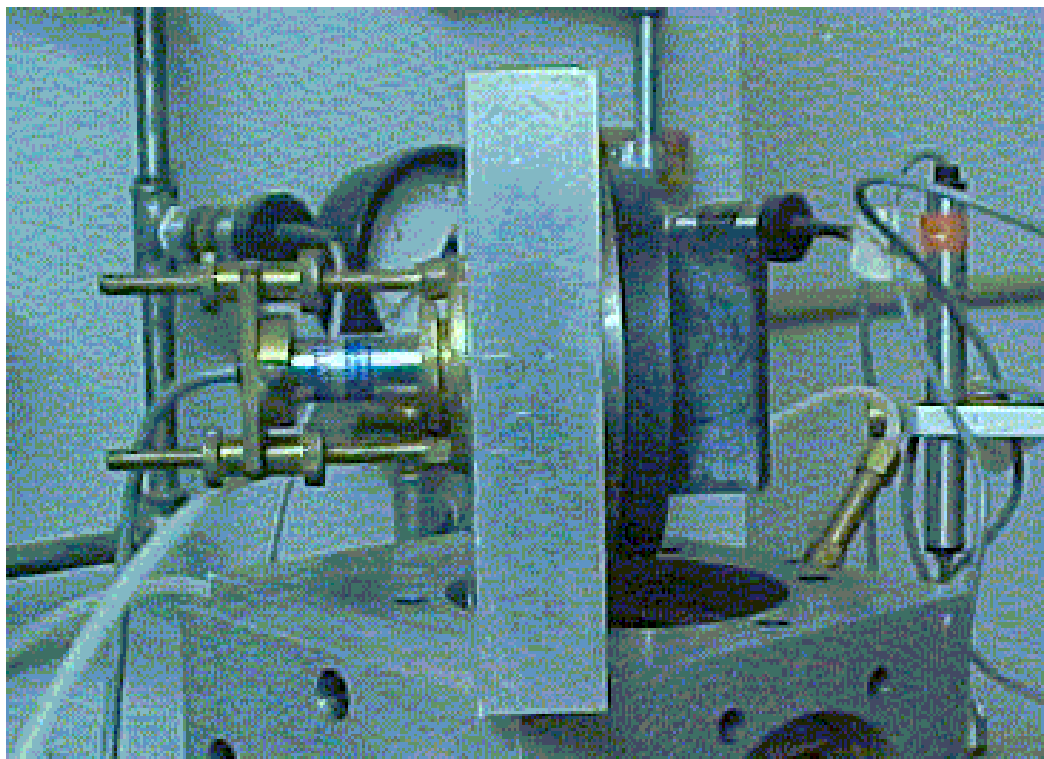


Figura 9 – Face lateral com o transdutor de deslocamento acoplado

3.1.2. Sistemas de aplicação de pressão e medição do deslocamento

A aplicação da pressão é feita através de um sistema composto dos seguintes elementos: compressor de ar, painel de controle de pressão, tubos flexíveis e interface ar-água. A Figura 10 ilustra uma vista geral do painel de controle de pressão, da interface ar-água da célula de reação e dos manômetros de controle.



Figura 10 – Painel de Controle

A pressão chega ao painel de controle, vinda de um compressor da marca SCHULZ, com capacidade de 1.000 kPa, através de uma linha de ar comprimido.

No painel de controle, foi adaptada uma válvula reguladora de pressão no sentido de se controlar a chegada desta aos reguladores de

ajuste fino deste painel. A pressão vai sendo liberada aos poucos nesta válvula no decorrer do ensaio.

O painel de controle de pressão apresenta quatro ramos principais: três para controle da pressão em cada par de faces da célula de reação e um para controle da pressão na interface ar-água, que vai atuar na saturação da amostra. Em cada um desses ramos existe um regulador de ajuste fino de pressão, da marca Norgren (Regulador de precisão 11-018), manômetros, da marca Record; e transdutores de pressão acoplados, da Wykeham Farrance (WF17060). Além disto, para comandar a abertura ou fechamento das linhas, existem 11 (onze) registros de esfera, que permitem manobras para aplicações independentes de carga a cada par de faces e no conjunto utilizado na saturação. A conexão entre os ramos do painel e as faces da célula de reação são feitas por tubos flexíveis da marca Poly-Flo, de 6,35 mm de diâmetro.

Em cada face lateral da célula de reação existe um transdutor de deslocamento (LSCT Wykeham Farrance) com 25 mm de curso, acoplado a cada face por anéis de vedação, o que impede o escapamento de ar durante a realização do ensaio. A posição do transdutor na face lateral pode ser observada na Figura 9.

3.1.3. O sistema de aquisição de dados

Utilizou-se, neste trabalho, o sistema de aquisição de dados existente no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFV, de forma análoga a Reis (1998). Este sistema é composto de: módulo condicionador de sinais de 16 canais (MSC 1.000 versão 2/16), conversor analógico digital (CAD 12/32-16) e o programa de aquisição de dados Aq dados versão 4.

O funcionamento do sistema se dá da seguinte forma: o módulo condicionador de sinais tem a função de excitar o transdutor e, ao mesmo tempo, amplificar e transmitir o sinal analógico para o conversor, que por sua vez tem a função de converter o sinal analógico para sinal digital, que é o sinal entendido pelo computador. O programa de aquisição de dados tem a função de armazenar e trabalhar os dados (Reis, 1998).

Seguindo ainda a metodologia de ensaio adotada por este autor, aqui também utilizou-se, dentre as formas de aquisição oferecidas pelo programa, a do tipo simples, que consiste na leitura de sinais durante um determinado tempo de duração do ensaio, com determinada frequência. Adotou-se também uma frequência de 1Hz no sentido de se acompanhar com maior precisão os acréscimos de pressão na tela do computador. As leituras de deslocamento, acompanhadas pela tela, eram feitas manualmente, quando estes se estabilizavam, o que de certa forma facilitou o tratamento dos dados por gerar um volume de pontos no ensaio bem menor se comparado com aquele que continha o arquivo de dados.

3.2. O Solo Utilizado

3.2.1. Características do Solo Utilizado

Geologicamente, a microrregião de Viçosa apresenta rochas do Embasamento Granito-Gnáissico Indiviso. Sobre essas rochas do complexo cristalino, encontram-se uma cobertura terciária pouco espessa e aluviões quaternários. Morfoestruturalmente, a região integra o Domínio dos Planaltos Cristalinos Rebaixados, situando-se entre as escarpas da Serra da Mantiqueira, a leste, e a Serra do Espinhaço

(Domínio do Planalto Proterozóico), a oeste. As condições morfoclimáticas dessa microrregião são caracteristicamente as das zonas intertropicais úmidas, em que predominam os processos químicos mecânicos. Da ação conjugada desses processos, resulta um manto de alteração (Alterito) bastante espesso, nas áreas de declividades fracas a médias (IGA, 1976; Ferraz,1994).

No que se refere ao relevo, a microrregião pertence ao Domínio Tropical Atlântico de Mares de Morros e predominam, no município, colinas convexas e convexo-côncavas, alinhadas em forma de espigões, bastante seccionadas pela rede de drenagem. Os topos são aplainados ou abaulados e funcionam como divisores de água para as pequenas bacias de drenagem. As vertentes apresentam ondulações e são bastante ravinadas. As elevações e os fundos de vale formam dois conjuntos pedológicos distintos no Planalto de Viçosa. Nas elevações, dominam os Latossolos e Cambissolos-Latossólicos, ao passo que os fundos de vale apresentam, nos terraços, solo podzólico Câmbico de textura muito argilosa, sendo os leitos maiores constituídos por solos aluviais de textura geralmente fina, algumas vezes em associação com hidromórfico (CORREA, 1984).

Segundo Resende (1982), ao observar um perfil na Zona da Mata, em Minas Gerais (solos desenvolvidos de gnaiss), podem-se distinguir os seguintes horizontes, de cima para baixo:

- a) horizonte A – apresenta-se como um horizonte escurecido e constitui a camada arável do perfil;
- b) horizonte B – apresenta-se como uma camada bastante espessa, de coloração vermelha ou vermelho-amarelada;
- c) horizonte C – apresenta-se como um camada rósea, na parte superior, e acinzentada, na parte inferior, que se estende até a rocha.

Nesse horizonte, os vestígios da estrutura da rocha são, ainda, visíveis.

O material utilizado neste trabalho foi obtido a partir de amostras deformadas, extraídas do horizonte C de perfis comuns à microrregião de Viçosa, mais especificamente na parte inferior do horizonte C, na região da Vila Secundino, dentro do Campus da UFV, daí segue-se a denominação dada ao material, o qual pode ser considerado um Saprolito. Este solo se apresenta com coloração acinzentada, com granulometria entre silte e areia fina.

Ferraz (1994) caracterizou e estudou diversos solos da região de Viçosa/MG, para fins de pavimentação rodoviária utilizando técnicas de estabilização com cimento, cal, betume e vinhoto, e estabilização com cimento para fins de utilização como material de construção de casas populares, entre os solos estudados por Ferraz (1994) está o solo Vila Secundino. Este foi o solo utilizado neste trabalho. Os valores dos limites de Atterberg e de compactação obtidos são apresentados na Tabela I, enquanto que a curva granulométrica é apresentada na Figura 11.

Tabela I – Índices físicos do solo Vila Secundino (Ferraz, 1989)

LL (%)	LP (%)	IP(%)	$\gamma_s(\text{kN/m}^3)$	$W_{ot}(\%)$	$\gamma_{dm\acute{a}x}(\text{kN/m}^3)$
29	19	10	26,15	13,62	18,07

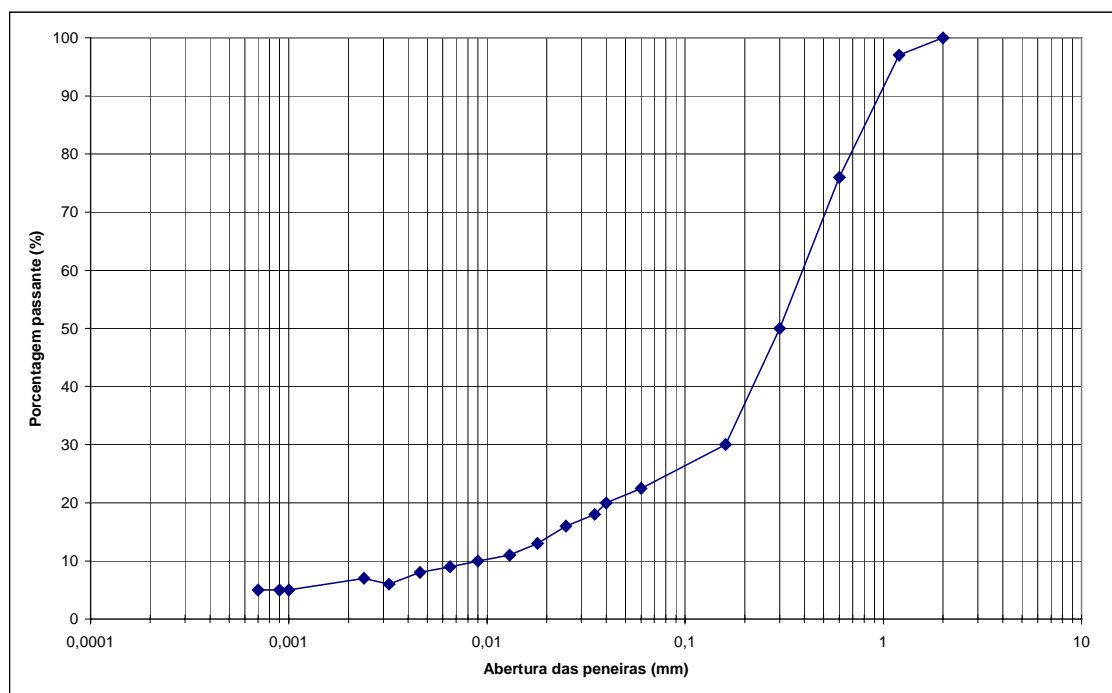


Figura 11 - Curva Granulométrica do solo Vila Secundino

Este solo pode ser enquadrado na classificação HRB como A-2-4, e na classificação unificada como SC.

3.2.2. Programa de ensaios

No programa de ensaios realizados, foram utilizados nove corpos de prova, compactados na umidade ótima com um grau de compactação (GC) em torno de 100% do Proctor normal, conforme se apresenta na Tabela II.

Tabela II – Dados de compactação dos corpos-de-prova

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W(%)	13,59	13,63	13,69	13,71	13,58	13,61	13,79	14,01	13,72
GC(%)	99,96	100,0	100,0	99,98	99,97	100,0	99,08	99,89	100,0

A Tabela III relaciona os corpos-de-prova com os ensaios realizados.

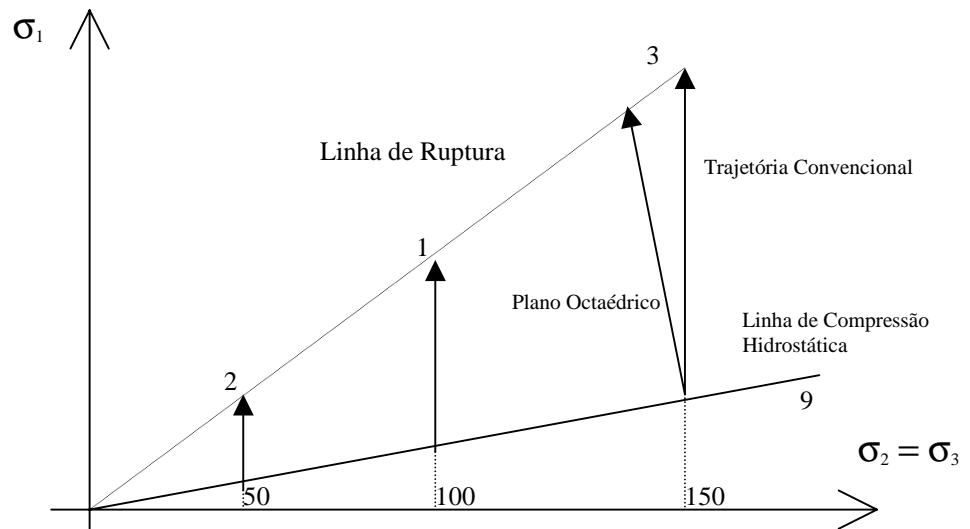
Tabela III – Descrição dos corpos de prova utilizados em cada ensaio

Corpo de Provas	Tensão Conf.(kPa)	Tipo Ensaio *	Ang. Lode(°)
1	100	CID	0
2	50	CID	0
3	150	CID	0
4	100	PO	0
5	100	PO	30
6	100	PO	15
7	100	PO	45
8	100	PO	60
9	-	CH	-

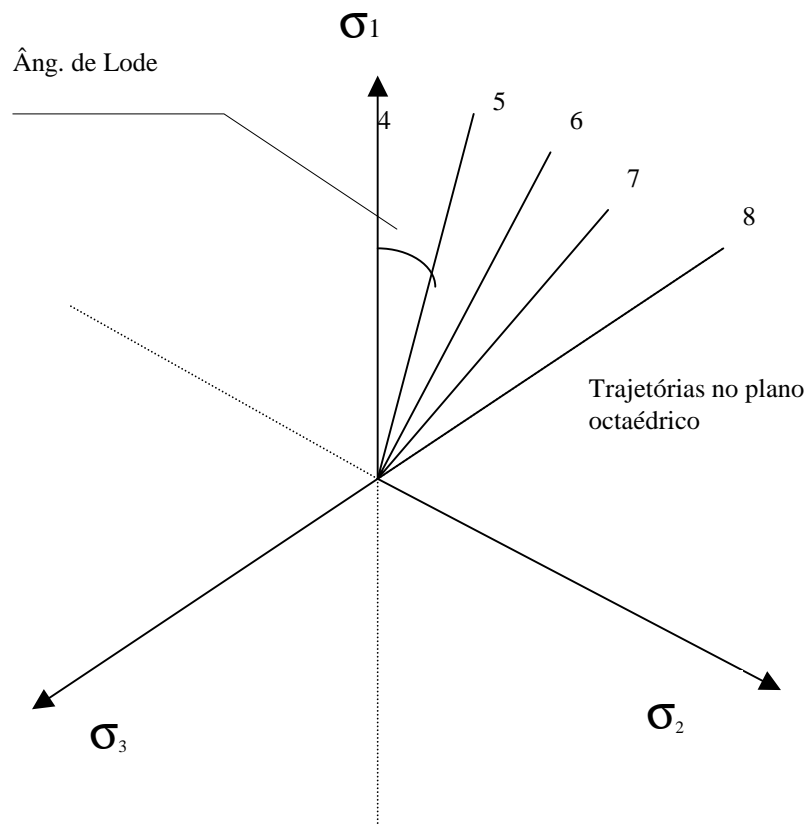
*CID = ensaio triaxial convencional, consolidado isotropicamente, drenado; PO = ensaio no plano octaédrico; CH = ensaio de compressão hidrostática.

Os nove ensaios realizados foram divididos da seguinte forma: 3 ensaios triaxiais convencionais, em que procurou-se reproduzir as condições da célula convencional; 5 ensaios no plano octaédrico, com tensão de confinamento de 100kPa e uma variação do ângulo de Lode de 15 em 15 graus, a partir de zero, buscando-se diferentes trajetórias de tensão; 1 ensaio de compressão hidrostática.

Na Figura 12, procura-se ilustrar as trajetórias de tensão seguidas nos ensaios realizados. Em primeiro lugar, mostra-se as trajetórias de tensão no plano de Rendulic e em seguida apresenta-se as trajetórias no plano octaédrico.



(a) Espaço de Rendulic



(b) Espaço das Tensões

Figura 12 – Trajetórias de tensão seguidas nos ensaios

3.2.3. Metodologia dos ensaios

O funcionamento geral do sistema consiste em se saturar a amostra através da linha de controle de água, via interface ar-água, aplicar as pressões através de um sistema de ar comprimido às membranas que ficam em contato com a amostra, através das três linhas de controle de pressão, o que causa a deformação da amostra, e medir essas deformações através dos medidores de deslocamento posicionados em cada uma das faces, via sistema de aquisição de dados.

A saturação da amostra é feita da seguinte forma: libera-se um determinado nível de pressão de confinamento, em torno de 5kPa, pelos manômetros que se ligam às membranas de borracha. Imediatamente após, libera-se pressão, em torno de 3 kPa, pela linha de saturação que levará água ao corpo-de-provas. Vai-se aumentando os níveis de pressão de forma a manter uma diferença entre elas em torno de 3 kPa, até que se obtenha a leitura do parâmetro B de Skempton igual a, no mínimo, 0,97 , quando então considera-se o corpo de provas saturado.

Finda a etapa de saturação, passa-se à fase de consolidação. Nesta fase, mantém-se a pressão na linha de saturação no mesmo valor no qual se atingiu o valor considerado ideal para o parâmetro B de Skempton, com o sistema de saturação aberto, para que possa haver drenagem, aumenta-se o valor da pressão de confinamento até que a diferença entre essa pressão e aquela existente na linha de saturação atinja o valor com o qual se deseja consolidar a amostra. Considera-se a etapa finalizada quando os valores de deformação volumétrica, calculados a partir das leituras dos transdutores de deformação, se estabilizarem.

No ensaio de compressão hidrostática, ao invés de se elevar a pressão de confinamento a um valor final de pressão diferencial em

relação àquela existente na linha de saturação, vai-se efetuando pequenos acréscimos e espera-se que as leituras de deformação se estabilizem para que se passe ao incremento posterior.

Nos ensaios convencionais, a ruptura é atingida, a partir da consolidação, mantendo-se constante as pressões laterais e elevando-se a pressão axial, em pequenos incrementos, nos intervalos dos quais se faz a leitura das deformações quando estas se estabilizam, até que o corpo-de-provas venha a se romper. É considerada ruptura, o momento em que para um acréscimo de pressão as leituras de deformação não mais se estabilizam.

Para os ensaios no plano octaédrico, a partir da consolidação, varia-se independentemente cada uma das pressões na face da amostra, de acordo com a trajetória que se esteja adotando, até se chegar à ruptura, considerada da mesma forma que no caso de ensaios convencionais. As tensões principais variam de acordo com a equação (14), em função do ângulo escolhido para a trajetória e das tensões octaédricas.

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sqrt{2} \cdot \tau_{oct} \cdot \cos \theta_{oct} + \sigma_{oct} \\ \sigma_2 = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \tau_{oct} \cdot (\cos \theta_{oct} - \sqrt{3} \cdot \sin \theta_{oct}) + \sigma_{oct} \\ \sigma_3 = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \tau_{oct} \cdot (\cos \theta_{oct} + \sqrt{3} \cdot \sin \theta_{oct}) + \sigma_{oct} \end{cases} \quad (14)$$

em que : τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica

σ_{oct} = tensão normal octaédrica (100kPa)

θ_{oct} = ângulo entre a trajetória de tensão e o eixo σ_1 (ângulo de Lode)

3.2.4. Resultado dos ensaios

A seguir apresentam-se os resultados para os diversos ensaios realizados. Na Figura 13, mostra-se o ensaio de compressão hidrostática. Apesar das deformações volumétricas terem sido aparentemente excessivas, os resultados dos ensaios são confirmados por terem sido feitas medições em 3 direções ortogonais. As Figuras 14 a 16 apresentam os resultados dos ensaios de compressão triaxial convencional, em termos de tensão e deformação. Na Figura 17 observa-se também o resultados dos ensaios de compressão triaxial convencional, colocados juntos, comparativamente em termos de tensão de ruptura, e os resultados da deformação volumétrica contra a deformação principal maior.

Nas Figuras 18 a 22 apresentam-se o resultados dos ensaios no plano octaédrico representando-se os gráficos da tensão cisalhante octaédrica contra deformações principais para 0°, 15°, 30°, 45° e 60° respectivamente.

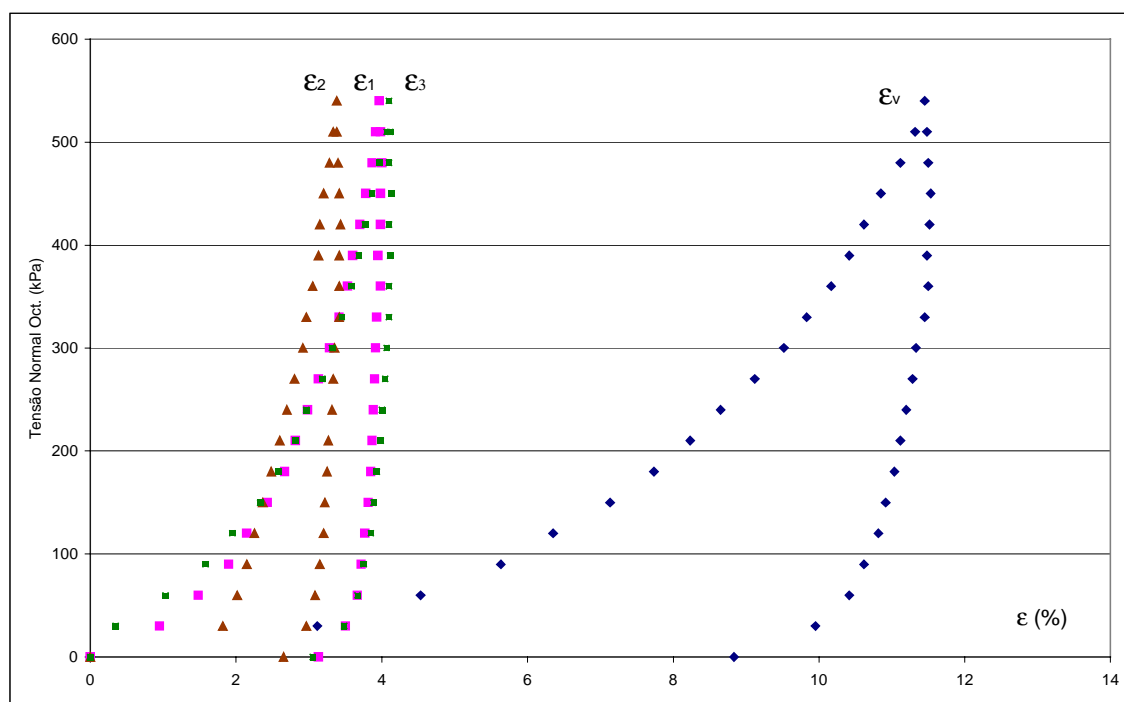


Figura 13 – Ensaio de compressão hidrostática

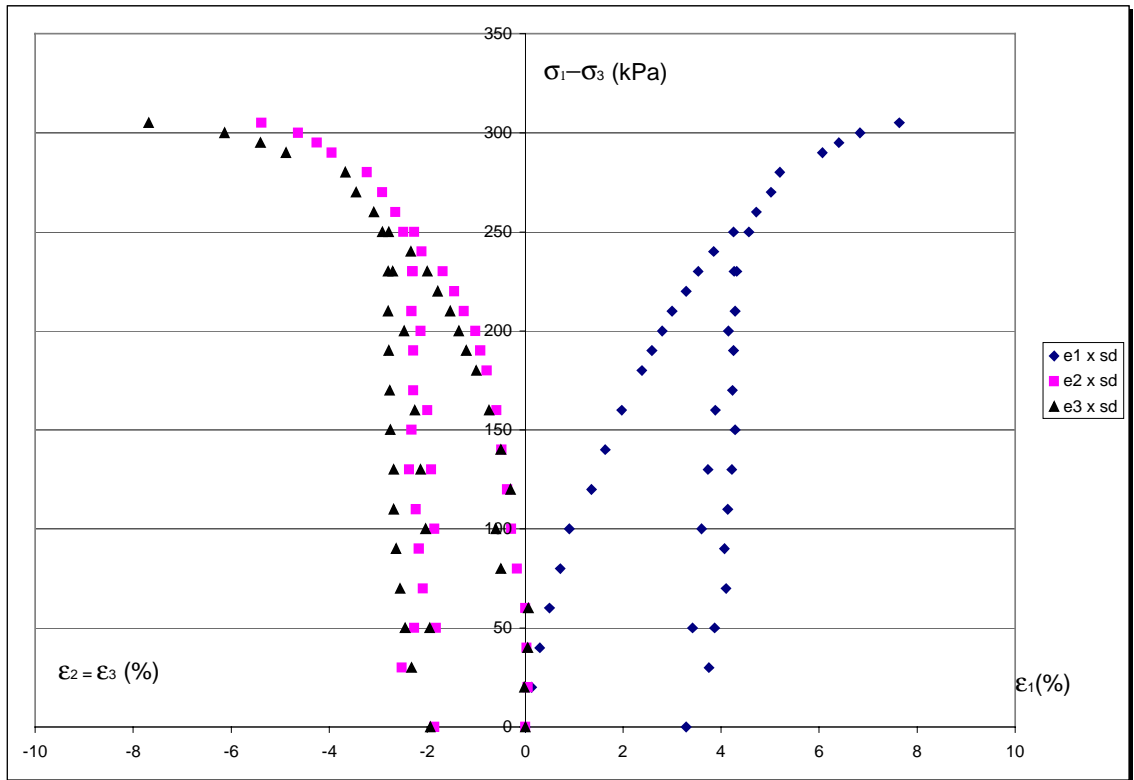


Figura 14 – Ensaio triaxial convencional ($\sigma_3 = 50$ kPa)

