

BETÂNIA SEVERINO BOTELHO

EQUIPAMENTO TRIAXIAL CÚBICO PARA ENSAIOS
EM SOLOS SATURADOS E NÃO-SATURADOS COM
SUCCÃO MATRICIAL CONTROLADA

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2007

BETÂNIA SEVERINO BOTELHO

**EQUIPAMENTO TRIAXIAL CÚBICO PARA ENSAIOS
EM SOLOS SATURADOS E NÃO-SATURADOS COM
SUCCÃO MATRICIAL CONTROLADA**

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil, para obtenção do título de
Magister Scientiae.**

APROVADA: 20 de março de 2007.

Prof. Rodrigo Martins Reis
(Co-Orientador)

Prof. Izabel C. Duarte Azevedo
(Co-Orientador)

Prof. Rejane Nascentes

Prof. Orêncio Monje Vilar

Prof. Roberto Francisco Azevedo
(Orientador)

*Dedico este trabalho a minha família,
alicerce de tudo que construí em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, pela vida.

Aos meus pais e aos meus irmãos pelo amor, pelas oportunidades e por fazer minha vida tão cheia de alegrias e realizações.

A todos os meus amigos pelas farras, descontrações, companheirismo, dedicação em todos os momentos, em especial; Vanusca, Elenice, Josiane, Simône, Rejane, e André.

Aos colegas da pós-graduação pelo companheirismo.

Ao Professor Roberto Francisco de Azevedo, pela amizade, pela paciência, dedicação e orientação.

Ao Professor Rodrigo pelo apoio e por sempre estar disposto a ajudar e ensinar.

À Professora Izabel pelo carinho e amizade.

Aos professores do departamento de engenharia civil, a todos aqueles que foram verdadeiramente mestres.

Aos funcionários do laboratório engenharia civil em especial ao técnico Paulo Capelão, pela disposição e boa vontade constante.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV.

À CAPES pelo apoio financeiro.

BIOGRAFIA

BETÂNIA SEVERINO BOTELHO, filha de Osvaldo Severino Botelho e Maria da Paixão Botelho, nasceu em 28 de outubro de 1980, em Unaí, Minas Gerais.

Em 1998, concluiu o Ensino Médio na Escola Estadual Cândido Ulhoa, em Bonfinópolis de Minas - MG.

Em 2000, iniciou o curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa (MG), concluindo-o em dezembro de 2004. Durante a graduação, teve a oportunidade de desenvolver trabalhos de iniciação científica por um ano, realizar estágios no LESA – Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental, laboratório de geotecnia do DEC- Departamento de Engenharia Civil e no SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto – Viçosa /MG.

Em março de 2005, ingressou no Curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, atuando na linha de pesquisa “Geotecnia analítica e experimental”, submetendo-se à defesa de dissertação em Março de 2007.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Relevância do trabalho	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da dissertação	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Equipamentos com controle de sucção matricial	5
2.1.1 Equipamento de cisalhamento direto.....	6
2.1.2 Equipamentos triaxiais convencionais cilíndricos).....	7
2.1.3 Equipamentos triaxiais cúbicos.....	13
2.2 Comportamento de solos não saturados	15
2.2.1 Estrutura do solo não saturado.....	15
2.2.2 Sucção.....	16
2.2.3 Curva característica.....	17
2.2.4 Resistência dos solos não saturados.....	19
3 EQUIPAMENTO TRIAXIAL CÚBICO	27
3.1 Descrição do equipamento triaxial cúbico	27
3.1.1 Célula Triaxial Cúbica.....	29

3.1.1.1	Quadro de reação.....	29
3.1.1.2	Faces laterais.....	30
3.1.1.3	Membranas de aplicação de pressão.....	33
3.1.2	Sistema de aplicação e medição de pressão.....	36
3.1.2.1	Compressor de ar e garrafas de nitrogênio.....	36
3.1.2.2	Painel de controle e tubos flexíveis.....	36
3.1.2.3	Interface ar/água.....	38
3.1.3	Câmaras de pré-instalação de sucção.....	39
3.1.4	Sistema de medição de deslocamento.....	41
3.1.5	Sistema de aquisição de dados.....	42
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	44
4.1	Características do solo ensaiado.....	44
4.2	Preparação dos corpos de prova	45
4.3	Ensaio realizados	48
4.3.1	Calibração da deformabilidade da célula triaxial cúbica.....	51
4.3.2	Procedimentos nos ensaios.....	51
4.3.3	Ensaio de compressão hidrostática.....	53
4.3.4	Ensaio de compressão triaxial não saturado.....	55
4.3.5	Ensaio de compressão triaxial saturado.....	57
4.3.6	Ensaio de compressão triaxial verdadeiro ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$).....	60
4.3.7	Ensaio para determinação da curva característica.....	60
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	64
5.1	Ensaio nas trajetórias de tensão convencionais (HC e CTC).....	64

5.1.1 Ensaio não saturado com sucção matricial de 80 kPa.....	64
5.1.2 Ensaio não saturado com sucção matricial de 160 kPa.....	67
5.1.3 Ensaio saturado.....	71
5.2 Ensaio nas trajetórias de tensão não convencionais...	83
5.2.1 Ensaio não saturado com sucção matricial de 80 kPa.....	83
5.2.2 Ensaio não saturado com sucção matricial de 160 kPa.....	87
5.2.3 Ensaio saturado.....	91
5.3 Ensaio com papel filtro e câmara de sucção.....	93
6 CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

RESUMO

BOTELHO, Betânia Severino, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2007. **Equipamento triaxial cúbico para ensaios em solos saturados e não-saturados com sucção matricial controlada.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Orientadores: Rodrigo Martins Reis e Izabel C. d' Almeida Duarte Azevedo.

Em países de clima tropical como o Brasil, frequentemente, se encontram solos em condições não-saturadas. Além disso, a maioria das obras geotécnicas solicita o solo em trajetórias de tensão nas quais as três tensões principais são diferentes e variam independentemente. Daí a necessidade de se construir equipamentos capazes de ensaiar no laboratório amostras de solos não saturados seguindo essas trajetórias de tensão. Nesse trabalho, um novo equipamento triaxial cúbico é apresentado. O equipamento foi desenvolvido para ensaiar amostras de solo em condições secas, saturadas ou com sucção matricial controlada. Faz-se uma revisão bibliográfica sobre equipamentos triaxiais assimétricos e cúbicos capazes de ensaiar solos não-saturados, e sobre aspectos importantes do comportamento de solos não saturados. Em seguida, apresentam-se e descrevem-se todos os elementos que compõem a célula triaxial cúbico sendo feita uma descrição detalhada de todo o equipamento. O Capítulo seguinte apresenta as principais características do solo residual jovem ensaiado, bem como a metodologia usada durante a realização do programa de ensaios. Finalmente, apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios realizados com o solo residual em condições saturadas, não saturadas, em trajetórias de tensão convencionais, em que duas tensões principais são iguais, e em trajetórias não convencionais, nas quais as três tensões principais variam independentemente. As principais conclusões apontam que o equipamento desenvolvido está funcionando adequadamente e parece ser muito apropriado para estudar o comportamento de solos não saturados.

ABSTRACT

BOTELHO, Betânia Severino, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March of 2007. **Equipment cubic triaxial for rehearsals in saturated soils and no saturated with suction controlled matric.** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Advisers: Rodrigo Martins Reis e Izabel C. d' Almeida Duarte Azevedo.

In tropical countries, like Brazil, soils in non saturated condition are frequently encountered. Besides, the majority of geotechnical works load the ground according to stress paths in which the three principal stresses are different and vary independently. Therefore, the need to develop equipments able to test in the laboratory non saturated soil samples following these stress paths. In this thesis, a new cubic triaxial cell is presented. The equipment was developed to test soil samples in dry, saturated or with matric suction controlled conditions. Results of a test program realized with the new equipment in a young residual soil samples are presented. A bibliographic review is made dealing with axisymmetrical and cubical triaxial equipments able to test soil samples in non saturated conditions, and principal features of non saturated soil behavior. Following, components of the cubical triaxial device are described in full detail and, in the next Chapter, the main characteristics of the young residual soil tested, as well as the methodology used during the test program, are presented. Finally, test results are presented and discussed, including tests with saturated and non saturated soil samples, realized in conventional stress paths in which two principal stresses are equal, and in non conventional stress paths in which the three principal stresses vary independently. The main conclusions state that the developed equipment is working adequately and seems to be appropriate to study the behavior of non saturated soils.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do Trabalho

Grande parte da superfície terrestre encontra-se em regiões áridas ou semi-áridas, nas quais a evaporação excede as precipitações anuais. Esses locais, nos quais as camadas mais superficiais de solo se encontram em condições não saturadas, abrigam em torno de 60% da população mundial. Por isso, uma grande variedade de estruturas de engenharia construídas nessas regiões, tais como estradas, barragens, aterros compactados, muros de contenção e fundações, entre outras, são feitas ou apoiadas em solos não saturados.

Nas últimas décadas, a mecânica dos solos não saturados tem experimentado uma importância crescente em todo o mundo, principalmente no meio acadêmico. Avanços no entendimento do comportamento de solos não saturados têm, mais recentemente, despertado um crescente interesse em levar em consideração a não saturação dos solos em situações práticas como: percolação em maciço de barragens de solo; projeto de camadas de cobertura final de aterros sanitários e de aterros de resíduos perigosos; estabilidade de taludes; estabilidade de estruturas de contenção; compactação de solos; solos colapsíveis e solos expansivos.

O entendimento do comportamento mecânico dos solos não saturados requer, por um lado, o desenvolvimento e aprimoramento de recursos experimentais específicos para esses materiais e, por outro, o desenvolvimento de métodos de análise que considerem o solo não saturado. Tem-se ainda que em obras geotécnicas executadas com ou sobre solos secos, saturados ou não saturados, normalmente induzem carregamentos nos quais as três tensões principais variam independentemente. Nesse contexto, equipamentos que simulem

essas condições de campo são de grande importância para descrever o comportamento do solo.

Ensaaios triaxiais cúbicos que controlam as três tensões principais separadamente foram desenvolvidos pioneiramente por KO e SCOTT (1967), apud REIS (1998) para ensaiar solos secos ou saturados. De lá para cá, diversos equipamentos triaxiais cúbicos foram desenvolvidos, inclusive no Brasil (STURE, 1979, apud REIS (1998); FARIAS e AZEVEDO, 1986; REIS e AZEVEDO, 1998). Entretanto, equipamentos desse tipo, capazes de ensaiar solos em condições não saturados com controle de sucção, ainda são raros no mundo (MATSUOKA et al., 1999; HOYOS JR & MACARI, 2001) e inexistentes no Brasil.

1.2 Objetivos

Portanto, essa dissertação tem os seguintes objetivos:

- modificar a célula triaxial cúbica desenvolvida por REIS (1998) para torná-la capaz de ensaiar solos não saturados com sucção controlada;
- mostrar que o novo equipamento está funcionando adequadamente;
- usar o novo equipamento para realizar ensaios triaxiais cúbicos em solo não saturado e saturado, em trajetórias de tensão convencionais, em que duas das tensões principais são iguais, e em trajetórias não convencionais, nas quais as três tensões principais variam independentemente; e, por fim,
- discutir como a resistência e a deformabilidade do solo variam com a sucção em trajetórias convencionais e não convencionais.

1.3 Organização da dissertação

Essa dissertação está dividida em seis capítulos. Neste primeiro capítulo busca-se mostrar a relevância dessa pesquisa mostrando que a presença de solos não saturados é uma realidade em obras geotécnicas e em grande parte do mundo e, em especial no Brasil. Através da apresentação dos objetivos propostos nota-se a importância da existência desse equipamento triaxial cúbico. Apresenta-se também, nesse capítulo, a forma como essa dissertação está organizada.

No Capítulo 2, faz-se, primeiro, uma revisão bibliográfica dos equipamentos capazes de realizar ensaios com controle de sucção, desde equipamentos de cisalhamento direto, equipamentos triaxiais cilíndricos até o equipamento triaxiais cúbicos. Isso foi feito, pois o equipamento desenvolvido nessa pesquisa pertence ao grupo dos equipamentos triaxiais cúbicos com controle de sucção e tensão controlada, sendo um tipo de equipamento raro no mundo. Nesse contexto mostra-se a evolução dos equipamentos para o uso da técnica de HILF (1956) e da pedra porosa de alta entrada de ar, bem como as superações de problemas para que o uso dessa técnica e desse dispositivo fosse possível para realização de ensaio com solos não saturados. Faz-se também uma pequena revisão bibliográfica de tópicos importantes sobre solos não saturados.

No Capítulo 3, faz-se uma descrição detalhada mostrando, através de fotos e desenhos esquemáticos, todos os sistemas que compõem o equipamento triaxial cúbico, com todos os sistemas modificados e adaptados para que o equipamento possa realizar ensaios com solos na condição não saturada e em várias trajetórias de tensões.

No Capítulo 4, apresenta-se o programa experimental, em que se descrevem as características do solo ensaiado e o modo como foram preparados os corpos de prova. Descreve-se a forma como foi feita a calibração da deformabilidade do equipamento, bem como as metodologias dos ensaios realizados no equipamento triaxial cúbico, nas trajetórias convencionais e não convencionais, em amostras saturadas e não saturadas, com sucções diferentes.

Descreve-se ainda a metodologia seguida no ensaio de determinação da curva característica do solo ensaiado através do uso da técnica do papel filtro e da câmara de sucção.

No Capítulo 5, faz-se a apresentação e análises de todos os resultados obtidos nos ensaios com o equipamento triaxial cúbico e, também, a apresentação e análise dos resultados da curva característica obtida para este solo.

No Capítulo 6 citam-se as conclusões a respeito do equipamento adaptado para ensaios em amostras saturadas e não saturadas com controle de sucção e o estudo realizado com o solo usado no trabalho. Apresentam-se, também, sugestões para trabalhos futuros utilizando este equipamento de grande potencial para descrever o comportamento de solos saturados, não saturados e/ou em trajetórias múltiplas de tensões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse Capítulo faz-se uma revisão bibliográfica na qual, na primeira parte, são apresentados equipamentos capazes de realizar ensaios com controle de sucção e, na segunda, uma pequena revisão sobre o comportamento de solos não saturados.

2.3 Equipamentos com controle de sucção matricial

Normalmente nos ensaios com sucção controlada, a técnica de translação de eixo proposta por HILF (1956) tem sido usada para impedir a cavitação quando a pressão da água contida nos poros do solo se aproxima de -100 kPa (pressão absoluta próxima a zero). De acordo com essa técnica, o comportamento do solo depende do valor da sucção ($u_a - u_w$), mas não depende dos valores das pressões do ar e da água. Sem a técnica de Hilf, não se poderia ter uma sucção igual ou maior que 100 kPa, com $u_a = 0$, porque u_w teria que ser igual ou menor que -100 kPa, o que não é possível porque a água cavita. De acordo com a técnica de Hilf, pode-se alcançar valores de sucção iguais ou maiores que 100 kPa, desde que se tenha um valor de u_a , por exemplo, igual a 50 kPa e u_w igual ou menor que -50kPa. Ou, no limite, u_a igual ou maior que 100 kPa e $u_w = 0$ kPa. No que tange aos ensaios de laboratório, essa técnica só se tornou viável devido à existência de pedras porosas de alta entrada de pressão de ar que, quando saturadas, apenas permitem a passagem da água, não permitindo a passagem de ar, até certo valor de pressão de ar, característica da pedra, conhecido como pressão de borbulhamento.

BOCKING & FREDLUND (1980) fazem restrições ao procedimento de translação de eixo quando há possibilidade de ocorrerem bolhas de ar oclusas no solo, e advertem que nesse caso a sucção matricial seria super estimada.

Apesar das limitações inerentes aos ensaios de cisalhamento diretos, esses equipamentos ainda são convenientes, por serem relativamente simples e fáceis de serem usados para se obter os parâmetros de resistência de solos saturados e, ou não saturados.

2.1.2 Equipamentos triaxiais convencionais (cilíndricos)

A adaptação fundamental nas câmaras de ensaio triaxial convencionais para permitir realizar ensaios com sucção controlada em amostras não saturadas de solos consiste na colocação de uma pedra porosa de alta entrada de pressão de ar na base da célula, na qual se apóia o corpo de prova. Como, no topo do corpo de prova, já existe uma pedra porosa normal, a sucção na amostra durante o ensaio é dada pela diferença entre as pressões impostas, de ar, no topo, e, de água, na base do corpo de prova. As principais modificações feitas nas câmaras triaxiais convencionais por BISHOP et al, (1960) são mostradas na Figura 2.2.

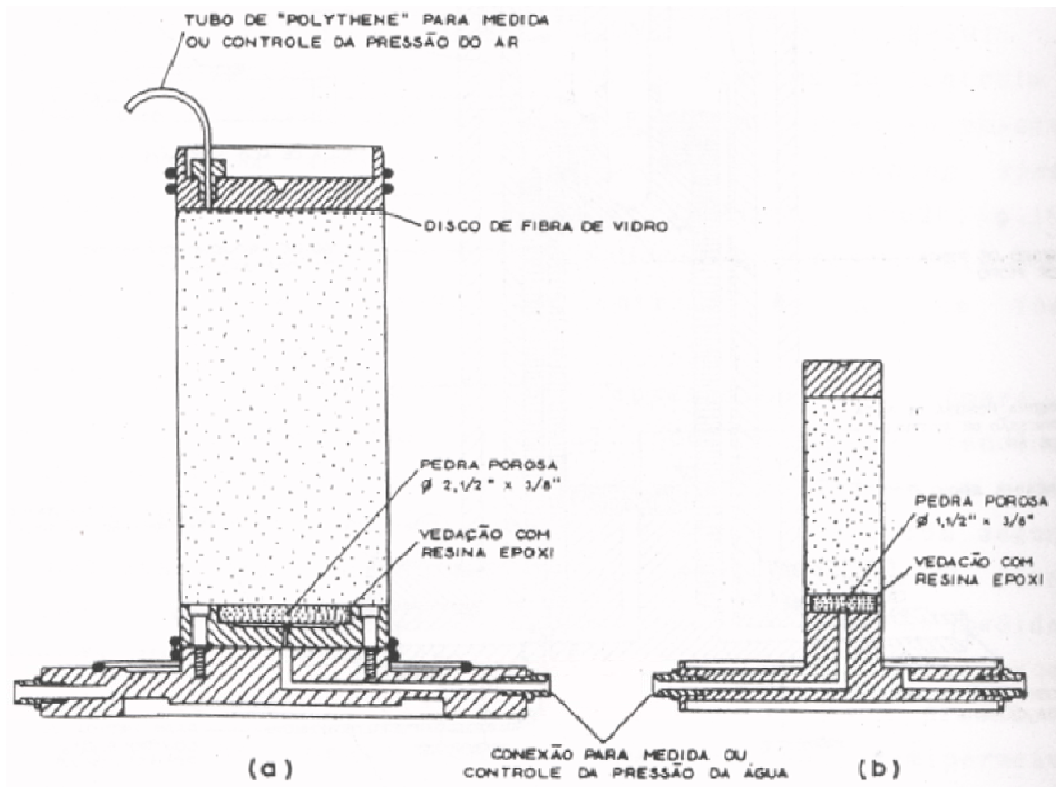


Figura 2.2: Esquemas das alterações desenvolvidas por BISHOP et alii (1960) mostrando o detalhe da pedra porosa de alta pressão de entrada de ar incrustada na base da câmara de ensaios de compressão triaxial.

BISHOP et al (1960) e BISHOP & DONALD (1961) citam dificuldades relativas à permeabilidade ao ar da membrana de látex. Com o propósito de contornar esse problema BISHOP & DONALD (1961) fizeram adaptações na câmara triaxial para submergir a amostra em mercúrio e dessa forma, prevenir a migração do ar pela membrana de látex (Figura 2.3). É importante a observação que as membranas de látex usadas nos ensaios de compressão triaxial podem ser permeáveis ao ar e à água. Entretanto, o uso de mercúrio para solucionar esse problema é pouco usual atualmente. KOMORNIK et al (1980) apud ROHM (1997) adotaram o uso de óleos de silicone para prevenir a passagem de água pela membrana de látex.

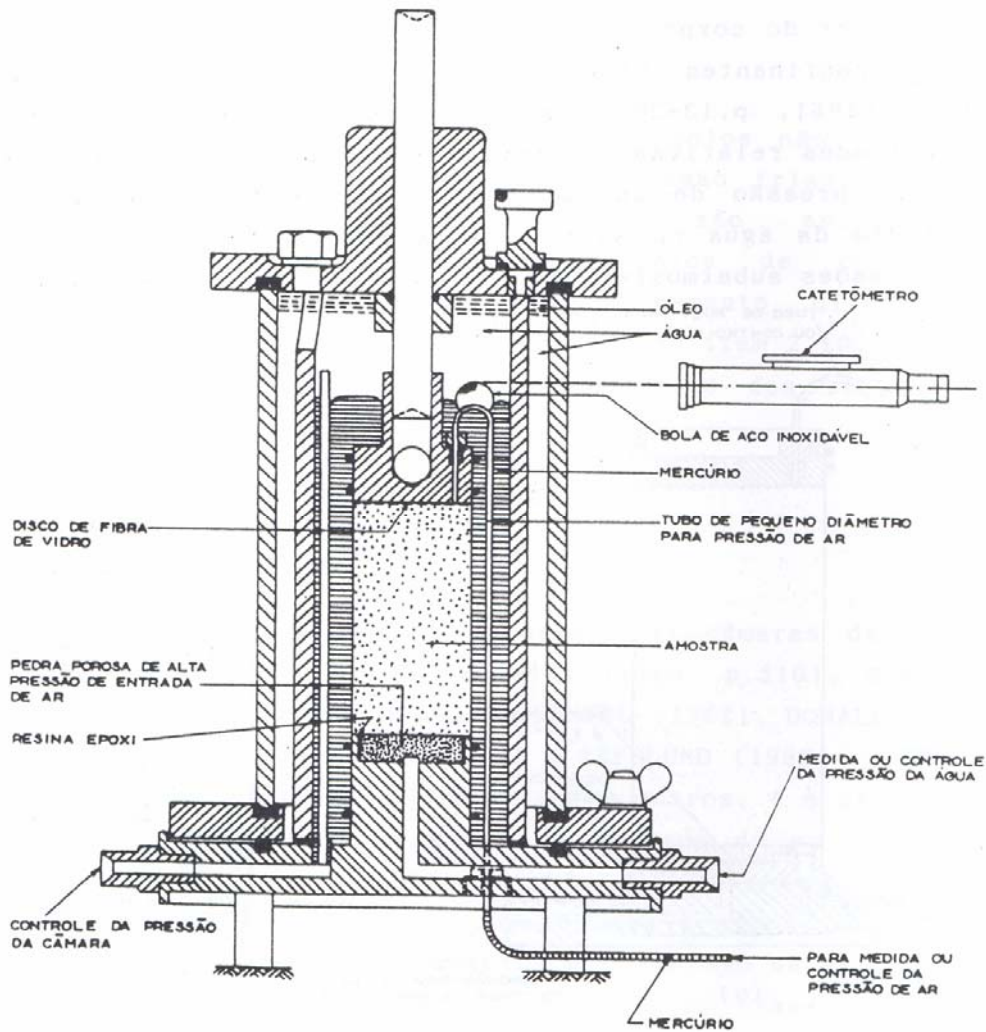


Figura 2.3: Modificações na câmara de ensaios de compressão triaxial necessárias para submergir o corpo de prova revestido com a membrana de látex em mercúrio (BISHOP & DONALD, 1961).

MACHADO (1998) e REIS (2004) realizaram trabalhos usando um equipamento de tensão controlada do tipo Bishop-Wesley (Figuras 2.4 e 2.5). Essa célula triaxial é capaz de realizar ensaios com controle de sucção matricial em quaisquer trajetórias de tensões desde que duas das três tensões principais sejam iguais. O sistema de aplicação das tensões, bem como a aquisição dos dados gerados durante o ensaio, são controlados por um computador que, através de um software de gerenciamento, torna o ensaio servo controlado. MACHADO (1998) realizou ensaios em diferentes trajetórias de tensão em amostras não saturadas, com sucção controlada e constante igual a 100kPa. Além disso, usou conceitos de elastoplasticidade para analisar os resultados obtidos.

Usando o mesmo equipamento utilizado por MACHADO (1998), REIS (2004) realizou ensaios em trajetórias de tensão convencionais em dois solos que formavam um perfil de intemperismo composto por um solo residual maduro e um solo residual jovem. Na análise dos resultados obtidos, procurou-se determinar curvas de escoamento para diferentes níveis de tensão, e se propôs um ajuste hiperbólico para representar a variação da coesão com a sucção.

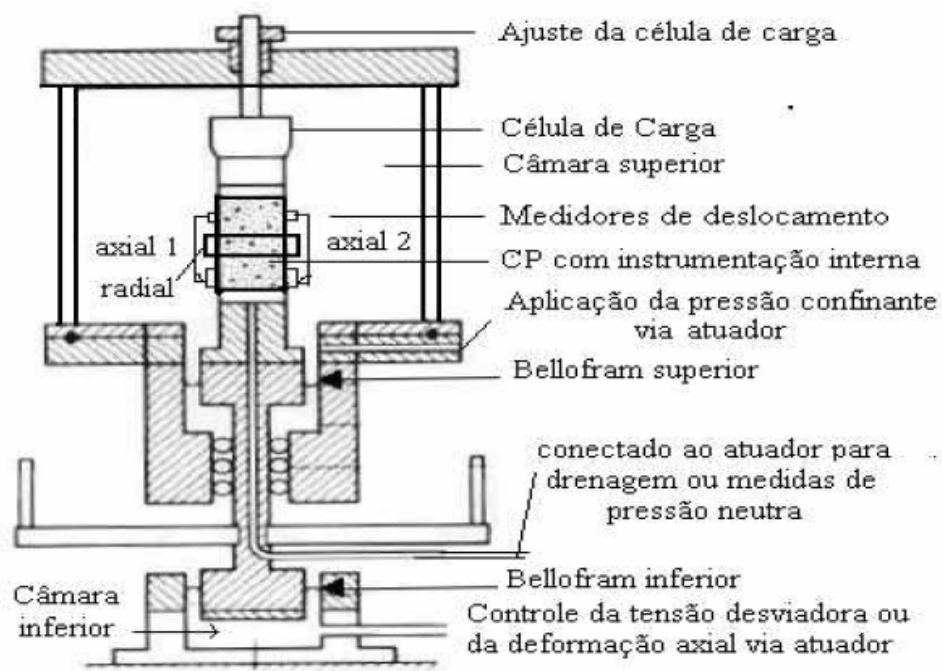


Figura 2.4: Representação esquemática da prensa Bishop Wesley.