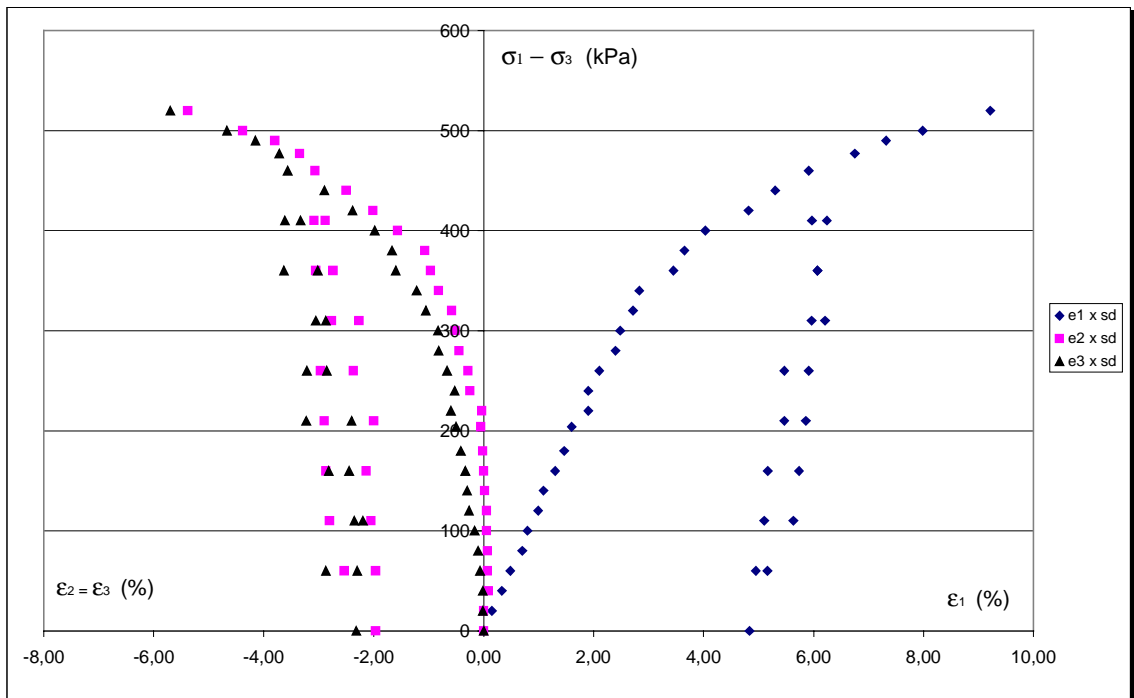


Figura 15 - Ensaio triaxial convencional ($\sigma_3 = 100$ kPa)

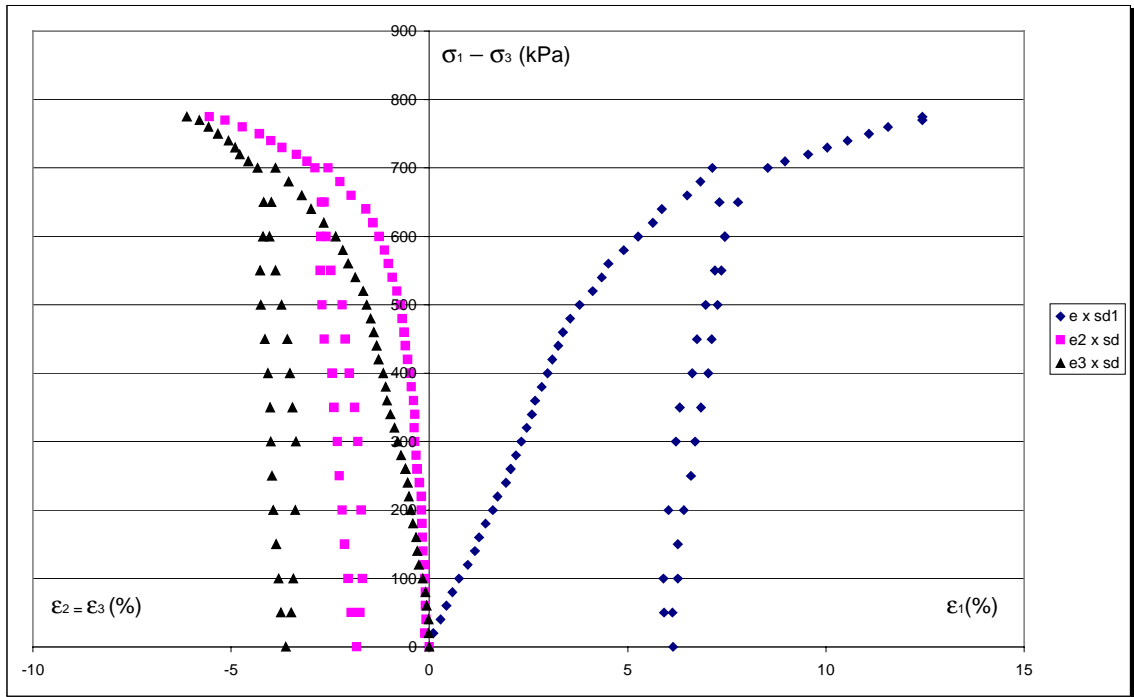


Figura 16 - Ensaio triaxial convencional ($\sigma_3 = 150$ kPa)

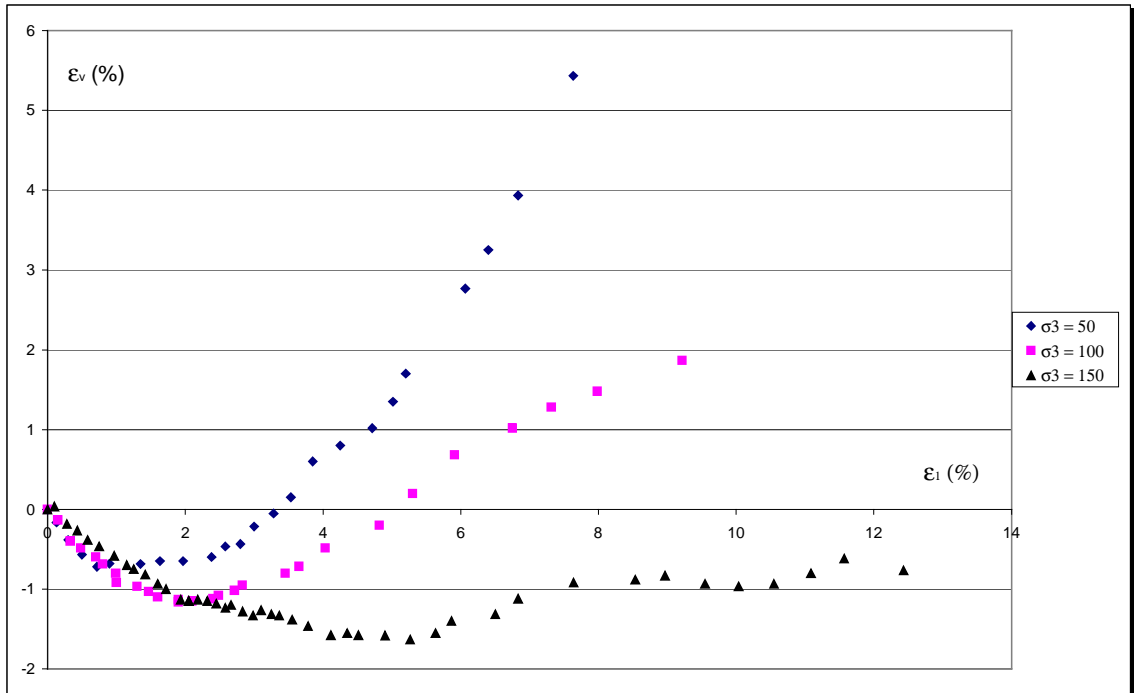
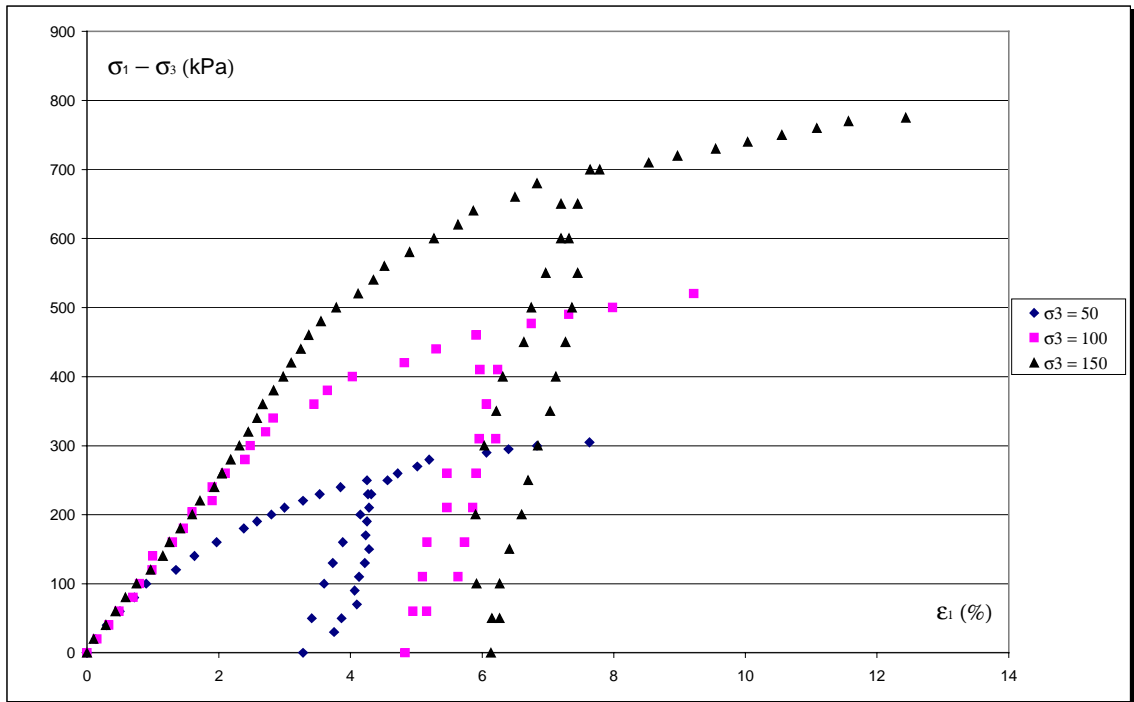


Figura 17 - Ensaio triaxiais convencionais

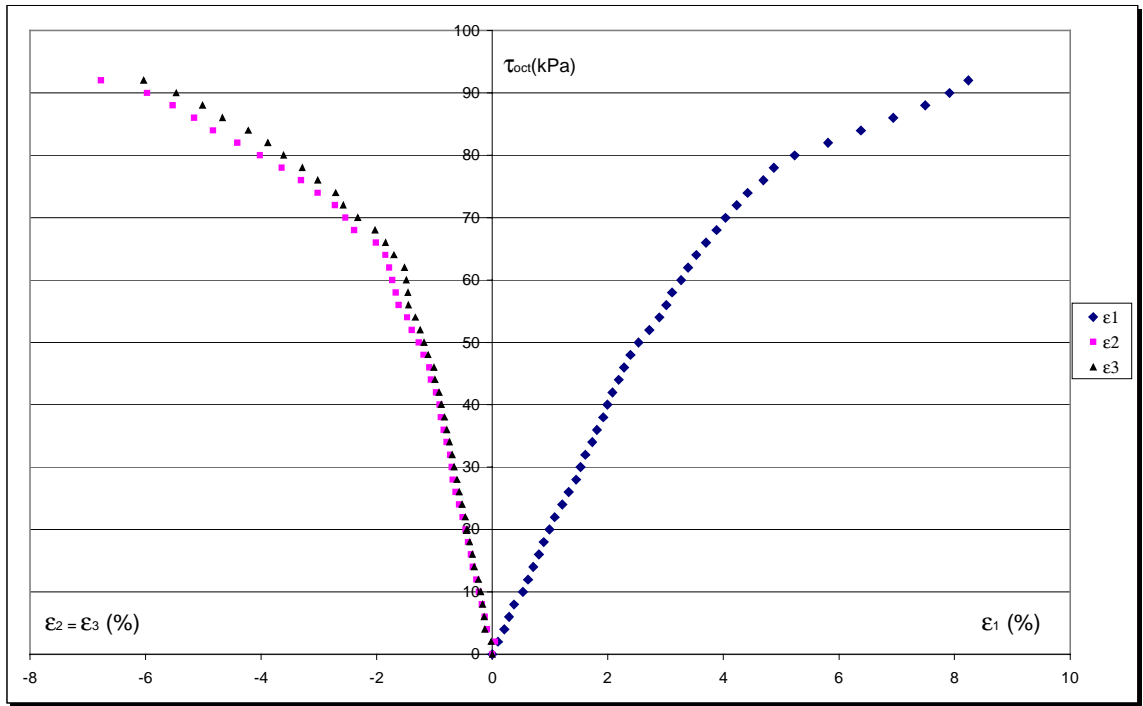


Figura 18 - Ensaio no plano octaédrico ($\theta = 0^\circ$)

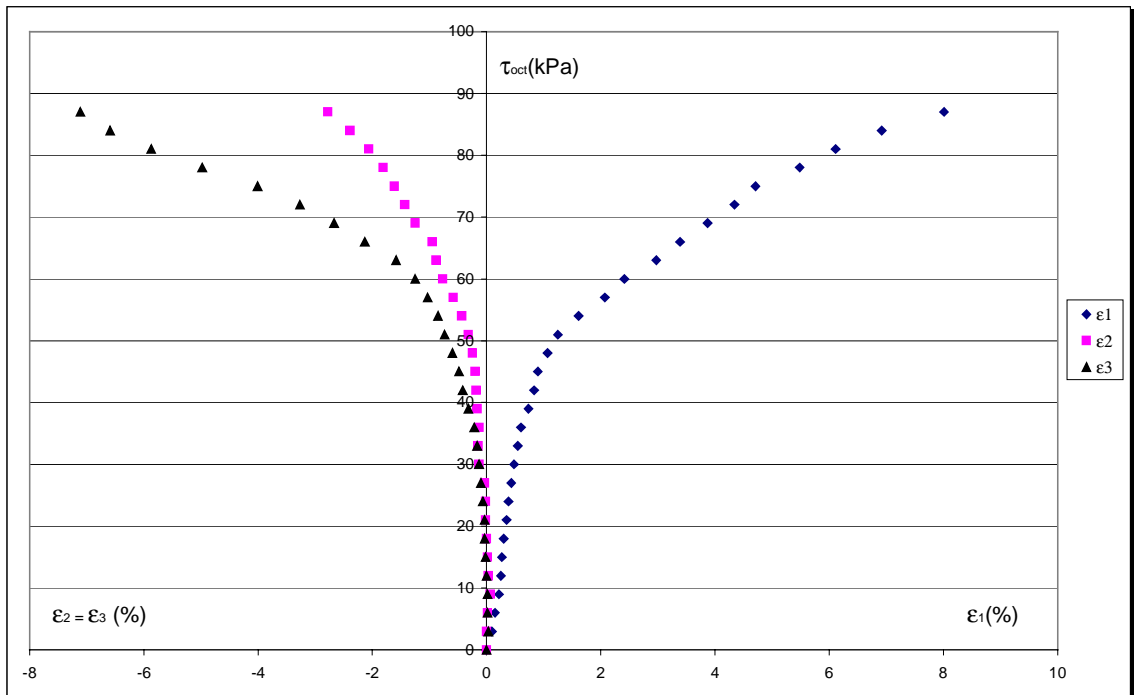


Figura 19 - Ensaio no plano octaédrico ($\theta = 15^\circ$)

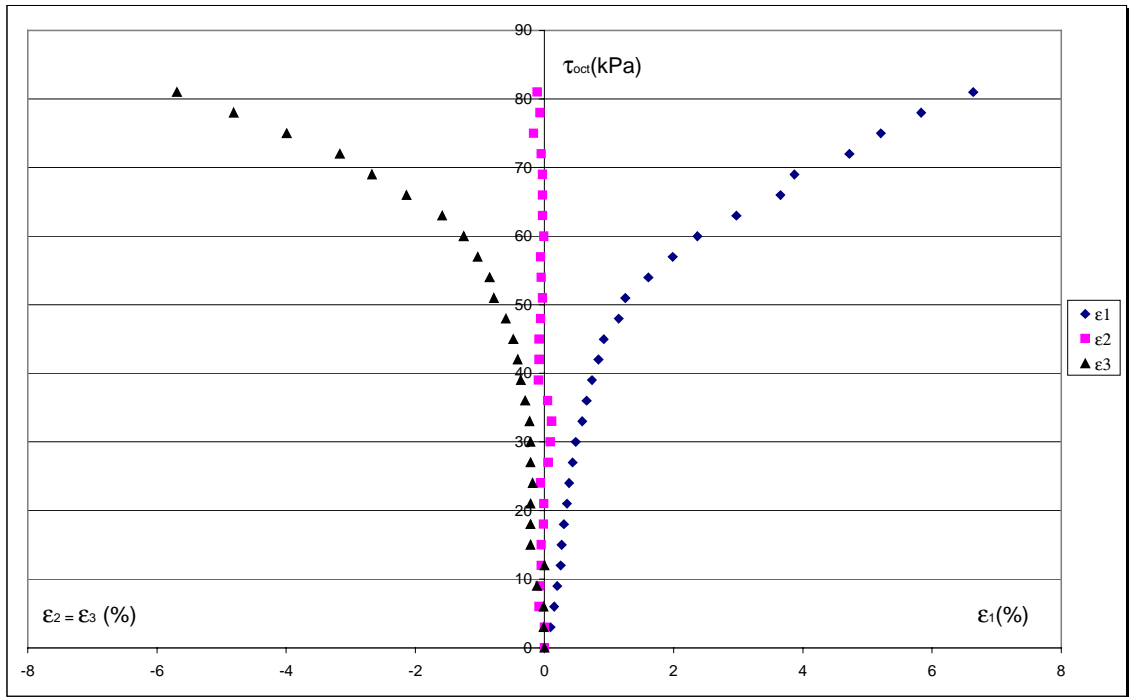


Figura 20 - Ensaio no plano octaédrico ($\theta = 30^\circ$)

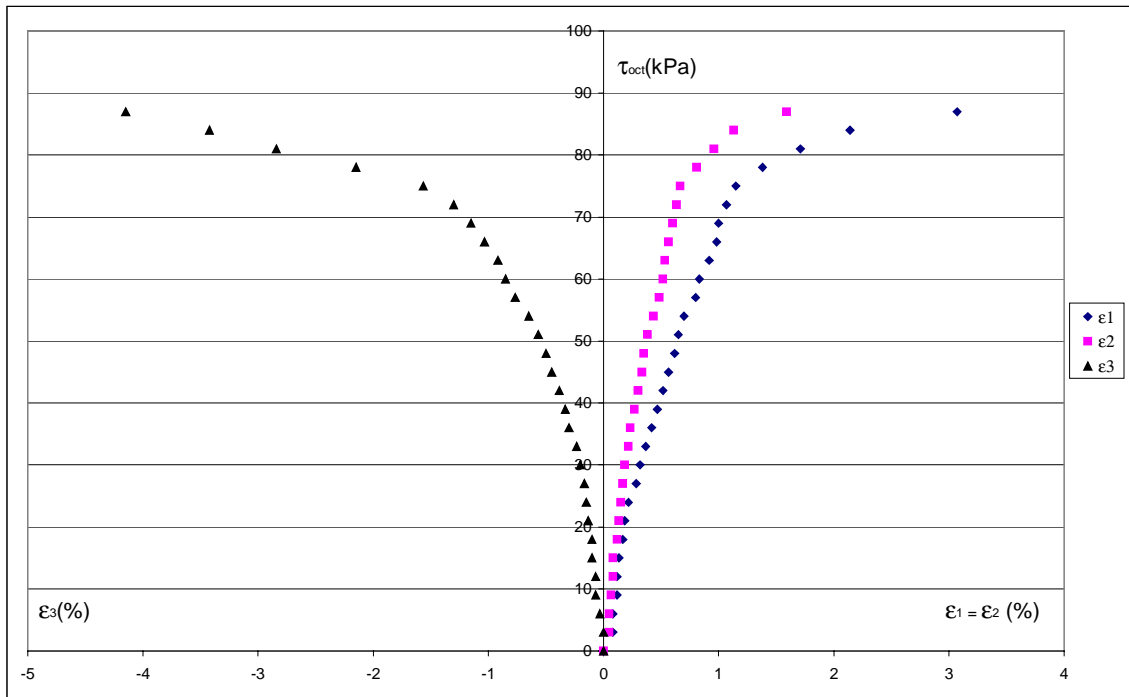


Figura 21 - Ensaio no plano octaédrico ($\theta = 45^\circ$)

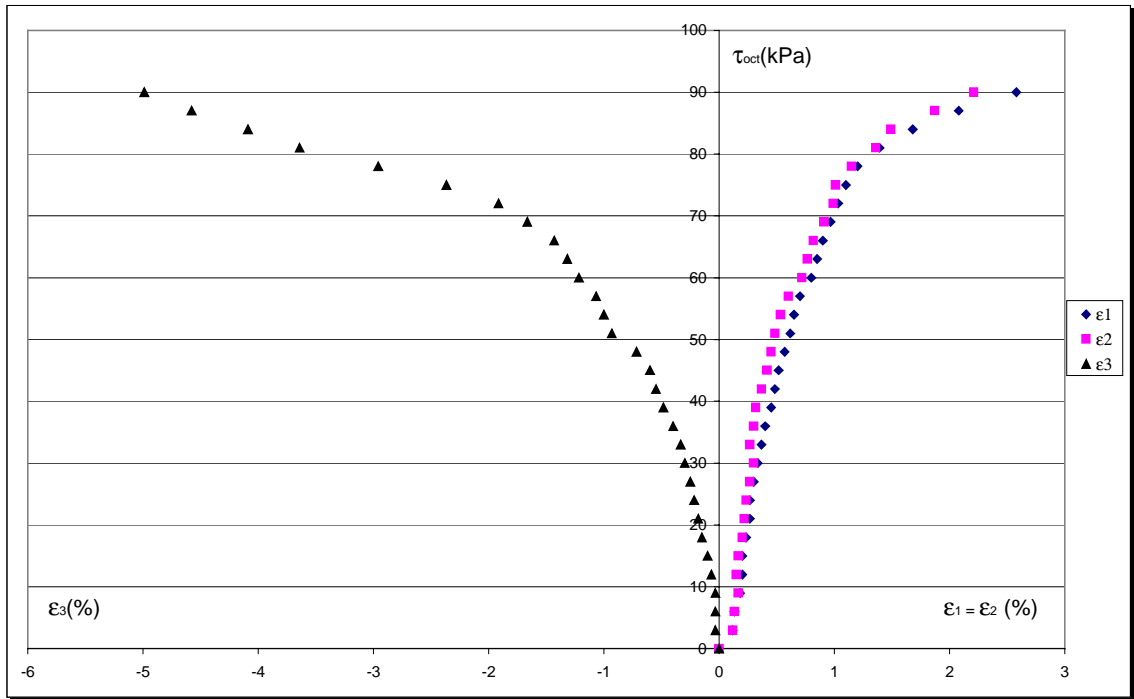


Figura 22 - Ensaio no plano octaédrico ($\theta = 60^\circ$)

4. MODELOS CONSTITUTIVOS UTILIZADOS NA TESE

4.1. Modelo Hiperbólico

4.1.1 – Introdução

Este modelo foi desenvolvido para análise incremental de deformações em solos em que o comportamento não linear é modelado por uma série de incrementos lineares. Assume-se que a relação entre tensão e deformação é governada pela lei de Hooke generalizada.

O modelo hiperbólico foi inicialmente proposto por Kondner (1963), e Kondner e Zelasko (1963), ampliado por Duncan e Chang (1970) e finalmente consolidado por Duncan e outros (1980). Kondner baseou-se no fato de que a curva tensão x deformação de alguns solos pode ser aproximada por uma hipérbole retangular (Figura 23) com razoável precisão, representada pela seguinte equação:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (16)$$

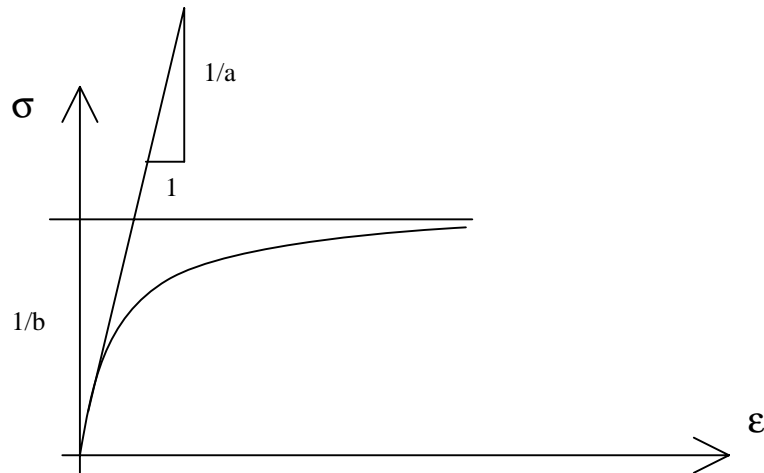


Figura 23 – Hipérbole retangular

Outros tipos de curva poderiam ter sido utilizados, mas as hipérboles têm duas características que tornam sua utilização conveniente:

- (1) os parâmetros a e b que aparecem na equação hiperbólica, equação (17), têm significado físico;
- (2) os valores de a e b , para uma dada curva tensão x deformação, podem ser facilmente determinados através da transformação da equação (17) em uma relação linear entre $\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ e ε (Duncan e Chang, 1970).

Para condições de deformação plana a relação entre tensão e deformação pode ser expressa em termos do módulo de Young, E , e do módulo de deformação volumétrica, B , da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{3B}{9B-E} \begin{bmatrix} (3B-E) & (3B-E) & 0 \\ (3B-E) & (3B+E) & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

4.1.2. – Relação tensão x deformação

A transformação da equação (17) em uma relação linear fornece a seguinte expressão:

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon \quad (18)$$

que representa uma reta no espaço bidimensional $\frac{\varepsilon}{\sigma_1 - \sigma_3} \times \varepsilon$, convencionalmente chamada de gráfico transformado.

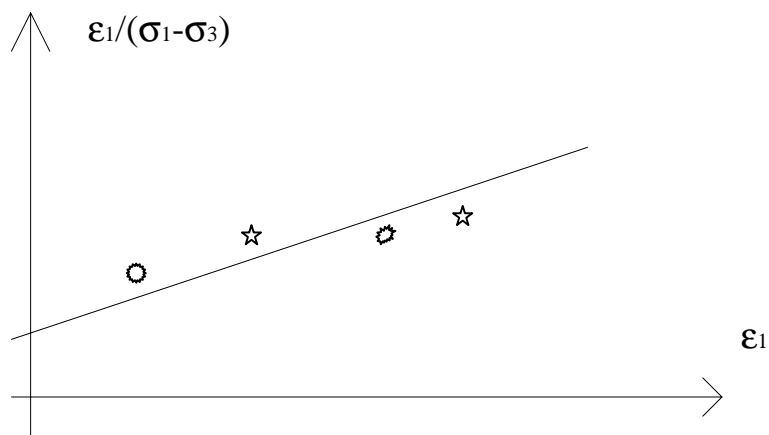


Figura 24 – Gráfico transformado

Rescrevendo a equação (18), em função da deformação e diferenciando o resultado em relação à deformação obtém-se, no ponto em que $\varepsilon = 0$, a seguinte relação:

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon} = E_i = \frac{a}{a^2} = \frac{1}{a} \quad (19)$$

Tomando o limite da equação (18) em função das deformações com estas tendendo ao infinito, tem-se:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} (\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_{ast} = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} = \frac{1}{b} \quad (20)$$

Dessa forma as constantes a e b são definidas, respectivamente, como o inverso do módulo de elasticidade inicial tangente (E_i) e o inverso do valor assintótico de tensão desviadora ao qual a curva tensão x deformação tende no infinito, e podem ser obtidos a partir do gráfico transformado, em que b é a inclinação da reta de ajuste dos pontos de cada ensaio e a o valor do intercepto dessas retas com o eixo das ordenadas.

Quando os dados obtidos de ensaios são plotados no gráfico transformado acontece, freqüentemente, dos pontos desviarem-se de uma relação linear ideal. De acordo com Duncan e Chang (1970) e Kulhawy et al. (1969), a experiência com centenas de curvas tensão-deformação de mais de 100 solos mostrou que uma boa representação é obtida selecionando-se a linha reta de modo que ela passe pelos pontos em que 70% e 95% da resistência do solo foram mobilizadas. Ou seja, na prática, somente 2 pontos para cada curva tensão-deformação (os pontos de 70% e 95%) são plotados no gráfico transformado.

O valor assintótico, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ast}$, é maior que a resistência real do solo pelo fato que a hipérbole de ajuste do comportamento deste permanecerá, de modo geral, abaixo da assíntota. Em função disto, pode-se correlacionar o valor - $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ast}$ - pode ser correlacionado com a resistência do solo - $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rup}$ - por meio do fator R_f :

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{rup} = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{ast} \quad (21)$$

O valor de R_f representa o ajuste entre $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rup}$ e $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ast}$, sendo sempre menor ou igual a 1. Substituindo-se os valores de a , b e R_f na equação (17) obtém-se:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{rup}}} \quad (22)$$

Exceto em casos de ensaios não drenados e não consolidados em solos saturados, tanto o módulo tangente quanto a resistência compressiva variam com a tensão de confinamento aplicada. A partir de evidências experimentais, Janbu (1963) mostrou que a relação entre módulo tangente inicial e tensão confinante pode ser expressa como:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (23)$$

em que p_a é a pressão atmosférica.

Os parâmetros K e n podem ser obtidos plotando-se $\frac{E_i}{p_a} \times \frac{\sigma_3}{p_a}$ em escala log-log.

Caso se assuma que a ruptura irá ocorrer sem variação no valor de σ_3 , a relação entre a resistência e a tensão de confinamento pode ser expressa convenientemente em termos do critério de ruptura de Mohr-Coulomb como:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{rup} = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (24)$$

em que c e ϕ são, respectivamente, a coesão e o ângulo de atrito do material. Como:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{rup}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ast}} \quad (25)$$

Tem-se:

$$R_f = \frac{\frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi}}{\frac{1}{b}} \quad (26)$$

A relação tensão x deformação pode ser empregada convenientemente em uma análise incremental de tensões em virtude de ser possível determinar o valor do módulo tangente correspondente a qualquer ponto da curva tensão x deformação. Se o valor da tensão principal menor for constante, o módulo de elasticidade tangente, E_t , pode ser expresso como:

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \varepsilon} \quad (27)$$

Essa diferenciação resulta na expressão seguinte:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 \quad (28)$$

De posse do valor de E_t , em uma análise incremental de tensões, pode-se, através do incremento de tensão, calcular o incremento de deformação:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_t} \quad (29)$$

de forma que cada trecho é assumido como linear.

4.1.3. – Deformações Volumétricas

Duncan e outros (1979) propõem que se modele a deformação volumétrica de um solo através de seu módulo volumétrico (B). Este módulo é assumido como função somente da tensão confinante (σ_3), através da expressão:

$$B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (30)$$

Em que K_b e m são parâmetros obtidos a partir do ajuste dos pontos dos ensaios quando se plota $\log \frac{B_i}{p_a} \times \log \frac{\sigma_3}{p_a}$, em que o valor de B para cada ponto pode ser obtido a partir de:

$$B = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3 \varepsilon_v} \quad (31)$$

O coeficiente de Poisson tangente pode ser obtido para qualquer valor de σ_3 a partir do valor de B determinado na equação (31), de modo que:

$$v_t = \frac{3B - E_t}{6B} \quad (32)$$

e a deformação volumétrica, a partir de:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 (1 - 2v_t) \quad (33)$$

O comportamento do solo no descarregamento é representado a partir do módulo de elasticidade no descarregamento E_{ur} , obtido a partir de um gráfico log-log, como os anteriores:

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (34)$$

em que k_{ur} e n são parâmetros adimensionais obtidos plotando-se um gráfico em escala log-log dos valores de $\frac{\sigma_3}{p_a}$ no eixo das abscissas e $\frac{E_{ur}}{p_a}$ no eixo das ordenadas.

Na Tabela IV, apresenta-se um resumo dos parâmetros do modelo hiperbólico:

Tabela IV – Parâmetros do modelo hiperbólico

Parâmetros do Modelo

$R_f, K, n, K_b, m, K_{ur}, c, \phi$

4.2. – Cam-Clay Modificado

4.2.1. – Introdução

O modelo Cam-Clay modificado é um modelo elasto-plástico, isotrópico com endurecimento. Considera-se a tensão principal intermediária igual à tensão principal menor ($\sigma_2 = \sigma_3$). No modelo, trabalha-se com as componentes de tensão p e q , definidas da seguinte forma:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad (35)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Esta notação tem a vantagem de indicar qual o aspecto do comportamento do solo está prevalecendo, o efeito normal (p) ou

cisalhante (q). Da mesma forma, ao invés de se utilizar as componentes principais de deformação, define-se:

$$\begin{aligned}\varepsilon_v &= \varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_3 \\ \varepsilon_\gamma &= \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)\end{aligned}\quad (36)$$

Em que ε_v representa a deformação volumétrica, associada à tensão hidrostática (p), e ε_γ representa a deformação de distorção, associada à tensão cisalhante (q).

4.2.2. – Função de plastificação

No Cam-Clay considera-se a plasticidade associada, ou seja, a função de plastificação é igual à função potencial plástico. A função de plastificação por sua vez é dada como:

$$F = F(p, q, p_0) = 0 \quad (37)$$

Em que p_0 é um parâmetro de endurecimento, ligado às deformações volumétricas plásticas, ou seja:

$$p_0 = p_0(\varepsilon_v^p) \quad (38)$$

A função de plastificação assume a seguinte forma:

$$F = q^2 + M^2 p (p - p_0) = 0 \quad (39)$$

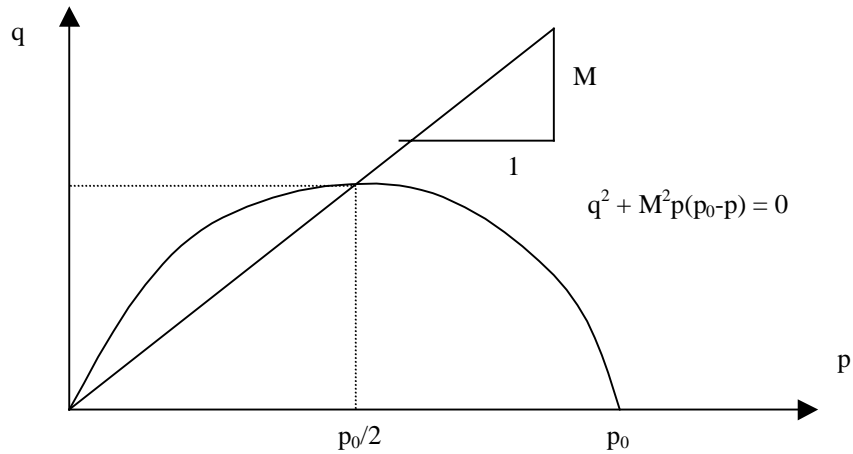


Figura 25 – Parâmetro M

O parâmetro M representa a inclinação da reta que passa por todos os pontos de ruptura (linha de estado crítico – Figura 25). Se relaciona com o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) da seguinte forma (Desai e Siriwardane, 1984):

$$M = \frac{6 \operatorname{sen} \phi}{3 - \operatorname{sen} \phi} \quad (40)$$

4.2.3. – Deformações

Os incrementos de deformações são obtidas a partir da soma dos incrementos deformações elásticas e plásticas (eq. 12):

$$d\varepsilon_{ij}^t = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (41)$$

Enquanto as deformações elásticas são calculadas através da lei de Hooke, as deformações plásticas são calculadas a partir da lei fluxo da plasticidade:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (42)$$

que no caso específico do modelo Cam-Clay podem ser escritas como:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_v^p \\ d\varepsilon_\gamma^p \end{Bmatrix} = d\lambda \begin{Bmatrix} M^2(2p - p_0) \\ 2q \end{Bmatrix} \quad (43)$$

O escalar $d\lambda$ é determinado a partir da lei da consistência (eq. 14), e, para este modelo assume a seguinte forma:

$$d\lambda = - \frac{\frac{\partial F}{\partial p} dp + \frac{\partial F}{\partial q} dq}{\frac{\partial F}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial F}{\partial p}} \quad (44)$$

Como a expressão de F é conhecida, a única incógnita passa a ser o fator $\frac{dp_0}{d\varepsilon_v^p}$, que pode ser obtido à partir da lei do endurecimento com auxílio do ensaio oedométrico:

$$\frac{\partial p_0}{\partial \varepsilon_v^p} = p_0 \left(\frac{1+e}{\lambda - \kappa} \right) \quad (45)$$

e finalmente pode-se calcular o acréscimo de deformação para um dado acréscimo de tensões:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_v^p \\ d\varepsilon_\gamma^p \end{Bmatrix} = \frac{M^2(2p - p_0)dp + 2q dq}{\left(\frac{1+e}{\lambda - \kappa} \right) p_0 M^4 p (2p - p_0)} \begin{Bmatrix} M^2(2p - p_0) \\ 2q \end{Bmatrix} \quad (46)$$

Em que e é o índice de vazios, p é a componente normal de tensão, κ é a inclinação da reta de descompressão no ensaio, ν é o coeficiente de Poisson, λ é a inclinação da reta virgem no ensaio oedométrico. Em uma análise incremental, a cada etapa variam p , q , p_0 e e , que serão utilizados na nova iteração. O valor do parâmetro p_0 é obtido a partir da equação (39), de modo que:

$$p_0 = \frac{q^2 + M^2 q^2}{M^2 p} \quad (47)$$

com os valores de p e q atualizados.

A parcela elástica da deformação pode ser determinada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_v^e &= \frac{dp}{B} \\ d\varepsilon_\gamma^e &= \frac{dp}{3G} \end{aligned} \quad (48)$$

Em que B e G são o módulo de variação volumétrica e o módulo de elasticidade transversal, respectivamente, e assumem os seguintes valores:

$$\begin{aligned} B &= \frac{(1+e)}{\kappa} p \\ G &= \frac{3B}{2} \left(\frac{1-2\nu}{1+\nu} \right) \end{aligned} \quad (49)$$

As deformações principais maior e menor podem ser obtidas da seguinte forma:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_v}{3} + \varepsilon_\gamma \quad (50)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_1}{2}$$

Na Tabela V apresenta-se um resumo dos parâmetros do Cam Clay:

Tabela V – Parâmetros e constantes relacionadas ao Cam-Clay

Parâmetros do Modelo

M, e_{ref} , λ , κ

em que e_{ref} é o índice de vazios de referência, correspondente a $p = 1$ na reta virgem.

4.3. – O modelo de Lade-Kim

4.3.1. – Introdução

Tanto quanto os modelos hiperbólico (Duncan et al, 1979) e Cam-Clay (Shofield e Wroth, 1968), o modelo elasto-plástico formulado por Lade (1977,1979), teve grande utilização por diversos autores (Azevedo e Ko, 1986; Santos e outros, 1989; Zornberg e Azevedo, 1990; Nogueira, 1992), pelo menos ao nível acadêmico, com bons resultados no que diz respeito à representação de ensaios de laboratório e obras geotécnicas.

Este modelo, no entanto, apresenta alguns problemas decorrentes do fato de utilizar duas superfícies de plastificação (Sture et al, 1989). Em vista disto, um novo modelo foi concebido (Lade e Kim, 1988a e b, Kim e Lade, 1988; Lade, 1990) com características semelhantes ao primeiro, porém apenas com uma superfície de plastificação (De Melo e Azevedo, 1995).

Alguma dificuldade em se reproduzir as características dos materiais tem sido encontrada na utilização deste novo modelo, como é o caso do trabalho de De Melo e Azevedo (1995), onde se fez uso de uma técnica de otimização em conjunto com o modelo para se chegar a resultados satisfatórios na reprodução do comportamento dos materiais da Barragem de Beliche.

4.3.2. – Deformações

De forma análoga a uma série de outros modelos elasto-plásticos, no modelo de Lade-Kim os incrementos de deformações são divididos em incrementos de deformações elásticas $d\varepsilon_{ij}^e$ e incrementos de deformações plásticas $d\varepsilon_{ij}^p$, (eq. 12).

Os incrementos de deformação elástica são obtidos a partir da lei de Hooke, usando-se o módulo de descarregamento e recarregamento como definido por Janbu (1963):

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (34)$$

As deformações plásticas são obtidas à partir da lei de fluxo da plasticidade (eq. 13):

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda_p \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right) \quad (51)$$

Diferentemente do Cam-Clay, este modelo utiliza a plasticidade não associada, ou seja, a função potencial plástico g é diferente da função de plastificação F .

Lade e Kim (1988) propuseram a seguinte função de plastificação, em que se supõe que o trabalho plástico (W_p), é o parâmetro de endurecimento:

$$F(\sigma_{ij}, W_p) = f'_p(\sigma_{ij}) - f''_p(W_p) = 0 \quad (52)$$

Nesta equação:

$$f'_p = \left(\Psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^h e^q \quad (53)$$

I_1, I_2 são o primeiro e o segundo invariantes de tensão, respectivamente, e e é o número de Euler, Ψ_1, h e q , são parâmetros do modelo:

$$f''_p = \left(\frac{1}{D} \right)^{\frac{1}{\rho}} \left(\frac{W_p}{p_a} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (54)$$

Os valores de D e ρ são obtidos à partir da lei de endurecimento, através da variação do trabalho plástico com o nível de tensão. Os autores do modelo chegam a:

$$D = \frac{c}{(27\Psi_1 + 3)^\rho} \quad (55)$$

$$\rho = \frac{q_q}{h}$$

em que c é um dos parâmetros de endurecimento do modelo.

Propõem ainda, os autores, a seguinte função para representar a o potencial plástico:

$$g_p = \left[\Psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} + \Psi_2 \right] \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^\mu \quad (56)$$

em que Ψ_1, Ψ_2 e μ são parâmetros do modelo. Ψ_1 é um fator de ponderação entre a forma triangular e a circular da superfície de potencial plástico num plano octaédrico; Ψ_2 controla a interseção da

superfície como eixo hidrostático e μ determina a sua curvatura no plano triaxial (De Melo e Azevedo, 1995).

Substituindo-se a equação (58) na lei de fluxo, chega-se às componentes dos incrementos de deformações plásticas:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_x^p \\ d\varepsilon_y^p \\ d\varepsilon_z^p \\ d\gamma_{yz}^p \\ d\gamma_{zx}^p \\ d\gamma_{xy}^p \end{Bmatrix} = d\lambda_p \begin{bmatrix} I_1 \\ P_a \end{bmatrix}^\mu \begin{Bmatrix} G - (\sigma_y + \sigma_z) \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1 (\sigma_y \sigma_z - \tau_{yz}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_z + \sigma_x) \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1 (\sigma_z \sigma_x - \tau_{zx}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_x + \sigma_y) \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1 (\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \frac{I_1^2}{I_2^2} \tau_{yz} - 2 \Psi_1 (\tau_{yx} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \frac{I_1^2}{I_2^2} \tau_{zx} - 2 \Psi_1 (\tau_{yx} \tau_{yz} - \sigma_y \tau_{zx}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \frac{I_1^2}{I_2^2} \tau_{xy} - 2 \Psi_1 (\tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_z \tau_{xy}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \end{Bmatrix} \quad (57)$$

em que:

$$G = \Psi_1 (\mu + 3) \frac{I_1^2}{I_3} - (\mu + 2) \frac{I_1}{I_2} + \Psi_2 \mu \frac{1}{I_1} \quad (58)$$

sendo o escalar $d\lambda_p$ calculado pela lei da consistência, fazendo $dF = 0$.

Na Tabela VI apresenta-se um resumo dos parâmetros ao modelo descrito.

Tabela VI – Parâmetros associados ao modelo Lade e Kim*

Parâmetros Elásticos
K_{ur}, n
Parâmetros de Ruptura
m, η_1
Parâmetros de Endurecimento
C, P
Parâmetros do Potencial Plástico
Ψ_1, Ψ_2, μ

Parâmetros de Plastificação

h, α

* parâmetros a serem definidos no capítulo 5.

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. – Modelo Hiperbólico

5.1.1. – Calibração

A partir dos dados dos três ensaios CID realizados e apresentados no capítulo 3, em um gráfico de ordenadas $\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)$, e abscissas (ε_1) , obtém-se, para os diversos pontos de cada um dos ensaios, os parâmetros a e b respectivamente como o intercepto desta com o eixo das ordenadas e o inverso da inclinação da reta de ajuste. A Figura 26, apresenta o ajuste obtido para cada um dos ensaios.

Os parâmetros K e n são obtidos desenhando-se em um gráfico os valores de $\log \frac{E_i}{P_a} \times \log \frac{\sigma_3}{P_a}$ ou então em um gráfico de escala log x log os valores de $\frac{E_i}{P_a} \times \frac{\sigma_3}{P_a}$, para cada um dos ensaios, obtendo-se, respectivamente, o valor de n definido pela inclinação da reta de ajuste, e

o valor de K como o intercepto desta reta com o eixo das abscissas. A Figura 27 apresenta os valores obtidos.

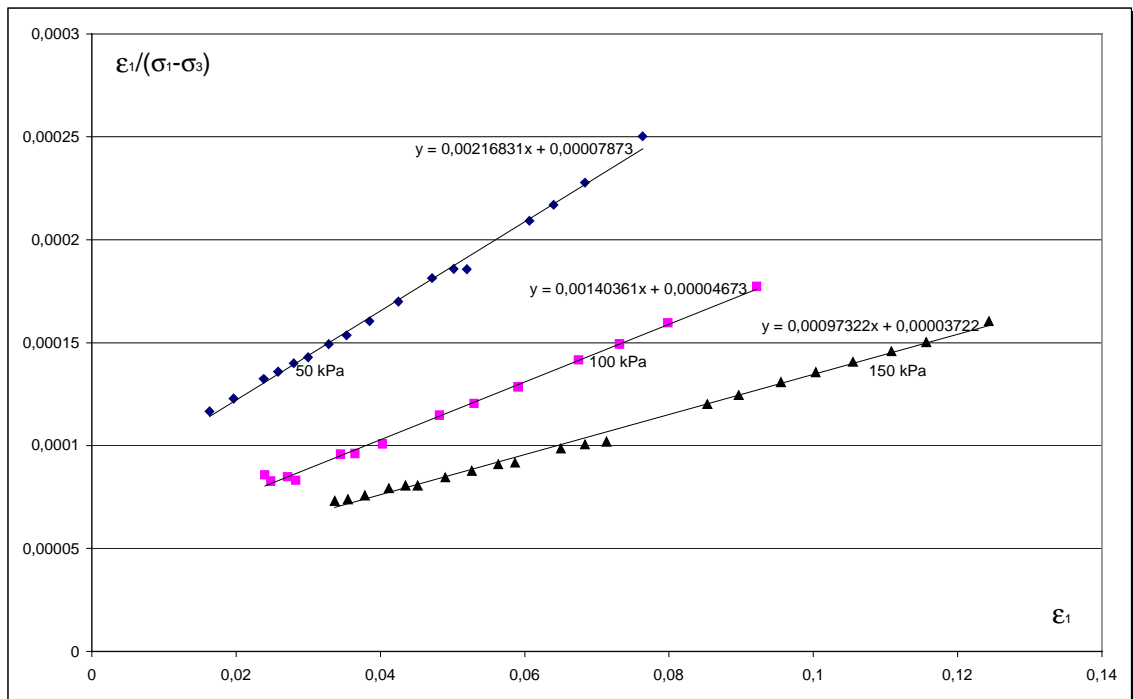


Figura 26 – Gráfico transformado

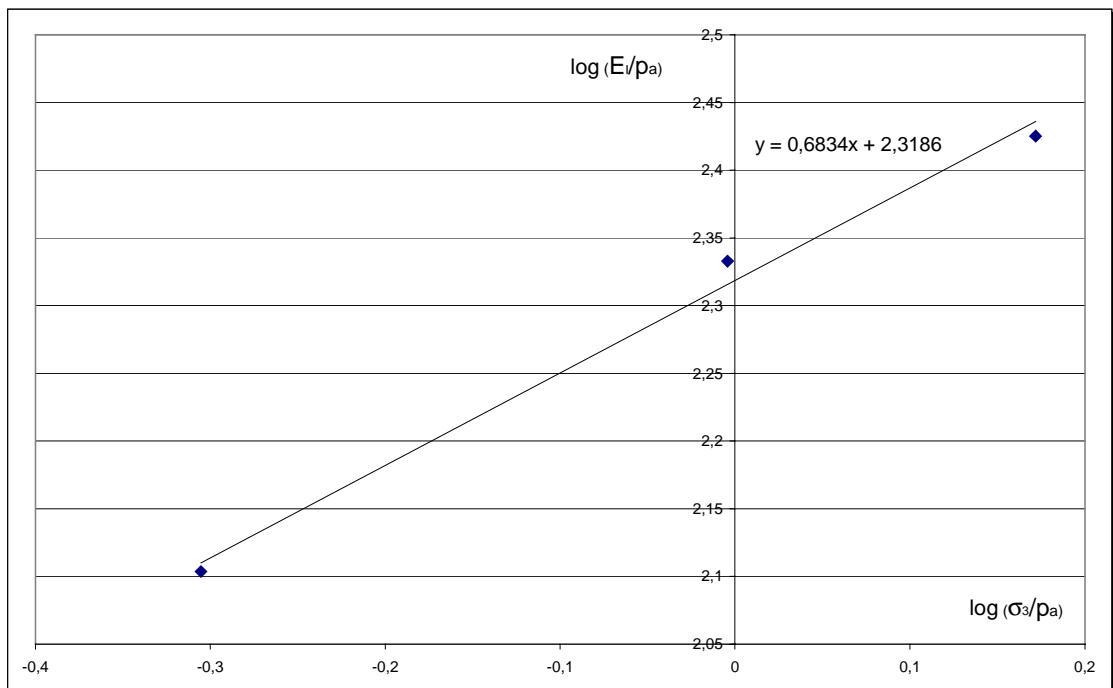


Figura 27 – Parâmetros K e n

De forma análoga ao que se faz na obtenção dos parâmetros K e n , utilizando-se os valores de E_{ur} obtidos nos ciclos de descarregamento-recarregamento realizados nos 3 ensaios CID, obtém-se K_{ur} . A Figura 28 ilustra o procedimento.

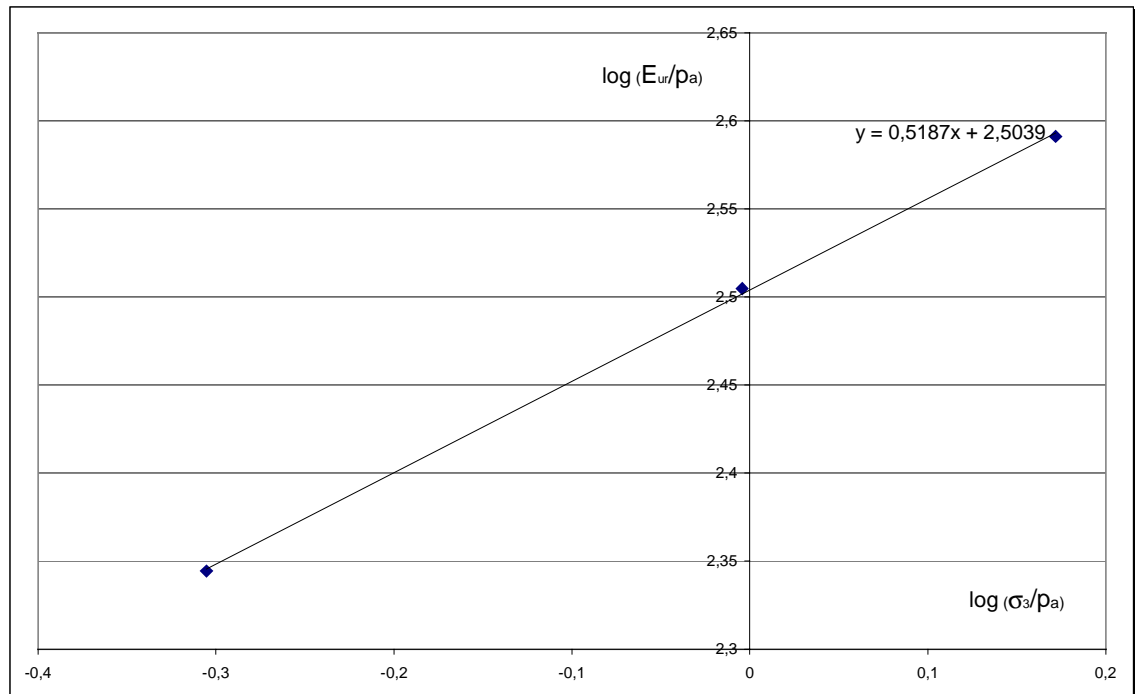


Figura 28 – Parâmetro K_{ur}

A partir dos ensaios CID, com a tensão desviadora e a deformação volumétrica no ponto equivalente a 70% da tensão de ruptura, calcula-se o valor de B para cada ensaio, de acordo com a teoria da elasticidade como:

$$B = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{3\varepsilon_v} \quad (59)$$

Dividindo os valores encontrados pela pressão atmosférica adotada (p_a), e desenhado em um gráfico $\log \times \log$ contra o valor da tensão de confinamento dividido pela pressão atmosférica, encontra-se, ajustando-se a melhor reta, o valor dos parâmetros K_b e m , respectivamente como o intercepto da reta com o eixo das ordenadas e a inclinação da reta de ajuste. Tal procedimento pode ser observado na Figura 30.