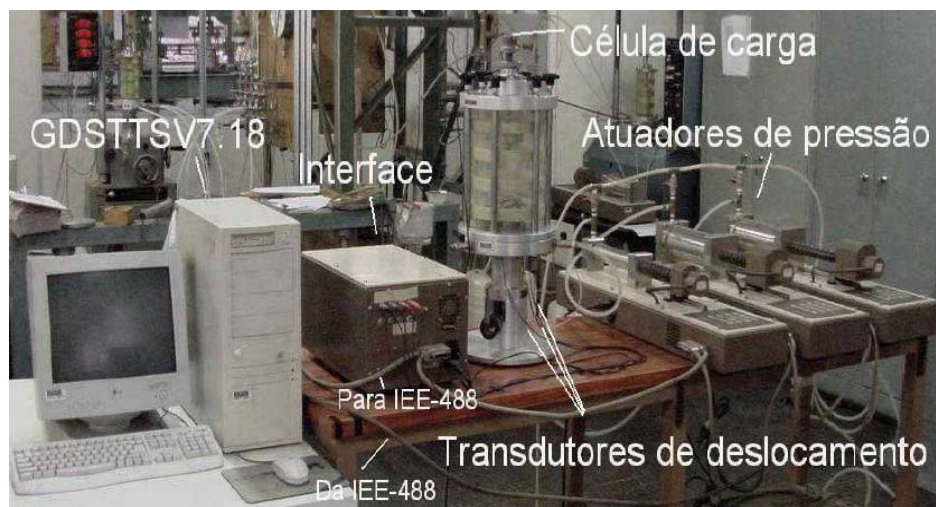


Figura 2.5: Disposição geral dos componentes da prensa triaxial do tipo Bishop Wesley servo controlada (REIS 2004)

AVERSA & NICOTERA (2002) desenvolveram dois novos equipamentos para ensaios em solos não saturados, usando a técnica de translação de eixo (HILF 1956). O primeiro para realizar ensaios triaxiais do tipo tensão controlado e, o segundo, para realizar ensaios edométricos (Figura 2.6). As deformações radiais, para o primeiro caso, são determinadas por medidas de variação de volume de uma célula interna preenchida com água, ao invés de mercúrio.

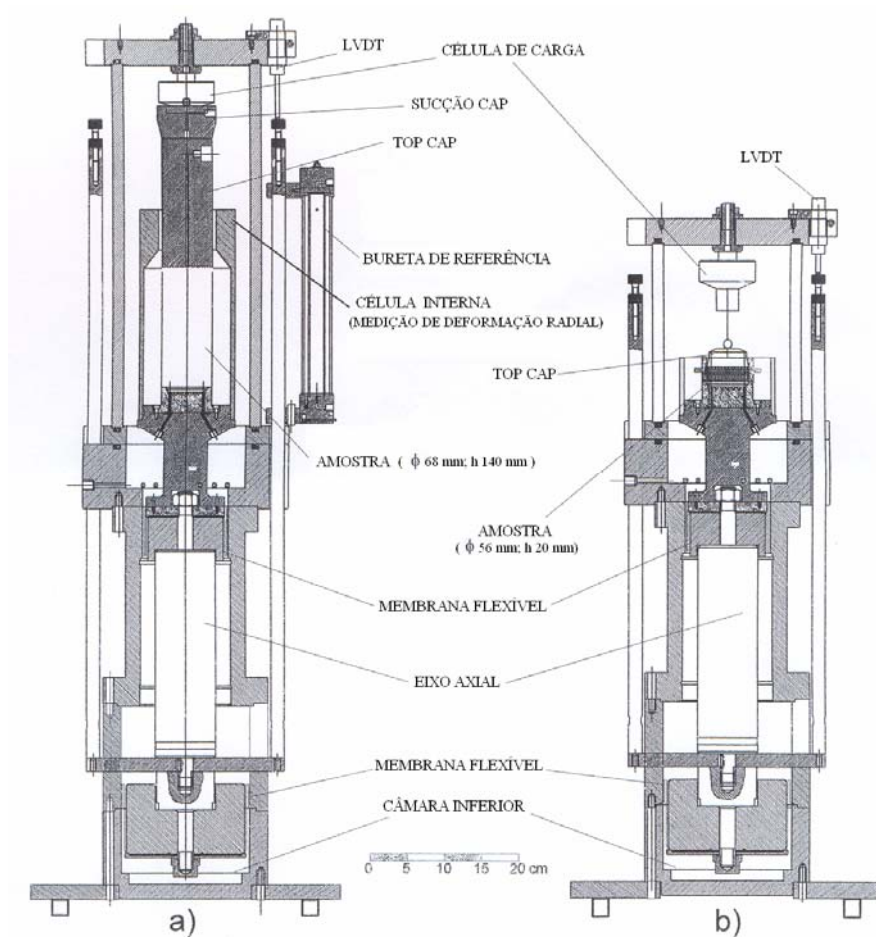


Figura 2.6: Detalhe da célula triaxial (a) e da célula edométrica (b).

Ainda no contexto de uso de equipamentos triaxiais convencionais, OLIVEIRA (2004) realizou ensaios usando a célula de cisalhamento para ensaio triaxial (Figura 2.7) que não usa uma pedra porosa de alta entrada de

pressão de ar, nem a técnica de HILF (1956). Isso porque, diferentemente dos trabalhos apresentados anteriormente, OLIVEIRA (2004) ao invés de controlar a sucção, mediu as sucções que ocorriam na amostra durante o transcorrer do ensaio, utilizando um tensiômetro (Figura 2.8) de alta capacidade (TAC) colocado na base do corpo de prova.

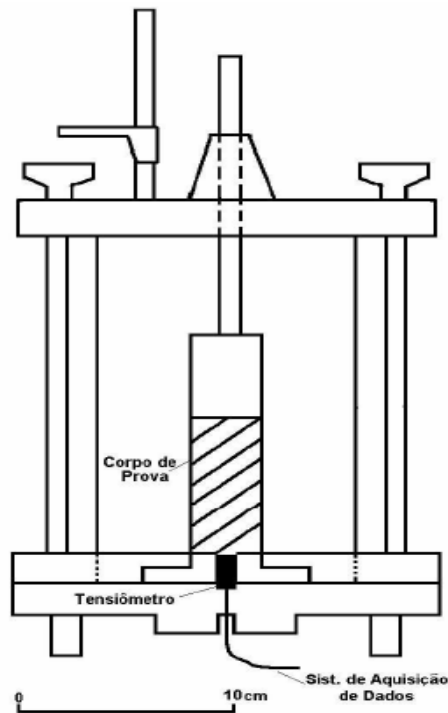


Figura 2.7: Célula de cisalhamento para ensaio triaxial saturado e não saturado.

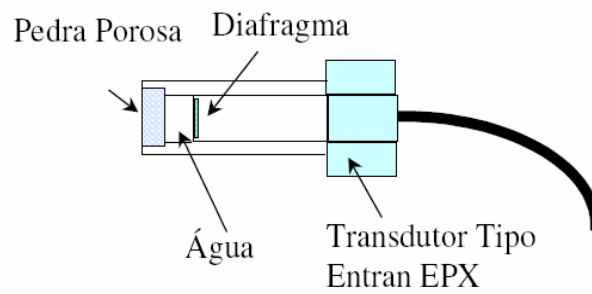


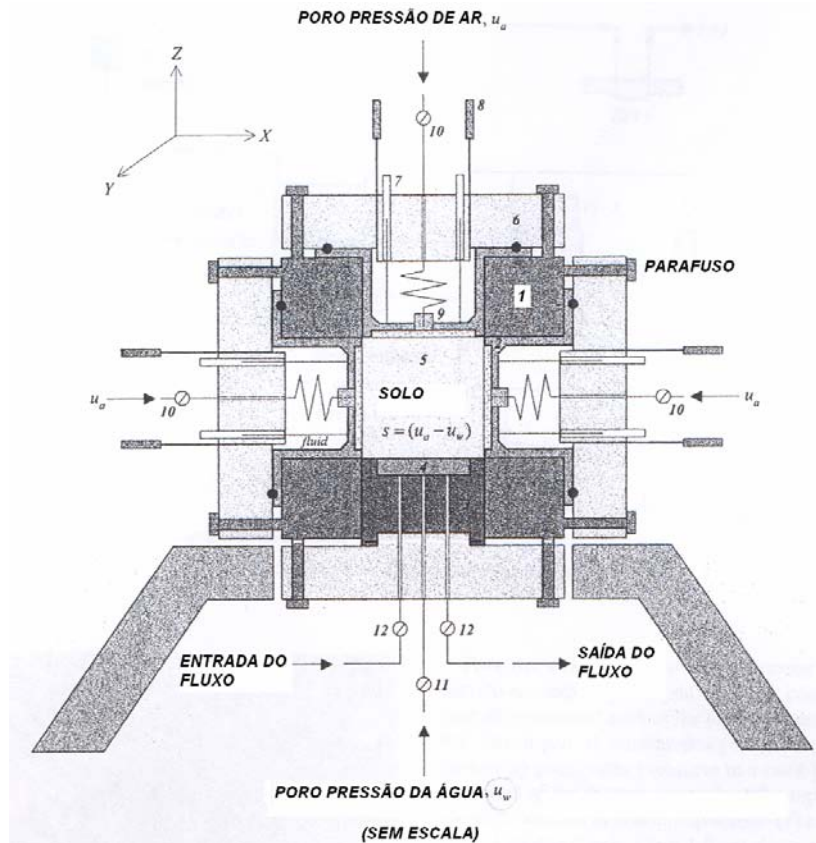
Figura 2.8: Representação esquemática do tensiômetro (TAC).

2.1.3 Equipamentos triaxiais cúbicos

Frequentemente na natureza, pontos de um maciço de solo sujeito a um carregamento geostático e, ou sobrecargas estão submetidos a estados tridimensionais de tensões, nos quais as três tensões principais são diferentes. Neste contexto, foram desenvolvidos equipamentos capazes de ensaiar amostras cúbicas saturadas ou secas, nas quais se podiam aplicar, independentemente, tensões diferentes em cada par de faces paralelas da amostra (FARIAS, 1986; REIS, 1998). Além disso, como na natureza frequentemente se encontram solos em condições não-saturadas, procurou-se ampliar o uso desses equipamentos triaxiais cúbicos para ensaiar amostras não saturadas com controle de sucção. Esses equipamentos são raros (MATSUOKA et al., 1999; HOYOS JR & MACARI, 2001).

MATSUOKA et al, (1999) desenvolveram um equipamento triaxial cúbico no qual usavam amostras cúbicas de 10 cm de lado. O equipamento é de deformação controlada e, portanto, as faces da amostra são carregadas por placas rígidas às quais se impõem deslocamentos controlados e lêem-se as correspondentes tensões. Pedras porosas de alta entrada de pressão de ar são colocadas em duas faces opostas de carregamento.

HOYOS JR & MACARI (2001) desenvolveram um equipamento para realizar ensaios triaxiais cúbicos com controle de sucção, usando a técnica de HILF (1956). O equipamento é composto por uma célula cúbica com cinco faces flexíveis e uma face de aço rígida na qual se coloca uma placa porosa de alta entrada de pressão de ar. Além disso, dispõe de um sistema de aplicação e medida de tensão, um sistema de medição de deformações, um sistema de controle e monitoramento das pressões de água e do ar, e um sistema de aquisição de dados (Figura 2.9).



1- Quadro cúbico	7- Medidor de deslocamento tipo LVTD
2- LATEX/POREX	8- Entrada/ saída de pressão
3- Peça cúbica da base	9- Cooper block/stem
4- Disco cerâmico	10- Válvula de pressão de ar
5- Amostra de solo	11- Válvula de pressão de água
6- Montagem das faces	12- Válvulas de drenagem

Figura 2.9: Detalhe da célula triaxial cúbica desenvolvida por Hoyos e Macari (2001).

MACARI & HOYOS JR (2001), utilizando o equipamento descrito anteriormente, fizeram uma bateria de ensaios para análise da influência da sucção matricial na envoltória de ruptura em diferentes trajetórias de tensão: axissimétricas ($\sigma_2 = \sigma_3$), hidrostáticas ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) e triaxial verdadeira ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$). Verificou-se que a sucção matricial exerceu influência significativa no valor da tensão de ruptura, para uma amostra de areia siltosa

compactada. Nos ensaios triaxiais verdadeiros ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), a sucção matricial exerceu significativa influência no tamanho, posição e na forma da envoltória de ruptura em planos octaédricos, conforme ilustrado na Figura 2.10.

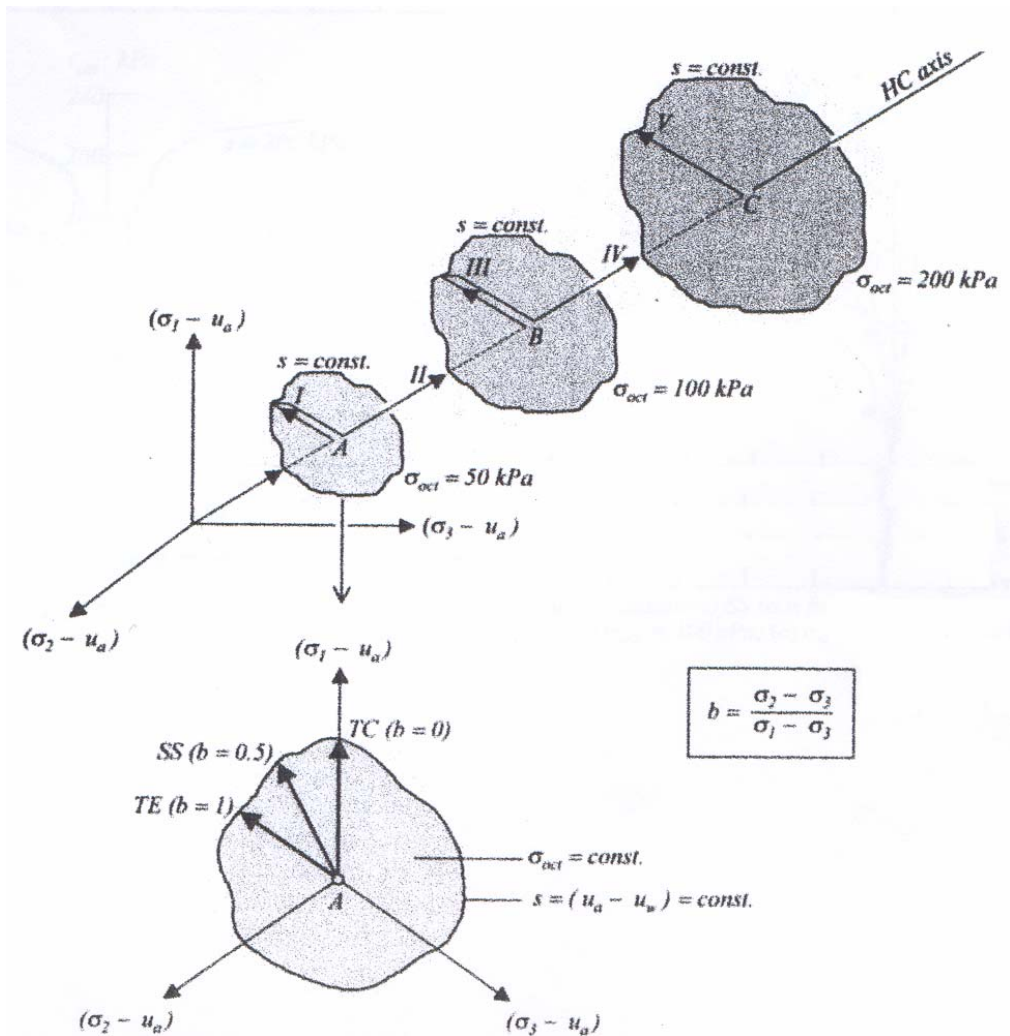


Figura 2.10: Envoltórias de tensões, em I-II-III-IV-V: múltiplos estágios de trajetórias tensões.

2.2 Comportamento de solos não saturados

2.2.1 Estrutura do solo não saturado

A estrutura dos solos é constituída por partículas sólidas e por vazios. Na condição saturada todos os vazios estão preenchidos por água. Quando o solo está

seco, todos os seus vazios estão totalmente preenchidos por ar. Por fim, na condição não saturada os vazios são preenchidos parcialmente por água e ar. Em países tropicais, frequentemente, os solos se encontram-se naturalmente não saturados.

A quantidade de água nos vazios do solo não saturado pode ser quantificada por meio do seu grau de saturação. Nessa circunstância, os volumes ocupados pelo ar e pela água podem estar dispostos de uma das seguintes formas:

a) Bolhas de ar totalmente envolvidas pela água, oclusas, que não se comunicam. Isso, normalmente, ocorre quando o grau de saturação é alto acima de 85 a 90%.

b) Ar todo intercomunicado, assim como a água, formando canais que se entrelaçam no espaço. Isto ocorre para valores intermediários de graus de saturação; e

c) Ar todo interconectado e a água se concentrando nos contatos entre as partículas, além de molhá-las por delgada camada de água adsorvida. Isso ocorre quando o grau de saturação é muito baixo.

2.2.2 Sucção

A sucção no solo tem duas componentes: sucção matricial e sucção osmótica. A primeira é geralmente associada ao fenômeno da capilaridade e adsorção, decorrente da tensão superficial da água, sendo definida como a diferença entre a pressão de ar e a pressão da água ($u_a - u_w$), enquanto que a componente osmótica relaciona-se à presença de íons e outros solutos na água intersticial (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

ALONSO et al (1986) concluíram que, normalmente, a sucção matricial é a mais relevante no comportamento dos solos não saturados e que o tipo de soluto

e sua concentração afetam o comportamento volumétrico, mas não a sucção osmótica.

Segundo TEIXEIRA e VILAR (1997), a sucção matricial precisa ser conhecida ou controlada, pois desempenha papel fundamental no comportamento do solo, visto que a deformabilidade e a resistência ao cisalhamento variam diretamente com a sucção. Contribuem para a sucção matricial os efeitos das forças capilares e de adsorção, de difícil separação na prática, obrigando que, na maioria dos trabalhos, sejam feitas abordagens considerando a influência global da sucção matricial no comportamento dos solos.

2.2.3 Curva característica

A relação entre a quantidade de água presente no solo e a sucção matricial pode ser chamada: curva característica de sucção, curva de retenção de água do solo, curva característica de retenção da água, curva característica, etc. Do mesmo modo, não existe uma padronização quanto à forma de apresentação da curva característica. A sucção aparece tanto no eixo das abscissas quanto das ordenadas, em escala normal ou logarítmica. O conteúdo de água aparece sempre em escala normal, mas é expresso de diferentes formas, a partir de umidade volumétrica, umidade gravimétrica ou grau de saturação do solo. Pode-se dizer também que são muito poucos os trabalhos que especificam o tipo de medida de sucção realizada, se total ou matricial.

A curva característica, apresentada na Figura 2.11, pode ser utilizada para fornecer uma estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, como a permeabilidade, resistência ao cisalhamento e variação de volume (FREDLUND e XING, 1994).

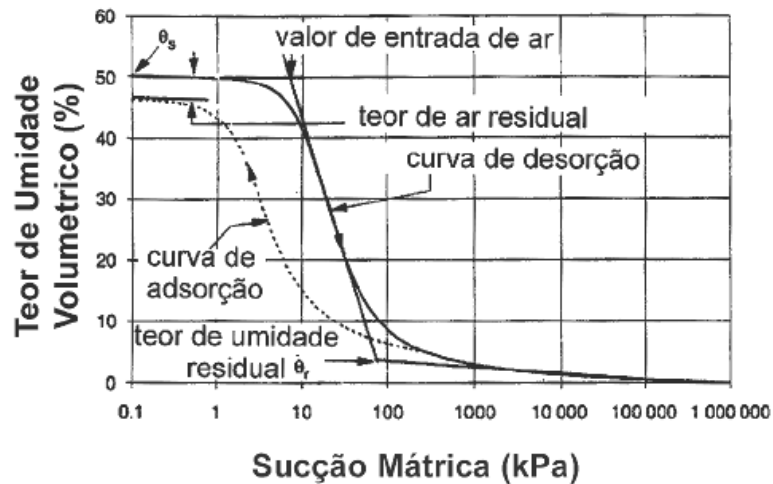


Figura 2.11: Curva característica típica de um solo siltoso (adaptado de FREDLUND e XING, 1994).

Devido a grande variação do teor de umidade, existem vários métodos de obtenção de curvas características. Alguns métodos são indicados para valores de teor de umidade mais baixos, enquanto que outros para valores mais altos. Pode-se citar a técnica do papel filtro, tensiômetros, câmaras de sucção que usam a técnica de translação de eixos, dentre outros (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

A curva característica varia em função do tipo de solo e também em função da trajetória seguida durante o ensaio, se de secagem ou umedecimento. A diferença entre as curvas de secagem e umedecimento é denominada de histerese, como pode ser observado na Figura 2.12. Não existe, portanto, um único ponto de equilíbrio entre o teor de umidade e a sucção do solo (LU & LIKOS, 2004).

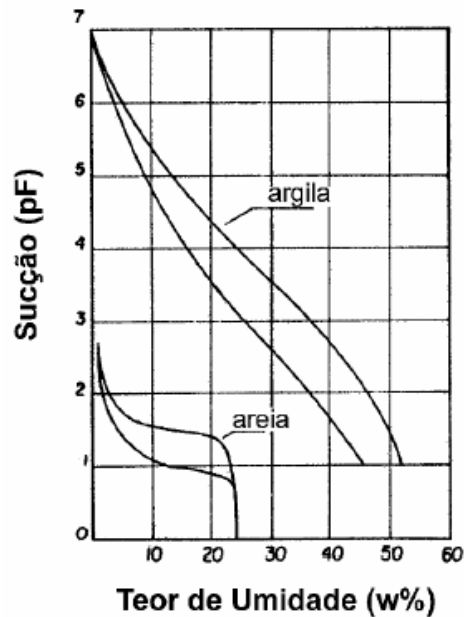


Figura 2.12: Curva característica típicas para solos argilosos e arenosos e fenômeno da histerese. (Machado & Zuquette, 2004)

Várias equações foram propostas na tentativa de reproduzir matematicamente a curva de um solo. Todas elas requerem a definição de alguns parâmetros de ajuste, além da sucção de entrada de ar e de teores de umidade residual e saturado (FREDLUND & XING 1994).

2.2.4 Resistência dos solos não saturados

Em ensaios de compressão triaxial obtém-se como resultado a curva de tensão *versus* deformação da qual, além da resistência ao cisalhamento, pode-se obter várias características da deformabilidade dos solos.

A influência da sucção no cisalhamento de solos não saturados pode ser observada através da curva tensão *versus* deformação, sendo necessário realizar ensaios com a mesma tensão confinante, porém com sucções diferentes e constantes para cada ensaio. Na Figura 2.13 este efeito é representado através do esquema com três ensaios hipotéticos com tensão confinante constante e sucção (S) variando. Analisando os gráficos, o que se verifica é que, quanto maior a

sucção, maiores serão a rigidez e as tensões necessárias para romper o solo. Tal comportamento foi observado por diversos pesquisadores (JOSA et al 1987; REIS, 1998; etc.).

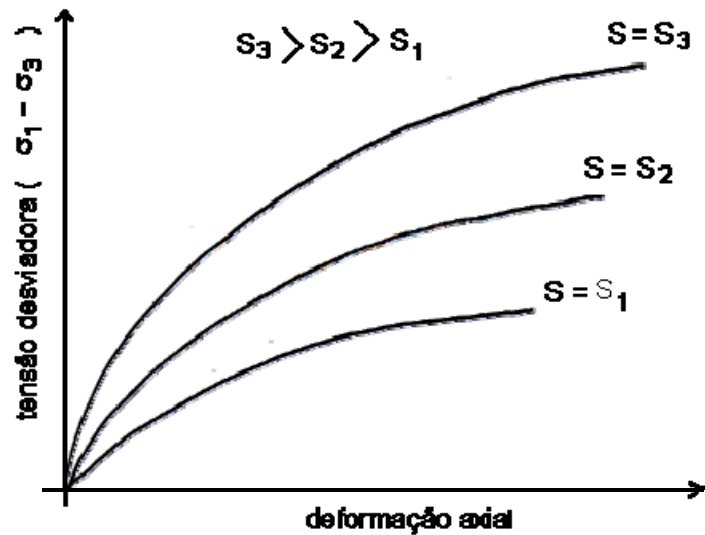


Figura 2.13: Gráfico tensão versus deformação em função da sucção, para mesma tensão confinante.

No adensamento a influência da sucção pode ser avaliada através do gráfico de tensão aplicada *versus* índices de vazios. É necessário realizar vários ensaios de adensamento com sucção constante para o mesmo ensaio, e sucção variável para ensaios diferentes (Figura 2.14). Analisando a figura fica claro que quanto maior a sucção do solo, menor é a variação do índice de vazios durante o ensaio, ou seja, mais rígido ele se torna.

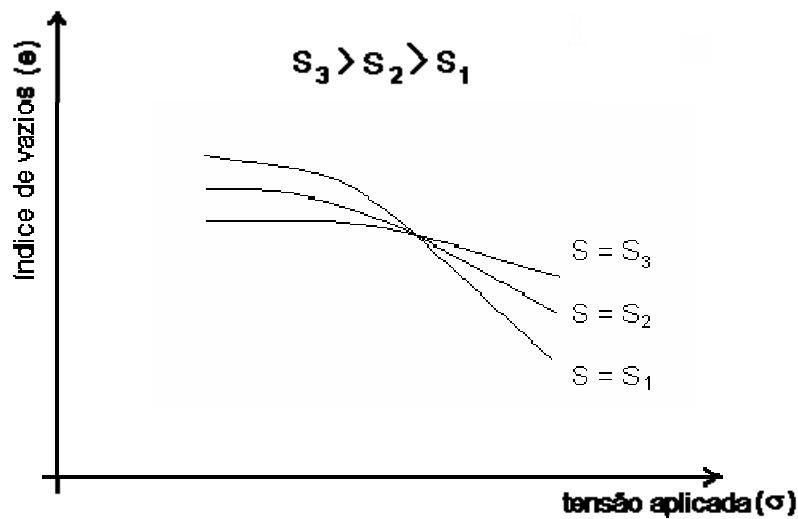


Figura 2.14: Gráfico ilustrando o comportamento índice de vazios versus tensão aplicada em função da sucção.

Como o princípio das tensões efetivas explicava aspectos correspondentes à resistência e à deformação dos solos nas condições seca e saturada, tentou-se estender esse princípio para explicar também o comportamento dos solos não saturados. Vários autores como CRONEY et al (1958), BISHOP (1959), AITCHISON (1961), JENNINGS (1961) e RICHARDS (1966) apud FREDULND & RAHARDJO (1993) propuseram generalizações do princípio das tensões efetivas para solos não saturados. Todas as equações propostas introduzem parâmetros que quantificam o efeito da sucção no valor da tensão efetiva. BISHOP (1959) propôs a equação 2.1:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w) \quad (2.1)$$

em que σ' é a tensão efetiva, σ a tensão total, u_a a pressão do ar e u_w a pressão de água, sendo χ um parâmetro que depende do grau de saturação e varia de zero para solo seco à unidade para solo saturado.

Proposta dessa maneira, entretanto essa expressão não consegue explicar a diminuição de volume que ocorre em solos não saturados à medida que a umidade

aumenta, ou seja, o efeito denominado colapso por umedecimento. Ainda tem-se a dificuldade em mensurar o parâmetro χ , que é altamente dependente do tipo de ensaio, ou seja, da trajetória de tensões e dos ciclos de molhagem e secagem (FARIAS, 2004).

Em vista disso, as variáveis de tensões mais usadas para definir o estado de tensão dos solos não saturados referem-se à tensão total líquida ($\sigma - u_a$), e a sucção mátrica ($u_a - u_w$).