Os valores dos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito, foram obtidos a partir da envoltória de ruptura, tal como pode ser observado na Figura 29 (Lambe e Whitman, 1979).

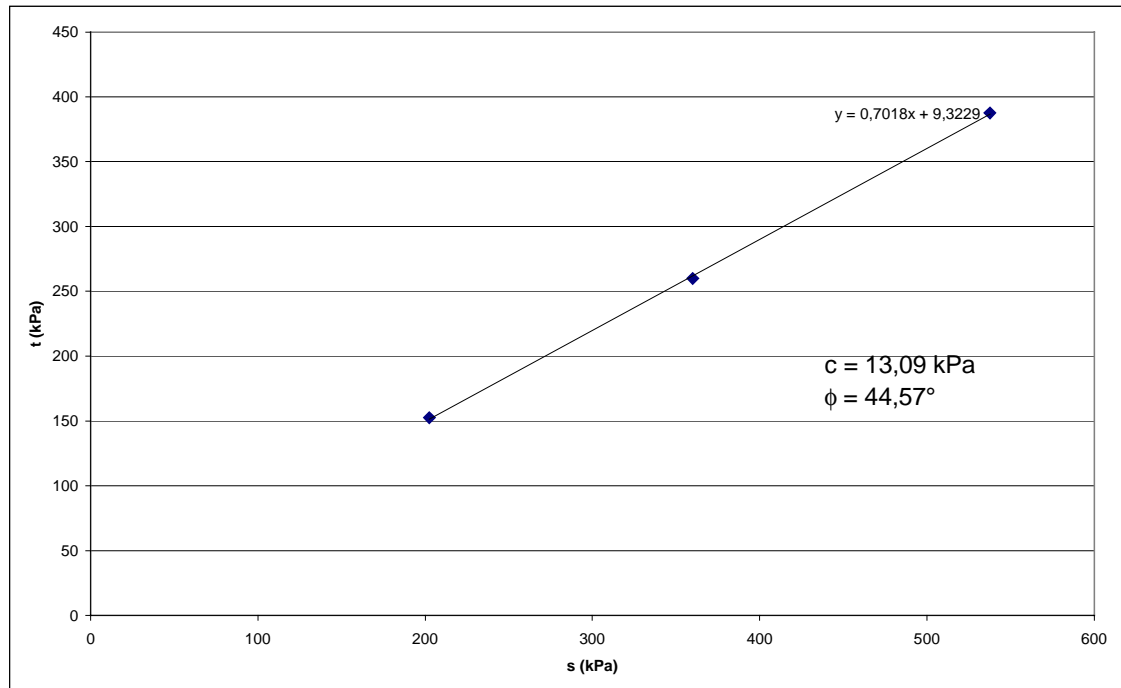


Figura 29 – Envoltória de ruptura

O parâmetro R_f , foi calculado de acordo com a equação (26), do item 4.1.2. Foram obtidos os valores 0,65; 0,75 e 0,75 para os ensaios com tensão de confinamento de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa respectivamente. Considerou-se para o parâmetro R_f , o valor médio dos valores obtidos a partir da equação (26)

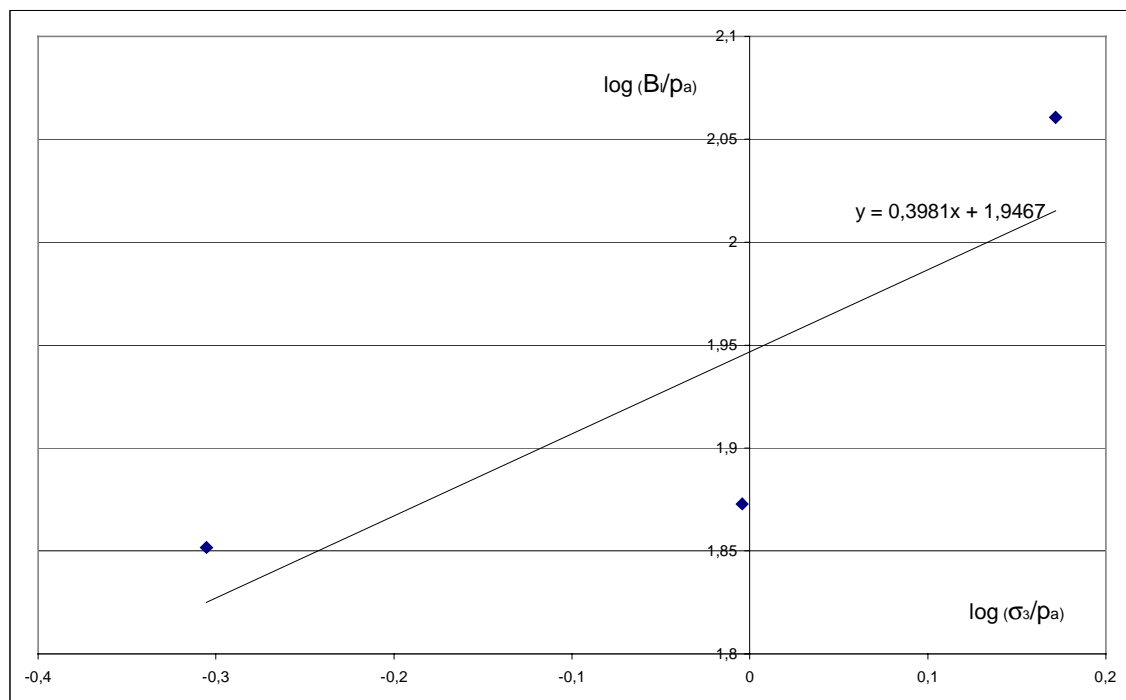


Figura 30 – Parâmetros K_b e m

A Tabela VII apresenta um resumo com os valores dos parâmetros obtidos para o modelo hiperbólico.

Tabela VII – Valores dos parâmetros obtidos para o modelo hiperbólico

R_f	K	n	K_b	m	K_{ur}	$C(kPa)$	$\phi(^{\circ})$	$p_a(kPa)$
0,72	208,25	0,683	88,45	0,39	319,08	13,09	44,57	100

5.1.2. – Comparações

A seguir apresentam-se as comparações entre os ensaios realizados e as reproduções obtidas com o modelo hiperbólico utilizando-se os parâmetros determinados de acordo com o item 5.1.1. A Figura 31, apresenta a reprodução do ensaio de compressão hidrostática. As Figuras de 32 a 34 mostram as reproduções dos ensaios de compressão triaxial convencional. Na Figura 35 apresenta-se, em conjunto, os ensaios de compressão triaxial convencional em termos de deformações

volumétricas observadas e calculadas. Nas Figuras 36 a 40 estão as reproduções obtidas para os ensaios no plano octaédrico.

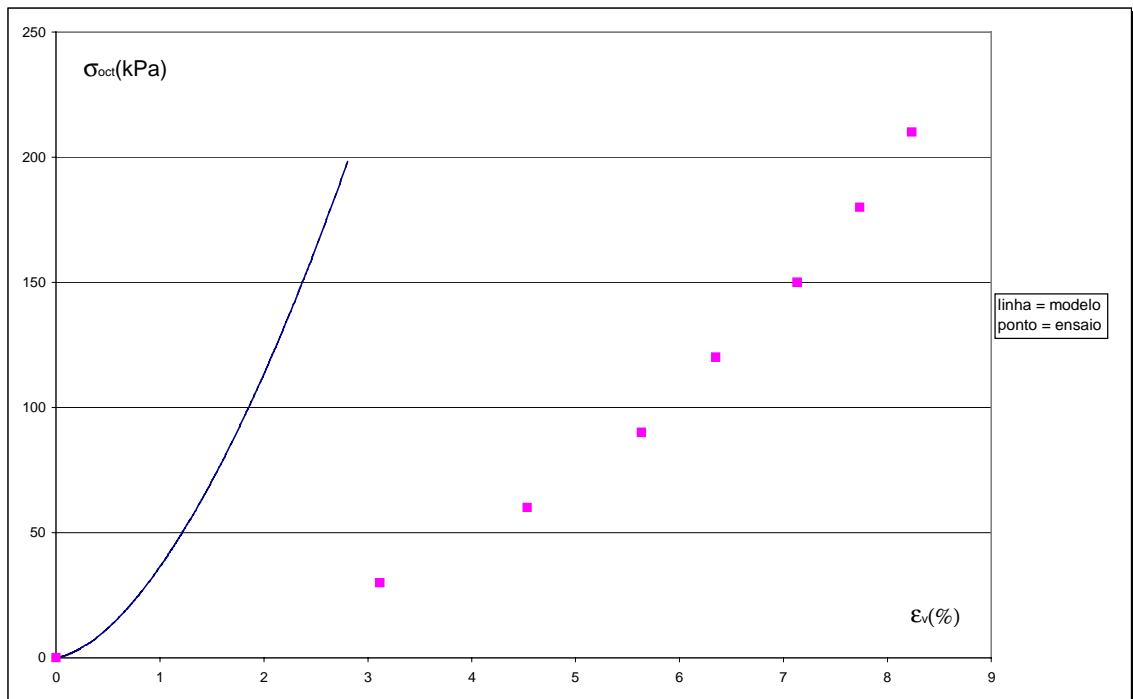


Figura 31 – Compressão Hidrostática x Hiperbólico

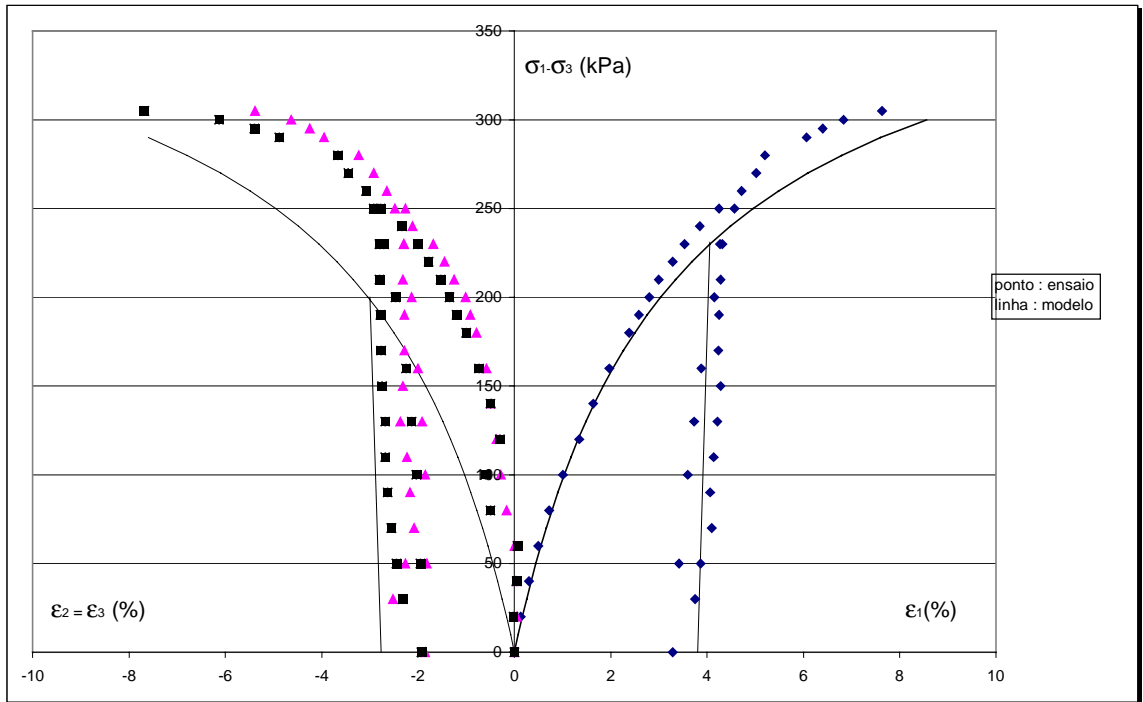


Figura 32 – Compressão triaxial (50 kPa) x Hiperbólico

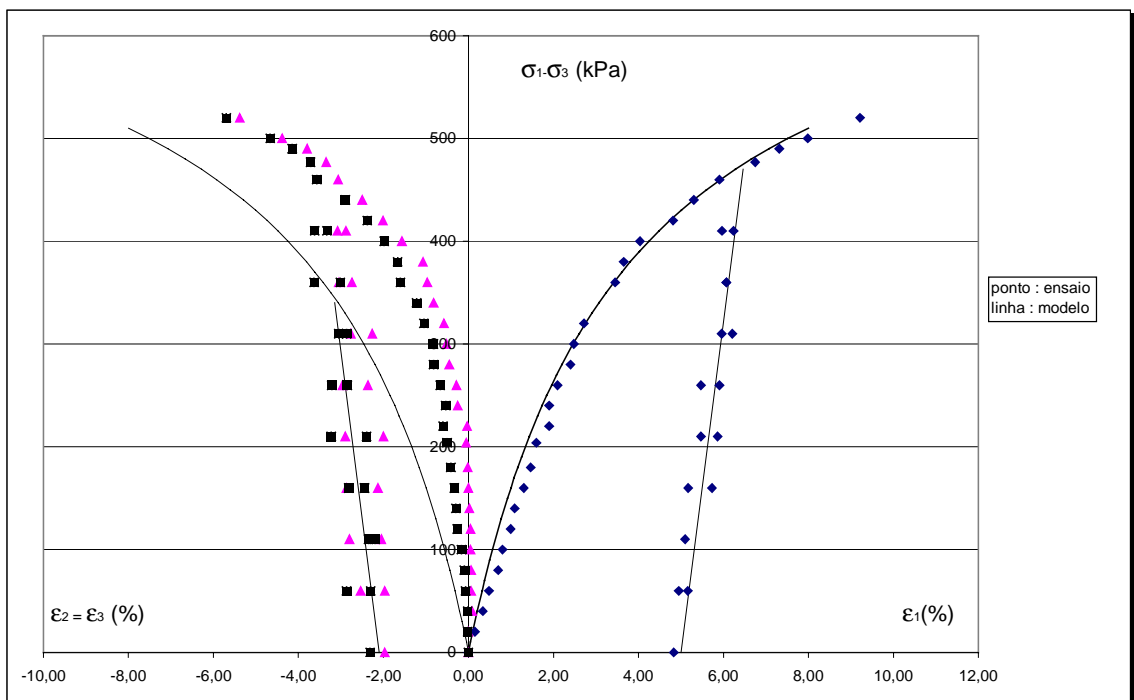


Figura 33 – Compressão triaxial (100kPa) x Hiperbólico

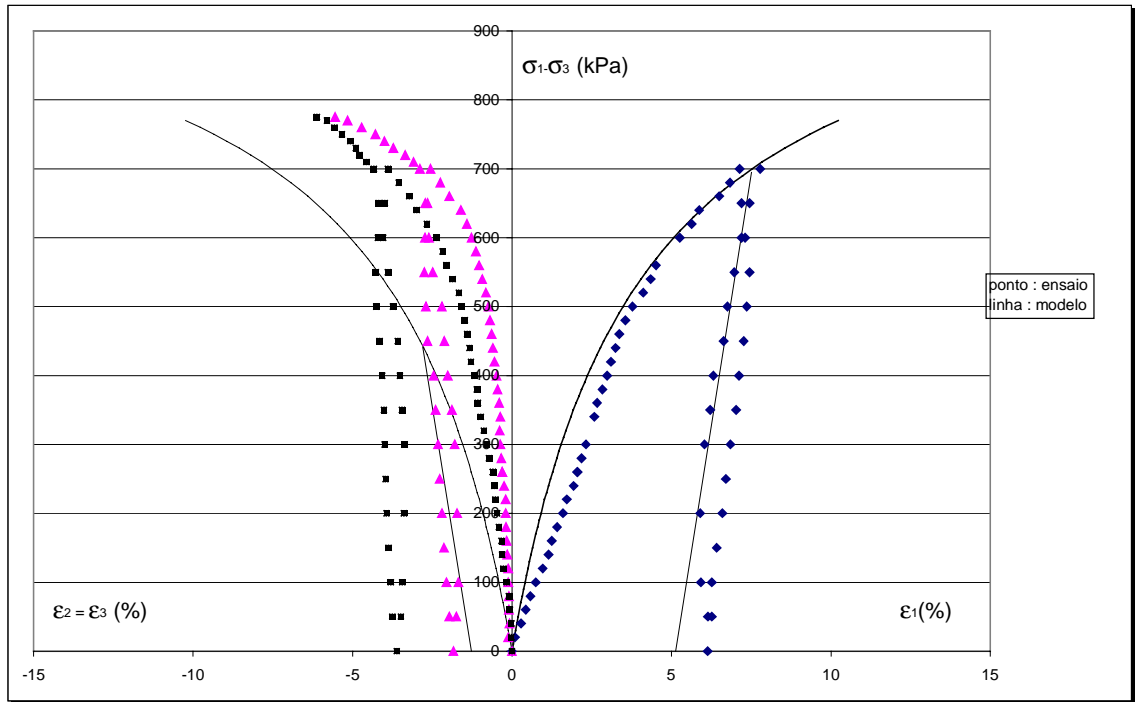


Figura 34 – Compressão triaxial (150kPa) x Hiperbólico

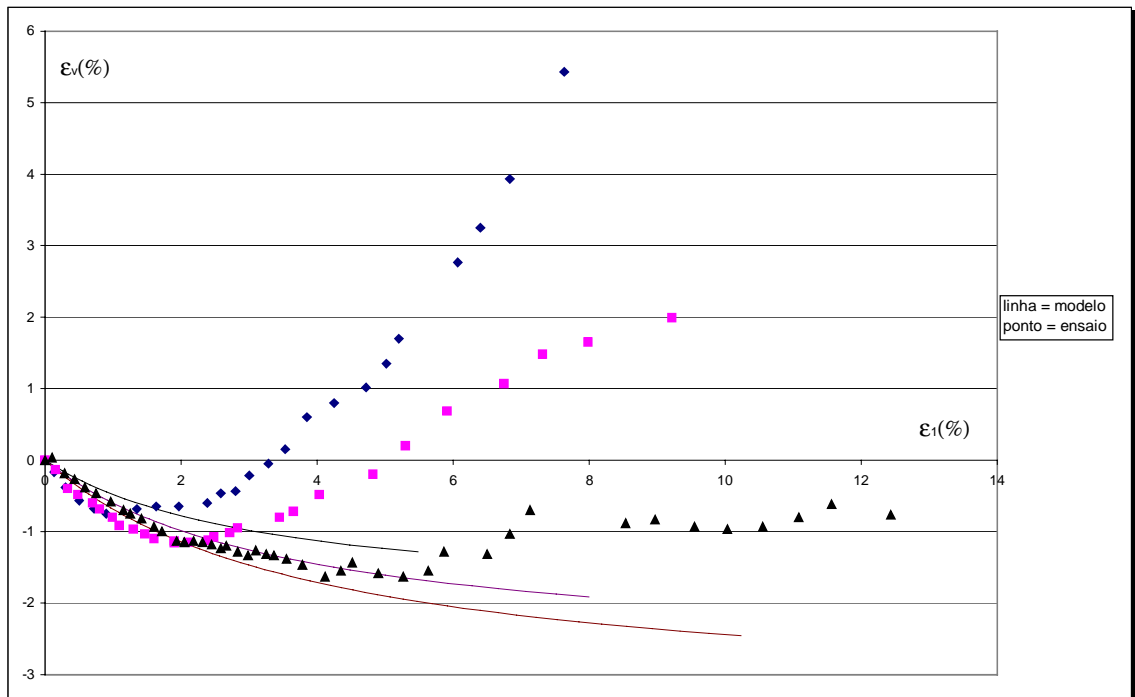
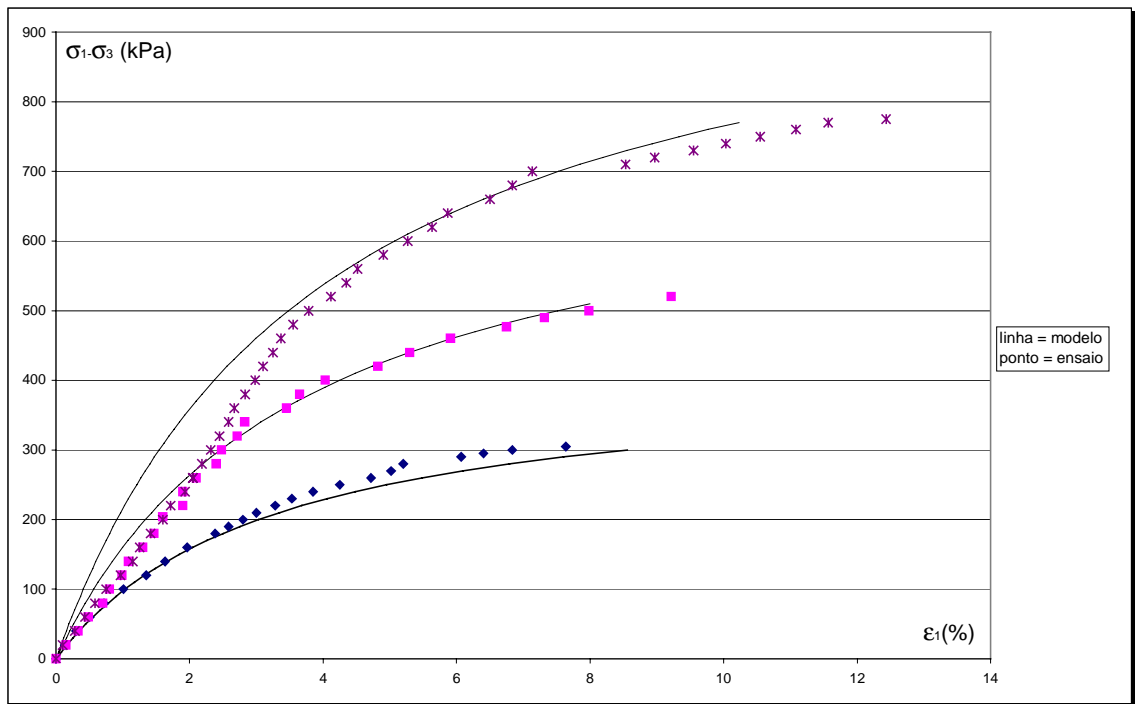