FREDLUND et al, (1978) propuseram uma equação alternativa para a resistência ao cisalhamento, que nada mais é do que uma extensão do critério de Mohr-Coulomb para solos não saturados, expressa pela equação 2.2:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (2.2)$$

em que c' é o intercepto de coesão para condição saturada; ϕ' é ângulo de atrito do solo e ϕ^b é o ângulo que expressa o aumento do intercepto coesivo do solo em função da sucção matricial. Na Figura 2.15, mostra-se a extensão da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para solos não saturados.

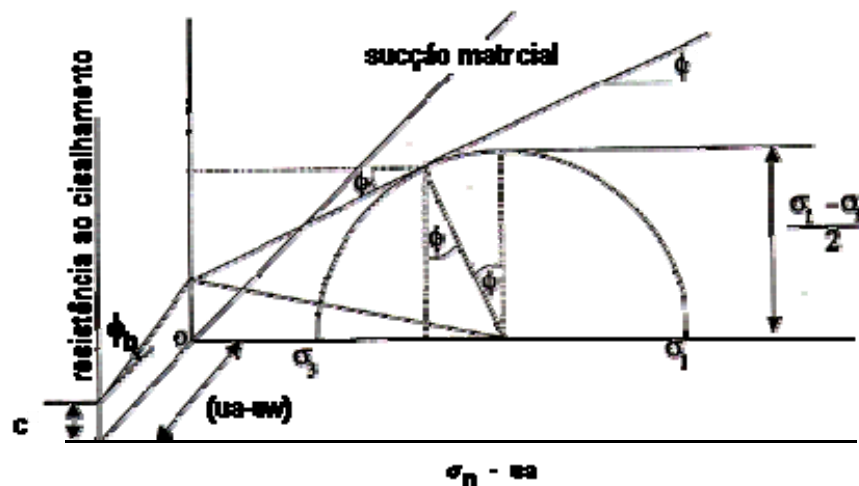


Figura 2.15: Extensão da envoltória de Mohr - Coulomb para solos não-saturados (Fonte: FREDLUND et al., 1978).

Em alguns trabalhos interessantes realizados no Brasil analisou-se a variação de ϕ^b com a variação da sucção, dos quais podem – se citar ROHM e VILAR (1994), TEIXEIRA e VILAR (1997), REIS e VILLAR (2004) e LOPES et al (2006).

ROHM e VILAR (1994) estudaram um solo arenoso laterizado da região de São Carlos, SP procurando analisar a não linearidade da variação da resistência ao cisalhamento com a sucção matricial. Em uma análise conjunta de características específicas deste solo, observou-se que a não-linearidade da relação q versus sucção matricial parecia estar relacionada com a microestrutura desse solo, que se mostrou esponjosa ou como um conjunto de “pipocas”, permitindo a ocorrência de grandes poros (inter-aglomerados) e de minúsculos outros poros (intra-aglomerados). Nos ensaios realizados, verificou-se que, exatamente para sucções a partir de 200 kPa, ϕ^b tendia a ficar constante, aproximando-se de um valor nulo. Em ensaios realizados por ROHM e VILAR (1995) foi observado que ϕ' variava com a sucção e que, como já foi comentado, a resistência variava com a sucção de maneira não-linear.

TEIXEIRA e VILAR (1997) estudaram um solo arenoso laterítico, compactado, na região centro-leste do Estado de São Paulo. Das conclusões referentes à sucção, que dizem respeito à ϕ e ϕ^b , observou-se uma linearidade na relação q versus $(p - u_a)$ para cada valor de sucção e que o aumento da sucção causa aumento do intercepto de coesão, uma vez que o ângulo de atrito não foi afetado. Outra observação importante é que os valores de resistência eram crescentes com a sucção e pareciam tender para um valor assintótico, ou seja, ϕ^b tendia a um valor constante, provavelmente nulo.

REIS e VILLAR (2004) estudaram o comportamento tensão versus deformação de dois horizontes de um solo residual de gnaisse, pertencentes a um perfil típico da cidade de Viçosa – MG, na condição não saturada, com diferentes valores de sucção. O estudo apoiou-se em ensaios de caracterização física e mineralógica, em ensaios destinados às análises porosimétricas e morfológicas (lâminas delgadas), e em ensaios de compressão triaxial, em diferentes direções de

cisalhamento e distintas trajetórias de tensão. Das conclusões referentes ao estado não saturado do solo observou-se que o ângulo de atrito interno praticamente não apresentou variação com a sucção matricial, como pode ser observado na Figura 2.16.

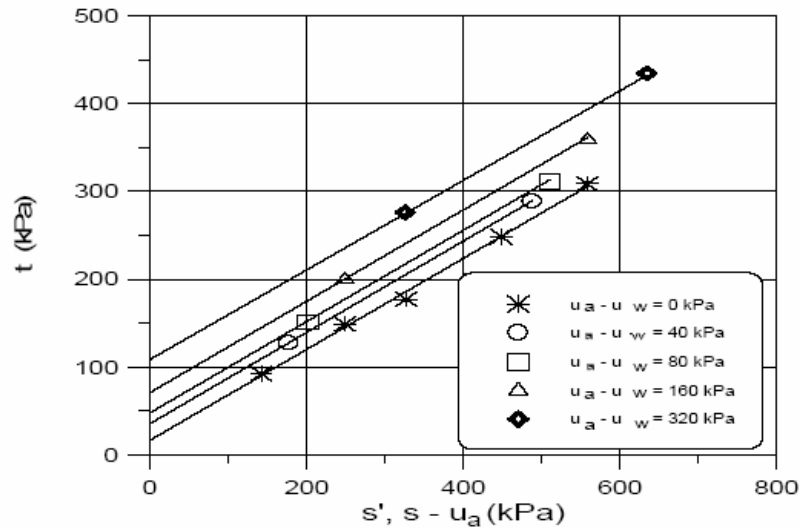


Figura 2.16: Envoltórias de resistência obtidas para várias sucções (solo maduro REIS e VILLAR 2004).

REIS e VILLAR (2004) ainda observaram que o intercepto de coesão crescia com a sucção numa relação que pode ser bem representada por uma função hiperbólica. Além disso, apresentou uma alternativa de previsão de envoltória de resistência, baseada nos parâmetros de resistência do solo saturado e nos resultados de ensaios correspondentes a um valor de sucção conhecido. A função hiperbólica foi ajustada aos pontos experimentais pela equação 2.3, utilizando-se o método dos mínimos quadrados, para obtenção dos parâmetros a e b .

$$c = c' + \left[\frac{(u_a - u_w)}{a + b \cdot (u_a - u_w)} \right] \quad (2.3)$$

Na equação 2.3 a e b são parâmetro do solo. Na Figura 2.17 apresenta-se o ajuste obtido por REIS e VILLAR (2004).

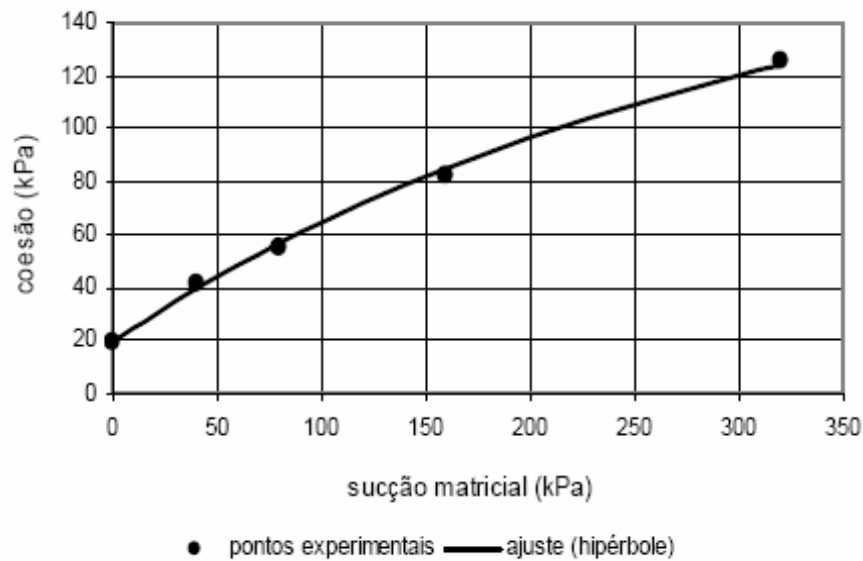


Figura 2.17: Variação da coesão em função da sucção matricial (solo maduro).

REIS e VILLAR (2004) observaram que esses resultados concordam com os resultados obtidos por diversos autores: ESCÁRIO & SAÉS (1987), DELEGE et al (1987), FREDLUND et al (1987).

Outro fato interessante observado por REIS e VILAR (2004) foi que ϕ^b e ϕ' eram iguais para valores iniciais de ϕ^b que concorda com as observações de ESCÁRIO & SAÉS (1987) e FREDLUND et al (1987).

LOPES et al, (2006) estudaram um solo residual jovem, retirado de um talude na região do Taquaril, Belo Horizonte- MG. Para analisar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento do solo, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada. Nos ensaios variou-se as tensões normais líquidas (σ_{nl}) de 50, 100 e 200 kPa e as sucções mátricas ($u_a - u_w$) de 25, 50, 100 e 200 kPa. Foi observado que para baixos valores de sucção, houve um rápido crescimento de ϕ^b , tendendo a um valor constante à medida que a sucção matricial aumentava. Esse comportamento não linear foi bem representado pela equação hiperbólica mostrada anteriormente.

LOPES et al, (2006) ressaltaram ainda que, para sucções entre 0 e 25 kPa, o valor de ϕ^b encontrado era menor que ϕ' , discordando, portanto, de autores

como ESCÁRIO & SAÉS (1986) e FREDLUND et al (1987), que afirmam que para uma faixa de sucção baixa, ϕ^b tenderia a um valor próximo de ϕ' . Além disso, estudos realizados por ABRAMENTO (1988), ROHM (1992) apud LOPES et al (2006), ROHM & VILAR (1995) e TEIXEIRAS & VILAR (1997) mostraram valores ϕ^b muito maiores que ϕ' , para baixos valores de sucção.

Conclui-se, portanto, que a não linearidade da curva de resistência (q) *versus* sucção mostra uma tendência não linear que pode ser ajustada por uma equação hiperbólica. Porém, as relações entre ϕ^b e ϕ' ainda são objeto de estudo sujeito a opiniões diferentes. Uma provável explicação para tais discordâncias pode estar relacionada com possíveis diferenças na microestrutura dos solos analisados.

3. EQUIPAMENTO TRIAXIAL CÚBICO

3.1 Descrição do equipamento triaxial cúbico

Neste item apresenta-se o equipamento triaxial cúbico de tensão controlada desenvolvido para ensaiar solos não-saturados com sucção controlada. O equipamento foi construído a partir de modificações realizadas no equipamento triaxial cúbico, originalmente construído por REIS e AZEVEDO (1998, 1999) para ensaiar solos saturados ou secos.

O equipamento é composto por: célula triaxial cúbica, sistema de aplicação e medição de pressão, sistema de medição de deslocamentos e sistema de aquisição de dados. Foi projetado para ensaiar amostras cúbicas de 6 cm de lado. O princípio de funcionamento constitui, basicamente, da aplicação de pressão de ar comprimido nas seis membranas que transmitem a pressão para as faces da amostra fazendo com que essa se deforme e, se for o caso, atinja a ruptura. As deformações são medidas através das leituras dos deslocamentos feitas por transdutores existentes em cada face da amostra.

Para ser possível realizar ensaios em amostras saturadas por contra-pressão, ou em amostras com uma determinada sucção (ensaios com sucção matricial controlada), foi acrescentada uma nova linha de aplicação de pressão no painel de controle do equipamento original. Em ensaios com amostras não-saturadas, essa linha serve para aplicar uma pressão de ar diretamente dentro da célula triaxial cúbica, ou seja, diretamente nos poros do corpo de prova que se encontra dentro da célula. Nesse caso, coloca-se em uma das membranas, uma pedra porosa especial de alta entrada de pressão de ar que, depois de saturada, permite apenas a passagem da água que a pressão de ar aplicada expulsa dos poros da amostra. Essa técnica, chamada translação de eixos (Hilf 1956), possibilita o controle da sucção matricial dentro da célula. Quando o ensaio é realizado com amostras saturadas, essa linha de aplicação de pressão é ligada diretamente à

interface ar/água. Nesse caso, aplica-se a pressão desejada ao ar que, através da interface, transmite para a água.

As tubulações do painel de aplicação do equipamento original eram de ferro galvanizado. Por causa disso, enferrujavam com facilidade e freqüentemente danificavam as válvulas reguladoras de pressão, registros e manômetros. Modificou-se o painel trocando os tubos de ferro galvanizado por mangueiras plásticas de alta pressão, eliminando os problemas comentados anteriormente. Na Figura 3.1 mostra-se uma visão geral do equipamento.

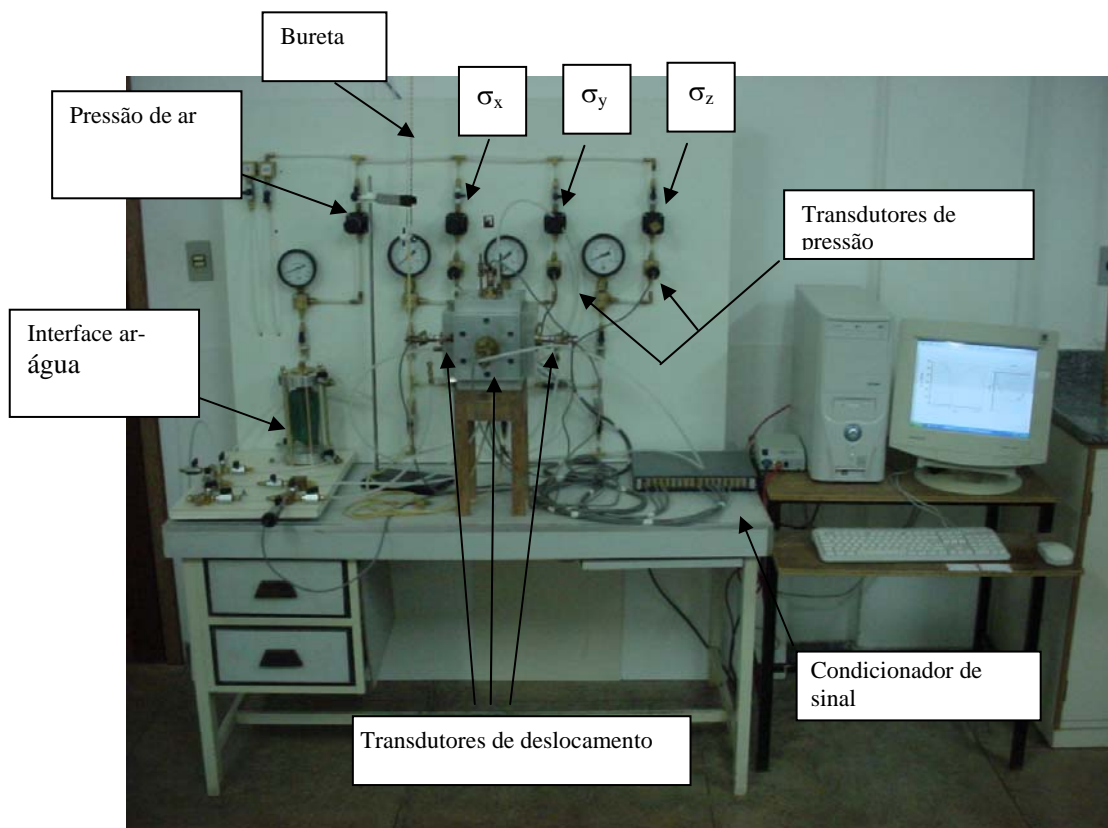


Figura 3.1: Vista geral do equipamento triaxial cúbico.

A seguir são apresentados detalhes de cada um dos componentes do equipamento triaxial cúbico desenvolvido.

3.1.1 Célula Triaxial Cúbica

A célula triaxial cúbica (Figura 3.2) é composta por um quadro de reações e seis faces laterais nas quais se encaixam as seis membranas de aplicação de pressão.



Figura 3.2: Célula triaxial cúbica.

3.1.1.1 Quadro de reação

O quadro de reação, feito de alumínio, aloja a amostra cúbica e serve para fixar as seis faces que seguram as membranas.

Na Figura 3.3, mostra-se uma visão geral do quadro, podendo-se observar a cavidade cúbica com 6,5 cm de lado, local onde fica a amostra a ser ensaiada. Nota-se também uma depressão cilíndrica, com 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, garantindo dessa forma a estanqueidade da cavidade.



Figura 3.3: Visão geral do quadro de reação da célula triaxial cúbica.

3.1.1.2 Faces laterais

As faces laterais, também confeccionadas de alumínio, são responsáveis pela transmissão das pressões para a amostra. Além disso, servem de suporte para os transdutores de deslocamento. No novo equipamento, uma dessas faces foi modificada para tornar possível a realização de ensaios não saturados com sucção controlada.

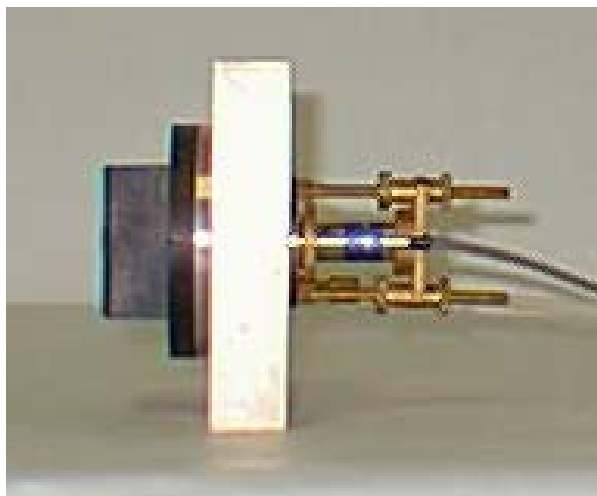


Figura 3.4: Visão geral da face lateral original.

Para tornar possível a utilização da técnica de translação de eixos (Hilf, 1956), introduziu-se uma pedra porosa de alta entrada de pressão de ar na membrana da face inferior. Desse modo, o equipamento passa a possuir cinco faces iguais às originais e uma face modificada quando o ensaio a ser realizado for o não saturado.

Uma das faces originais é mostrada na Figura 3.4. Internamente essa face é mostrada na Figura 3.5 e possui as seguintes dimensões; 14,7 cm de lado por 4,49 cm de espessura. Cada face lateral possui, em sua parte interna, três tipos de furo denominados D1, D2 e D3. Através do furo D1 se aplica a pressão de ar nas membranas; pelo furo D2 passa o medidor de deslocamento, e pelos furos D3 passam os parafusos de fixação da face no quadro de reação. Ainda na Figura 3.5, nota-se uma parte cilíndrica que contém um dente, no qual é encaixada a borda da membrana. Essa parte encaixa-se na depressão cilíndrica do quadro de reação de tal maneira que, quando aparafusada contra o quadro de reação, permite que a membrana fique totalmente presa entre os dois.

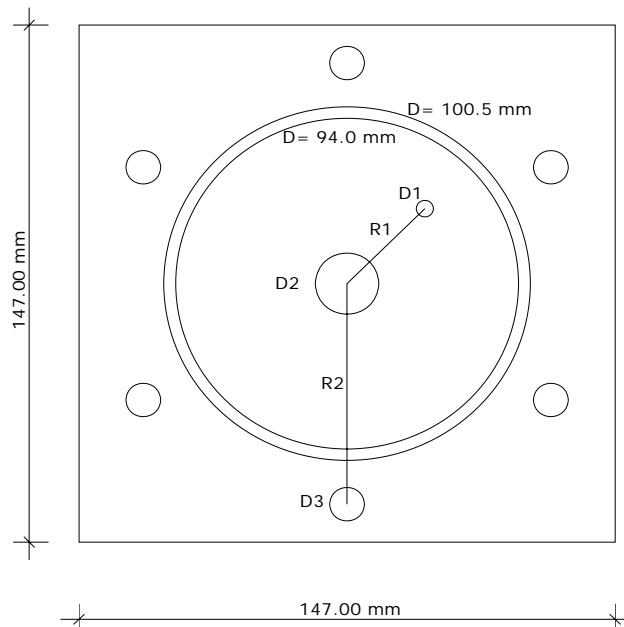


Figura 3.5: Vista interna da face lateral.

Na Figura 3.6 ilustra-se um esquema em corte de uma das cinco faces originais. Pode-se observar o furo no quadro de reação para introdução de ar (ensaios com sucção controlada) ou água (ensaios com amostras saturadas) na amostra.

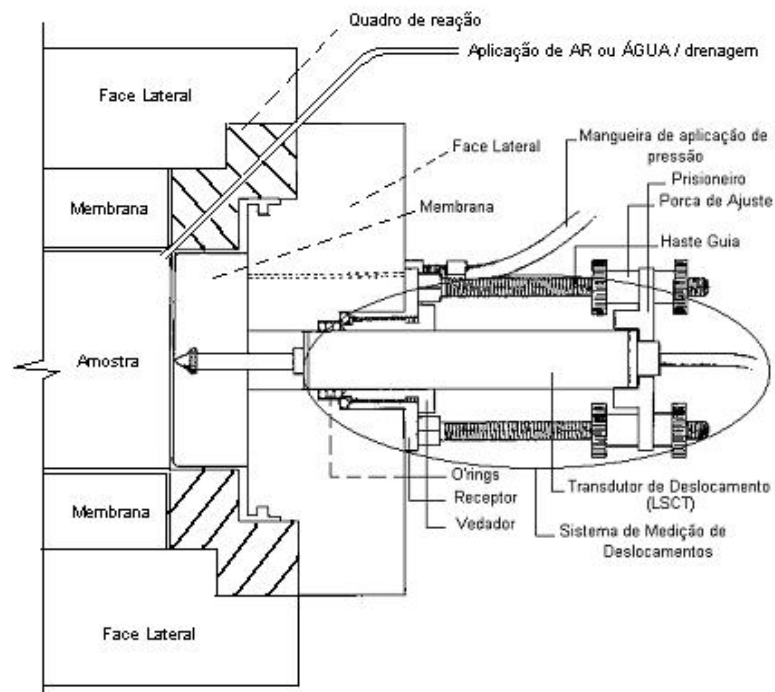


Figura 3.6: Face normal com sistema de deslocamento e furo no quadro de reação para aplicação de ar ou água no interior da amostra.

Na Figura 3.7 apresenta-se um esquema em corte da face modificada para abrigar a pedra porosa especial usada nos ensaios com sucção controlada. Entre outras coisas, pode-se observar que a pressão da água é controlada pela altura de uma pequena coluna de água colocada em uma bureta graduada.

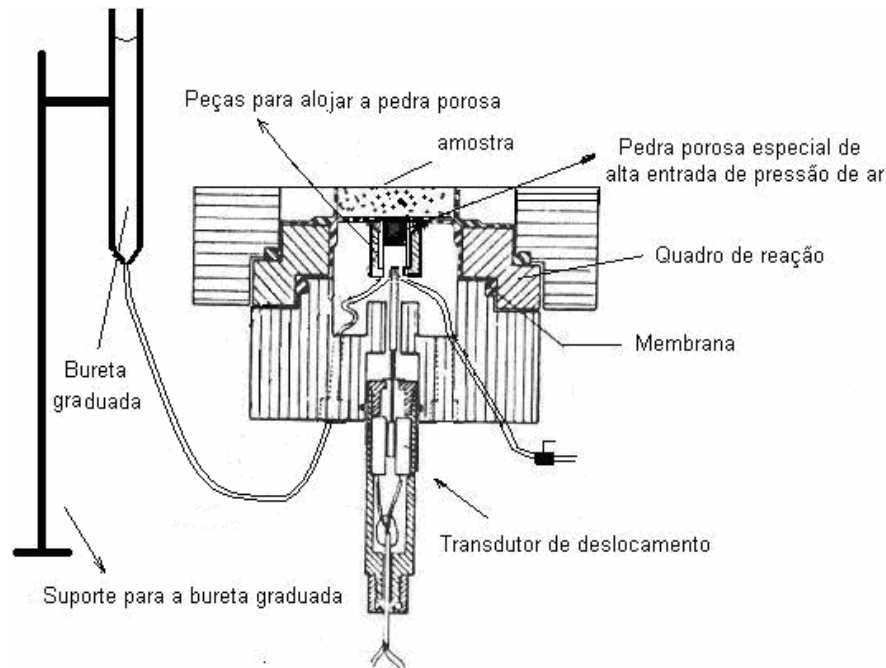


Figura 3.7: Face inferior modificada para aplicação da técnica de translação de eixos.

3.1.1.3 Membranas de Aplicação de Pressão

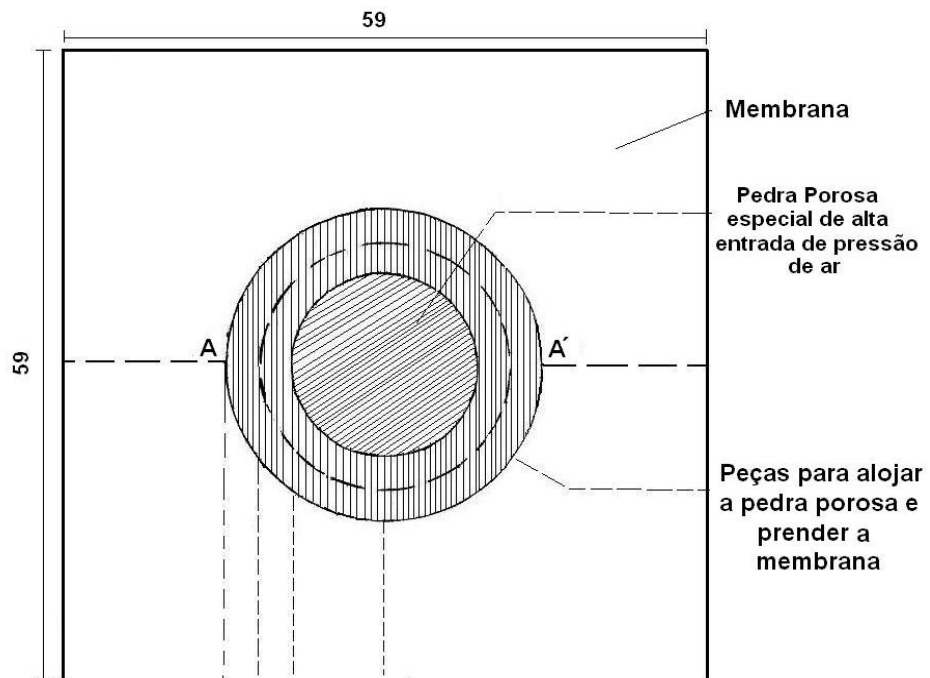
A principal função destas membranas é transmitir, por meio de pressão de ar aplicada no seu interior, uma tensão uniforme nas faces da amostra.

Nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 mostra-se a membrana usada na face modificada. Pode-se perceber que a pedra porosa especial tem um diâmetro pequeno em relação ao tamanho da face. Isso é positivo porque a amostra continua sendo carregada com tensão controlada (membrana flexível). Por outro lado, dificulta a saída, ou entrada, de água necessária ao equilíbrio das porosidades diante da sucção imposta. Entretanto, essa dificuldade pode ser contornada, uma vez que o equilíbrio é feito em câmaras especiais, antes de se colocar o corpo de prova na célula triaxial, como se verá adiante.

A peça que aloja a pedra porosa de alta entrada de pressão de ar é aparafusada na peça inferior, de modo que a membrana fique presa entre as duas (Figuras 3.8 e 3.9). Assim o ar aplicado no interior da câmara é transmitido para

os poros da amostra e o excesso de água contida nos poros passa pela pedra porosa e vai para a bureta graduada aberta para a atmosfera (Figura 3.7). Quando o fluxo de água estabiliza, as pressões de ar e água estão em equilíbrio. Nesse momento, a sucção matricial na amostra é igual à pressão de ar aplicada menos a pressão da água, aproximadamente 10 kPa (correspondente a altura da água na bureta). O objetivo dessa pequena pressão de água é manter a pedra porosa saturada durante o ensaio e também permitir um fluxo de água na câmara embaixo da pedra para retirada de eventuais bolhas de ar em qualquer instante, inclusive durante o ensaio.

a) VISTA SUPERIOR



b) CORTE A A'
UNIÃO DAS PEÇAS
(MACHO E FÊMEA)

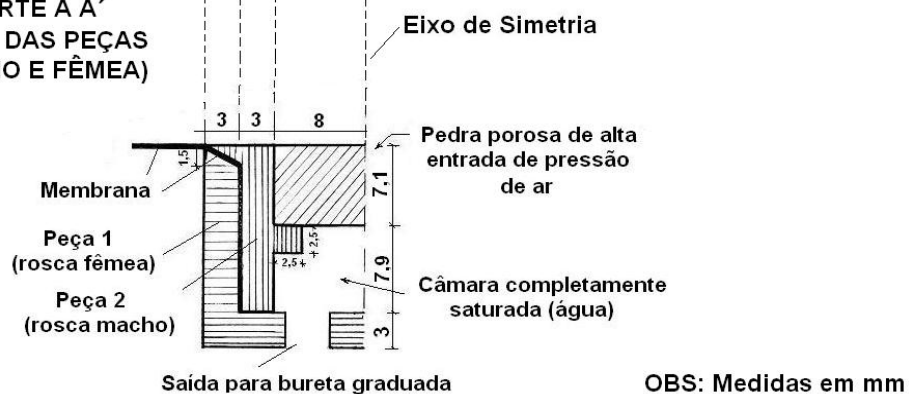


Figura 3.8: Vista superior e corte da união das peças 1 e 2 com a membrana.

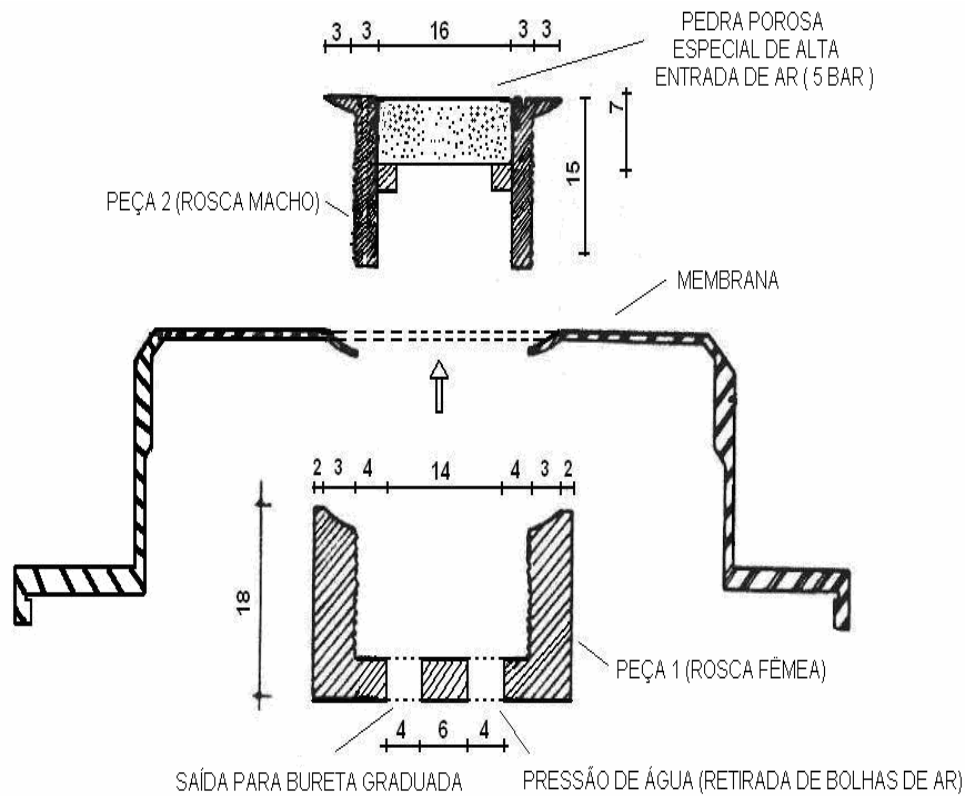


Figura 3.9: Detalhe do encaixe da pedra porosa de alta entrada de pressão de ar na membrana.

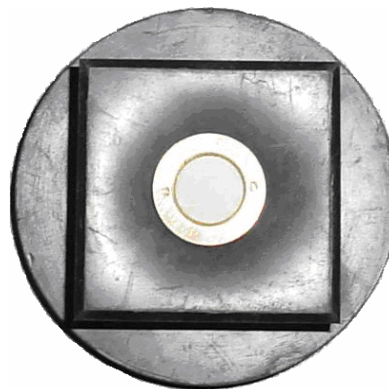


Figura 3.10: Vista superior da membrana com a pedra porosa especial.

No que diz respeito à membrana, quatro requisitos são fundamentais para assegurar a sua boa qualidade: transmitir uma distribuição de tensão uniforme sem restringir a deformação da amostra, não absorver parte das tensões aplicadas

durante o carregamento, não interferir significativamente com membranas adjacentes e não romper durante o carregamento.

A membrana utilizada foi feita com borracha de silicone vulcanizada, para ser impermeável ao ar, com um moldador composto de uma tampa, que possuía quatro pontos extravasares, e uma base que, quando juntas, deixavam um espaço vazio entre elas correspondente às dimensões da membrana (FARIAS e AZEVEDO, 1986).

3.1.2 Sistema de aplicação e medição de pressão

Esse sistema é dividido em duas partes: a primeira é responsável pela aplicação de pressão de água ou ar no interior da amostra e a segunda aplica pressão de ar nas seis faces laterais (pressão de confinamento e cisalhamento das amostras). Os componentes que constituem esse sistema são: compressor de ar e garrafas de nitrogênio, painel de controle, tubos flexíveis e interface ar água.

3.1.2.1 Compressor de ar e garrafas de nitrogênio

O compressor utilizado, da marca SCHULZ, tem capacidade de aplicar até 1.000 kPa. As pressões chegam até o painel de controle através de uma linha de ar comprimido existente no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). As garrafas de nitrogênio são usadas quando é necessário usar uma pressão superior a 1000 kPa e também em momentos de despressurização do compressor de ar.

3.1.2.2 Painel de controle e tubos flexíveis

Na Figura 3.11 mostra-se o painel de controle de pressão com seus componentes: um ramo de ligação principal, quatro ramos principais, quatro

válvulas reguladoras de pressão, quatro manômetros, quatro transdutores de pressão e registros de esfera. Os registros de esfera permitem isolar ou combinar as três linhas de aplicação de pressão.

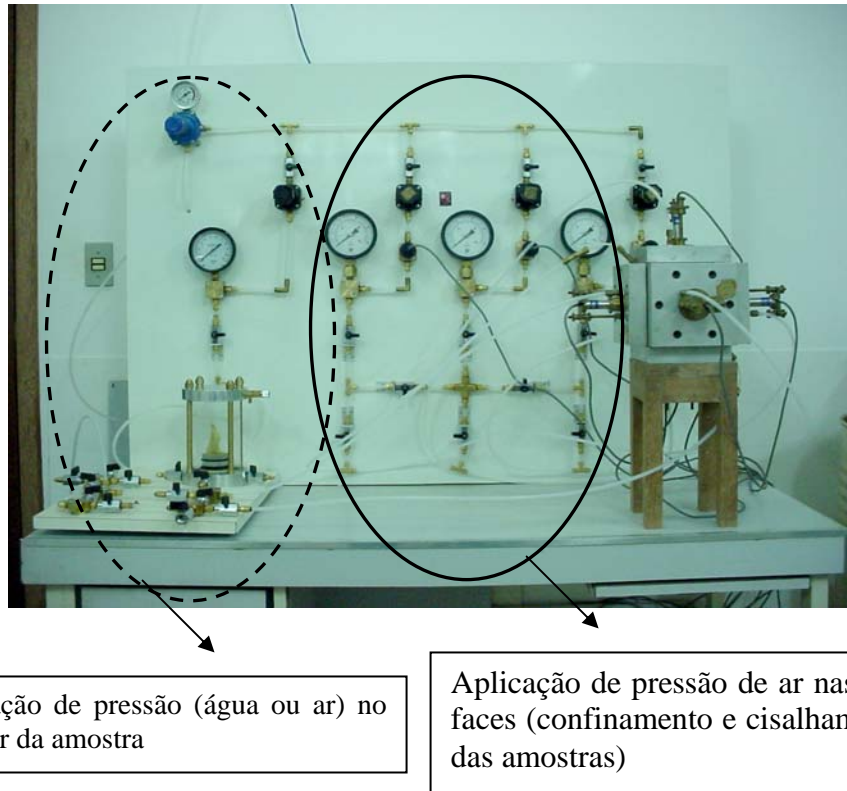


Figura 3.11: Sistemas de aplicação de pressão do equipamento triaxial cúbico para ensaios saturados por contra-pressão e ensaios com sucção controlada.

Tubos flexíveis levam o ar comprimido da saída do painel de controle até furos do tipo D1 das faces laterais da célula triaxial ou até o interior da amostra confinada na célula triaxial. Na Figura 3.11, os três ramos principais que ficam mais a direita do painel de controle de aplicação de pressão são bifurcados de forma a se poder aplicar a mesma pressão em duas faces opostas da amostra. O ramo principal, a esquerda, dependendo do tipo do ensaio, aplica ar na interface ar-água (ensaio saturado) ou nos poros da amostra de solo (ensaio com sucção controlada).

3.1.2.3 Interface ar/água

A interface ar/água é ligada diretamente à quarta linha de aplicação de pressão (a linha a esquerda na Figura 3.11). Ela é usada quando o ensaio é realizado em amostras saturadas. A função dessa interface é transmitir a pressão aplicada de ar para a água, possibilitando assim que se aplique uma contra-pressão de água no interior do corpo de prova ensaiado para “garantir” a sua saturação.

Na Figura 3.12 apresenta-se o esquema de aplicação de pressão de água no interior da amostra para realização de ensaios com amostras saturadas. A pressão de ar passa pela interface ar-água permitindo que a pressão de água chegue à amostra por meio de dois furos existentes numa mesma diagonal do quadro de reação, um na parte superior e outro na parte inferior, possibilitando assim a saturação da amostra por contrapressão.

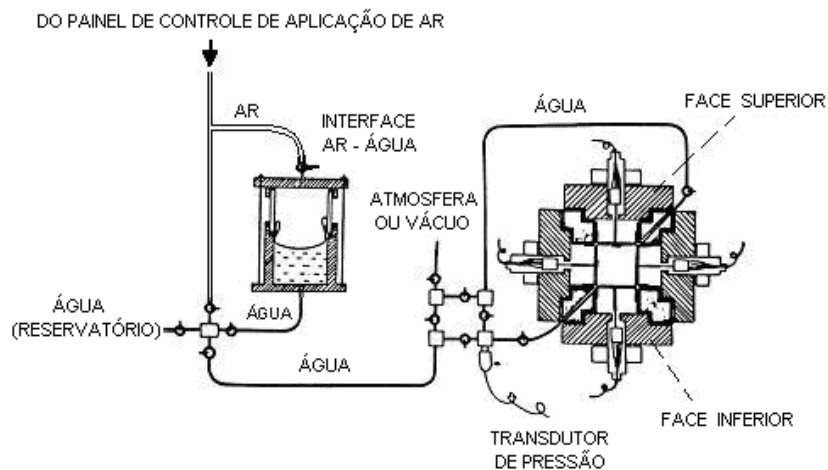


Figura 3.12: Aplicação de pressão de água no interior da amostra.

Na Figura 3.13 ilustra-se o esquema de aplicação de pressão de ar no interior da amostra para realização de ensaios com sucção controlada. A pressão de ar chega à parte superior da amostra por meio de dois furos feitos na parte superior do quadro de reação.

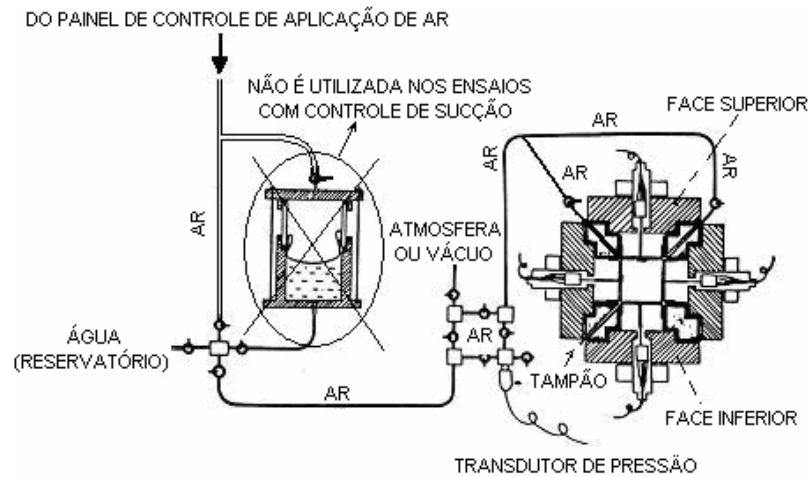


Figura 3.13: Aplicação de pressão de ar no interior da amostra.

3.1.3 Câmaras de pré-instalação de sucção

Como foi mencionado anteriormente, para acelerar o equilíbrio da amostra com a sucção que se deseja realizar o ensaio, visto que a pedra porosa de alta entrada de pressão de ar tem dimensões reduzidas na célula triaxial cúbica, prepararam-se câmaras que fazem a “instalação” da sucção na amostra antes dessa ser levada para a célula triaxial.

O sistema de pré-aplicação de sucção matricial é constituído por câmaras de pressão cilíndricas que têm em sua base uma pedra porosa de alta entrada de pressão de ar com 5 cm de diâmetro. Cada câmara é conectada a um painel de ar comprimido. Assim, nessas câmaras por meio da técnica de translação de eixos (Hilf, 1956), o corpo de prova é submetido à sucção matricial que se deseja executar o ensaio triaxial cúbico (Figura 3.14).



Figura 3.14: Vista das câmaras de pressão para instalar a sucção.

O período de permanência do corpo de prova para instalação da sucção foi determinado através da observação da constância de peso da amostra. O uso desse sistema foi muito importante, uma vez que agilizou a execução dos ensaios. Com as câmaras de sucção foi possível aplicar sucções diferentes ou iguais em até três corpos de prova simultaneamente. Quando as amostras do conjunto atingiam a sucção desejada, uma delas era retirada e levada para a célula triaxial cúbica para ser realizado o ensaio, sendo colocada uma nova amostra na câmara de sucção. Ao final desses ensaios, novos corpos-de-prova já podiam ser ensaiado porque suas sucções já estavam instaladas.

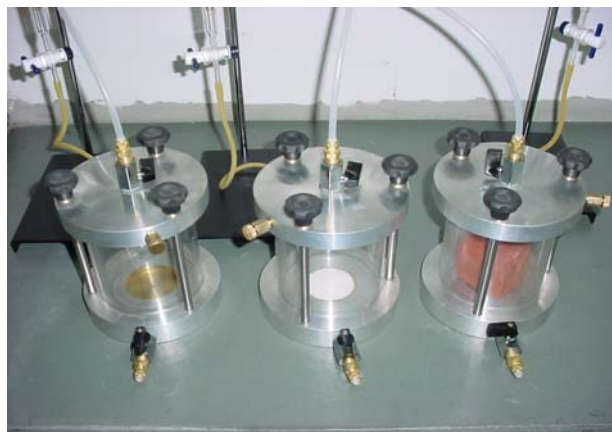


Figura 3.15: Detalhe das câmaras mostrando local de encaixe da perda porosa especial.

Estão apresentados na Figura 3.15, detalhes do interior das câmaras de pré-aplicação de sucção, mostrando a primeira câmara ainda sem a pedra porosa colada, a segunda já com a pedra porosa colocada e por último mostra-se a câmara com um corpo de prova em seu interior para se instalar uma determinada sucção.

3.1.4 Sistema de medição de deslocamento

O sistema de medição de deslocamento, composto de um transdutor de deslocamento para cada face lateral, além de um sistema de fixação, vedação e regulagem foi totalmente desenvolvido na UFV (Reis, 1990). Os transdutores usados têm curso de 25 mm e foram fabricados pela Wykeham Farrance (Figura 3.16).

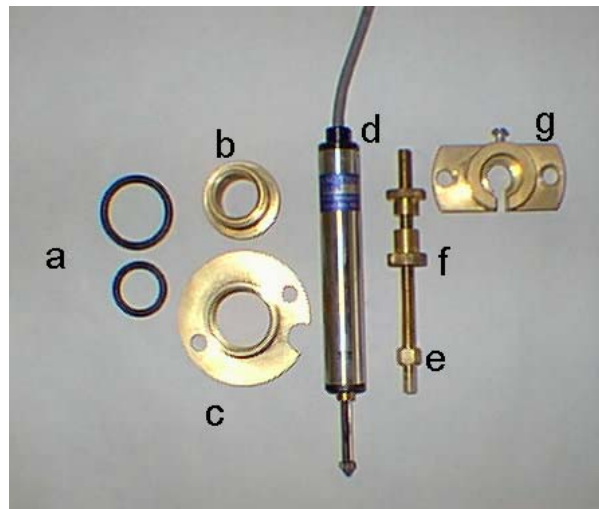


Figura 3.16: Transdutor de deslocamento desmontado, (a) anéis de vedação, (b) vedador, (c) receptor, (d) transdutor, (e) haste guia, (f) porcas de ajuste, (g) prisioneiro.

Para que o ar não escapasse pela tampa do transdutor de deslocamento, por onde sai o cabo contendo os fios de transmissão de sinais, foram utilizados um anel de vedação e uma cola ultra-rápida (Araldite) na parte interna da tampa.

3.1.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um controlador de sinais, um conversor analógico/digital e um programa (AqDados da Lynx) conforme apresentado na Figura 3.17. O sistema funciona 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 digital. O programa de aquisição de dados tem a função de armazenar e permitir cálculos com os dados.

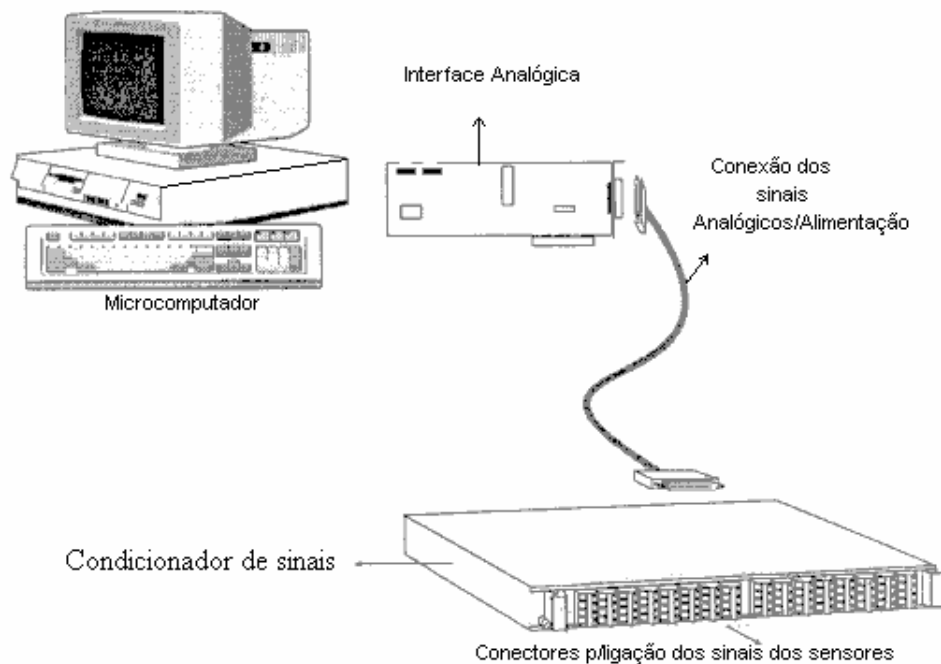


Figura 3.17: Esquema com todos os componentes do sistema de aquisição de dados.

Uma opção importante oferecida pelo programa de aquisição de dados é a calibração dos transdutores de pressão e de deslocamento.

A calibração dos transdutores de pressão foi realizada através da aplicação de pressão por potes de mercúrio a uma célula triaxial convencional, na qual, em uma saída, se colocou o transdutor ligado ao sistema de aquisição de dados e, na

outra, outro transdutor pressão, já calibrado com o sistema de potes de mercúrio. Aplicava-se uma pressão à célula que era medida com o transdutor já calibrado. Neste instante, fazia-se a leitura da voltagem no transdutor que estava sendo calibrado.

A calibração dos transdutores de deslocamentos foi realizada com auxílio de um paquímetro. Este procedimento era feito, primeiramente, com o transdutor com a haste totalmente comprimida, leitura que deveria corresponder ao valor zero. Para determinar outros pontos da curva de calibração, deslocava-se de um valor conhecido, medido com um paquímetro, a haste do transdutor e registrava-se a voltagem correspondente.

A frequência de aquisição utilizada nos ensaios foi de 1Hz. Esta frequência elevada era importante, sobretudo nas horas que os incrementos de tensão eram aplicados. Esta frequência gerava em cada etapa de carregamento um grande número de leituras de deslocamentos. Em vista disso, como só era necessária à última leitura de deslocamento de cada etapa de carregamento, anotava-se esse valor em uma planilha do *Excel* especificamente preparada para isso.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Nesse capítulo, apresenta-se o programa experimental realizado, descrevendo-se as características do solo e as metodologias utilizadas nos experimentos. O solo escolhido foi coletado no mesmo talude, cerca de um metro acima, do que foi usado no trabalho de REIS (2004) para que fosse possível fazer comparações que permitissem verificar o bom funcionamento do novo equipamento.

No programa experimental foram realizados ensaios tanto em trajetórias convencionais como não-convencionais, com solos saturados e não saturados. Além disso, obteve-se a curva de retenção de água do solo por meio das técnicas do papel filtro e da placa de sucção.

4.1 Características do solo ensaiado

O material ensaiado é um solo residual jovem de gnaiss coletado em um talude situado no município de Viçosa, MG. Em uma primeira fase foram realizados ensaios de caracterização do material: distribuição granulométrica, limite de consistência e massa específica dos sólidos. Na Figura 4.1 apresenta-se o resultado do ensaio granulométrico realizado por peneiramento e sedimentação, e no Quadro 4.1 estão indicados o resultado dos ensaios de massa específica dos sólidos, limite de liquidez, limite de plasticidade e as porcentagens granulométricas. Esses ensaios foram realizados segundo as normas técnicas da ABNT.

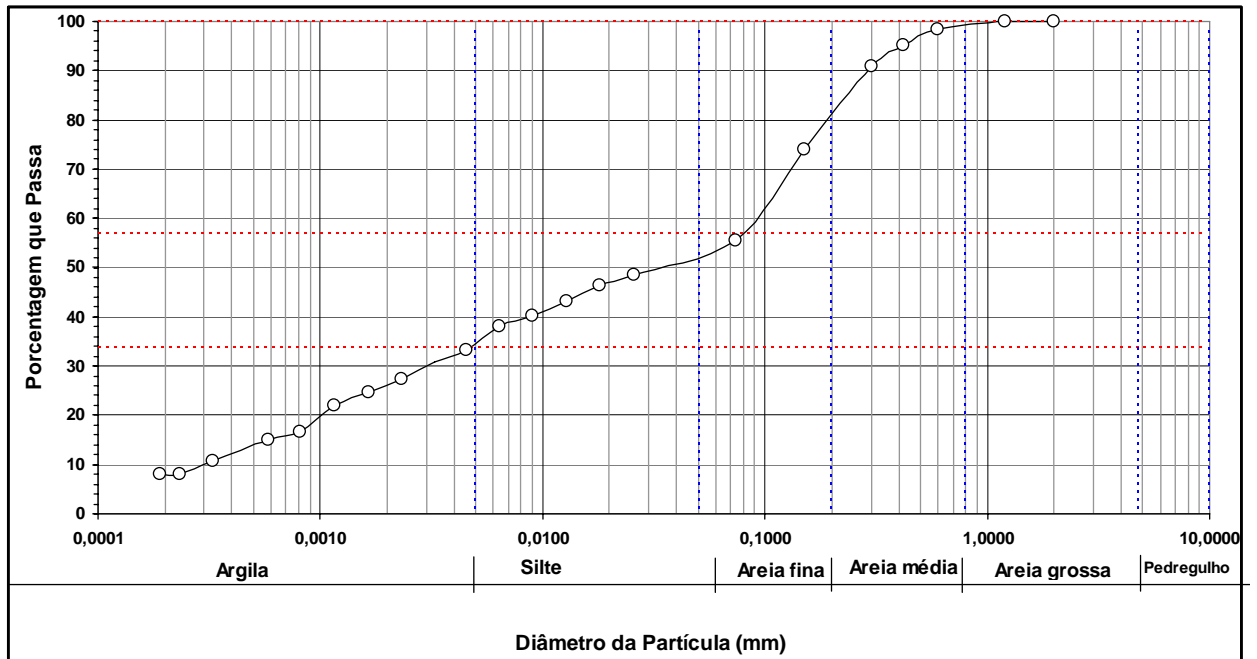


Figura 4.1: Curva Granulométrica do solo analisado.

Quadro 4.1: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica.

γ_s (KN/m ³)	LIMITES (%)			GRANULOMETRIA (%)			
	LL	LP	IP	argila	silte	areia	pedregulho
27,7	51	36	15	35	17	48	0

4.2 Preparação dos corpos de prova

Amostras indeformadas do solo foram coletadas em cilindros de PVC, com aproximadamente 30 cm de diâmetro e 45 cm altura. Na Figura 4.2 apresenta-se detalhes da coleta do solo.



Figura 4.2: Detalhe da coleta de amostra indeformada no campo.

Imediatamente após a coleta, o cilindro com amostra de solo era levado para o laboratório de geotecnia da UFV, onde era parafinado nas extremidades e levado para a câmara úmida, na qual permanecia até o momento da moldagem dos corpos de prova.

Na preparação dos corpos de prova procedeu-se da seguinte maneira:

i) dividiu-se a amostra cilíndrica em blocos menores sempre observando e marcando a direção topo base;

ii) separava-se um desses blocos para moldar o corpo de prova cúbico. Os demais eram adequadamente embalados e levados de volta para a câmara úmida;

iii) usando-se o bloco separado, moldava-se o corpo de prova (um cubo com arestas de 6cm). Com o uso de estiletes e o auxílio de uma forma de aço no formato de um berço (Figura 4.3), eram feitos os ajustes finais para se conseguir a dimensão desejada;



Figura 4.3: Detalhe da forma de aço no formato de berço e cubo rígido de aço em formato cúbico com 6 cm de lado.

iv) o corpo de prova moldado (Figura 4.4) era embalado, identificado e guardado na câmara úmida até o momento do ensaio;

v) usava-se o solo descartado durante a moldagem do corpo de prova para se determinar o teor de umidade da amostra.