Figura 35 – Deformações Volumétricas x Hiperbólico

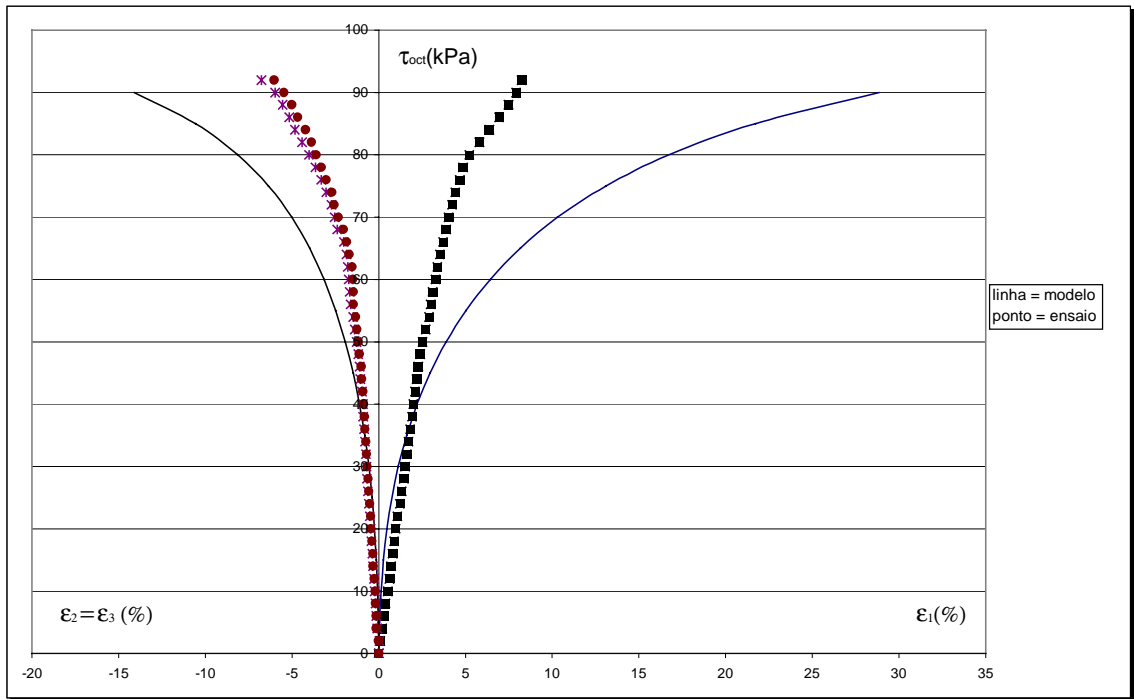


Figura 36 – Plano Octaédrico (0°) x Hiperbólico

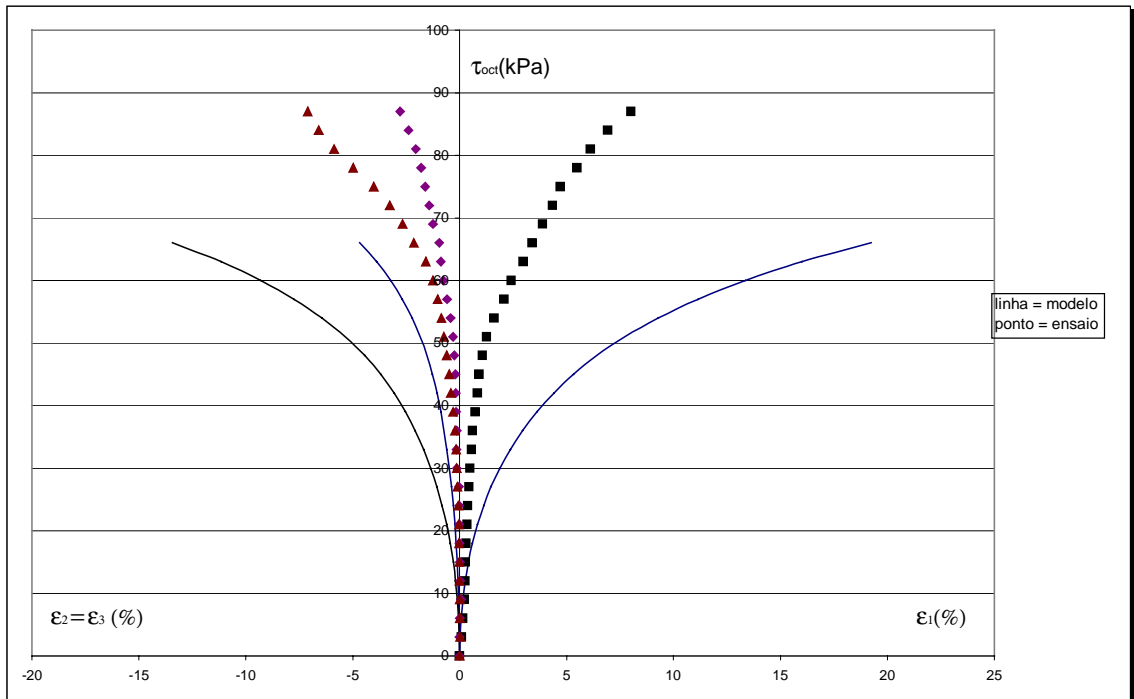


Figura 37 – Plano Octaédrico (15°) x Hiperbólico

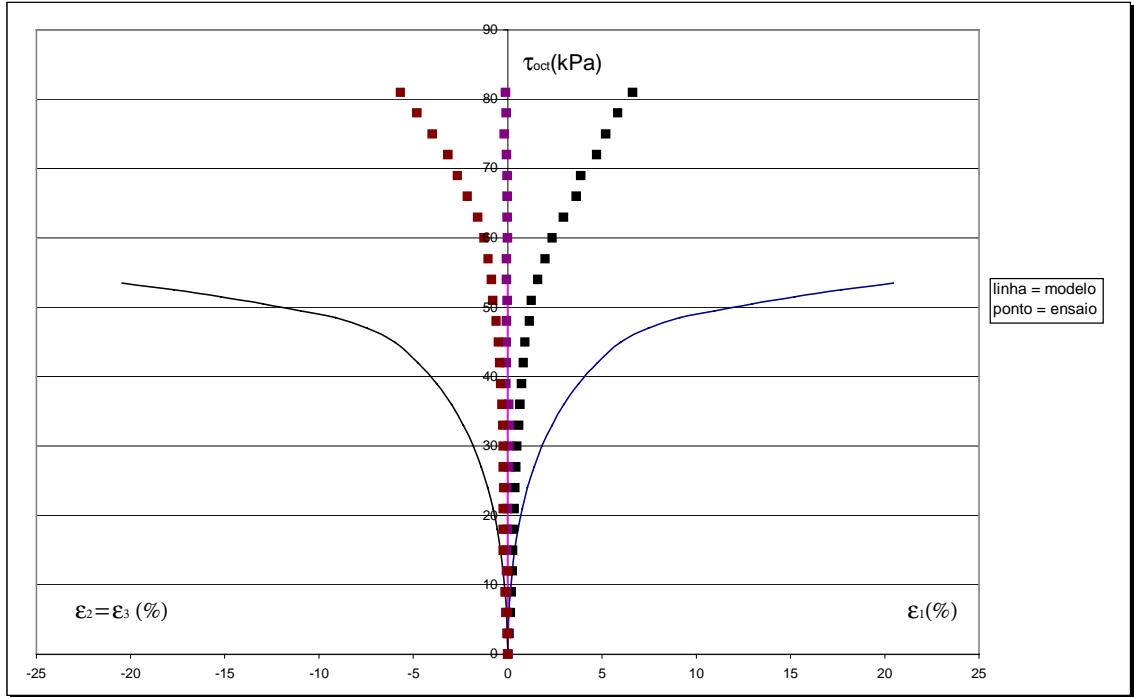


Figura 38 – Plano Octaédrico (30°) x Hiperbólico

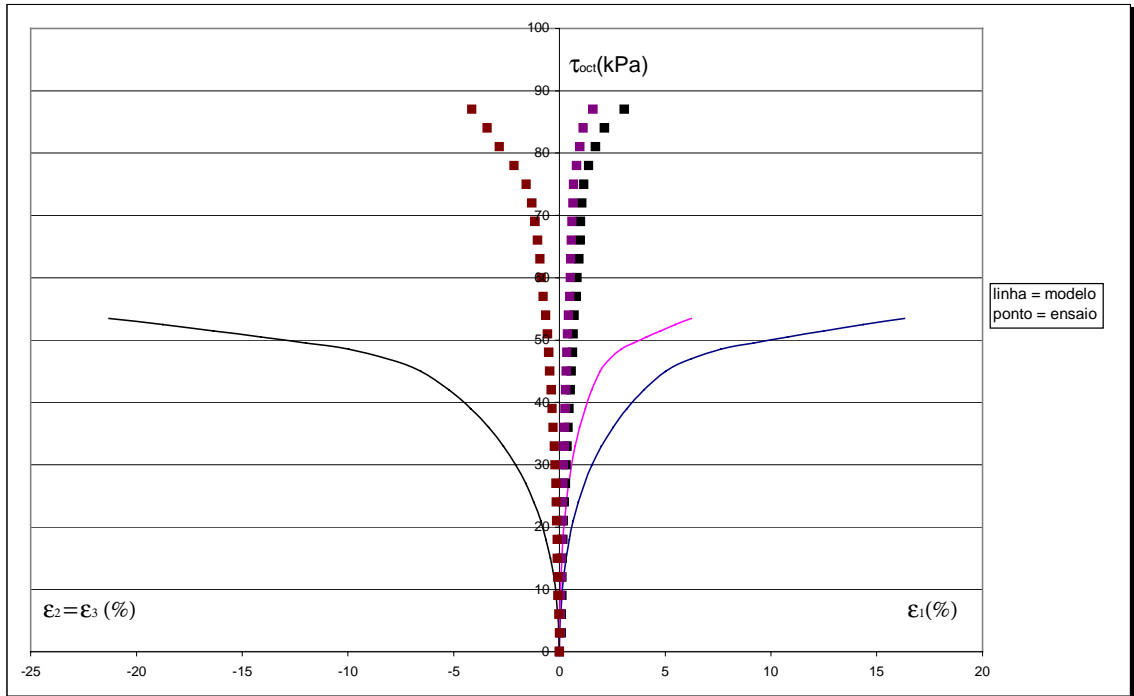


Figura 39 – Plano Octaédrico (45°) x Hiperbólico

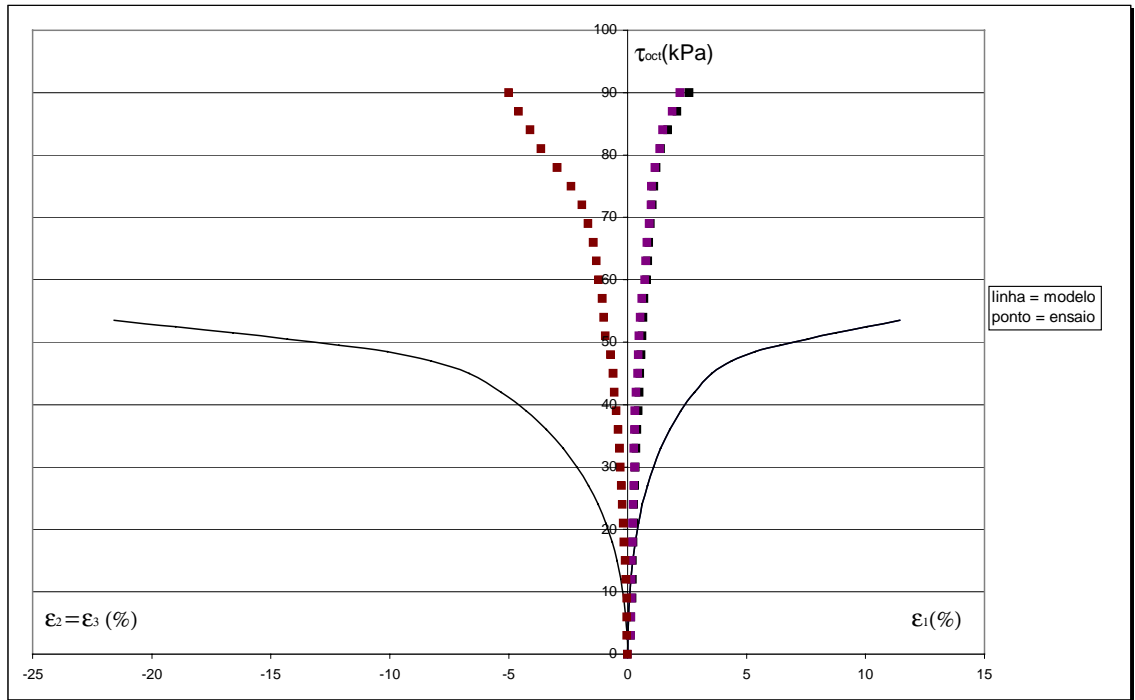


Figura 40 – Plano Octaédrico (60°) x Hiperbólico

5.2 – Cam-Clay Modificado

5.2.1 – Calibração

A partir dos valores de c e ϕ , calcula-se o parâmetro M , conforme descrito na equação (40) do item 4.2.2, tendo sido encontrado, o valor de 1,83.

Como se trata de um processo incremental, é necessário que se defina alguns valores iniciais para começar o processo, quais sejam: o índice de vazios inicial para cada ensaio, o valor da tensão de referência p_0 , e o valor do coeficiente de Poisson.

O índice de vazios inicial para cada ensaio foi obtido com o auxílio do ensaio de compressão hidrostática, tendo-se chegado aos seguintes valores para as tensões de confinamento de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa, respectivamente: 0,43; 0,41 e 0,39.

A tensão de referência para a reprodução de cada um dos ensaios foi adotada como a tensão de confinamento durante a consolidação, e o valor do coeficiente de Poisson foi adotado como 0,2; um valor típico da literatura.

Os parâmetros λ e κ são extraídos a partir da reta de compressão virgem, desenhando-se, em um gráfico, o índice de vazios inicial de cada ensaio contra o logaritmo natural da tensão de confinamento. A figura 41 ilustra tal procedimento.

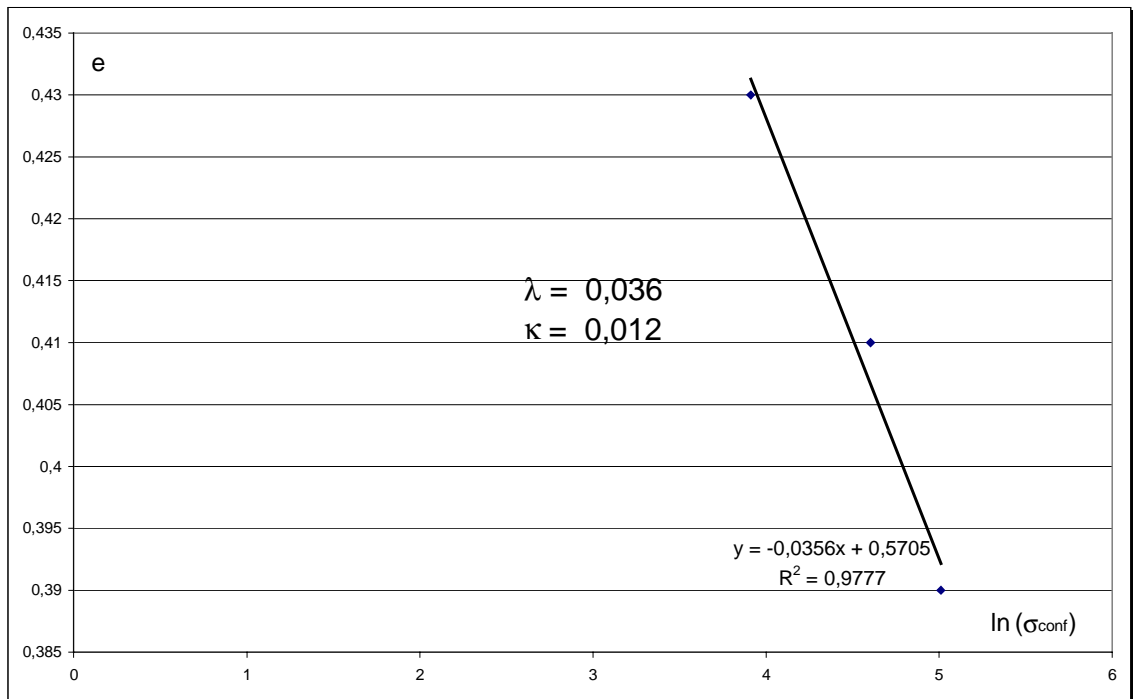


Figura 41 – Parâmetros λ e κ .

O parâmetro λ é definido como a inclinação da reta da Figura 41 (reta virgem), e o parâmetro κ é usualmente tomado com um terço de λ . Os valores encontrados foram, respectivamente, para λ e κ , 0,036 e 0,012.

No processo incremental, a cada etapa variam o módulo de cisalhamento (G), o módulo volumétrico (B), o índice de vazios (e) e a pressão de referência (p_0).

5.2.2. – Comparações

A seguir apresentam-se as comparações entre os ensaios realizados e as reproduções obtidas com o Cam-Clay Modificado utilizando-se os parâmetros determinados de acordo com o item 5.2.1. A Figura 42, apresenta a reprodução do ensaio de compressão hidrostática. As Figuras de 43 a 45 mostram as reproduções dos ensaios de compressão triaxial convencional. Na Figura 46 apresenta-se, em conjunto, os ensaios de compressão triaxial convencional, ilustrando-se também as deformações volumétricas obtidas em cada um dos ensaios. Nas Figuras 47 a 51 estão as reproduções obtidas para os ensaios no plano octaédrico.

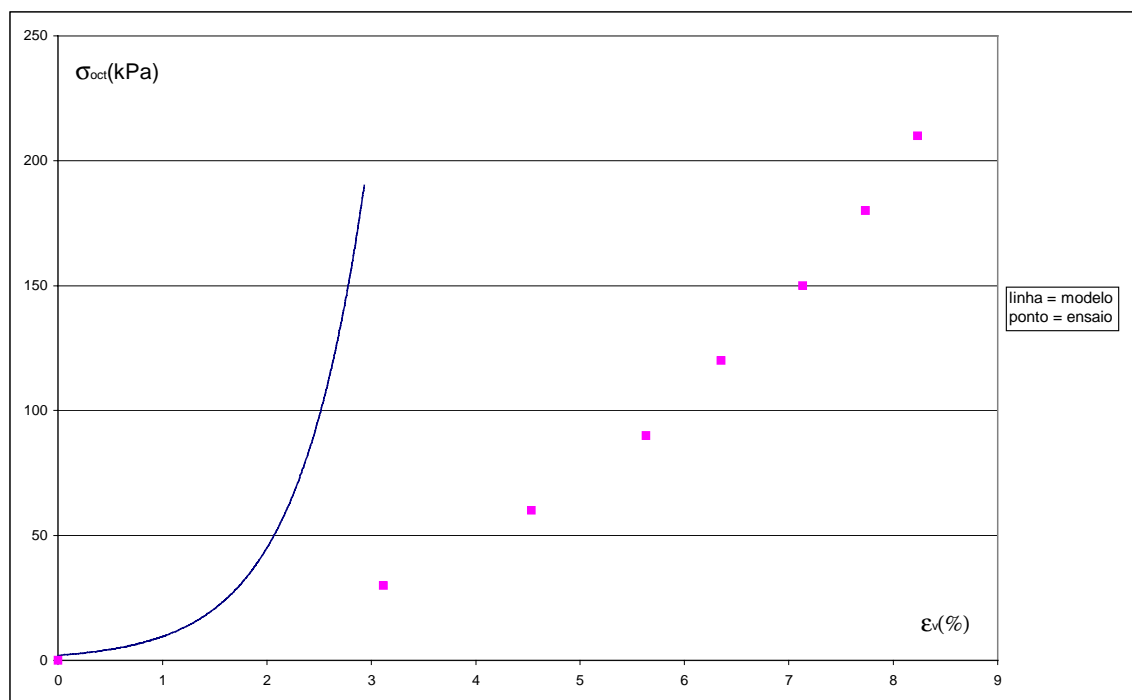


Figura 42 – Ensaio compressão hidrostática x Cam-Clay

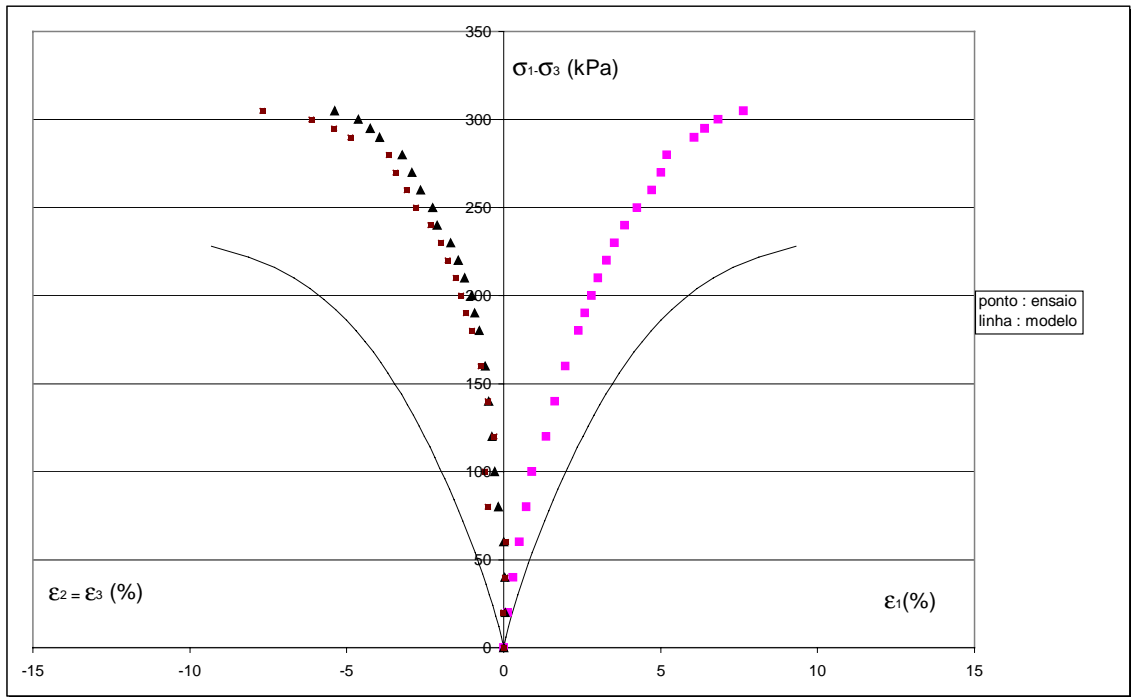


Figura 43 – Ensaio de compressão triaxial (50 kPa) x Cam-Clay

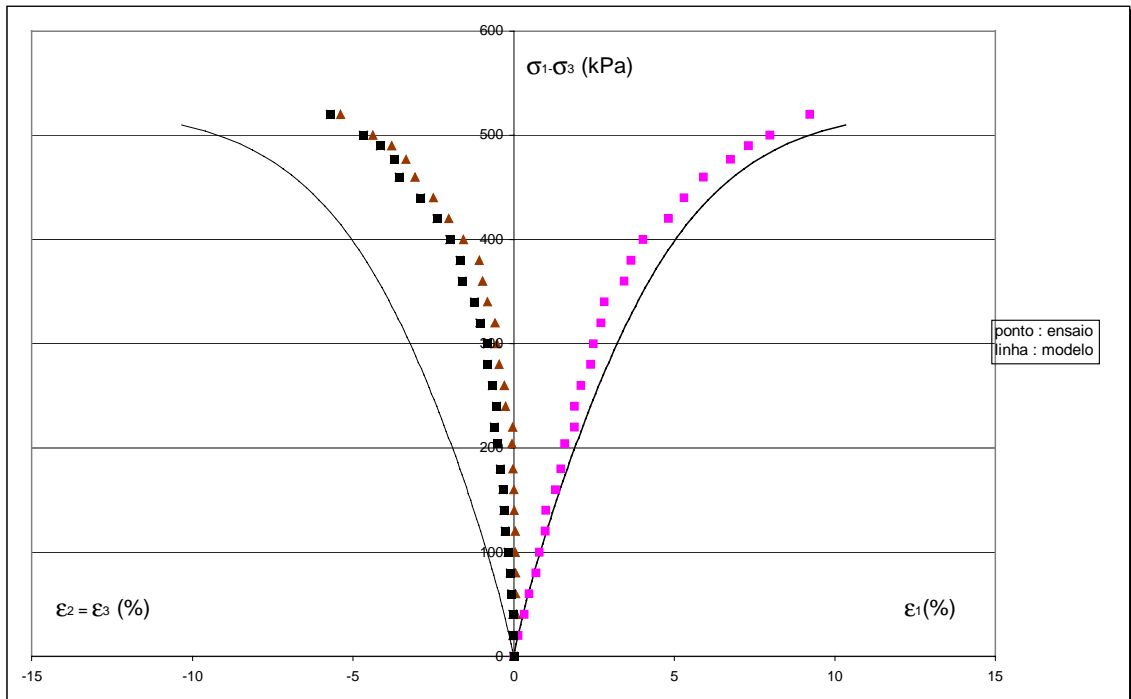


Figura 44 – Ensaio de compressão triaxial (100kPa) x Cam-Clay

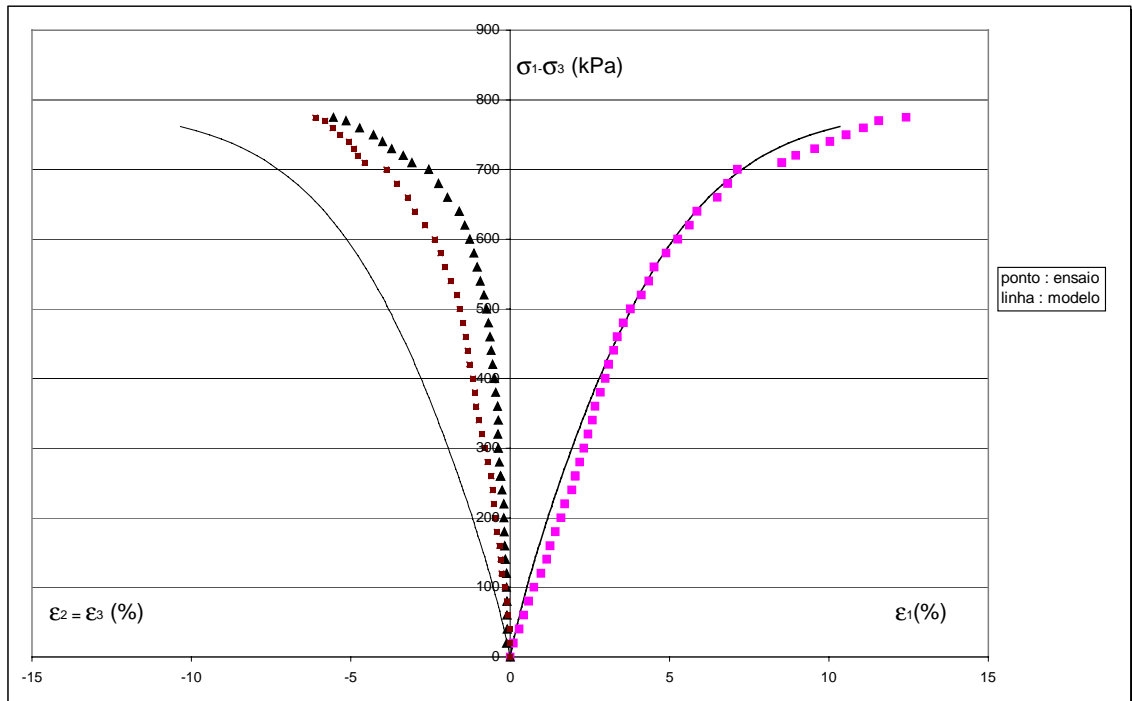


Figura 45 – Ensaio de compressão triaxial (150 kPa) x Cam-Clay

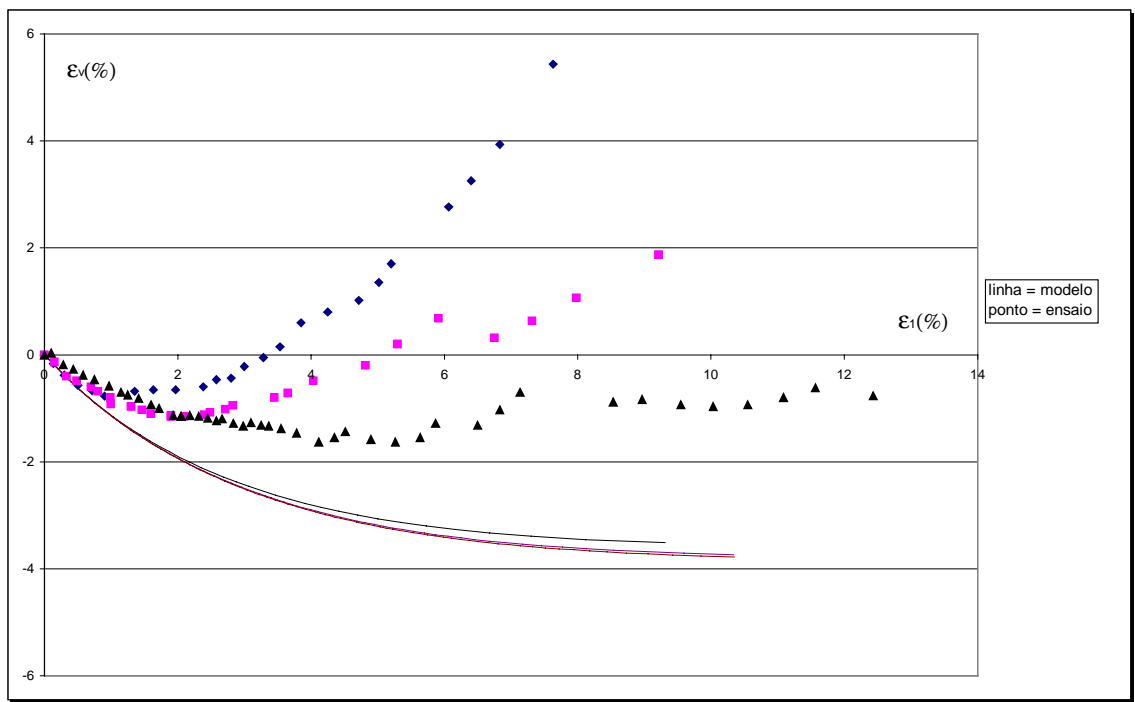
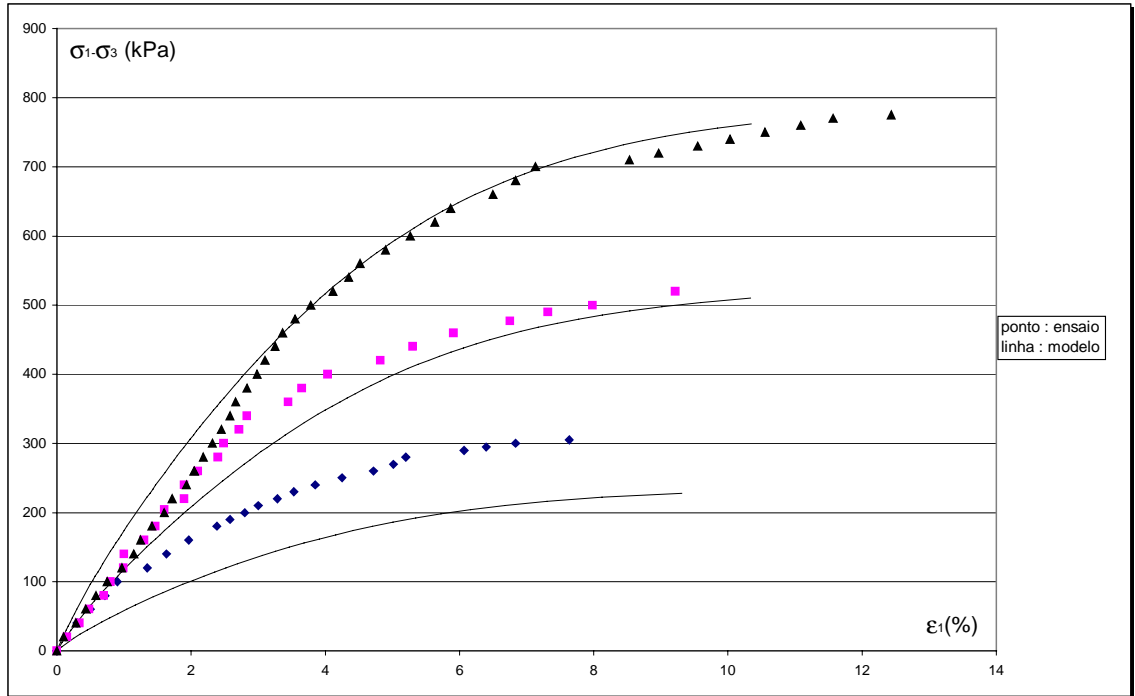