Figura 4.4: Detalhe da amostra moldada em formato cúbico com 6 cm de lado.

4.3 Ensaios realizados

Foi realizado um programa de ensaios triaxiais que compreendeu ensaios em trajetórias convencionais e não-convencionais (triaxiais verdadeiros, ou seja, $(\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3)$) com amostras saturadas e não-saturadas do solo. Os dezenove ensaios realizados foram os seguintes:

A) Ensaios em trajetórias convencionais;

i) 04 ensaios com sucção matricial de 80 kPa, sendo 03 do tipo CTC com tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa e o último do tipo HC (compressão hidrostática);

ii) 04 ensaios com sucção matricial de 160 kPa, sendo 03 do tipo CTC com tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa e o último do tipo HC (compressão hidrostática);

iii) 04 ensaios com amostras saturadas, sendo 03 do tipo CTC com tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa e o último do tipo HC (compressão hidrostática);

B) Ensaios em trajetória não-convencionais (Figuras 4.5 e 4.6)

i) 01 ensaio saturado, com tensão octaédrica de 100kPa e ângulo de Lode de 30°;

ii) 03 ensaios com sucção matricial de 80 kPa, tensão octaédrica de 100kPa, e ângulos de Lode respectivamente iguais a 0°, 30° e 60°;

iii) 03 ensaios com sucção matricial de 160 kPa, tensão octaédrica de 100kPa, e ângulos de Lode respectivamente iguais a 0°, 30° e 60°;

Nas Figuras 4.5 e 4.6 apresentam uma visão esquemática das representações de um estado de tensão em função das tensões principais $\sigma_1 - u_a$, $\sigma_2 - u_a$ e $\sigma_3 - u_a$ e por meio das tensões octaédricas σ_{oct} e τ_{oct} e do ângulo de Lode

θ_{oct} . Sendo σ_{oct} e τ_{oct} definidos pelas equações 4.1 e 4.2, no item 4.3.6 desse capítulo serão apresetadas a seguir as equações que demonstram como o ângulo de ângulo de Lode (θ_{oct}) foi determinado no momento do ensaio.

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4.1)$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (4.2)$$

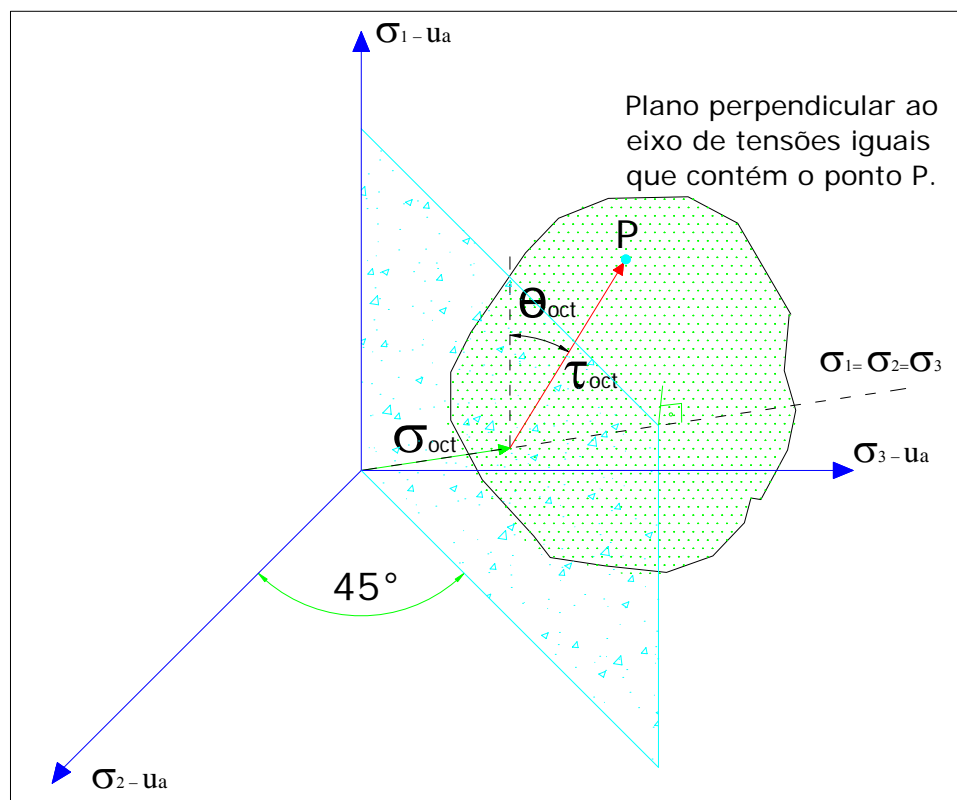


Figura 4.5: Representação esquemática em 3D de um estado de tensão em trajetória não convencional.

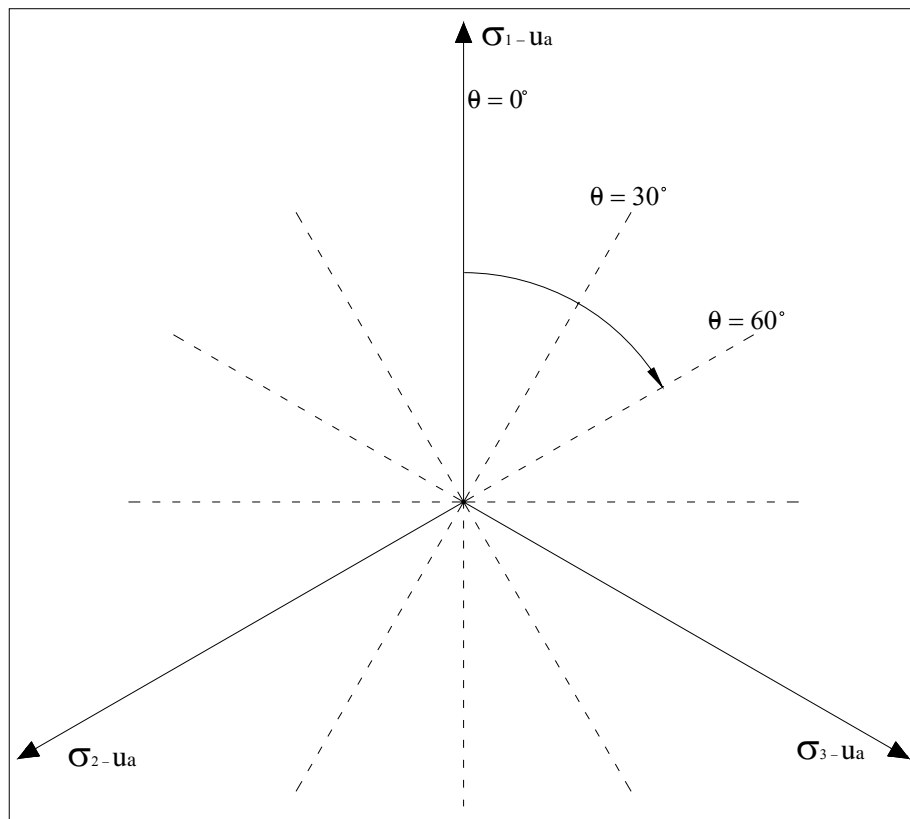


Figura 4.6: Plano perpendicular ao eixo de tensões iguais ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), ou seja, plano octaédrico indicando o sentido de variação do ângulo θ_{oct} .

Por fim, foi realizado um ensaio para se obter a curva de retenção de água do solo. A técnica usada para traçar uma parte dessa curva foi a do papel filtro, tendo-se usado o papel Whatman nº 42, enquanto que para a outra parte da curva usaram-se as câmaras de sucção. Foram moldados 14 corpos de prova cilíndricos com 2 cm de altura e diâmetro médio de 4,75 cm, como ilustrado na Figura 4.7. Uma dessas amostras foi colocada na câmara de sucção, e as demais foram ensaiadas com papel filtro.



Figura 4.7: Detalhe da amostra moldada em formato cilíndrico.

4.3.1 Calibração da deformabilidade da célula triaxial cúbica

Realizou-se um ensaio de compressão hidrostática com um corpo de prova rígido apresentado na Figura 4.3, com o objetivo de verificar a deformabilidade do aparelho. Verificou-se que as deformações da amostra eram desprezíveis, só ocorrendo o movimento de corpo rígido, uma vez que os deslocamentos registrados em faces opostas eram praticamente iguais.

4.3.2 Procedimentos nos ensaios

O procedimento inicial de acondicionamento do corpo de prova na célula triaxial cúbica independentemente do ensaio ser saturado ou não é o mesmo. É muito importante reduzir ao máximo o atrito entre membranas adjacentes e entre membrana e o corpo de prova. Para isso, todas as membranas devem ser lubrificadas com graxa de silicone previamente a realização dos ensaios garantindo, desse modo, que a tensão aplicada seja uma tensão principal. A partir daí, para todos os tipos de ensaios, procede-se da seguinte maneira:

i) Retiram-se apenas três faces laterais para que a amostra possa ser colocada na célula triaxial cúbica, como pode ser visto na Figura 4.8.

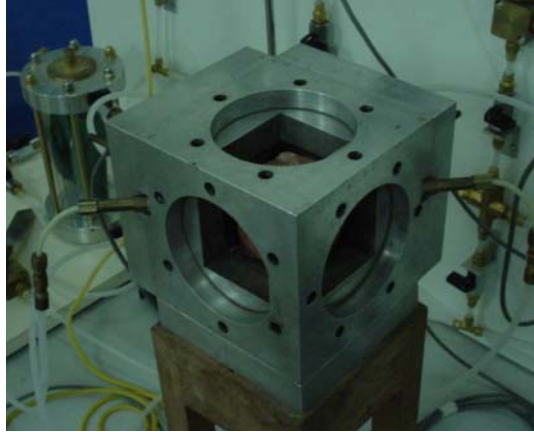


Figura 4.8: Detalhe da amostra dentro da célula triaxial cúbica.

ii) Coloca-se a amostra na célula triaxial com auxílio de uma espátula.

iii) Colocam-se as três faces retiradas e apertam-se os parafusos de cada face de maneira alternada, de modo a garantir um aperto uniforme (Figura 4.9).



Figura 4.9: Detalhe da célula triaxial cúbica com todas as faces colocadas.

iv) Entra-se no programa de aquisição de dados, o qual estará mostrando na tela todas as leituras de cada canal de medição de deslocamento, medidas pelos transdutores de deslocamentos instalados em cada uma das faces da célula triaxial.

Para cada tipo de ensaio foi desenvolvida uma planilha específica no programa *Excel*, em que se anotavam, para cada incremento de pressão conhecido, os valores dos deslocamentos após a estabilização das leituras. Assim, à medida que os dados eram digitados na planilha, o gráfico tensão *versus* deformação ia sendo traçado. Este procedimento permitiu observar e controlar o ensaio à medida que era realizado, uma vez que, é através da inclinação da curva tensão *versus* deformação que se sabe se a ruptura está próxima. À medida que essa inclinação diminui os acréscimos de tensões precisam ser cada vez menores, para que se possa definir melhor a tensão máxima suportada pelo solo.

4.3.3 Ensaio de compressão hidrostática

O ensaio de compressão hidrostática consiste em comprimir igualmente todas as faces do corpo de prova cúbico. Pode ser realizado com o corpo de prova na condição saturada ou não saturada. Na primeira condição é necessário que, primeiramente, proceda-se à saturação do corpo de prova através da aplicação de pressão na interface ar/água através da abertura dos registros T12, T13 e T14. Essa pressão é transmitida para a água no interior do corpo de prova através dos registros T16, T17 e T18 mostrados na Figura 4.10. O procedimento de saturação será mais detalhado quando for descrito o ensaio triaxial saturado do tipo CTC (Compressão triaxial Convencional) no item 4.3.5.

No caso de o ensaio ser não saturado, o corpo de prova é submetido à sucção matricial desejada através dos registros T12, T13, T15, T17 e T18 (Figura 4.10).

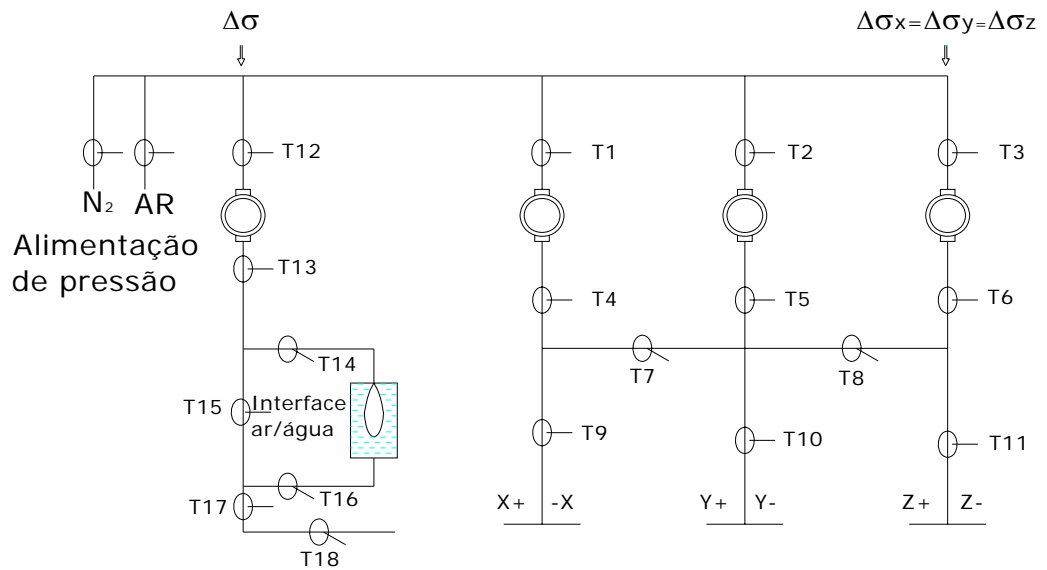


Figura 4.10: Esquema das linhas de aplicação de pressão.

Nos ensaios com amostras saturadas não-saturadas, a pressão no interior do corpo de prova deve ser cerca de 5 kPa menor do que a pressão confinante, para garantir que o corpo de prova não esteja sendo carregado durante as fases de saturação ou instalação de sucção e, também, para garantir a integridade dos transdutores de deslocamento e das membranas flexíveis.

Na fase de compressão hidrostática utiliza-se apenas uma linha de aplicação de pressão, mantendo-se as demais linhas fechadas. Na Figura 4.10, ilustra-se um esquema desse ensaio, em que os registros T1, T2, T4 e T5 encontram-se fechados e os registros T3, T6, T7, T8, T9, T10 e T11 abertos. O ensaio é realizado aplicando-se sucessivos acréscimos de tensão e lendo-se, após a estabilização, os deslocamentos medidos pelos transdutores. O procedimento é repetido até que se alcance a pressão máxima desejada. Quanto ao tempo de estabilização, verificou-se que, nesse ensaio, as leituras se estabilizavam com rapidez (cerca de dois minutos).

4.3.4 Ensaio de compressão triaxial não saturado

O procedimento seguido para a realização desses ensaios é o seguinte:

i) Retira-se o corpo de prova da câmara úmida;

ii) Mede-se o corpo de prova e ajusta-se para 60 mm alguma dimensão que, eventualmente, seja maior que esse valor;

iii) Pesa-se o corpo de prova;

iv) Borrifa-se o corpo de prova com água destilada e deairada a uma distância de cerca de 1m para não danificá-lo. O intuito desse procedimento é levar a umidade gravimétrica até próximo da saturação, e dessa forma, fazer com que todas as amostras ensaiadas sigam uma trajetória hídrica semelhante, antes da aplicação da sucção matricial;

v) Pesa-se o corpo de prova umedecido;

vi) Leva-se o corpo de prova para uma das câmaras de aplicação de sucção. Nela, por meio da técnica de translação de eixos (Hilf, 1956), o corpo de prova é submetido à sucção que se deseja executar o ensaio triaxial cúbico.

vii) O corpo de prova deve permanecer nessa câmara até que se tenha certeza que a sucção de ensaio foi instalada, o que pode ser avaliado através da pesagem diária do mesmo. A sucção desejada estará instalada quando não houver variação do peso do corpo de prova entre duas pesagens consecutivas.

viii) Transfere-se o corpo de prova para a célula triaxial cúbica e começa-se o ensaio não saturado, composto das seguintes etapas:

I) Reequilíbrio de sucção;

II) Adensamento e

III) Ruptura.

Na primeira etapa, como pode ser observado na Figura 4.11, aplica-se a pressão de ar com mesmo valor da sucção instalada, devendo-se, simultaneamente, aplicar uma pressão de confinamento, nas faces laterais do CP, 5kPa maior que a pressão de ar, como já foi mencionado. O cessar do movimento de água na bureta, estabelece quando a fase de reequilíbrio termina. Apesar de a duração dessa fase ser curta, poucas horas, padronizou-se executá-la em um período de um dia para garantir que a sucção matricial já estivesse totalmente reequilibrada. Quando o corpo de prova é colocado na célula triaxial é mantido o mesmo estado de tensão que o corpo de prova estava submetido antes, na câmara de sucção.

Na etapa de adensamento, aplica-se uma compressão hidrostática no valor do confinamento desejado em apenas um incremento de pressão. Passa-se, então, a monitorar os deslocamentos até que esses cessem. Nesse instante, o adensamento estará concluído. Normalmente, para o solo ensaiado, essa etapa durava entre 3 e 4 horas.

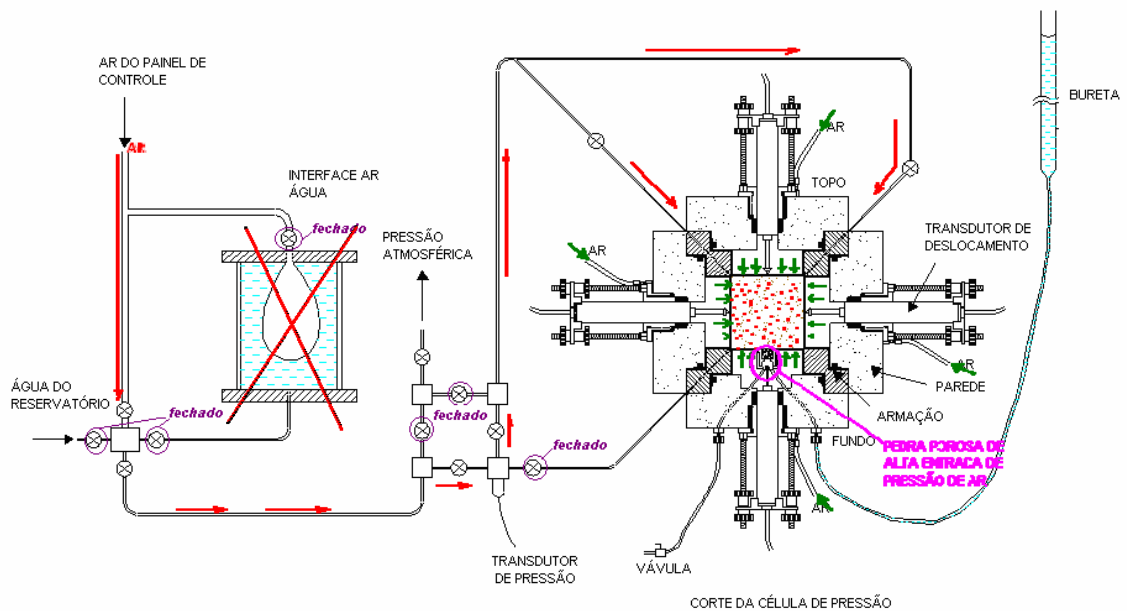


Figura 4.11: Esquema de funcionamento da célula triaxial cúbica no momento do reequilíbrio de sucção matricial.

Na etapa de ruptura do ensaio abre-se, primeiramente, a torneira T3 (Figura 4.10) para permitir o fluxo de ar nessa linha, na qual serão aplicados os acréscimos de pressão. A pressão confinante continuará sendo aplicada pela linha y, sendo necessário apenas fechar o registro T8 e manter abertos os registros T7, T9 e T10, garantindo assim trajetórias convencionais em que $\sigma_1 = \sigma_2$. Para iniciar os incrementos de pressão ajusta-se a válvula da linha z para a pressão correspondente ao primeiro incremento, abrem-se os registros T6 e T11 e espera-se a estabilização dos transdutores de deslocamento. Nesse momento são realizadas as leituras dos transdutores que são transferidas manualmente para a planilha *Excel*. Aplica-se novo incremento de tensão e repetem-se os procedimentos descritos anteriormente, até a ruptura do corpo de prova. Quanto ao tempo de estabilização, verificou-se que no início do ensaio, ou seja, para níveis de tensões afastados da ruptura, esse tempo era bem curto, por volta de dois minutos. Porém, para níveis de tensões próximos da ruptura, esse valor variava entre cinco e 30 minutos.

4.3.5 Ensaio de compressão triaxial saturado

O ensaio de compressão triaxial saturado é composto das seguintes etapas:

- I) Percolação (início da saturação);**
- II) Saturação (leitura do parâmetro B);**
- III) Adensamento e**
- IV) Ruptura.**

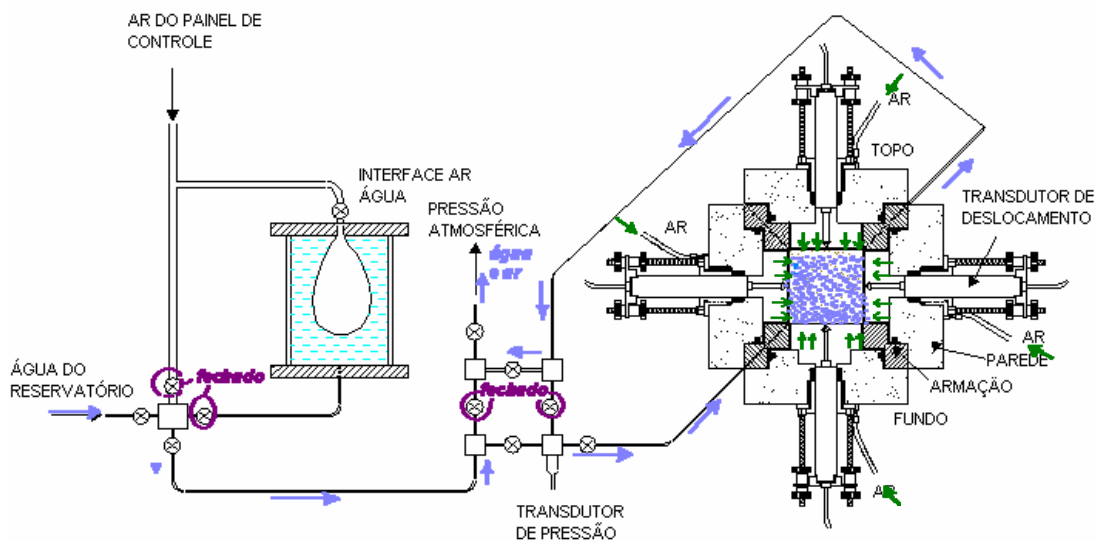


Figura 4.12: Esquema de funcionamento da célula triaxial cúbica no momento da percolação.

A fase de percolação é na realidade o início da saturação do corpo de prova. O tempo necessário nessa etapa depende do tipo de solo. Nesse caso, notou-se que, após cerca de 1 minuto, já se observava que a água passava através do corpo de prova. Essa etapa consiste em provocar um fluxo de água nos tubos flexíveis diretamente ligadas ao corpo de prova, confinado na célula triaxial. Para isso, inicialmente, usa-se a água do reservatório que se encontra sob uma pressão correspondente a cerca de 1,1 m de coluna de água. Como pode ser observado na Figura 4.12, a água do reservatório percola os poros do corpo de prova em fluxo ascendente, que facilita a retirada de bolhas de ar que porventura, estejam presas nos tubos flexíveis e nos poros do corpo de prova. Pelas razões já mencionadas, aplica-se simultaneamente uma pressão de confinamento, através das linhas de aplicação de pressão, 5 kPa maior que a pressão da água que circula pelo corpo de prova.

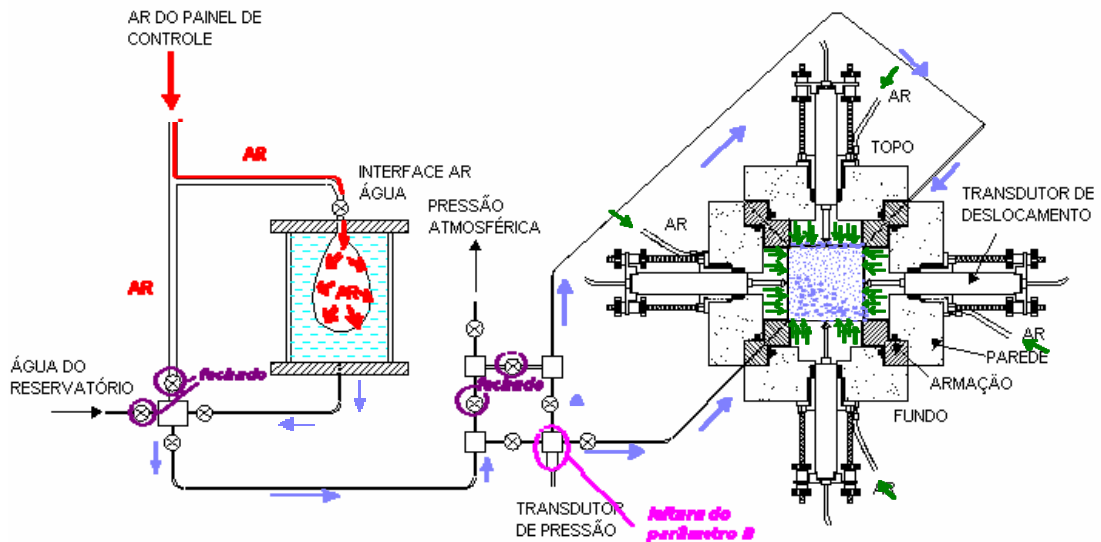


Figura 4.13: Esquema de funcionamento da célula triaxial cúbica no momento da saturação do corpo de prova.

Tendo observado que todo o ar foi retirado do sistema, inicia-se o processo de saturação do corpo de prova propriamente dito. Para isso, é necessário substituir a linha de aplicação de pressão da água vinda do reservatório pela quarta linha de aplicação de pressão de ar usando, nesse caso, a interface ar/água (Figura 4.13).

Para realizar a saturação do corpo de prova é necessário fechar a saída de água para a atmosfera, assim a água é forçada a entrar no corpo de prova através dos tubos flexíveis ligados na parte inferior e superior. Para promover a saturação do corpo de prova é necessário dar incrementos de pressão de ar na bexiga e manter uma pressão de confinamento cerca de 5 kPa maior que a pressão da água. Assim, aplicam-se incrementos de pressão tanto na água quanto no confinamento e espera-se a estabilização dos transdutores. Para saber se já ocorreu a saturação do corpo de prova faz-se a leitura do parâmetro B, através do uso da equação 4.1:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (4.3)$$

Como se sabe, em condições não-drenadas, se a tensão de confinamento aplicada é aumentada ou reduzida de um valor $\Delta\sigma$ conhecido e a variação correspondente de poro-pressão Δu é medida no transdutor de pressão, pode-se calcular o valor de B. Se o valor de B for igual a 1, a amostra pode ser considerada saturada.

Uma vez saturado o corpo de prova, o ensaio prossegue para as próximas etapas. Os procedimentos das etapas de adensamento e ruptura são iguais às descritas no item 4.3.4.

4.3.6 Ensaio de compressão triaxial verdadeiro ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)

Os procedimentos descritos anteriormente são válidos para esse tipo de ensaio, exceto a forma em que são aplicados os incrementos de tensão na fase de ruptura do ensaio. Os incrementos das tensões principais são obtidos a partir de uma tensão normal octaédrica (σ_{oct}) e de um ângulo de Lode (θ) adotados constantes, e de incrementos da tensão de cisalhamento octaédrica (τ_{oct}) a partir das equações 4.4, 4.5 e 4.6 (AZEVEDO 2006):

$$\sigma_1 = \sigma_{oct} + \sqrt{2} * \cos \theta * \tau_{oct} \quad (4.4)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{oct} - \frac{\sqrt{2}}{2} (\cos \theta + \sqrt{3} * \text{sen} \theta) \tau_{oct} \quad (4.5)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{oct} - \frac{\sqrt{2}}{2} (\cos \theta - \sqrt{3} * \text{sen} \theta) \tau_{oct} \quad (4.6)$$

4.3.7 Ensaio para determinação da curva característica

Foram empregadas duas técnicas na obtenção dos pontos da curva característica do solo: a câmara de sucção, com uma pedra porosa de alta

entrada de pressão de ar de ar de 500 kPa, e a técnica do papel filtro para sucções maiores do que 500 kPa.

Para os pontos obtidos através das câmaras de pressão seguiu-se o seguinte procedimento:

i) Moldaram-se vários corpos de prova cilíndricos, em anéis de PVC, cujos teores de umidade foram determinados;

ii) Posteriormente todos os corpo de prova foram umedecidos o máximo possível com algodão molhado, para que seguissem a mesma trajetória hídrica, desses um foi separado e colocado na câmara de sucção, conforme ilustrado na Figura 4.14.



Figura 4.14: Anel colocado na câmara de pressão.

iii) Aplicou-se, inicialmente uma sucção de 25 kPa, e, ao final de dois dias o anel foi pesado e recolocado na câmara de sucção. Esse procedimento foi seguido até que se observasse que o peso da amostra permanecia constante entre as pesagens, anotando-se esse valor e a sucção correspondente;

iv) A sucção era então incrementada e o mesmo procedimento das pesagens era realizado obtendo assim, mais um par de valores peso e sucção. Os demais pontos foram determinados sucessivamente até o valor de sucção de 500 kPa , limite de pressão suportado pela pedra porosa de alta entrada de ar.

No caso dos pontos determinados através da técnica do papel filtro, utilizou-se o papel filtro Whatman nº. 42, procedendo-se da seguinte forma:

i) Como os corpos de prova já estavam umedecidos o máximo possível, eles foram recolhidos em tempos diferentes para serem colocados em contato com o papel filtro;

ii) Colocavam-se, então, dois papéis filtro, um na face superior e outro na inferior de cada corpo de prova, que era imediatamente envolto em filme plástico e fita adesiva, identificado e deixado na câmara úmida por 7 dias em uma vasilha plástica.

iii) Após o período de 7 dias, os corpos de prova eram abertos, retiravam-se os papéis filtro e determinavam-se as umidades dos mesmos;

iv) Ao se remover o filme plástico, o papel filtro era retirado com auxílio de uma pinça, não devendo ficar exposto ao ar por mais que 5 segundos, e pesado em balança analítica com precisão de 0,0005g. Em seguida, o papel filtro úmido era colocado na estufa a uma temperatura de 105°C, por um período mínimo de 2 horas, e novamente pesado para obtenção do seu peso seco. O manuseio do papel filtro era realizado com a utilização de uma pinça e as pesagens eram realizadas em balanças de alta precisão. Conhecida a umidade do papel filtro, utilizaram-se curvas de calibração para determinação a do valor da sucção do corpo de prova. Nessa pesquisa não foi realizado o ensaio de calibração do papel filtro, tendo-se utilizado as curvas de calibração de CHANDLER et al. (1992), dadas pelas equações:

$$\text{I) Sucção (kPa)} = 10^{(6.05+2.48 \log w)}, \text{ para umidades do papel filtro } > 47\%$$

$$\text{II) Sucção (kPa)} = 10^{(4.84-0.0622w)}, \text{ para umidades do papel filtro } \leq 47\%$$

Ao se utilizar essa técnica, o ideal é que cada valor de sucção seja determinado pela média de pelo menos dois resultados.

Para determinação dos diferentes pontos da curva de retenção de água, repetiu-se esse procedimento com corpos de prova bastante umedecidos (praticamente saturados) depois expostos ao ar durante diferentes intervalos de tempo (duas, quatro, seis, etc., horas) isso foi realizado para que todos os corpos de prova seguissem a mesma trajetória hídrica, ou seja, trajetória de secagem para obter os pontos da curva.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Nesse capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior.

5.2 Ensaios nas trajetórias de tensão convencionais (HC e CTC)

5.2.1 Ensaios não saturados com sucção matricial 80 kPa

Nas Figuras 5.1 a 5.4 apresentam-se os resultados dos ensaios com sucção controlada realizados, respectivamente, nas trajetórias de compressão hidrostática e de compressão triaxial convencional $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{constante} \neq \sigma_1$ crescente.

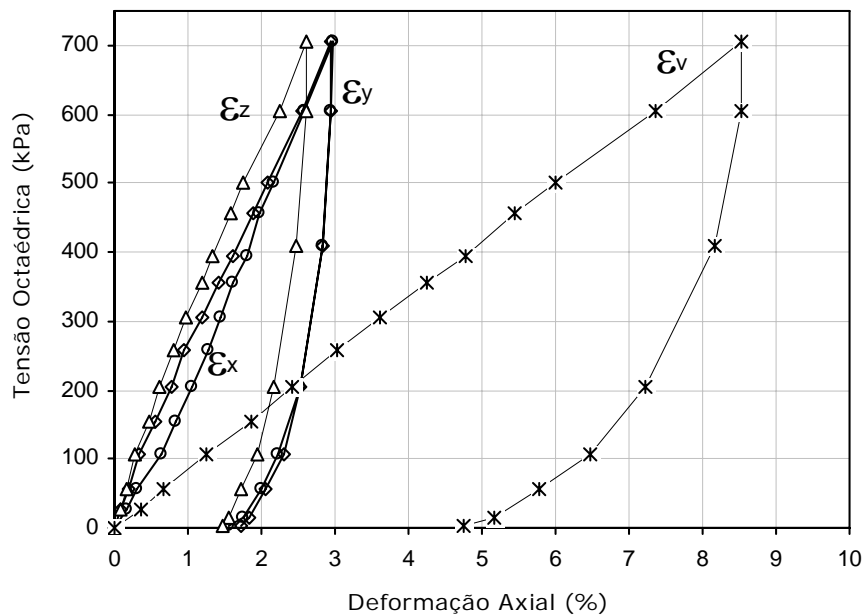


Figura 5.1: Ensaio hidrostático com sucção matricial de 80 kPa

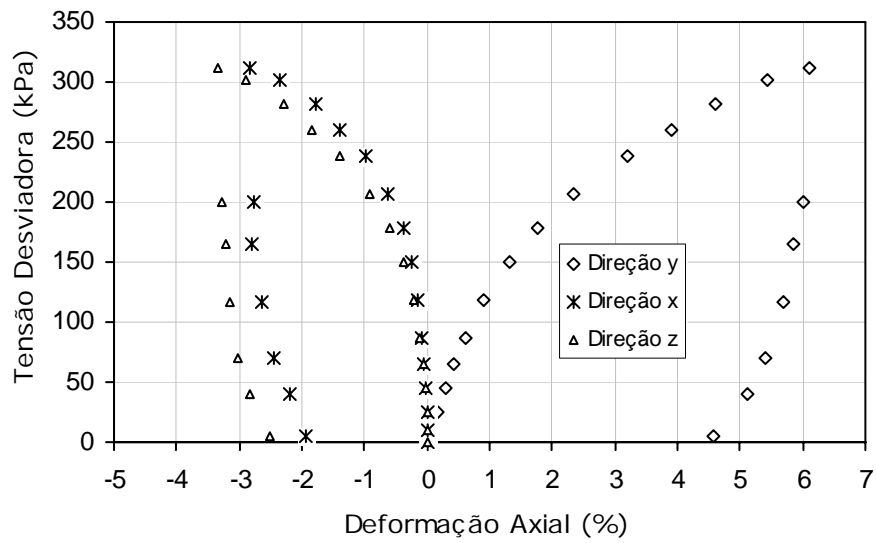


Figura 5.2: Ensaio triaxial cúbico com tensão confinante de 50 kPa e sucção matricial de 80 kPa.

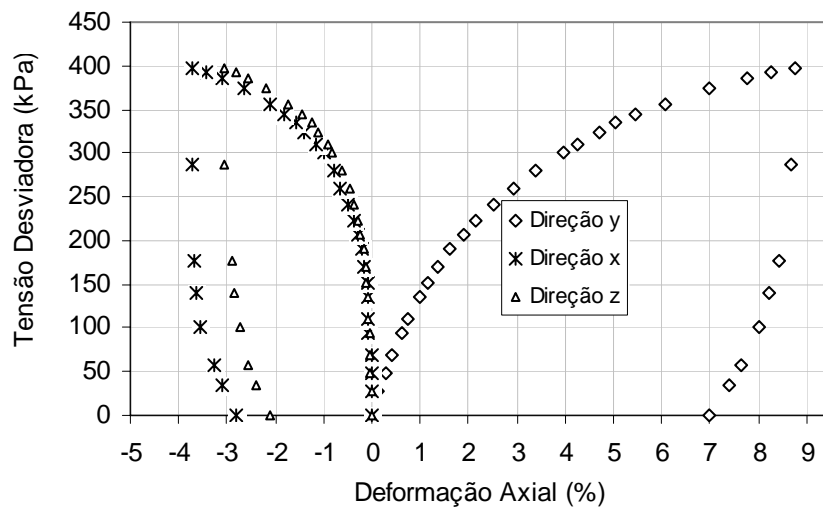


Figura 5.3: Ensaio com tensão confinante de 100 kPa e sucção matricial de 80 kPa.

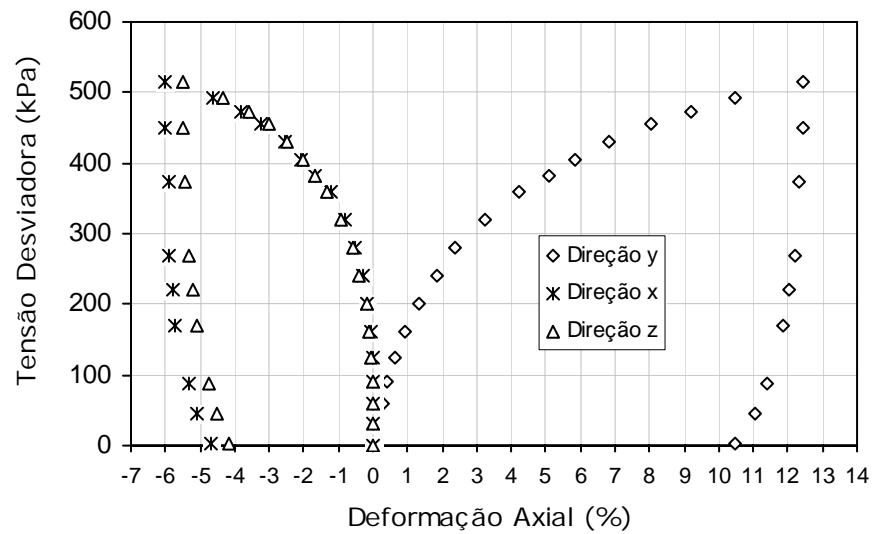


Figura 5.4: Ensaio com tensão confinante de 150 kPa e sucção matricial de 80 kPa.

Na Figura 5.1 observa-se que as deformações nas direções x, y e z são quase iguais, praticamente indicando que o material tem um comportamento isotrópico. Essa observação se confirma nas Figuras 5.2 a 5.4 quando nota-se que as deformações nas direções x e y, perpendiculares à direção do carregamento (z), são bastante próximas.

Na Figura 5.5 mostram-se os resultados das Figuras 5.2 a 5.4 da maneira que normalmente são apresentados nos ensaios axissimétricos. Observa-se um comportamento volumétrico inesperado uma vez que o ensaio com pressão confinante de 100 kPa apresentou uma diminuição de volume maior que a do ensaio com pressão de confinamento de 150 kPa.

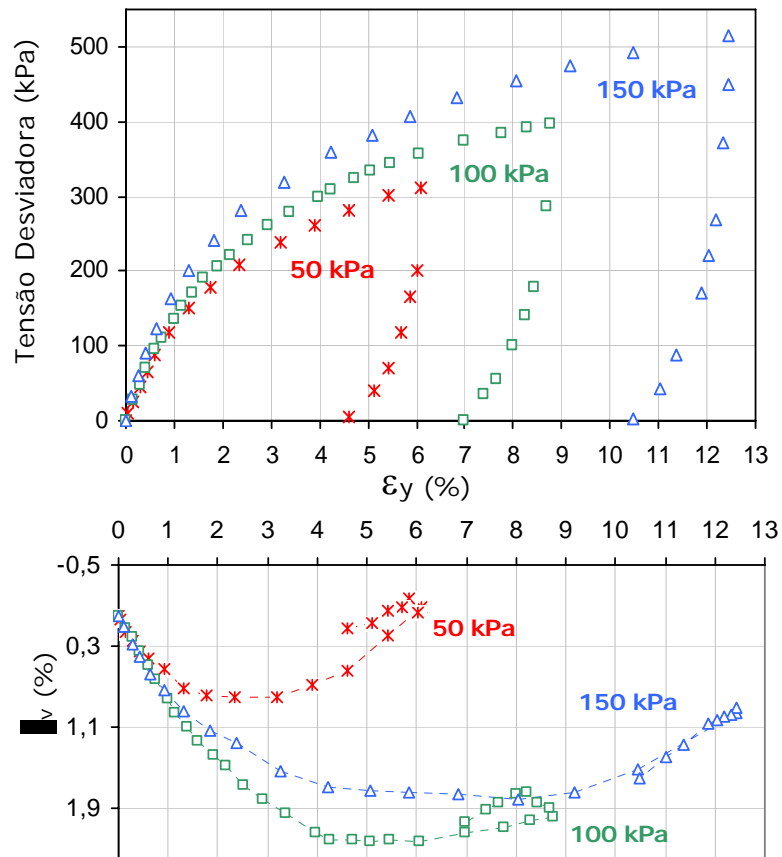


Figura 5.5: Variação da resistência em função da variação da tensão de confinamento para uma sucção $(u_a - u_w) = 80$ kPa, curva de deformação axial *versus* deformação volumétrica (ϵ_v).

5.2.2 Ensaios não saturados com sucção matricial 160 kPa

Nas Figuras 5.6 a 5.9 apresentam-se os resultados dos ensaios com sucção controlada realizados, respectivamente, nas trajetórias de compressão hidrostática e de compressão triaxial convencional $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{constante} \neq \sigma_1$ crescente.

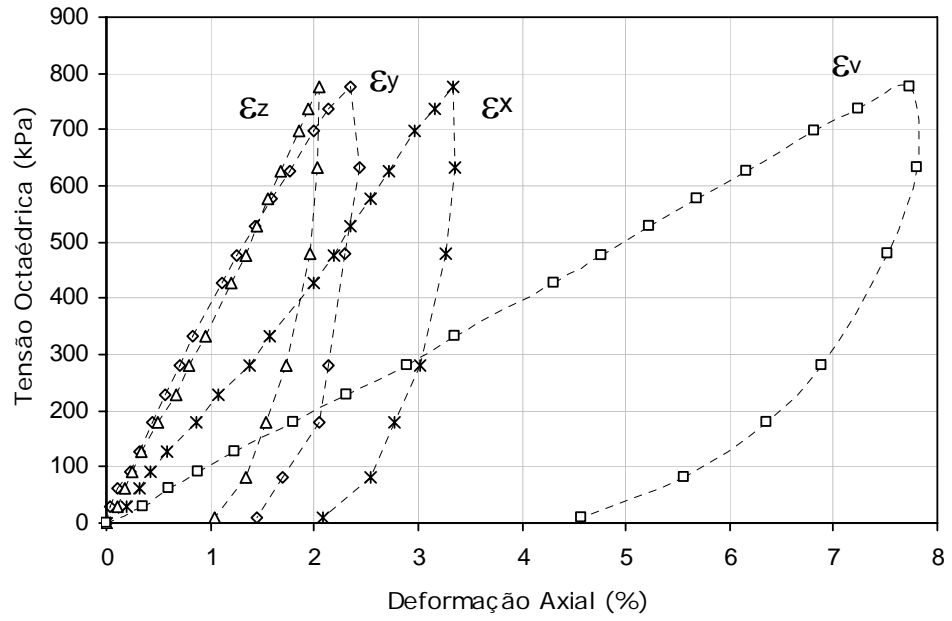


Figura 5.6: Ensaio hidrostático com sucção matricial de 160 kPa.

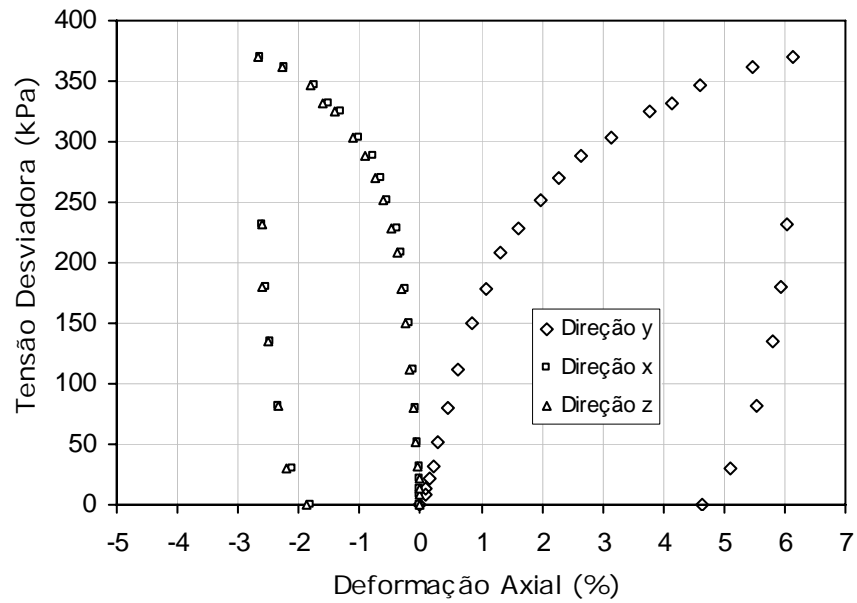


Figura 5.7: Ensaio triaxial cúbico com tensão confinante de 50 kPa e sucção 160kPa.

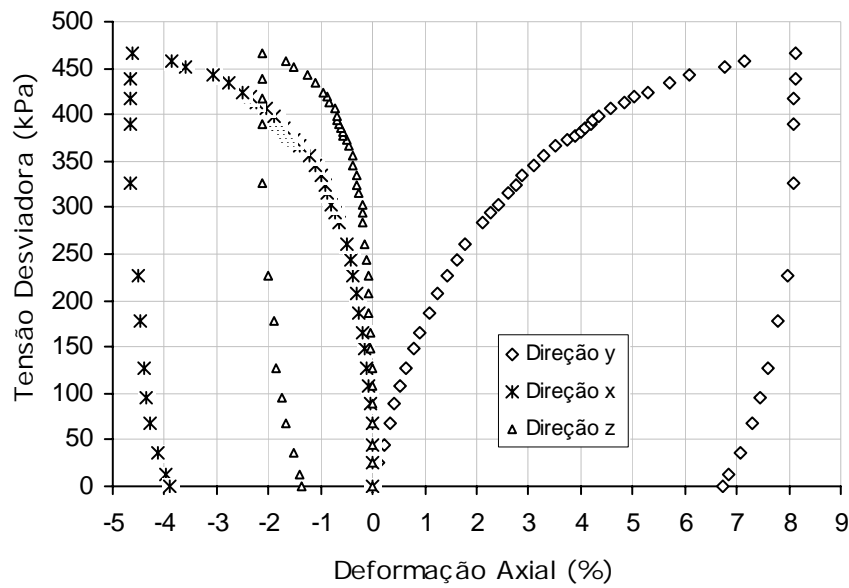


Figura 5.8: Ensaio triaxial cúbico com tensão confinante de 100 kPa e sucção 160kPa.

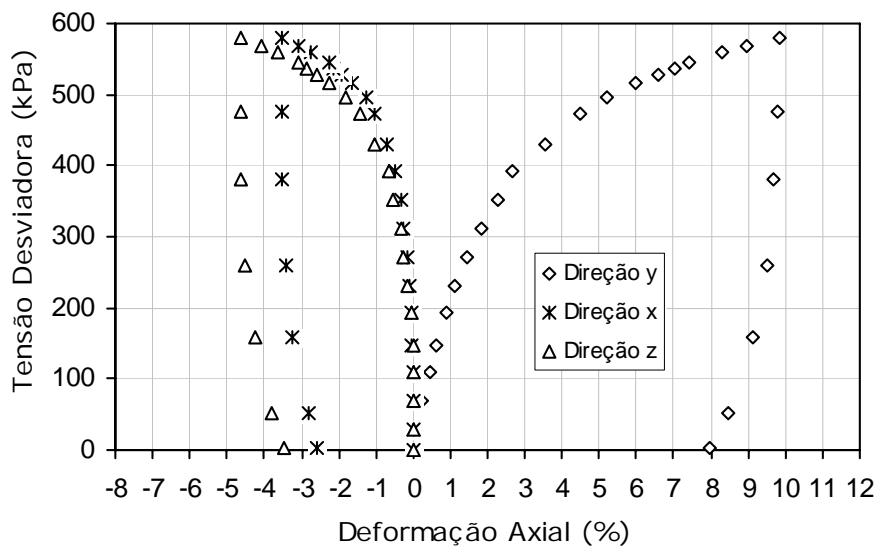


Figura 5.9: Ensaio triaxial cúbico com tensão confinante de 150 kPa e sucção 160kPa.

Uma análise das Figuras 5.6 a 5.9 não permite uma confirmação do comportamento isotrópico do solo, uma vez que, nesse caso as deformações que deveriam ser iguais não estão tão próximas quanto nos ensaios com sucção igual a 80 kPa.

Na Figura 5.10 apresentam-se os resultados das Figuras 5.7 a 5.9 da maneira comumente representada nos ensaios CTC. Observa-se que, nesse caso, o comportamento volumétrico foi de acordo com o esperado, uma vez que os ensaios apresentaram variações volumétricas crescentes à medida que a pressão de confinamento aumentava.

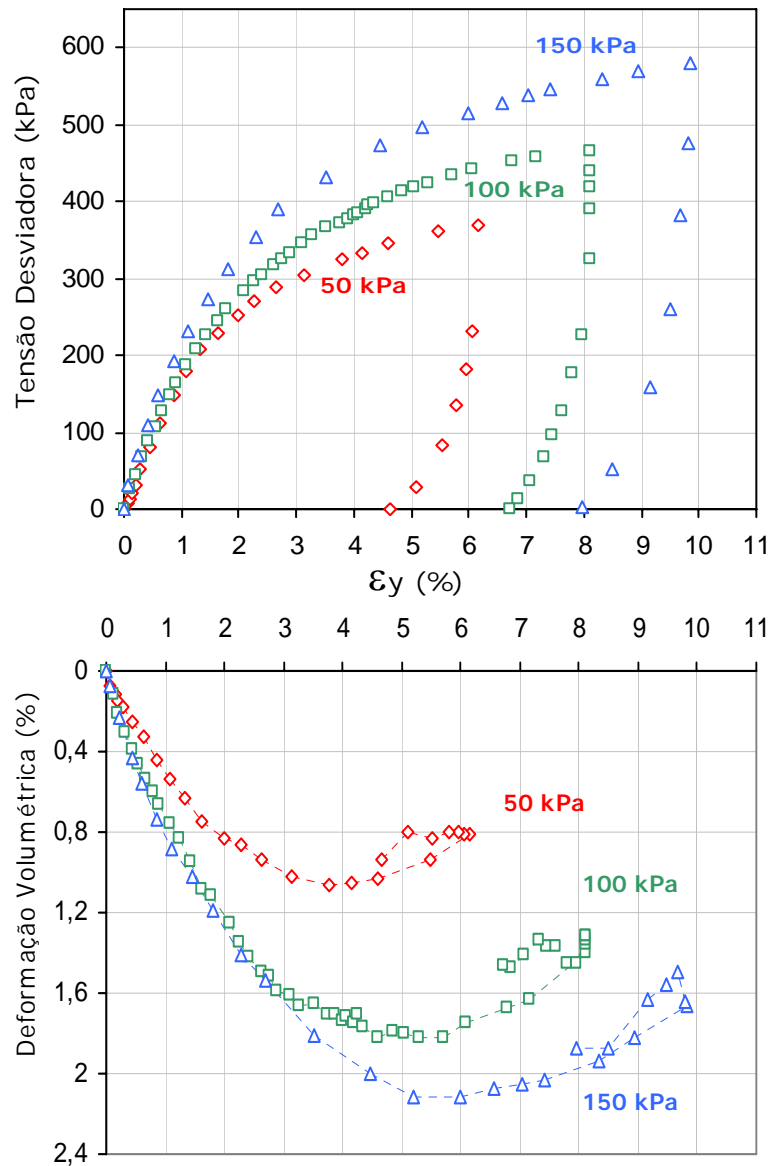


Figura 5.10: Variação da resistência em função da variação da tensão de confinamento para a sucção $(u_a - u_w) = 160$ kPa, e curva de deformação axial *versus* deformação volumétrica (ϵ_v).

5.2.3 Ensaio saturados

Nas Figuras 5.11 a 5.14 apresentam-se os resultados dos ensaios com amostras saturadas realizados, respectivamente, nas trajetórias de compressão hidrostática e de compressão triaxial convencional $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{constante} \neq \sigma_1$ crescente.