Figura 46 – Deformações Volumétricas x Cam-Clay

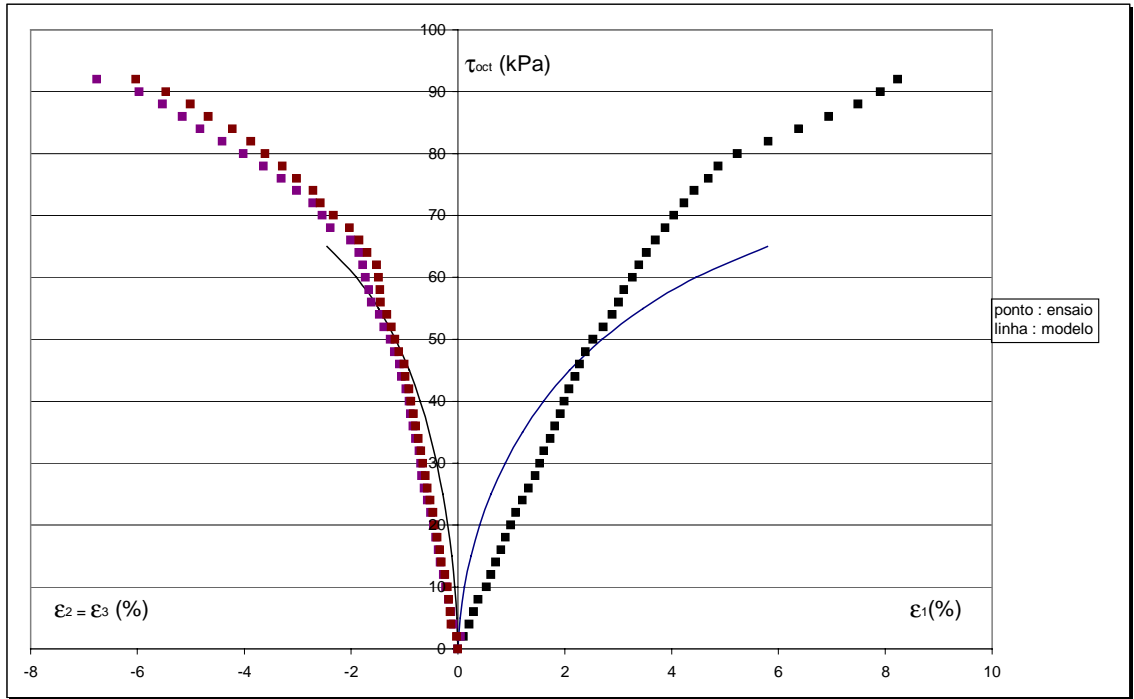


Figura 47 – Plano Octaédrico (0°) x Cam-Clay

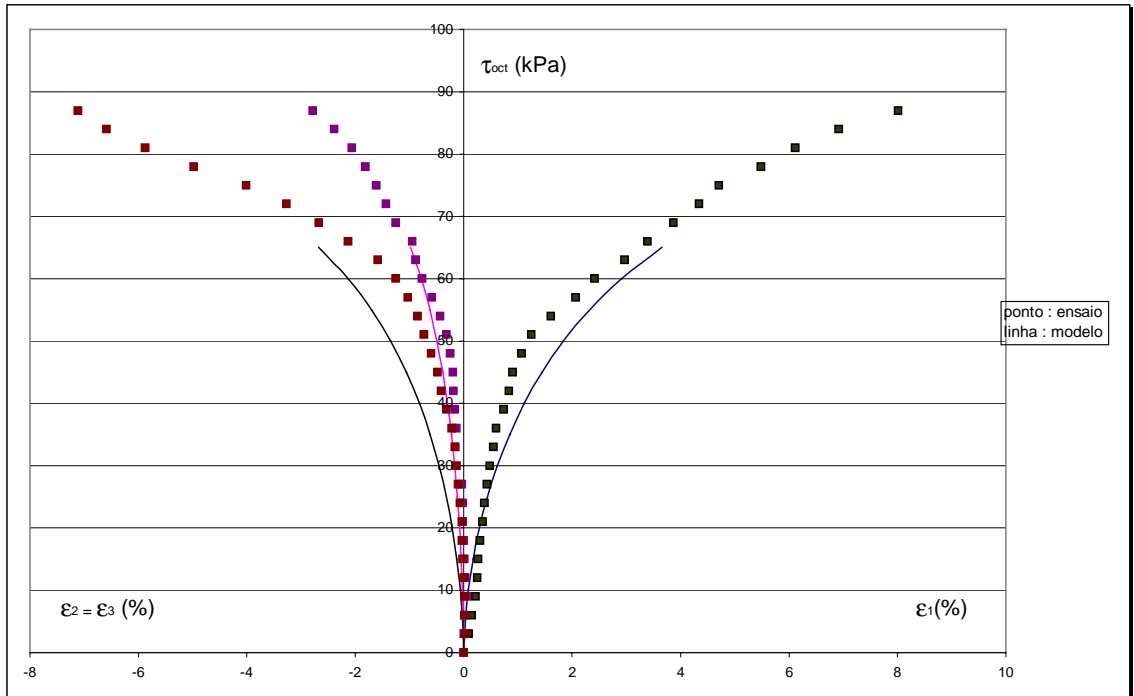


Figura 48 – Plano Octaédrico (15°) x Cam-Clay

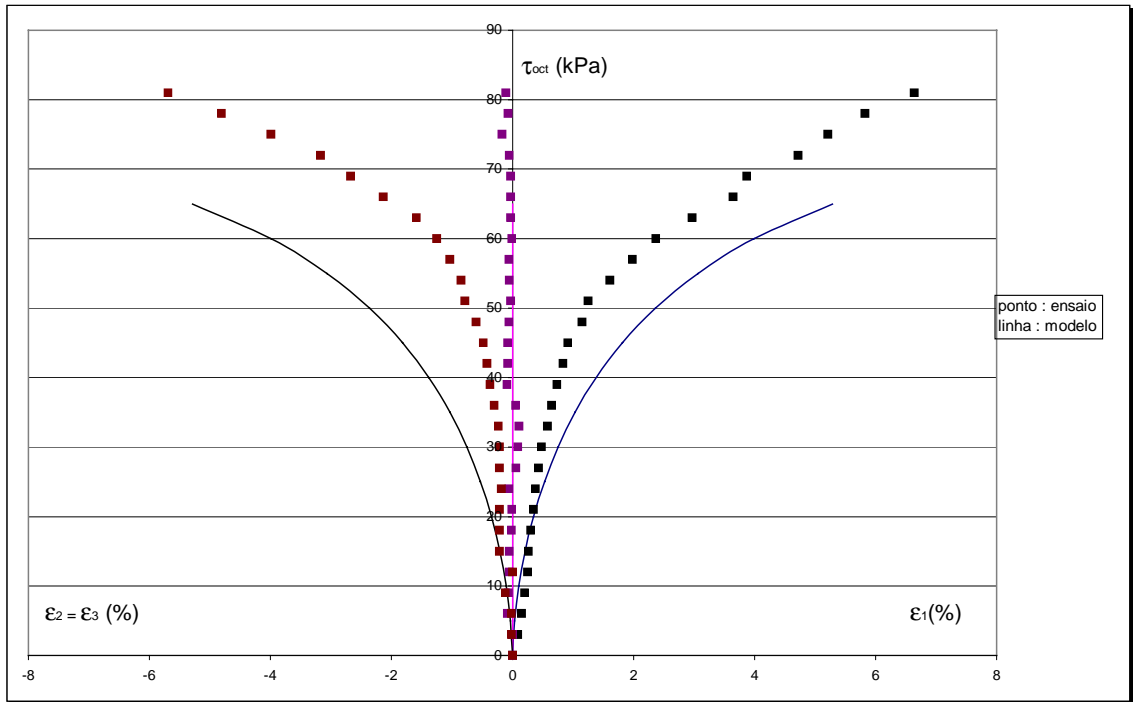


Figura 49 – Plano Octaédrico (30°) x Cam-Clay

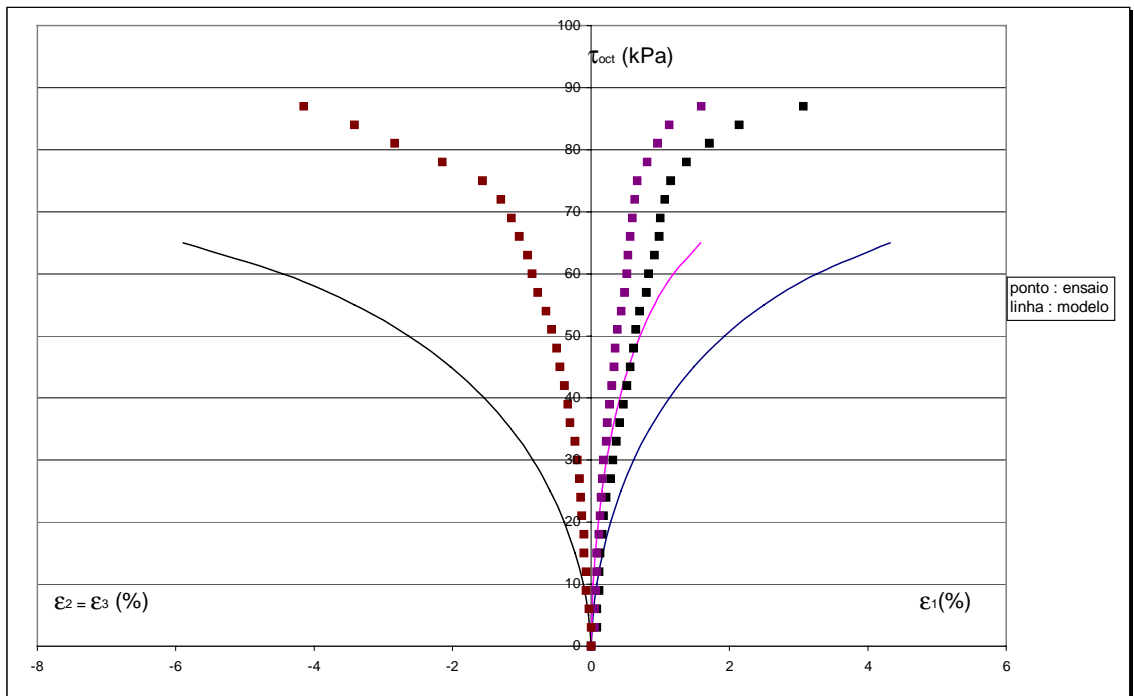


Figura 50 – Plano Octaédrico (45°) x Cam-Clay

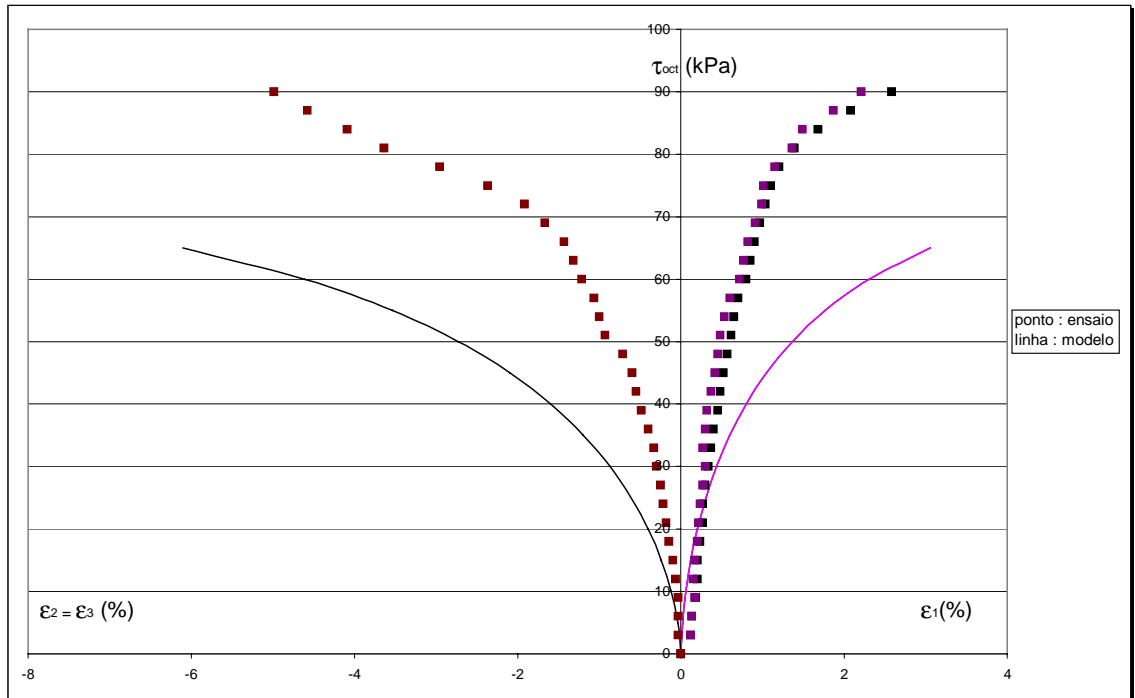


Figura 51 – Plano Octaédrico (60°) x Cam-Clay

5.3 – Modelo de Lade e Kim

5.3.1. – Calibração

Neste modelo são necessários ensaios de compressão isotrópica e de compressão triaxial convencional para a determinação dos parâmetros.

Os valores de K_{ur} e n são obtidos através da melhor reta de ajuste do gráfico dos pontos $\log\left(\frac{E_{ur}}{p_a}\right)$ contra $\log\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)$. K_{ur} é o intercepto da reta com o eixo vertical e n a inclinação desta reta em relação ao eixo horizontal.

Tomando-se as tensões correspondentes aos pontos de ruptura nos ensaios triaxiais e desenhando-se em um gráfico $\log\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right)$ contra $\log\left(\frac{p}{I_1}\right)$ obtém-se m como a inclinação da reta de ajuste dos pontos e η_1 pelo intercepto desta reta com o eixo vertical.

Os parâmetros de endurecimento, p e c , são obtidos a partir do gráfico $\log\left(\frac{I_1}{p_a}\right)$ contra $\log\left(\frac{W_p}{p_a}\right)$. A inclinação da reta de ajuste dos pontos corresponde a p e o intercepto desta com o eixo vertical corresponde a c .

Os autores propõem a seguinte relação para a obtenção do parâmetro ψ_1 :

$$\Psi_1 = 0,00155m^{-1,27} \quad (59)$$

De acordo com De Melo e Azevedo (1995), calculado ψ_1 , os parâmetros ψ_2 e μ podem ser obtidos a partir do procedimento seguinte.

Expressando a razão de deformação incremental plástica como:

$$\nu_p = -\frac{d\epsilon_3^p}{d\epsilon_1^p} \quad (60)$$

e considerando os valores dos incrementos de deformação plástica dados pela lei de fluxo para uma condição triaxial ($\sigma_2 = \sigma_3$), obtém-se a seguinte equação:

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \xi_x - \Psi_2 \quad (61)$$

em que,

$$\xi_x = \frac{1}{1+\nu_p} \left\{ \frac{I_1^3}{I_2^2} (\sigma_1 + \sigma_3 + 2\nu_p \sigma_3) + \Psi_1 \frac{I_1^4}{I_3^2} (\sigma_1 \sigma_3 + \nu_p \sigma_3^2) \right\} - 3\Psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} + 2\frac{I_1^2}{I_2} \quad (62)$$

e,

$$\xi_y = \Psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \quad (63)$$

Uma vez que já tenham sido calculados os parâmetros elásticos, K_{ur} e n , e de ruptura, m e η_1 , é possível calcular ν_p , para cada nível de tensão e conseqüentemente ξ_x e ξ_y . Os parâmetros μ e Ψ_2 são obtidos pela reta de melhor ajuste dos pontos obtidos no espaço ξ_x e ξ_y , através do coeficiente angular da mesma, que é igual ao inverso do primeiro parâmetro e do intercepto desta com o eixo vertical, que fornece o segundo parâmetro.

Importante observar, conforme De Melo e Azevedo (1995), que os valores produzidos podem não satisfazer ao princípio da irreversibilidade, o que não é válido. Para tanto, a seguinte relação deve ser satisfeita:

$$\begin{aligned} \mu > 0 \\ \Psi_2 > -(27 \cdot \Psi_1 + 3) \end{aligned} \quad (64)$$

Finalmente, os parâmetros de plastificação h e q , são dados como se mostra a seguir.

Considerando o trabalho plástico e a superfície de plastificação, conforme demonstrado em De Melo e Azevedo(1995), o parâmetro h assume a seguinte expressão:

$$h = \frac{\log \left(\frac{\Psi_1 \frac{I_{3B}^3 - I_{1B}^2}{I_{3B} I_{2B}}}{27\Psi_1 + 3} \right) e}{\log \frac{I_A}{I_B}} \quad (65)$$

Em que A e B são dois pontos considerados em uma mesma superfície de plastificação. Mais precisamente A pode ser tomado no eixo hidrostático ($q = 0$) e B na envoltória de ruptura ($q = 1$).

Como o valor de h não varia muito com o nível de tensão, costuma-se utilizar um valor médio de h como se fez com o parâmetro R_f no caso do modelo hiperbólico.

O valor de q varia com o nível de tensão S , definido como:

$$S = \frac{1}{\eta_1} \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^m \quad (66)$$

O valor de S varia de 0 no eixo hidrostático a 1 na ruptura. Utilizando-se a equação da função de plastificação pode-se escrever:

$$q = \ln \frac{\left(\frac{W_p}{Dp_a} \right)^{1/p}}{\left(\Psi_1 \frac{I_1^3 - I_1^2}{I_3 - I_2} \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^h} \quad (67)$$

A região de interesse é aquela compreendida onde $0 \leq q \leq 1$, Com isso a relação entre q e S pode ser escrita como uma relação hiperbólica:

$$S = \frac{q}{\alpha + \beta q} \quad (68)$$

Lade e Kim (1988a) sugerem que o melhor valor de q é obtido quando $S = 0,80$. Considerando ainda que a curva da equação (68) passa por $q = 1, S = 1$, chega-se a:

$$\alpha = 0,25 \frac{q_{80}}{1 - q_{80}} \quad (69)$$

Conhecido o valor de α , q pode ser obtido através da equação (70), que por sua vez, advém da equação (68), quando se substitui o valor de α :

$$q = \frac{\alpha S}{1 - (1 - \alpha)S} \quad (70)$$

Como a determinação dos parâmetros elásticos se faz de forma análoga ao que é feito no modelo hiperbólico, os mesmos valores foram adotados, ou seja: $K_{ur} = 319,09$, e $n = 0,683$.

Isto feito, parte-se para a determinação dos parâmetros de ruptura: m e η_1 , obtidos a partir do gráfico da Figura 52, como a

inclinação e o intercepto com o eixo vertical da reta de ajuste, respectivamente.

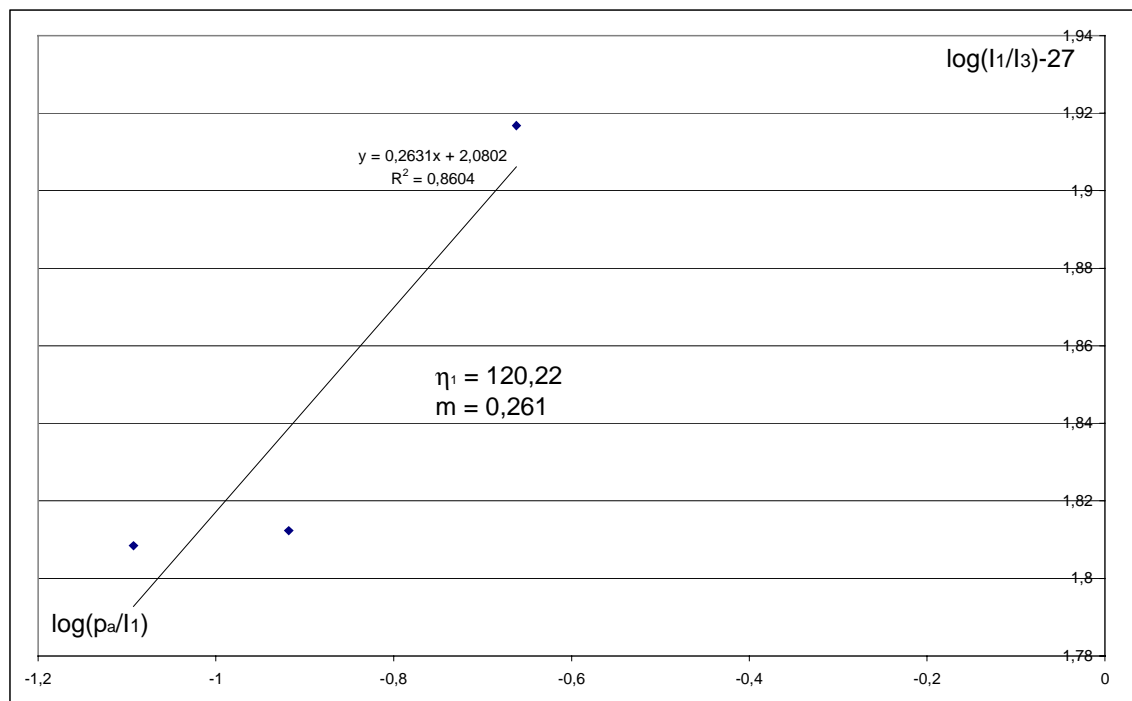


Figura 52 – Parâmetros de ruptura

Os valores obtidos correspondem a 0,261 para m e 120,22 para η_1 .

A seguir determinam-se os parâmetros de endurecimento c e p , obtidos, respectivamente, pelo intercepto e inclinação da reta de ajuste mostrada no gráfico da Figura 53.

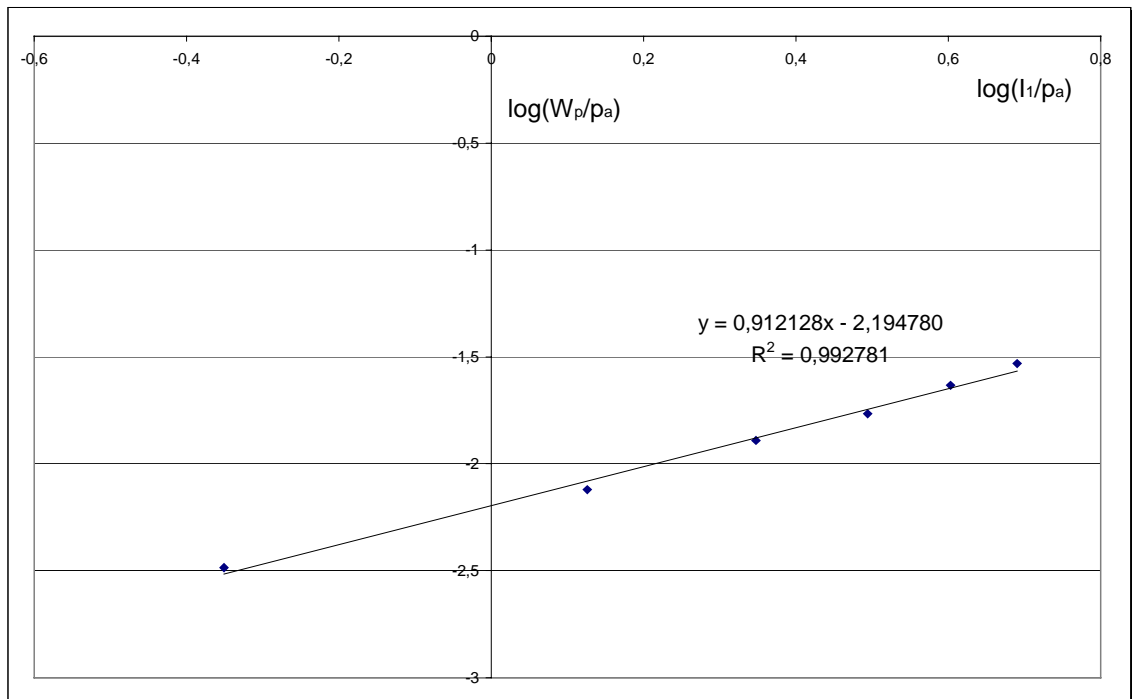


Figura 53 – Parâmetros c e p

Determinou-se para c, 0,0064, e para p, 0,912. Os parâmetros do potencial plástico, Ψ_2 e μ , são dados, respectivamente, pelo intercepto da reta de ajuste dos pontos do gráfico da figura 54 com o eixo vertical e pelo inverso de sua inclinação.

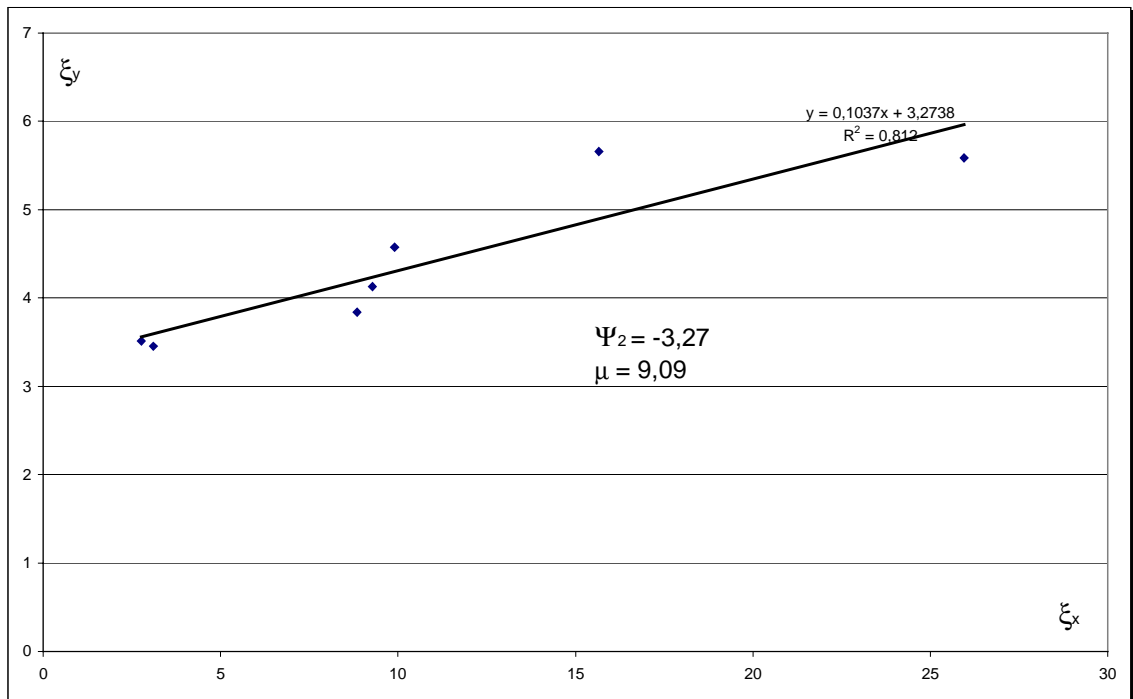


Figura 54 – Parâmetros do potencial plástico

Desse forma tem-se para Ψ_2 -3,27 e para μ 9,09. Os parâmetros de plastificação h e α , foram calculados como 0,817 e 0,706, respectivamente, sendo estes parâmetros determinados conforme o item 4.3.3. O gráfico da figura 55 ilustra este procedimento.

Na Tabela VIII, faz-se um resumo dos parâmetros encontrados para o modelo de Lade e Kim.

Tabela VIII – Parâmetros obtidos para o modelo

Parâmetros	Valores
ν	0,2
K_{ur}	319,09
n	0,68
m	0,261
η_1	120,22
c	00064
p	0,912
Ψ_2	-3,27
μ	9,09
α	0,706
$h_{\text{médio}}$	0,817

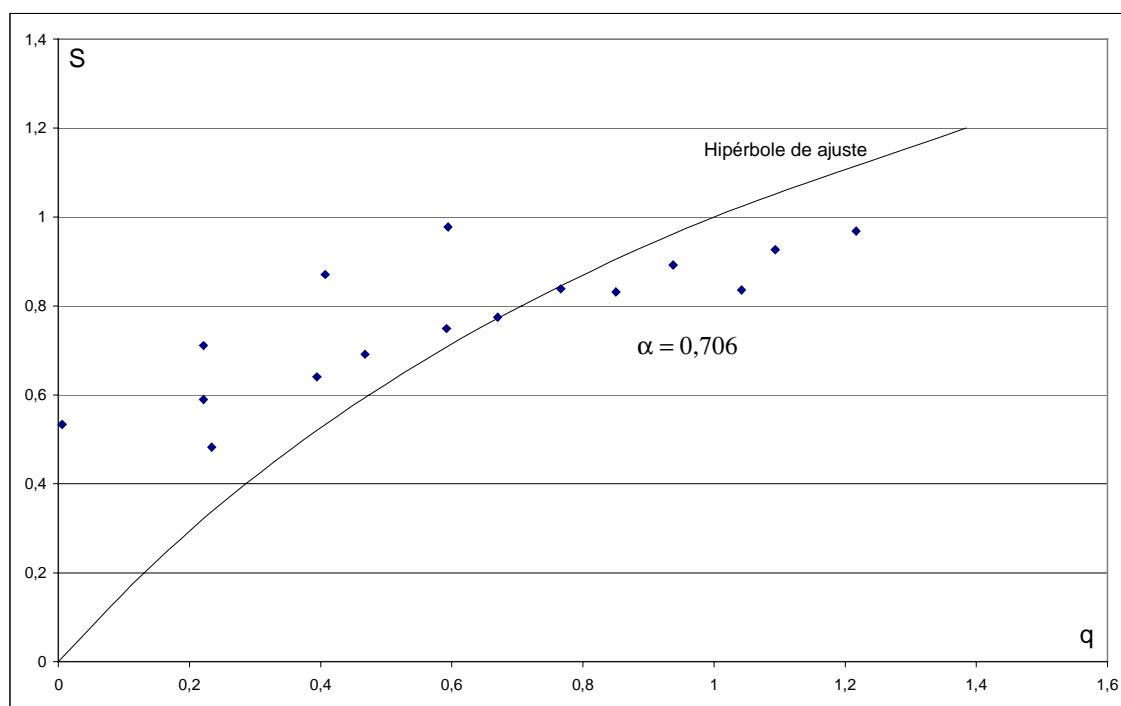


Figura 55 – Parâmetro α

5.3.2. – Comparações

A seguir apresentam-se as comparações entre os ensaios realizados e as reproduções obtidas com o modelo de Lade e Kim utilizando-se os parâmetros determinados de acordo com o item 5.3.1. A figura 56, apresenta a reprodução do ensaio de compressão hidrostática. As figuras de 57 a 59 mostram as reproduções dos ensaios de compressão triaxial convencional.

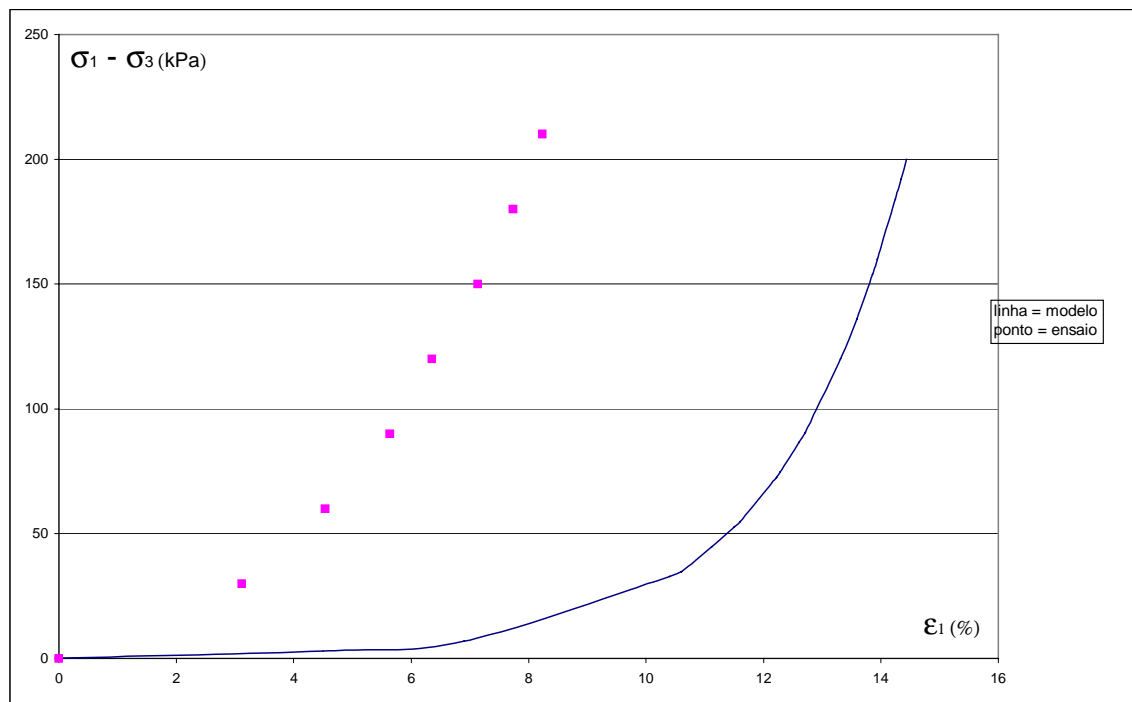


Figura 56 – Ensaio de compressão hidrostática x Lade e Kim

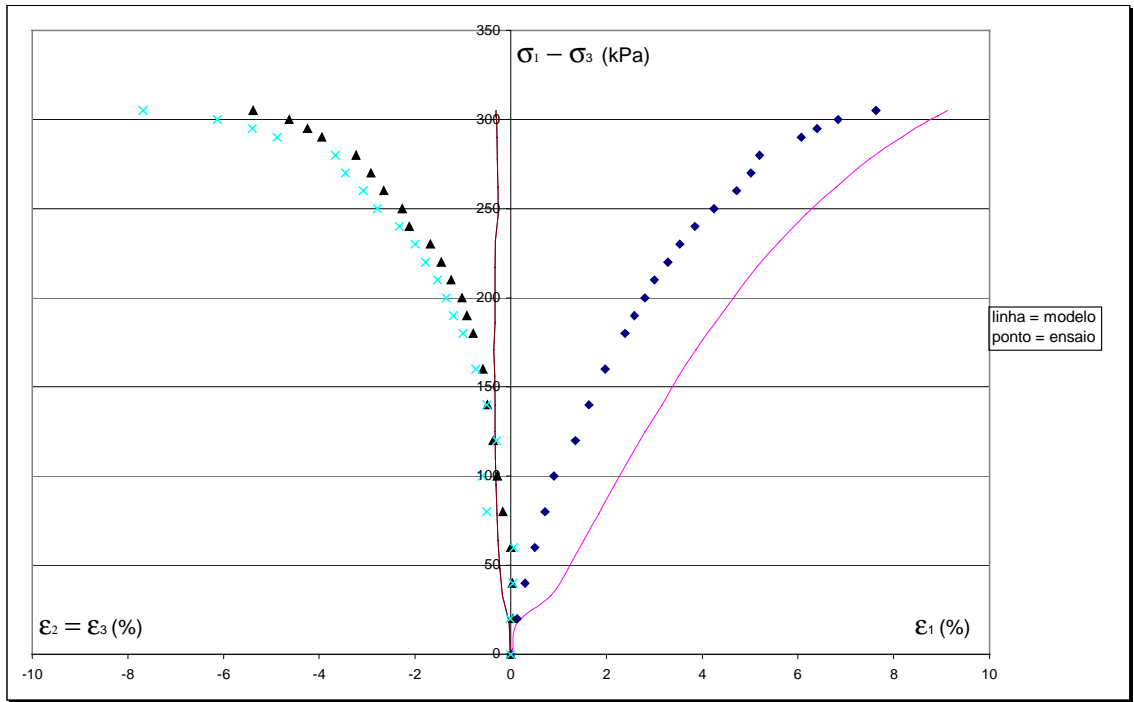


Figura 57 – Ensaio de compressão triaxial (50 kPa) x Lade e Kim

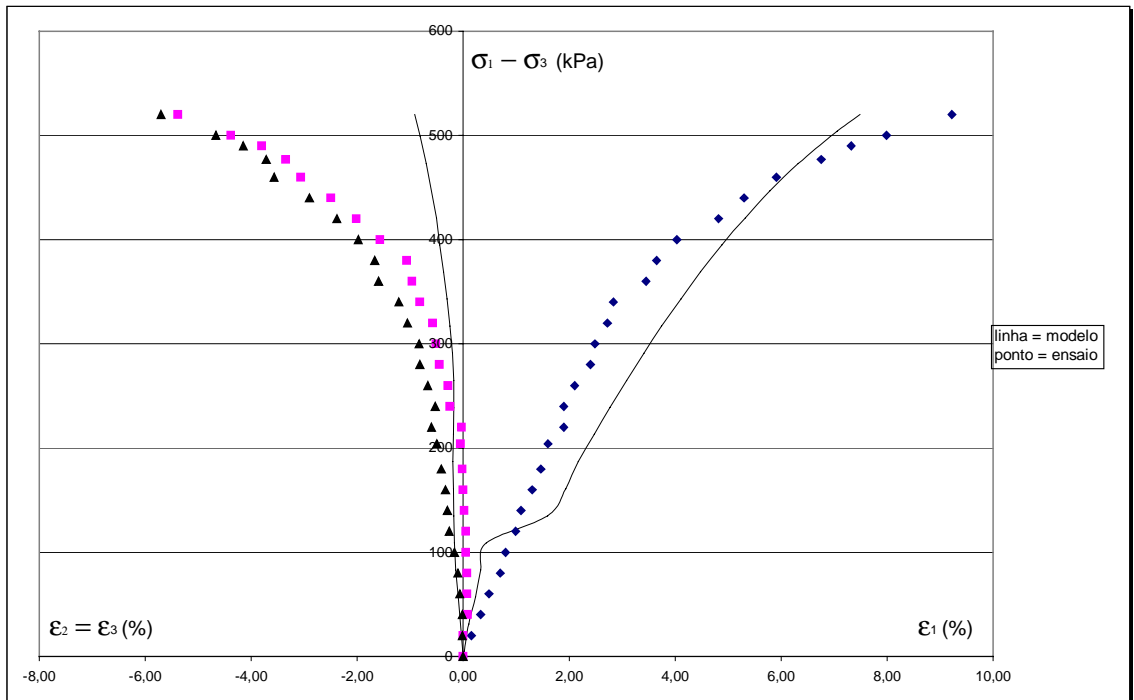


Figura 58 – Ensaio de compressão triaxial (100 kPa) x Lade e Kim

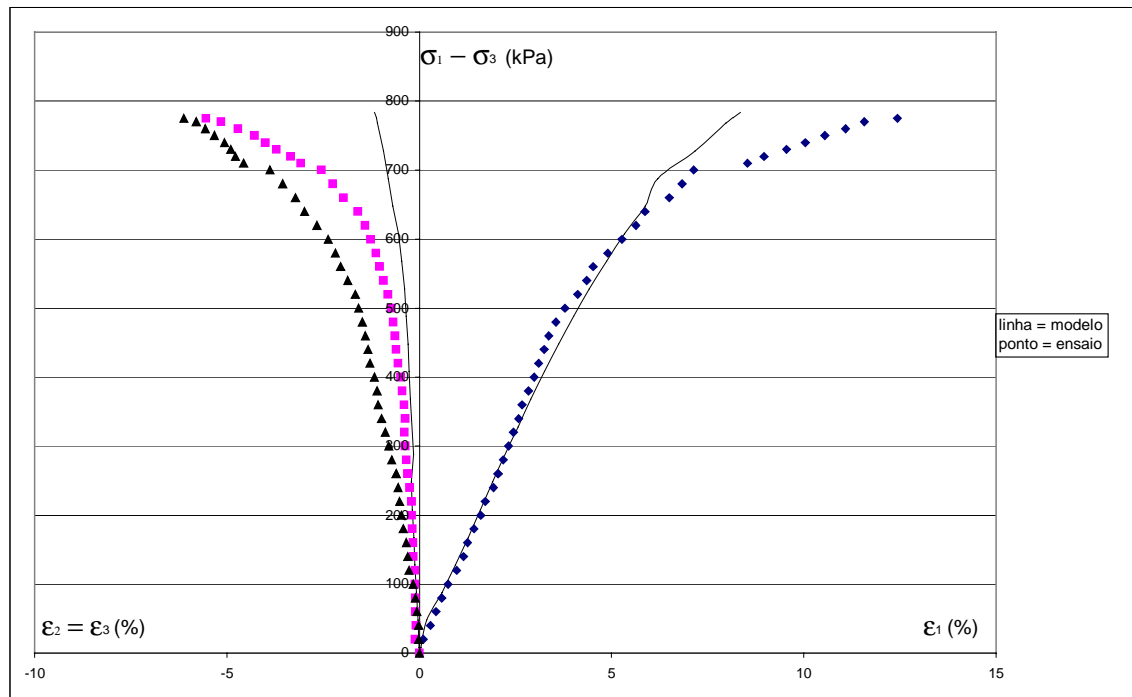


Figura 59 – Ensaio de compressão triaxial (150 kPa) x Lade e Kim

Como pode-se observar, as reproduções obtidas com os parâmetros determinados no item 5.3.1 não ficaram nada satisfatórias. De Melo e Azevedo (1995) chamam a atenção para a dificuldade em se calibrar o modelo e para reproduções pobres, obtidas com o mesmo, como é o caso de Iturri (1991) e Bagio (1995). Em seu trabalho, De Melo e Azevedo chegam a utilizar um algoritmo de otimização dos parâmetros no sentido de melhorar a resposta do mesmo. Com o mesmo propósito, neste trabalho, adota-se um procedimento de otimização dos parâmetros desenvolvido por Velloso (2000).

A otimização consistiu, basicamente, em se usar os valores dos parâmetros elásticos (K_{ur} e n) e de ruptura (m e η_1) obtidos anteriormente, e depois determinar os demais parâmetros de forma a minimizar a diferença entre os resultados obtidos com o modelo e os resultados experimentais dos três ensaios CID. Dessa forma chega-se a um novo conjunto de parâmetros, conforme demonstra a Tabela IX.

Tabela IX – Parâmetros obtidos por otimização

Parâmetros	Valores
ν	0,2
K_{ur}	348,0
n	0,73
m	0,25
η_1	115,0
c	0,0003
p	1,39
Ψ_2	-2,98
μ	2,07
α	0,29
h	1,39

Com este novo conjunto de parâmetros obteve-se reproduções mais satisfatórias para os ensaios realizados. A Figura 60 apresenta a reprodução do ensaio de compressão hidrostática. As Figuras 61 a 63 apresentam os ensaios de compressão triaxial convencional. Na figura 64, observa-se as reproduções das deformações volumétricas. Nas figuras 65 a 69 apresenta-se as reproduções dos ensaios no plano octaédrico.