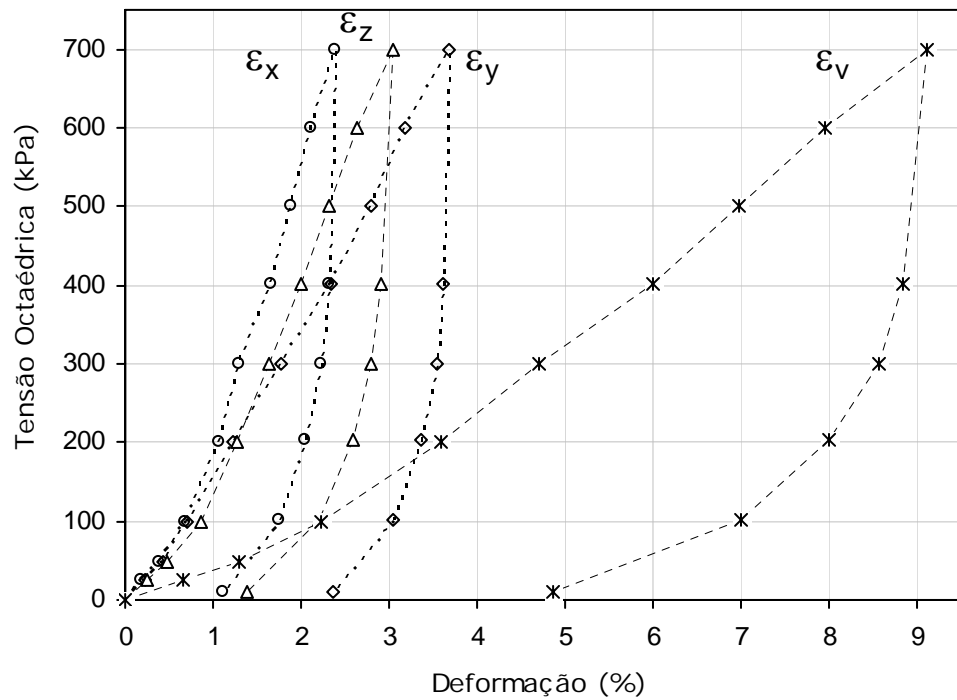


Figura 5.12: Ensaio hidrostático com sucção matricial nula, ou seja, amostra saturada.

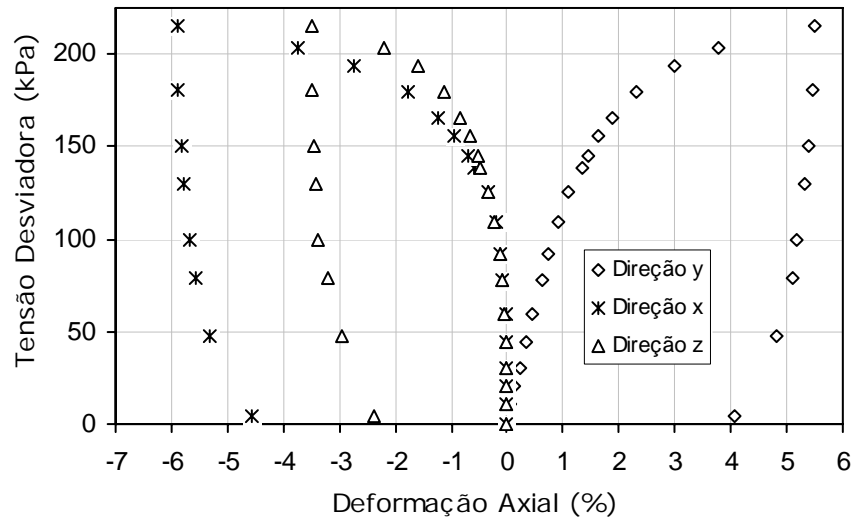


Figura 5.13: Ensaio triaxial cúbico com tensão confinante de 50 kPa e sucção nula.

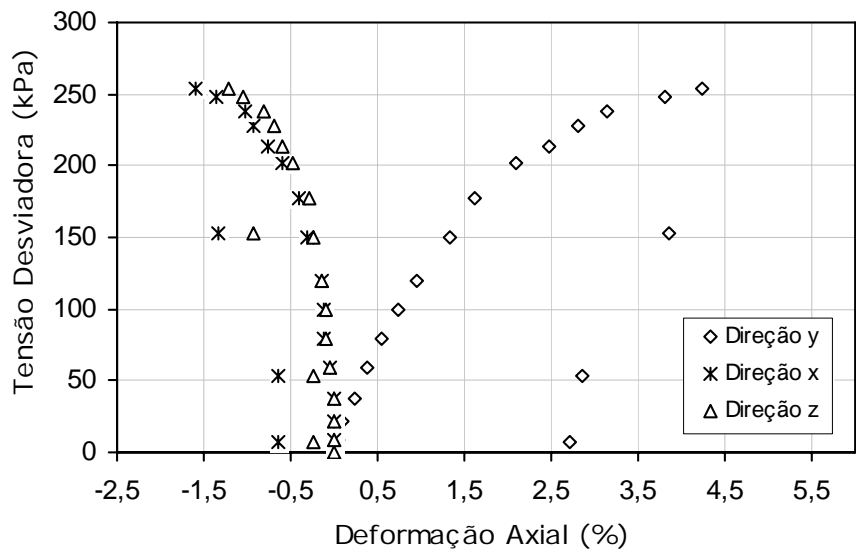


Figura 5.14: Ensaio triaxial cúbico com tensão confinante de 100 kPa e sucção nula

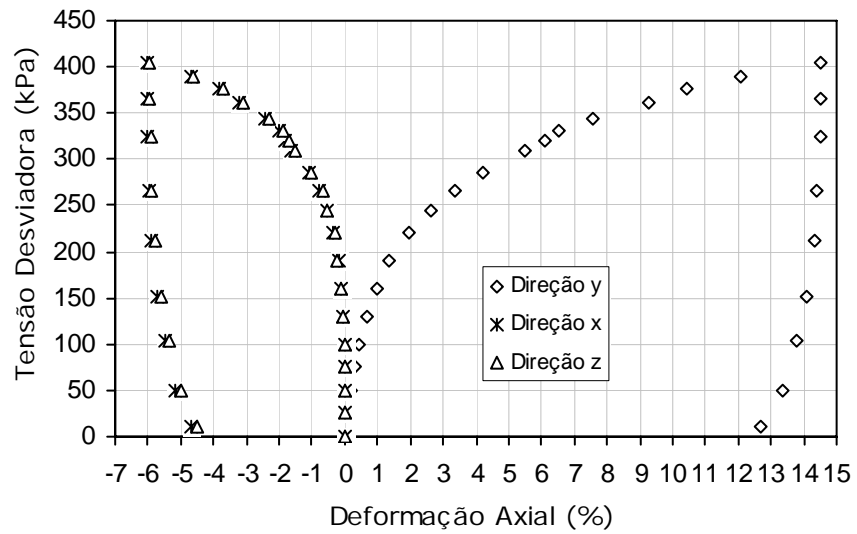


Figura 5.15: Ensaio triaxial cúbico com tensão confinante de 150 kPa e sucção nula

Da mesma forma que nos ensaios com sucção de 160 kPa, uma análise das Figuras 5.11 a 5.14 não permite concluir que o solo se comporta isotropicamente, uma vez que as deformações que deveriam ser iguais não estão tão próximas quanto nos ensaios com sucção igual a 80 kPa, apesar de estarem mais próximas que nos ensaios com sucção de 160 kPa.

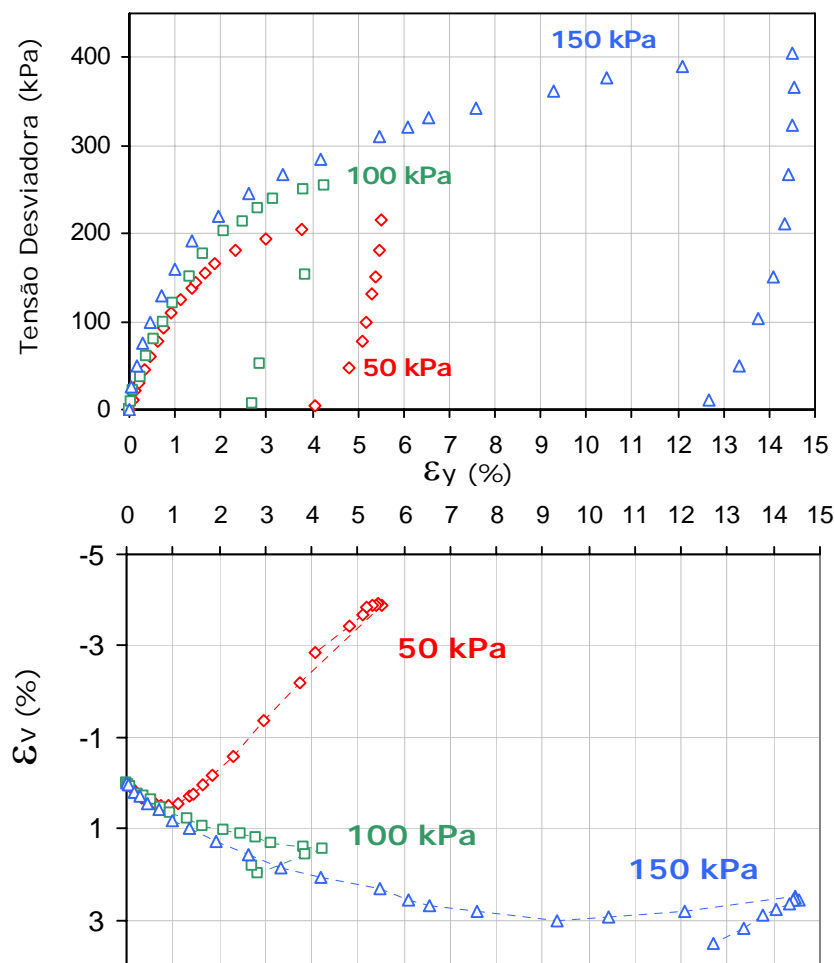


Figura 5.16: Variação da resistência em função da variação da tensão de confinamento para a sucção $(u_a - u_w) = 0$, curva de deformação axial versus deformação volumétrica (ϵ_v).

Na Figura 5.16 observa-se que, também nesse caso, o comportamento volumétrico apresentou variações volumétricas crescentes à medida que a pressão de confinamento aumentava, de acordo com o esperado.

Na Figura 5.17 mostra-se uma comparação entre os resultados do ensaio com pressão de confinamento de 150 kPa e sucção de 160 kPa obtidos com a célula triaxial cúbica (Figura 5.9), e os obtidos por REIS (2004) em uma célula axisimétrica do tipo Bishop-Wesley. Nota-se uma boa concordância entre os resultados tanto em relação às curvas de tensão *versus* deformação axial e

deformação volumétrica *versus* deformação axial, quanto em relação aos valores da tensão e deformação de ruptura. As pequenas diferenças encontradas podem ser atribuídas a diferenças nas amostras do solo, uma vez que o solo ensaiado nesse trabalho foi coletado cerca de um metro acima do solo coletado anteriormente no trabalho de REIS (2004).

Acredita-se que as deformações volumétricas obtidas com a célula triaxial cúbica tenham uma precisão muito boa, uma vez que são medidas diretamente pelos transdutores de deslocamento. Observa-se, também, que como a ruptura foi alcançada com uma deformação axial relativamente pequena (8%), a interferência entre as membranas também foi pequena o que torna o equipamento triaxial cúbico particularmente interessante para estudos de solos não-saturados.

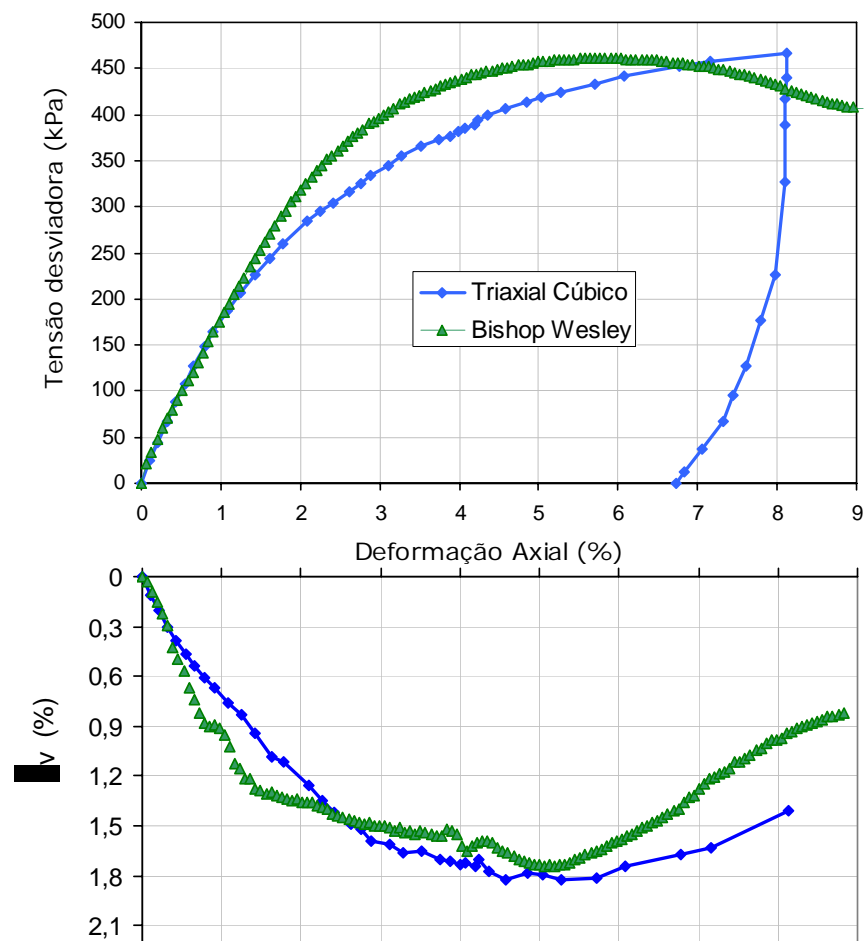


Figura 5.17: Curvas de deformação axial *versus* deformação volumétrica (ϵ_v) dos ensaios triaxial cúbico e Bishop Wesley, com sucção de $(u_a - u_w) = 160$ kPa e pressão de confinamento líquida $(\sigma_c - u_a)$ igual a 100 kPa.

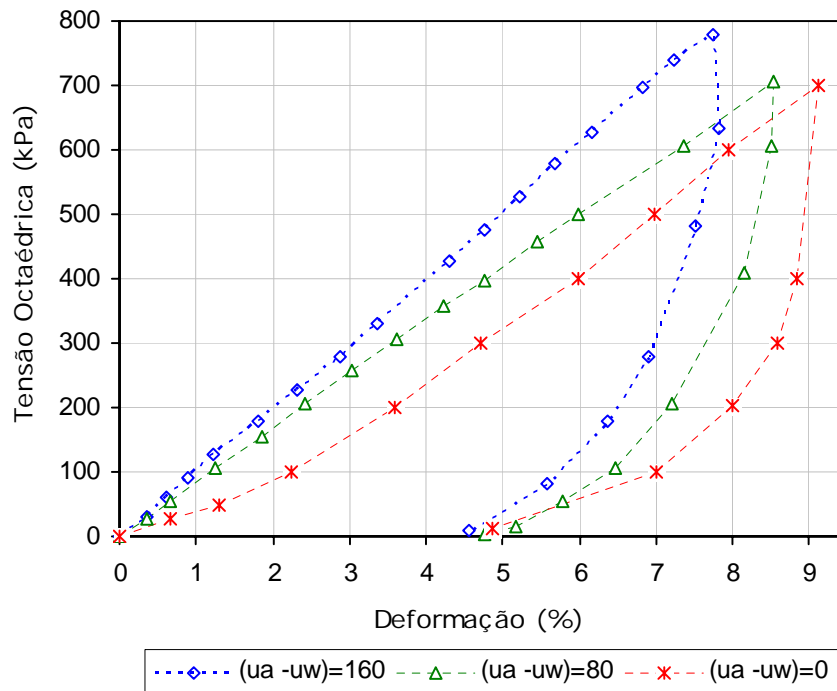


Figura 5.18: Curva tensão octaédrica *versus* deformação para sucção nula, 80 kPa e 160 kPa.

Na Figura 5.18 pode-se observar o comportamento do solo quando submetido ao ensaio de compressão hidrostática, para valores de sucção matricial iguais a zero, 80 kPa e 160 kPa. Nessa comparação observa-se que, por exemplo, para a sucção 160kPa, quando a tensão octaédrica for igual a 400 kPa, a deformação volumétrica é igual a 4%, enquanto que, para o mesmo nível de tensão, quando o solo está saturado, a deformação volumétrica é igual a 6%. Conclui-se que, caso o solo no ensaio de 160 kPa e no nível de tensão de 400 kPa, tivesse sido umedecido até a saturação, ele sofreria uma diminuição de volume igual a 2% que é, habitualmente, chamada de colapso.

Nas Figuras 5.19 a 5.21 apresentam-se as curvas tensão *versus* deformação, obtidas para mesmos valores de pressão de confinamento e diferentes valores de sucção.

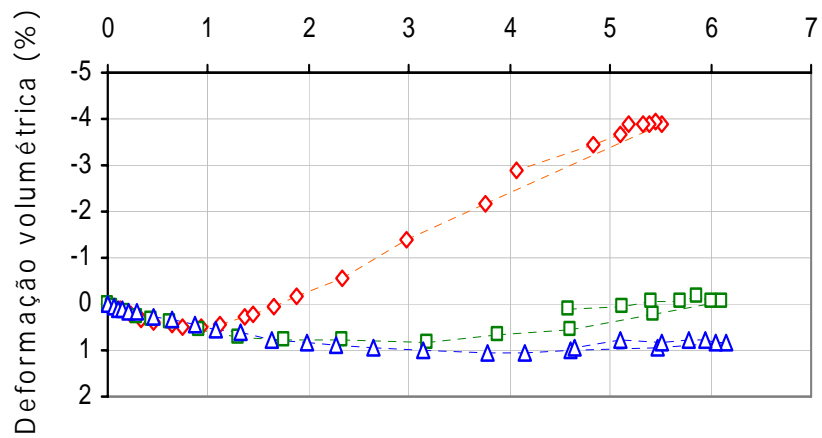
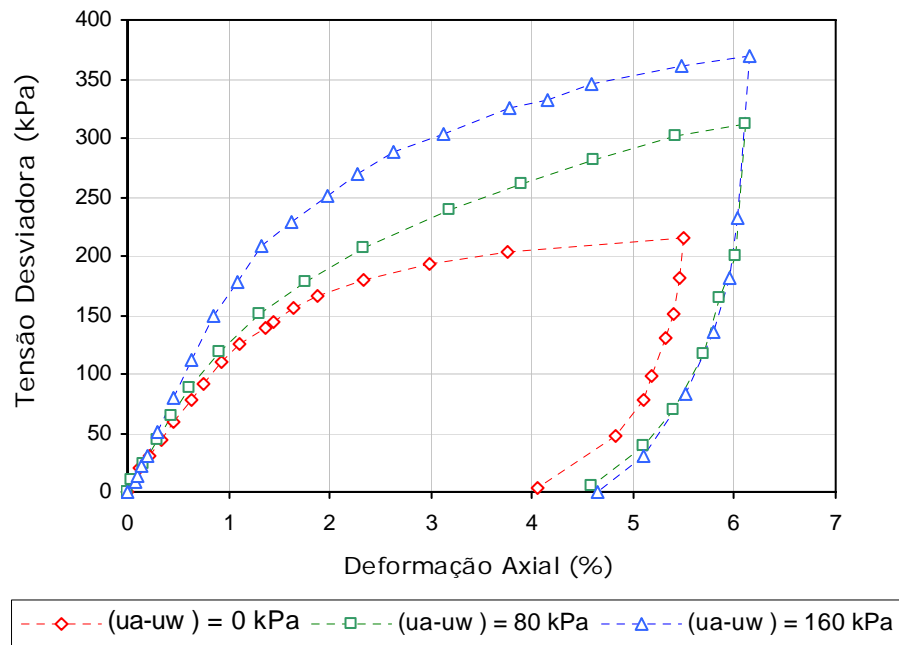


Figura 5.19: Variação da resistência em função da variação da sucção matricial para tensão de confinamento de 50kPa.

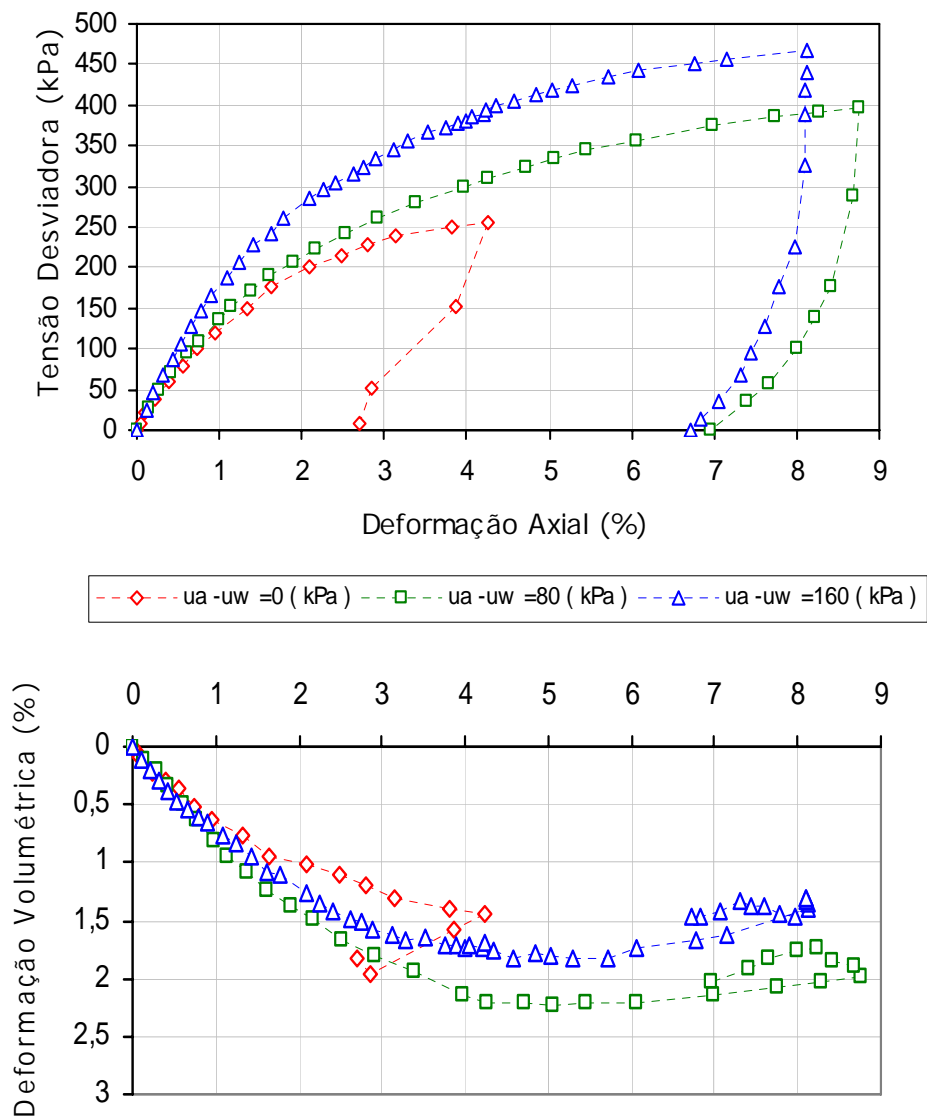


Figura 5.20: Variação da resistência em função da variação da sucção matricial para tensão de confinamento de 100kPa.

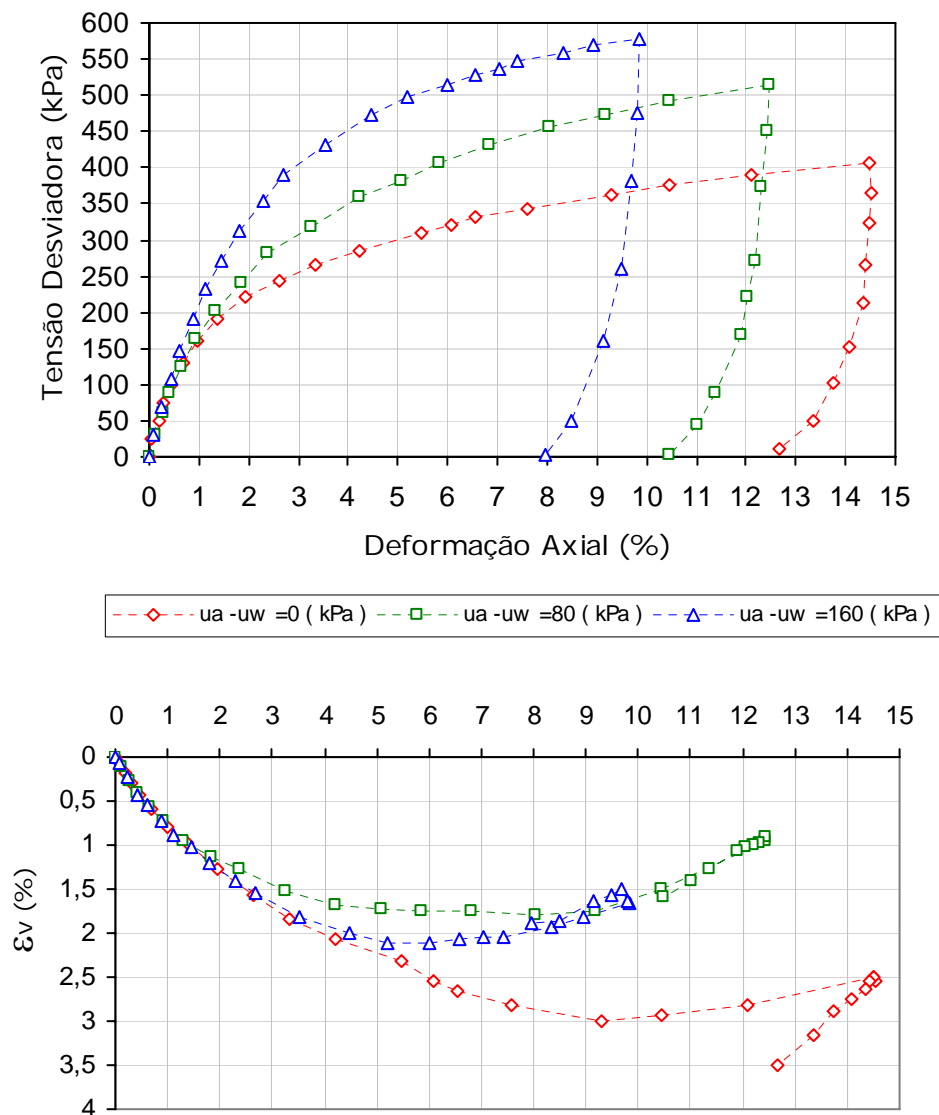


Figura 5.21: Variação da resistência em função da variação da sucção matricial para tensão de confinamento de 150kPa.

Observa-se que para as três tensões de confinamento estudadas, a resistência e a rigidez do solo aumentam com o aumento da sucção matricial, como era esperado.

Na Figura 5.22 são apresentados os pontos na ruptura correspondentes aos ensaios CTC em que $p - u_a = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ e $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Considerando que o ângulo de inclinação das retas é β e o intercepto é d , pode-se determinar os

parâmetros de ruptura correspondentes do critério de Mohr-Coulomb ϕ , ângulo de atrito do solo e c , coesão, por meio das equações 5.1 e 5.2 apresentadas a seguir:

$$\text{sen } \phi = \tan \beta \quad (5.1)$$

$$c = \frac{d}{\cos \phi} \quad (5.2)$$

No Quadro 5.1 apresentam-se os valores dos parâmetros do solo. Pode ser visto que o ângulo de atrito não varia significativamente, enquanto que a coesão do solo aumenta consideravelmente com o aumento da sucção.