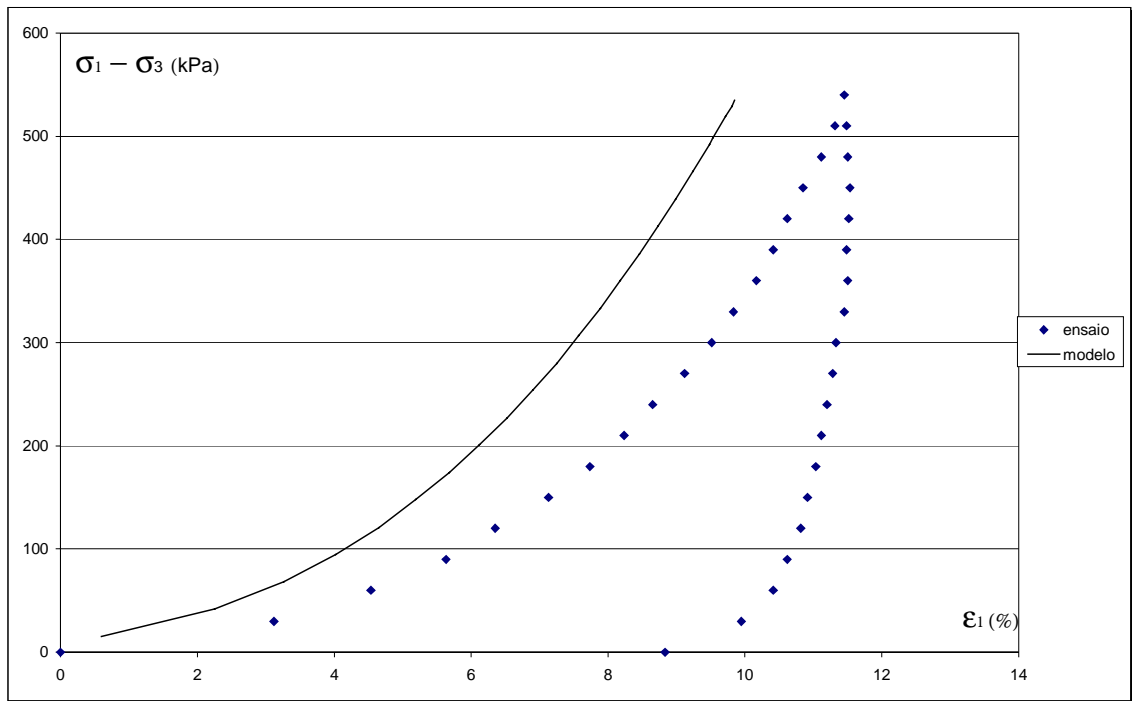


Figura 60 – Compressão Hidrostática x Lade e Kim

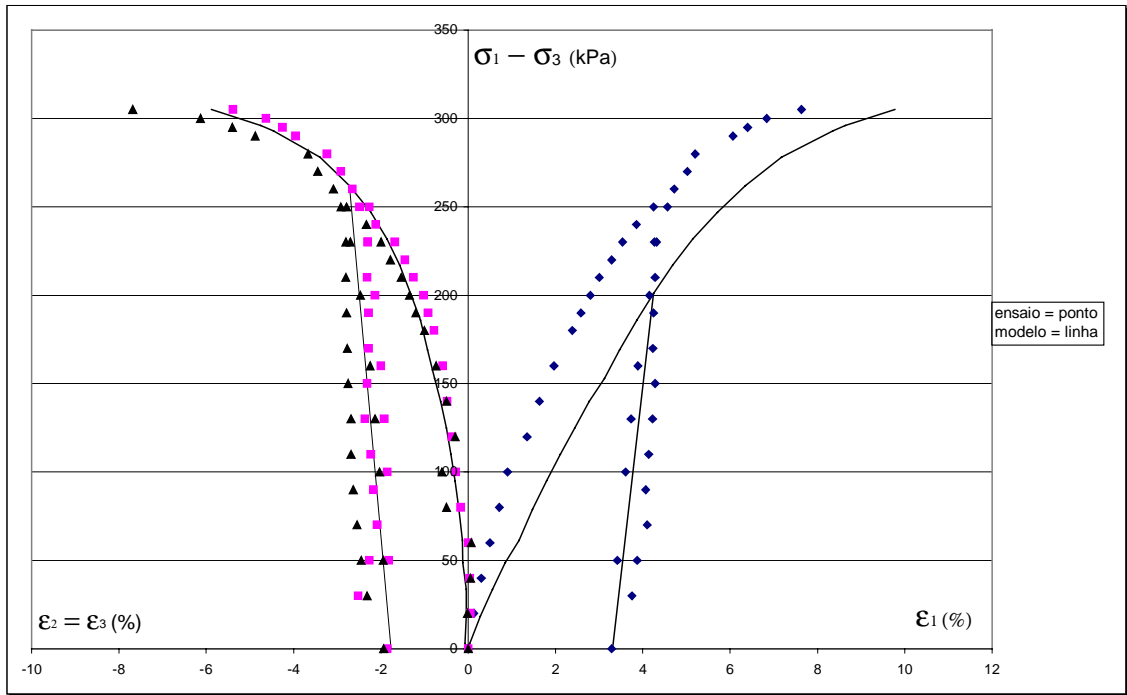


Figura 61 – Compressão triaxial (50 kPa) x Lade Kim

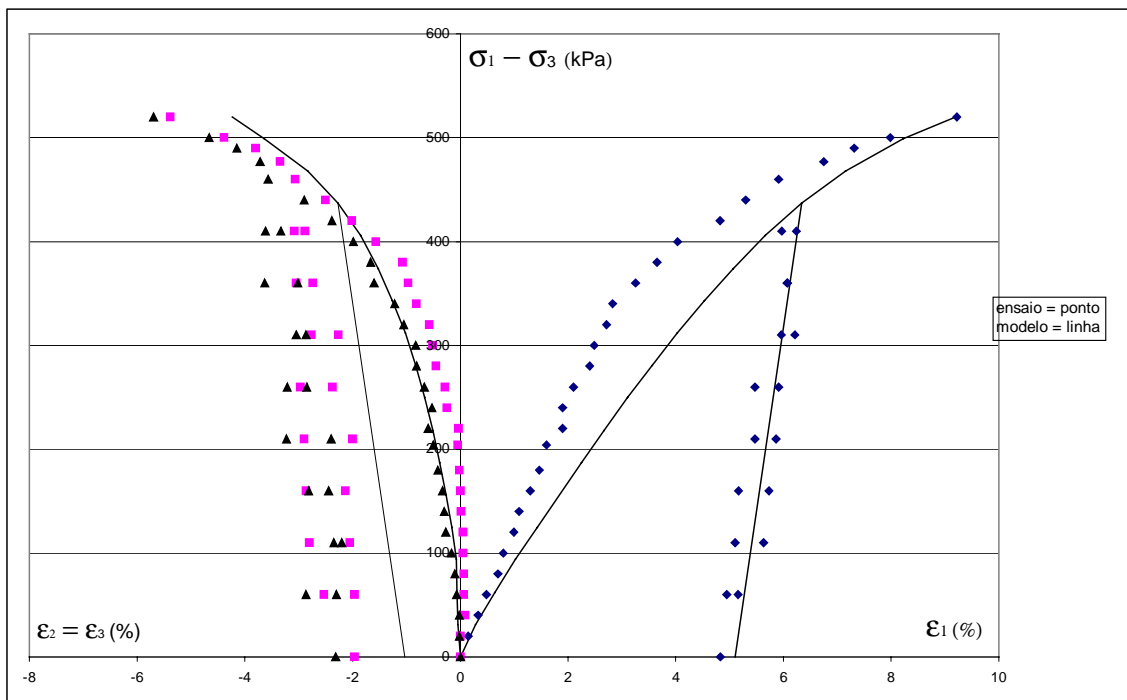


Figura 62 – Compressão triaxial (100 kPa) x xLade e Kim

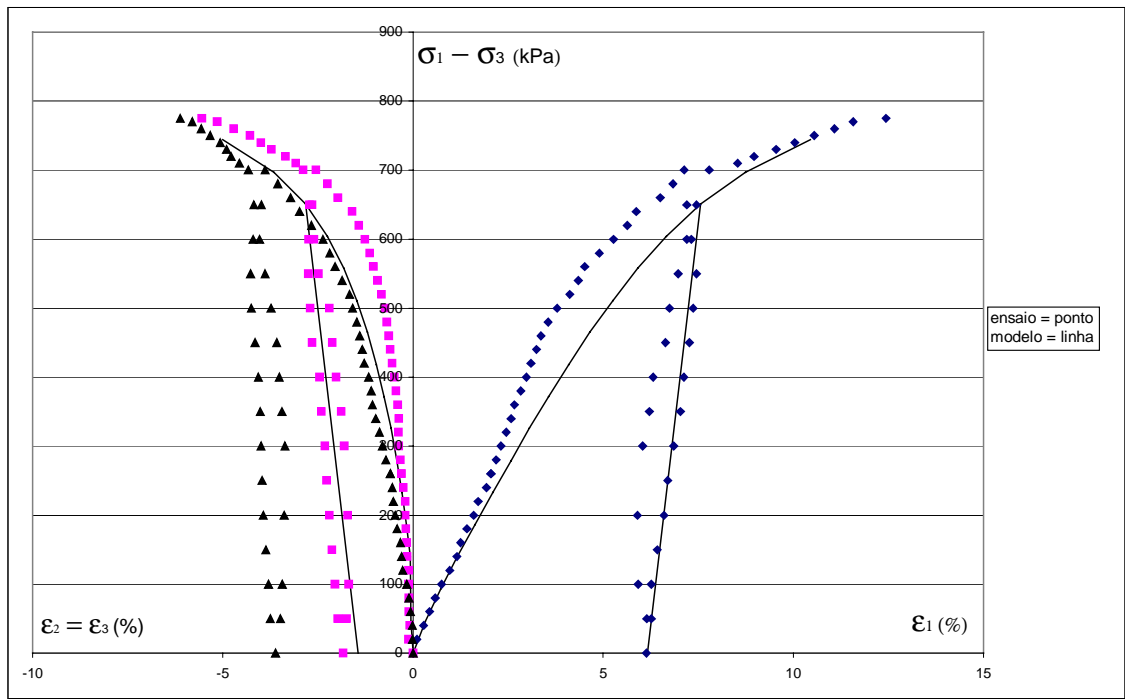


Figura 63 – Compressão triaxial (150 kPa) x Lade e Kim

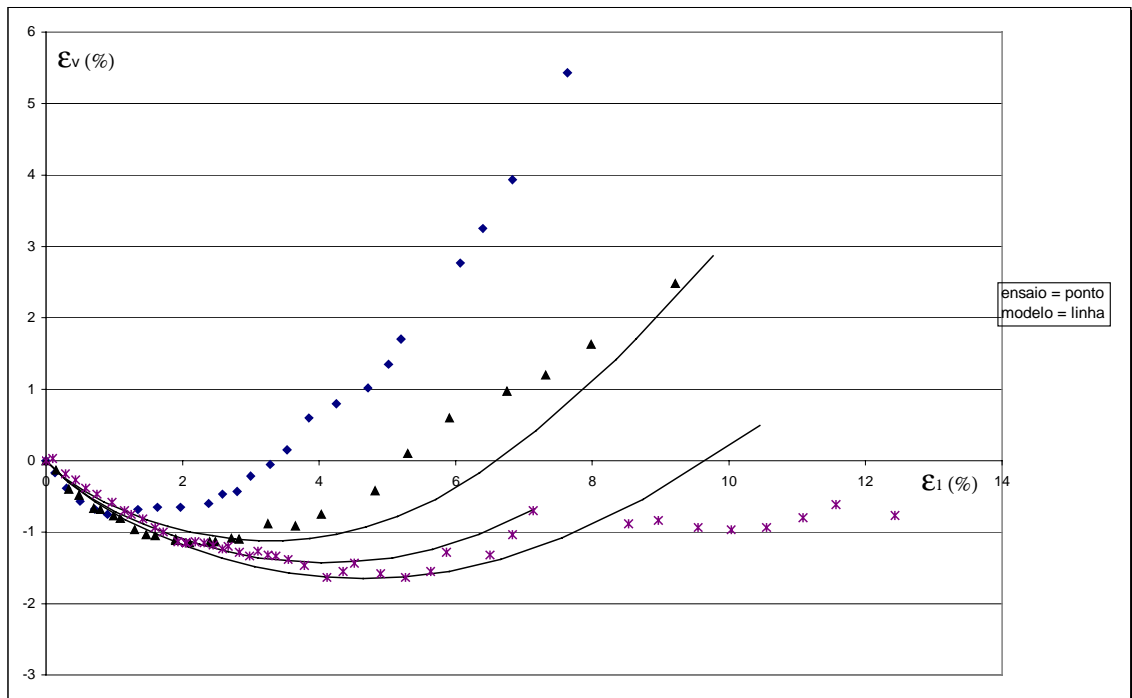
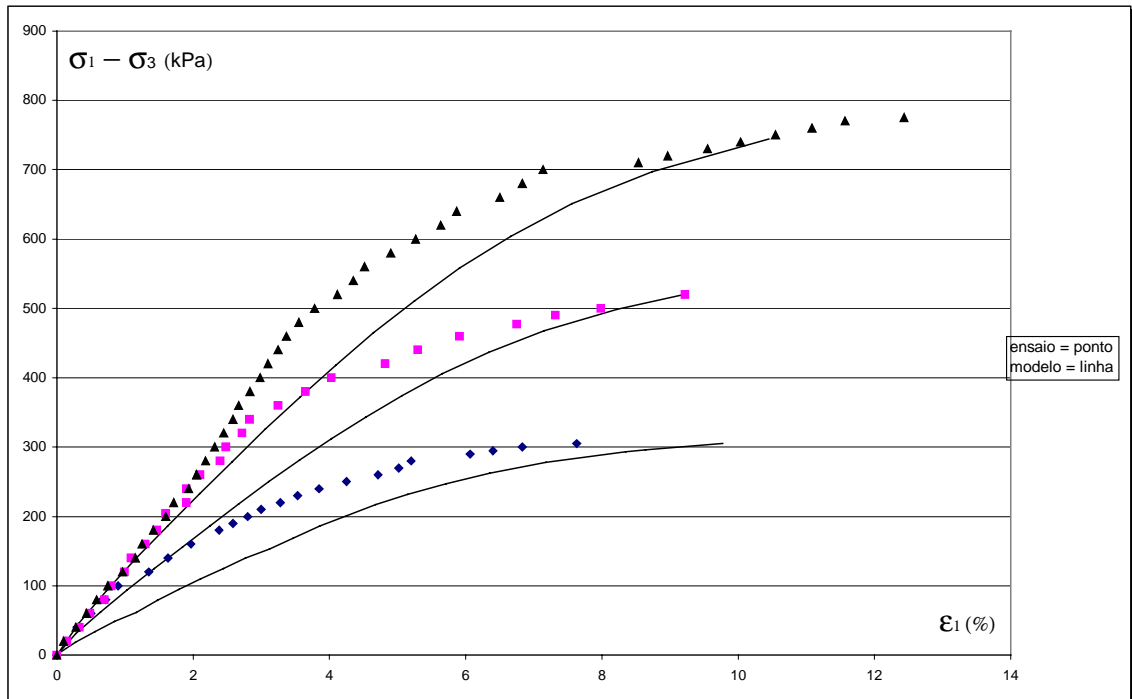


Figura 64 – Deformação Volumétrica x Lade e Kim

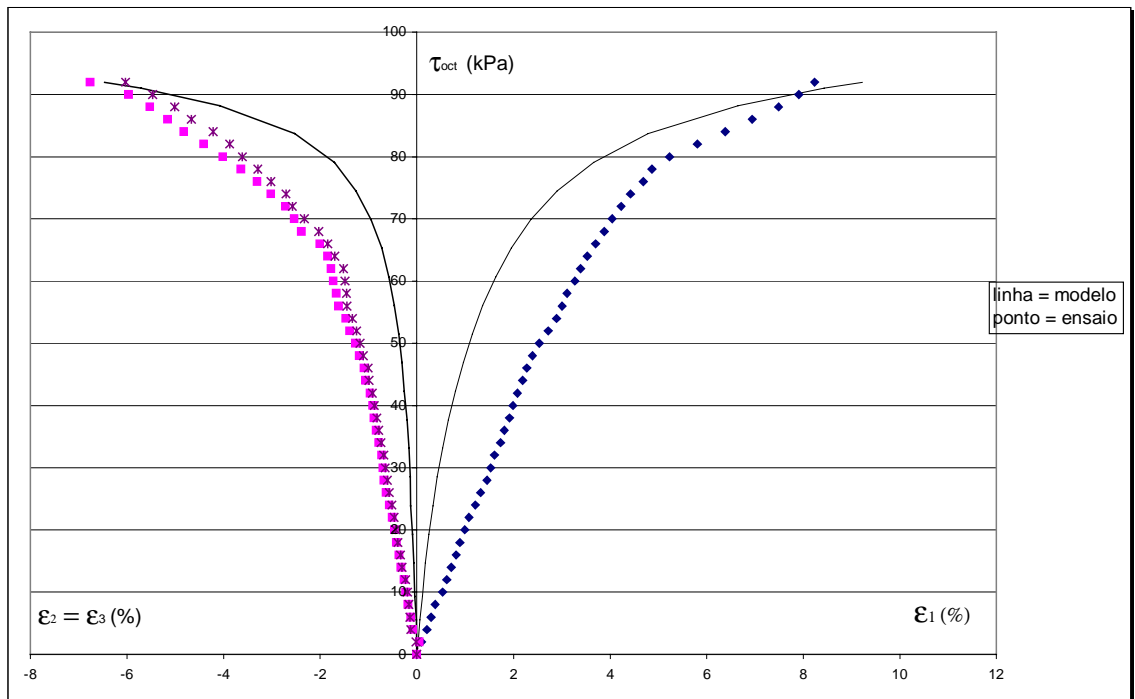


Figura 65 – Plano octaédrico (0°) x Lade e Kim

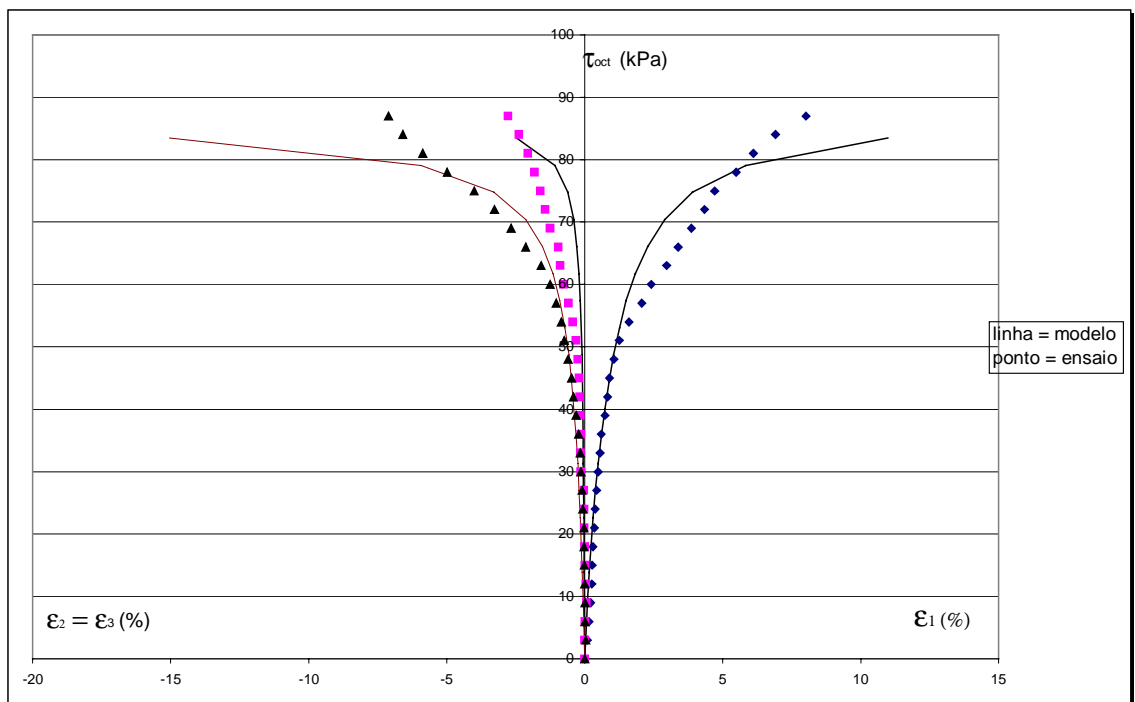


Figura 66 – Plano octaédrico (15°) x Lade e Kim

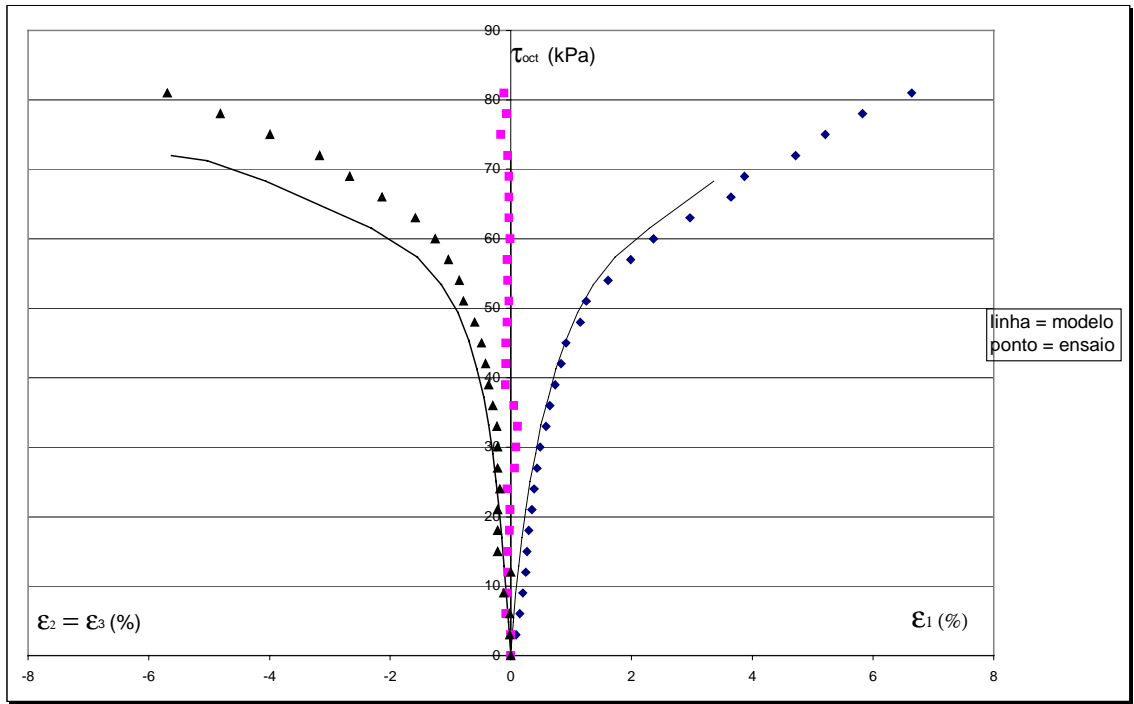


Figura 67 – Plano octaédrico (30°) x Lade e Kim

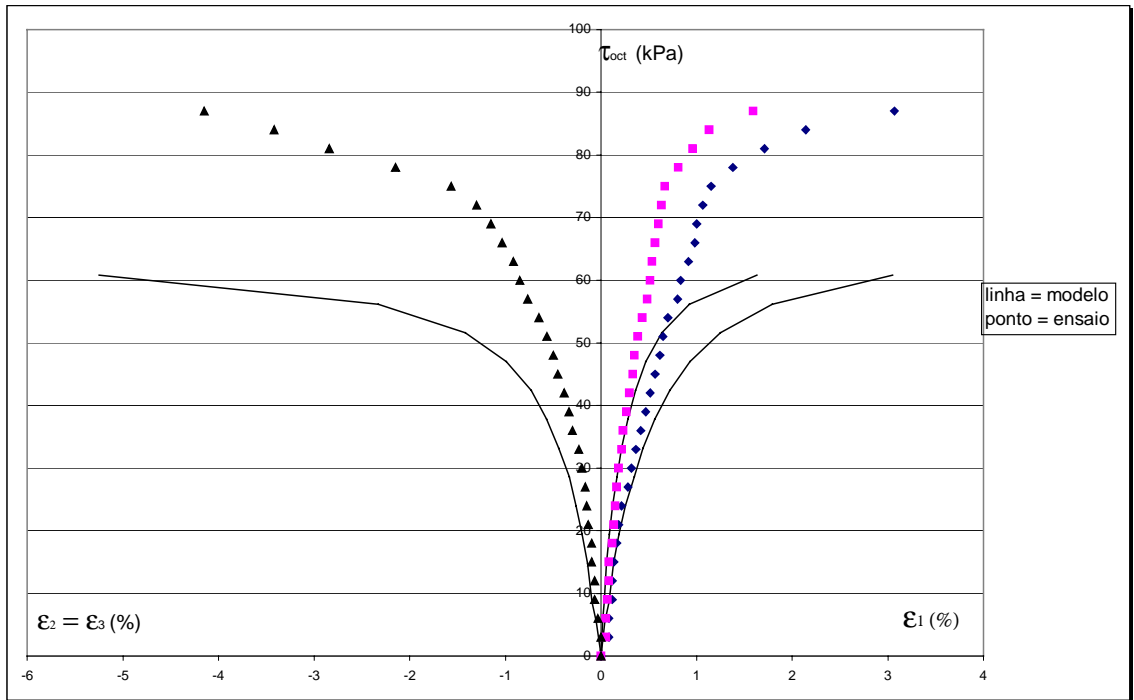


Figura 68 – Plano octaédrico (45°) x Lade e Kim

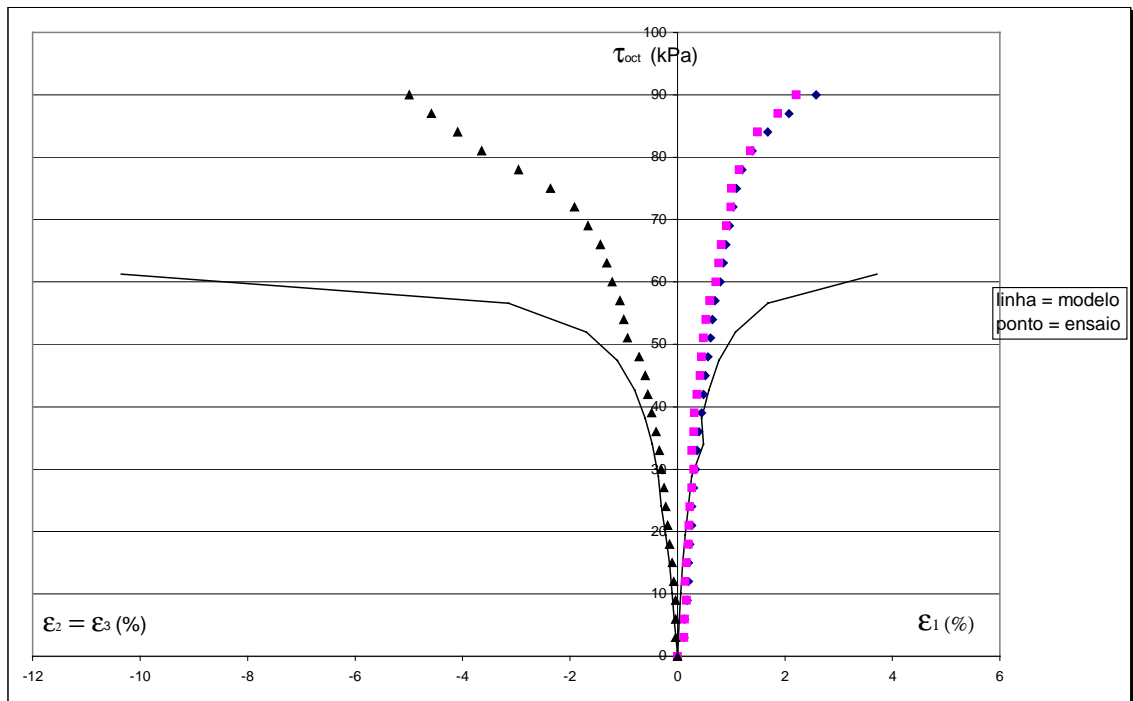


Figura 69 – Plano octaédrico (60°) x Lade e Kim

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. – Conclusões

Neste trabalho, inicialmente, estudou-se o comportamento de um solo residual de gnaiss, denominado Vila Secundino, através de ensaios de compressão triaxial convencional, compressão hidrostática, e compressão triaxial no plano octaédrico, com variação do ângulo de Lode de 0° a 60°. Posteriormente, investigou-se a possibilidade de alguns modelos constitutivos representarem o comportamento tensão x deformação x resistência observado nos experimentos, e, finalmente, foram feitas comparações entre os comportamentos experimental e analítico. As principais conclusões a que se chegou foram as seguintes:

- O equipamento triaxial cúbico da UFV é de fácil utilização, ou seja, uma vez definida a trajetória de tensão a ser seguida, a sua operação não apresenta grandes dificuldades.

- Os registros de ajuste fino de pressão são extremamente sensíveis, danificando-se com qualquer tipo de variação mais brusca de pressão, o que obrigou a instalação de uma válvula controladora na linha de ar que abastece o equipamento, o que melhorando o desempenho

dos registros mas sem eliminar a necessidade de revisão dos mesmos a cada ensaio, no sentido de se evitar que a membrana se rompesse no decorrer dos ensaios.

- Em termos de manutenção, embora seja extremamente simples, o equipamento, para seu perfeito funcionamento, exige uma constante atenção, principalmente nas membranas de aplicação de pressão no corpo-de-provas, e na linha de saturação que pode entupir durante a extração do corpo-de-provas da célula.

- O equipamento permite, efetivamente, a realização de ensaios com variação independente de 3 tensões, como, por exemplo, os ensaios realizados no plano octaédrico, nos quais variou-se, independentemente, através de manobras nos registros e válvulas de controle, as tensões aplicadas na base e no topo do corpo-de-provas, e em cada par de faces laterais.

- O pior em termos de utilização do equipamento é o sistema de aquisição de dados, que se mostrou um tanto limitado no que diz respeito à interface com o usuário, à visualização e controle dos parâmetros envolvidos.

- O modelo não linear elástico, em termos de calibração, não apresentou maiores problemas. No entanto, só conseguiu representar satisfatoriamente a relação deformação principal maior x tensão desviadora nos ensaios triaxiais convencionais, deixando muito a desejar em todas as outras situações.

- O modelo elasto-plástico Cam-Clay modificado também não apresentou grandes problemas na fase de calibração. Em termos de reprodução dos ensaios, o Cam-Clay basicamente repetiu a performance do hiperbólico, ou seja, forneceu uma aproximação razoável da relação deformação principal maior x tensão desviadora, também deixando muito a desejar nas demais reproduções.

- A obtenção dos parâmetros do modelo de Lade-Kim pelo procedimento convencional, além de muito complexa e trabalhosa, mostrou-se inadequada pois originou parâmetros que conduziram a uma reprodução não satisfatória dos ensaios. Entretanto, os parâmetros obtidos através de um processo de otimização, que minimiza as diferenças entre os resultados experimentais e os fornecidos pelo modelo, melhoraram muito a reprodução dos ensaios, sobretudo do ensaio de compressão hidrostática e dos ensaios de compressão triaxial convencional, inclusive no que diz respeito à reprodução das deformações volumétricas, em que se conseguiu reproduzir o efeito dilatante do solo.

A conclusão final é que, dos modelos utilizados, o modelo de Lade-Kim, após a otimização dos parâmetros, foi o que melhor conseguiu reproduzir o comportamento do solo residual estudado neste trabalho.

6.2. – Sugestões

Como mencionado anteriormente, uma das grandes dificuldades encontradas foi na utilização do sistemas de aquisição de dados, que apresenta um ambiente muito pouco amigável, principalmente nos dias de hoje, em que é comum se utilizar plataformas gráficas, que permitem visualização de figuras na tela e a navegação por várias janelas em um mesmo ambiente. Fica como sugestão para futuros trabalhos o desenvolvimento de um sistema integrável a uma dessas plataformas, que, principalmente, forneça a quem está executando o ensaio, uma estimativa, em tempo real, do que está acontecendo em termos do comportamento tensão x deformação.

Uma outra sugestão diz respeito à disposição das peças do equipamento. O lugar mais adequado para a instalação do transdutor

que mede o valor da tensão na água, em ensaios drenados, seria a saída de drenagem da célula, e não, junto aos controles da linha de saturação.

Por fim, sugere-se a continuidade desta linha de pesquisa – modelos constitutivos e ensaios no triaxial cúbico - no Setor de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, levando-se a cabo pesquisas que contemplem a utilização de modelos abrangendo o comportamento do solos naturais, com efeitos de sucção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEIXO, M. S. **Comportamento tensão-deformação de solos residuais no equipamento triaxial**. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 1998. 110p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1998.
- ANÔNIMO. **Ensaio de Laboratório**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. P. 10.(Relatório)
- BAGIO, D. **Estudo experimental e numérico do comportamento de estacas em areia**. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 1995, 115p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995.
- BISHOP, A. W. , WESLEY, L. D. A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. **Geotechnique**, v. 25, n. 4, p. 657-670, 1975.
- CARPIO, G. W. T. **Ensaio triaxiais cúbicos e axissimétricos em argila normalmente adensada**. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 1990. 156p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1990.
- CHEN, W.F. **Plasticity in Reinforced Concrete**. New York: McGrawHill, 1982. 474p. New York, 1982.

- KIM, M. K. , LADE, P. V. Single hardening constitutive modelo for frictional materiasl, I. Plastic Potencial Function. **Computers and Geotechnics 5, Elsevier Science Publishers Ltda**, p. 307-324. 1988.
- KO, H. Y., SCOTT, R. F. A new soil testing apparatus. **Geotechnique**, v. 17, n. 1p 40-57, 1967.
- KONDNER, R. L. Hiperbolic stress-strain response: cohesive soils. **Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE**, SM1, p. 115-143. 1963.
- KONDNER, R. L. , ZELASKO, J. S. A hiperbolic stress-strains formulation for sands. In: **II Pan-American Conference on soil mechanics na foundation engineering**, Brazil, vol. 1, p. 289-324. 1963.
- LODI, P. C. , MACHADO, S. L. , VILAR, O. M. Aplicação do modelo Cam-Clay modificado a um solo arenoso. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Brasília, 1998. **Anais ...**, p. 131-138. Brasília, 1998.
- LADE, P. V. Elasto-Plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 13 p. 1019-1035. 1977.
- LADE, P. V. Stress-strain theory for normally consolidated clay, In: **III International conference on numerical methods in geomechanics**, Aschen, p. 1325-1337. 1979.
- LADE, P. V. , KIM, M. K. , Single hardening constitutive modelo for frictional materiasl, II. Yield criterion and plastic worl contours. **Computers and Geotechnics 6, Elsevier Science Publishers Ltda**, p. 13-29. 1988a.
- LADE, P. V. , KIM, M. K. , Single hardening constitutive modelo for frictional materiasl, III. Comparisons with experimental data. **Computers and Geotechnics 6, Elsevier Science Publishers Ltda**, p. 31-47. 1988b.
- LEVADA, C. **Aplicação do modelo elasto-plástico de Kim-Lade na representação do comportamento tensão-deformação de solos da cidade de São Paulo**. São Carlos, SP: USP, 1996, 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, 1996.

- NADER, J. J. Um novo modelo hipoplástico. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Brasília, 1998. **Anais ...**, p. 385-392. Brasília, 1998.
- QUARESMA, H. D. **Ensaaios triaxiais cúbicos em areia saturada**. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 1997. 91p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.
- REIS, R. M. **Desenvolvimento e utilização de um equipamento triaxial cúbico no estudo da anisotropia de um solo residual de gnaíse da região de Viçosa (Minas Gerais)**. Viçosa,, MG: UFV, 1998. 108p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- STURE, S. **Development of a multiaxial cubical test device with pore pressure monitoring facilities**. Blacksburg, Va: Department of Civil Engineering, VPI na SU, 1979. Report No. VPI-E-19. 18).
- STURE, S. , BUDIMAN, J. S. , ONTUNA, A. K. , KO, H. Y. **Directional shear cell experiments on a dry cohesionless soils**. S. I.: ASTM, 1987, p. 71-79. (ASTM, 10).
- VELLOSO, R. Q. **Estudo numérico da estimativa de parâmetros hidráulicos em solos parcialmente saturados** Rio de Janeiro, RJ: PUC, 2000. 80p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.
- VELLOSO, R. C. **Estudo experimental e analítico de uma areia submetida a ensaios não monotônicos**. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 1987. 198p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1987.
- VELLOSO, R. C. , AZEVEDO, R. F. Descrição de um sistema automático de aquisição de dados para uma célula triaxial cúbica. In: SIMPÓSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO EM GEOTECNIA, 1998, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 1988. V2, p. 467-474.
- ZORNBERG, J. G. **Análise por elementos finitos do comportamento de escavações utilizando um modelo elasto-plástico**. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 1989.280P. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1991.