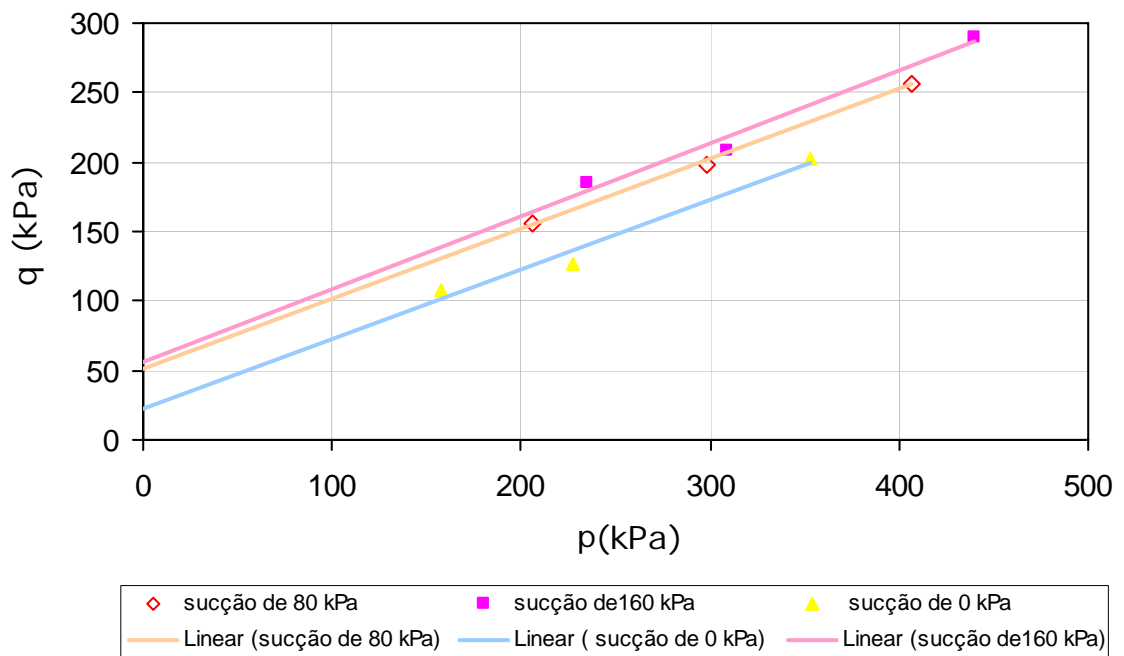


Figura 5.22: Envoltórias de ruptura para diferentes valores de sucção segundo o critério de Mohr-Coulomb.

Quadro 5.1: Parâmetros de ruptura do critério de Mohr-Coulomb.

$u_a - u_w$ (kPa)	β	d (kPa)	ϕ	c (kPa)
0	26,6	22,7	30,1	23,3
80	26,7	50,9	30,2	58,9
160	27,6	56,4	31,5	66,1

Segundo REIS (2004) a variação da coesão em função da sucção matricial pode ser representada por uma função hiperbólica ajustada aos pontos experimentais através da equação 5.3:

$$c = c' + \frac{\psi}{(a + b\psi)} \quad (5.3)$$

Nessa equação 5.3, c é a coesão aparente do solo para um dado valor de sucção matricial (ψ) e c' é a coesão efetiva do solo, obtida para $\psi = u_a - u_w = 0$, e a e b são os parâmetros do solo.

A seguir no Quadro 5.2 apresentam-se os valores das constantes a e b , calculadas através dos pontos experimentais e utilizadas no ajuste da equação (5.3).

Quadro 5.2.: Constantes a e b da equação (5.3).

c'	a	b
26,25	1,607	0,011

Na Figura 5.23 apresenta-se a curva do ajuste hiperbólico obtida através dos pontos experimentais obtidos nos ensaios com a célula triaxial cúbica. Também estão indicados os pontos experimentais obtidos por REIS (2004).

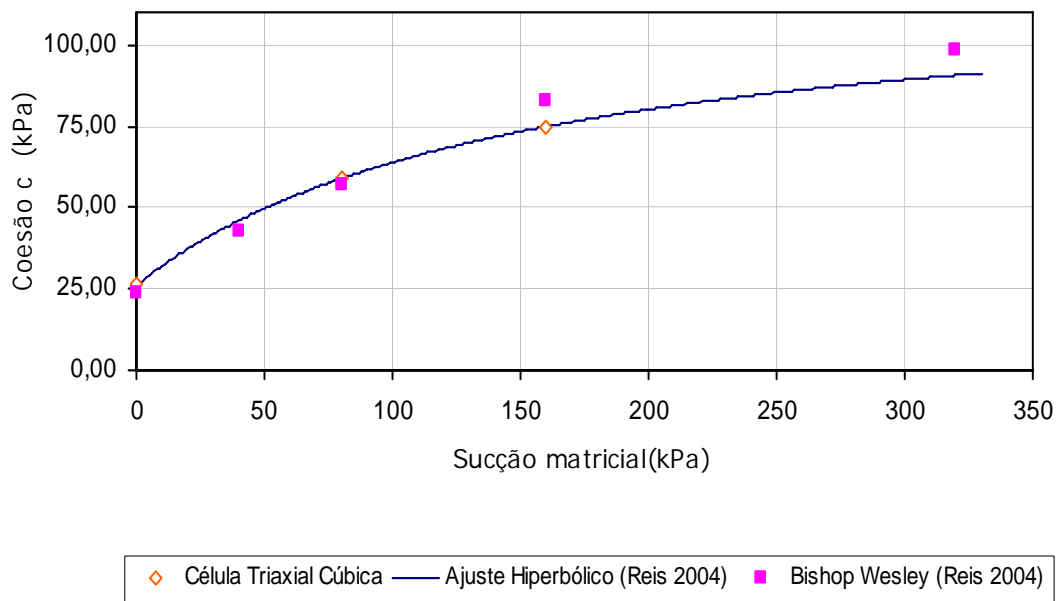


Figura 5.23: Ajuste hiperbólico do aumento da coesão com a sucção.

Como se pode observar na Figura 5.23 a função hiperbólica se ajusta muito bem aos pontos experimentais descrevendo a tendência não linear da variação da sucção com o aumento da coesão. Dessa forma, os resultados obtidos nessa dissertação confirmam que o parâmetro ϕ^b admitido constante não o é (ESCÁRIO& SÁEZ, 1987; DELAGE et al., 1987; FREDLUND et al., 1987; ESCÁRIO& JUCÁ, 1989; ROHM & VILAR, 1995 e REIS & VILAR, 2004 e outros).

No Quadro 5.3 apresentam-se valores dos módulos de elasticidade inicial (E) e os correspondentes à metade da tensão de ruptura (E_{50}) e do coeficiente de Poisson (ν) na ruptura.

Quadro 5.3.: Parâmetros de deformabilidade ($u_a - u_w$) = 0, 80kPa e 160 kPa.

$u_a - u_w$ (kPa)	σ_c (kPa)	E	E_{50}	ν
0	50	146,74	119,83	0,1502
	100	160,66	115,5	0,37205
	150	218,33	135,17	0,2214
80	50	202,37	111,43	0,4319
	100	221,09	113,51	0,4685
	150	258,46	128,38	0,33665
160	50	245,9	168,32	0,4576
	100	332,64	164,33	0,47795
	150	307,54	170,26	0,44245

Através da análise dos valores apresentados no Quadro 5.3, pode ser observado: i) que os módulos de elasticidade E_{50} são sempre menores que os módulos de elasticidade E ; ii) na maioria dos ensaios tanto E_{50} quanto E aumentam com a tensão de confinamento; iii) em todos os ensaios os módulos de elasticidade aumentam à medida que a sucção aumenta; iv) os coeficientes de Poisson não apresentaram uma tendência definida com o aumento da pressão de confinamento, porém, em quase todos os casos, aumentaram com o aumento da sucção.

5.3 Ensaios nas trajetórias de tensão não convencionais

5.3.1 Ensaios não saturados com sucção matricial de 80kPa

Nas Figuras 5.24 a 5.26 apresentam-se os resultados dos ensaios com sucção de 80 kPa realizados com tensão normal octaédrica constante igual a 100 kPa, ângulo de Lode iguais a 0° (triaxial de compressão, TC), 30° e 60° (triaxial de extensão, TE), e tensão de cisalhamento octaédrica crescente até a ruptura.

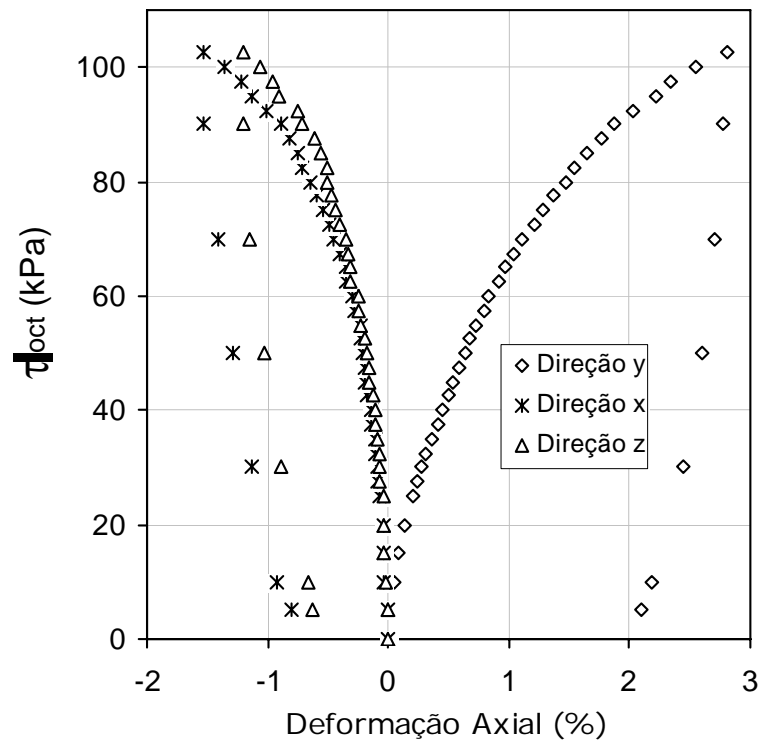


Figura 5.24: Ensaio com $\sigma_{oct} = 100$ kPa , $\theta_{oct} = 0^\circ$ e sucção matricial 80 kPa.

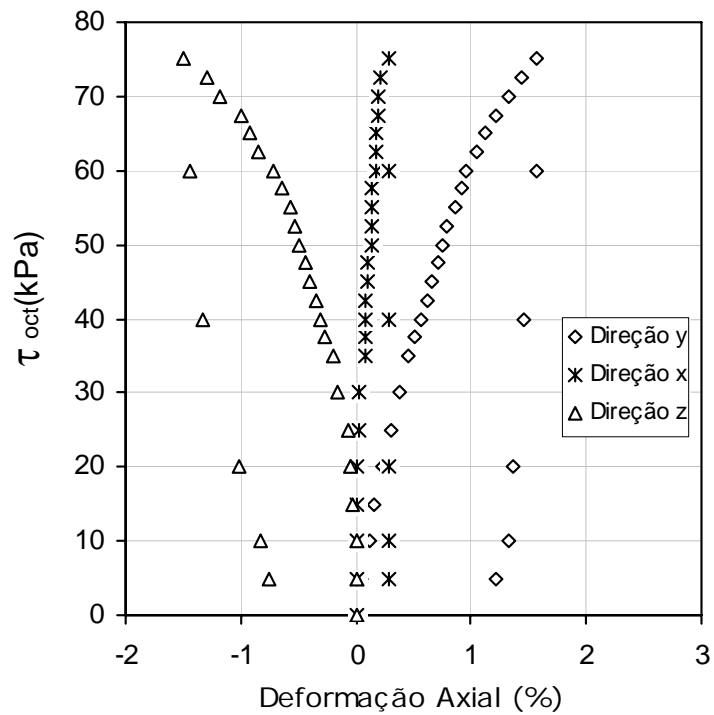


Figura 5.25: Ensaio com $\sigma_{oct} = 100$ kPa , $\theta_{oct} = 30^\circ$ e sucção matricial 80 kPa.

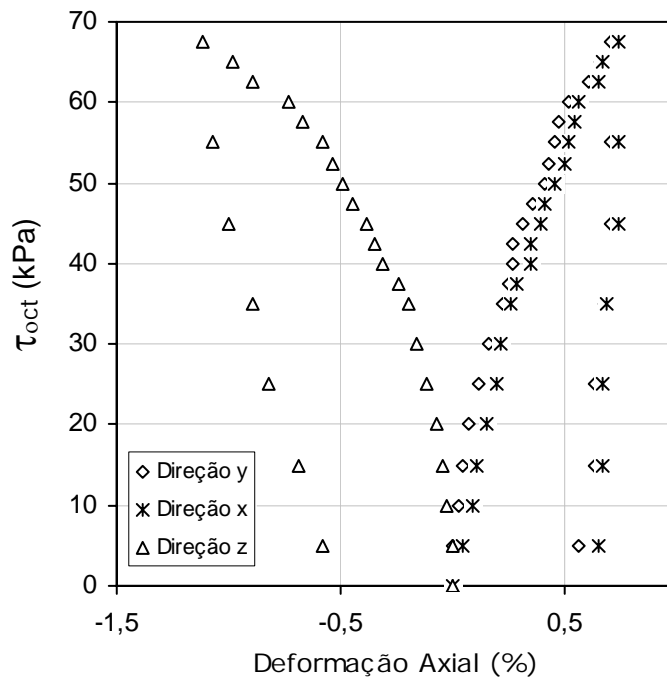


Figura 5.26: Ensaio com $\sigma_{oct} = 100$ kPa , $\theta_{oct} = 60^\circ$ e sucção matricial 80 kPa.

Observa-se que a deformação principal intermediária (direção z), é igual à deformação principal menor (direção x), no ensaio TC (Figura 5.24), é quase nula no ensaio com θ igual a 30° (Figura 5.25), praticamente configurando uma condição de deformação plana, e fica igual à deformação principal maior (direção y), no ensaio TE (Figura 5.26). Isto confirma o comportamento isotrópico do solo nos ensaios realizados com esse valor de sucção.

Na Figura 5.26 apresentam-se as curvas de tensão de cisalhamento octaédrica *versus* distorção octaédrica e de deformação volumétrica *versus* distorção octaédrica, podendo-se observar que as tensões na ruptura diminuem à medida que o ângulo de Lode aumenta. Entretanto, a rigidez do solo não sofre variações significativas com a variação do ângulo de Lode, principalmente, para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 30^\circ$.

Por outro lado, observa-se que as curvas de variação volumétricas foram diferentes, maiores variações volumétricas ocorreram à medida que o ângulo de Lode aumentava.

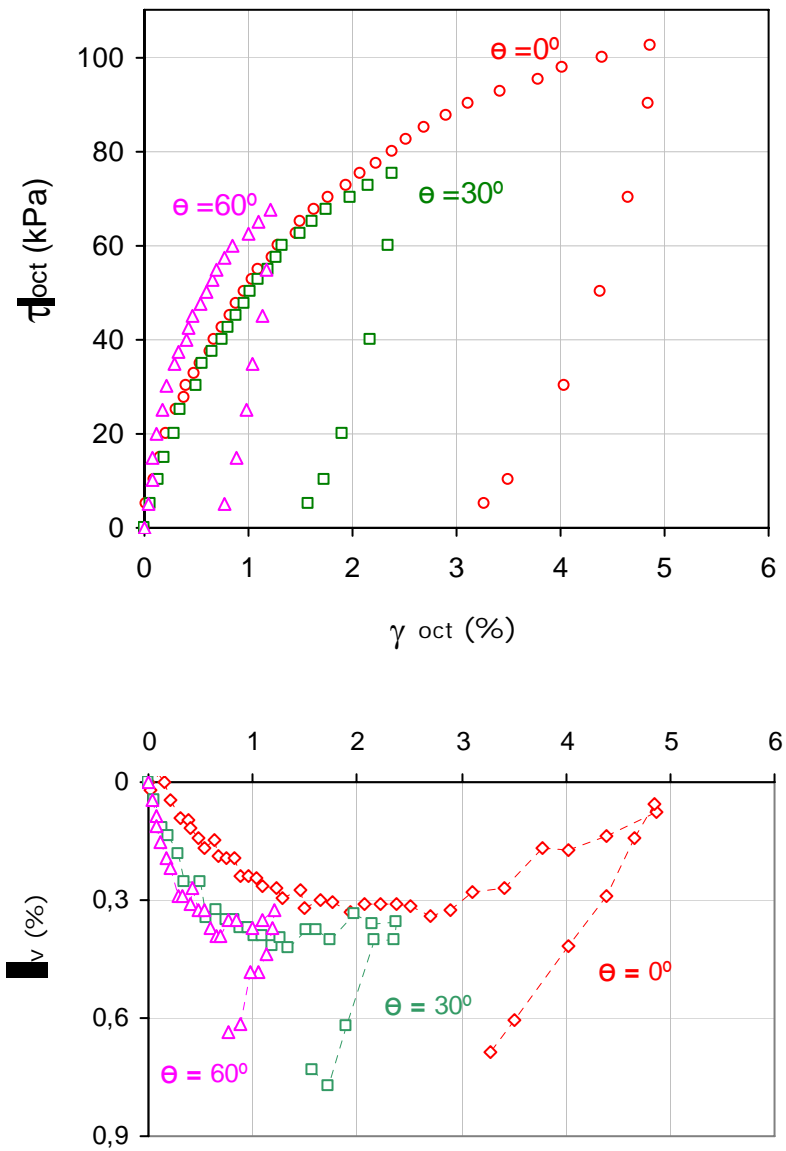


Figura 5.27: Curva de tensão de cisalhamento octaédrica (τ_{oct}) versus distorção angular octaédrica (γ_{oct}), e curva deformação volumétrica (ϵ_v) versus distorção angular octaédrica (γ_{oct}), para $\theta_{oct} = 0^\circ$, $\theta_{oct} = 30^\circ$ e $\theta_{oct} = 60^\circ$, com sucção matricial ($u_a - u_w$) de 80 kPa e $\sigma_{oct} = 100$.

5.3.2 Ensaio não saturados com sucção matricial de 160kPa

Nas Figuras 5.28 a 5.30 apresentam-se os resultados dos ensaios com sucção de 160 kPa realizados com tensão normal octaédrica constante igual a 100 kPa e ângulo de Lode constante iguais a 0° (TC), 30° e 60° (TE), e tensão de cisalhamento octaédrica crescentes até a ruptura.

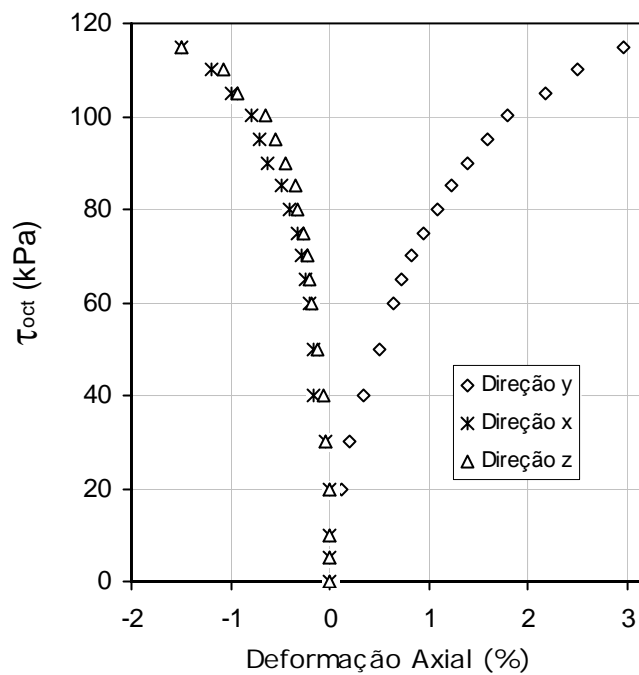


Figura 5.28: Ensaio com $\sigma_{oct} = 100$ kPa , $\theta_{oct} = 0^\circ$ e sucção matricial 160 kPa.

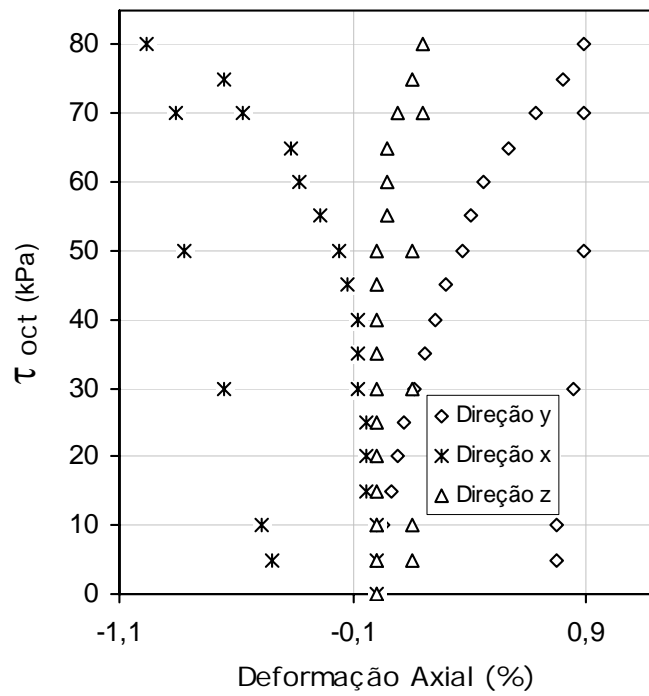


Figura 5.29: Ensaio com $\sigma_{oct} = 100$ kPa , $\theta_{oct} = 30^\circ$ e sucção matricial 160 kPa.

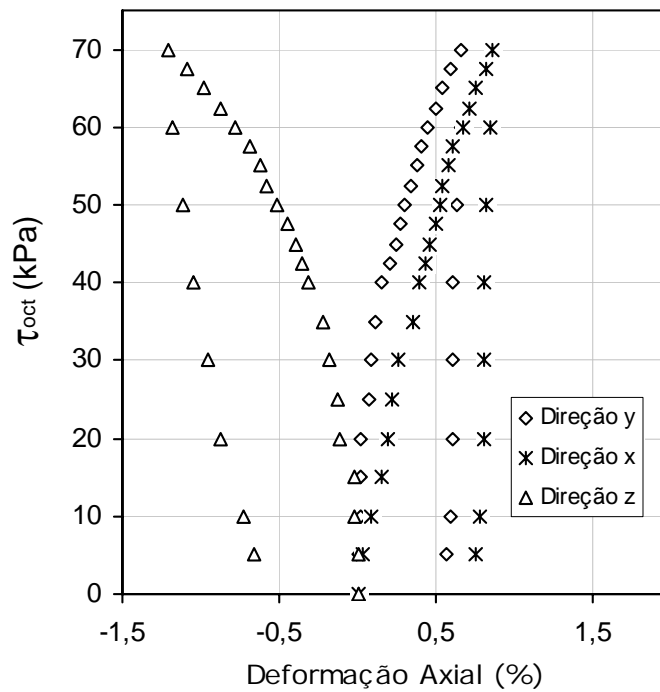


Figura 5.30: Ensaio com $\sigma_{oct} = 100$ kPa , $\theta_{oct} = 60^\circ$ e sucção matricial 160 kPa.

Nesse caso, observa-se que a deformação principal intermediária (direção z) é igual à deformação principal menor (direção x) no ensaio TC (Figura 5.28). No entanto, não é praticamente nula no ensaio com θ igual a 30° (Figura 5.29) e não fica igual à deformação principal maior (direção y) no ensaio TE (Figura 5.30). Esse comportamento, não confirma o comportamento isotrópico do solo da mesma forma que nos ensaios realizados com este valor de sucção nas trajetórias de tensão convencionais.

Na Figura 5.31 apresentam-se as curvas de tensão de cisalhamento octaédrica *versus* distorção octaédrica e de deformação volumétrica *versus* distorção octaédrica. Mais uma vez, pode-se observar que as tensões na ruptura diminuem à medida que o ângulo de Lode aumenta. Entretanto, a rigidez do solo permaneceu praticamente inalterada com a variação do ângulo de Lode, enquanto que, nesse caso, as curvas de variação volumétricas não apresentaram uma tendência clara de variação à medida que o ângulo de Lode aumentava.

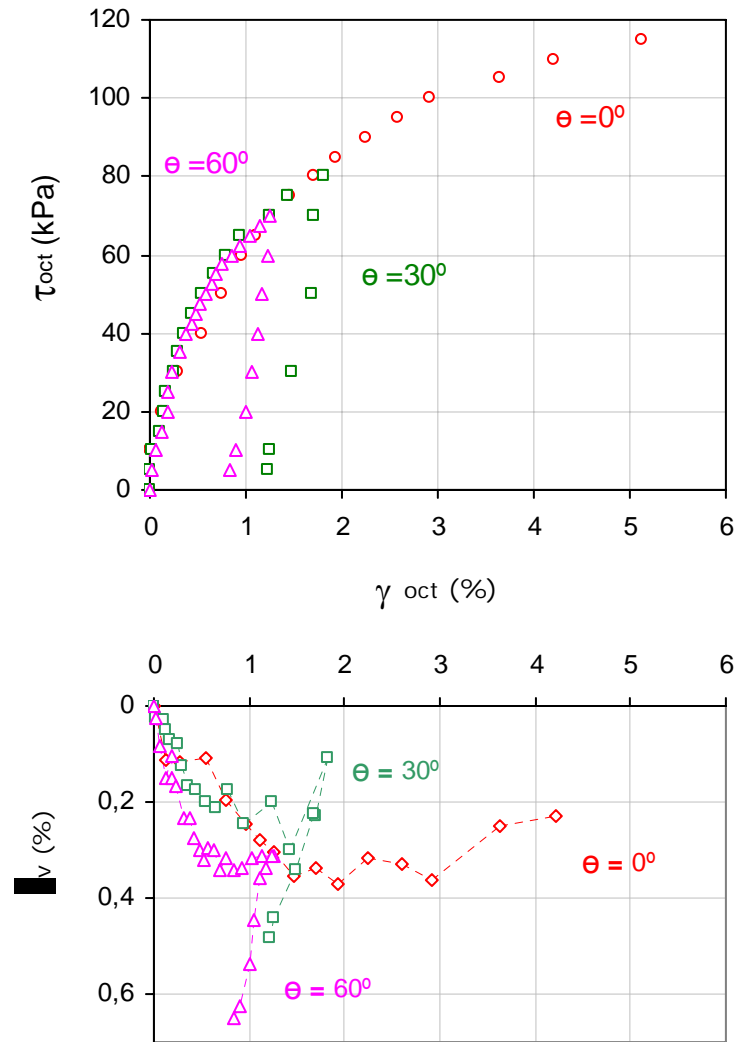


Figura 5.31: Curva de tensão de cisalhamento octaédrica (τ_{oct}) versus distorção angular octaédrica (γ_{oct}), e curva deformação volumétrica (ϵ_v) versus distorção angular octaédrica (γ_{oct}), para $\theta_{oct} = 0^\circ$, $\theta_{oct} = 30^\circ$ e $\theta_{oct} = 60^\circ$, com sucção matricial ($u_a - u_w$) de 160 kPa e $\sigma_{oct} = 100$ kPa.

5.3.3 Ensaio saturados

Nas Figuras 5.32 e 5.33 apresentam-se os resultados do ensaio com sucção matricial nula realizado com tensão octaédrica constante igual a 100 kPa, ângulo de Lode constante e igual a $\theta=30^\circ$ e tensão octaédrica crescente até a ruptura.

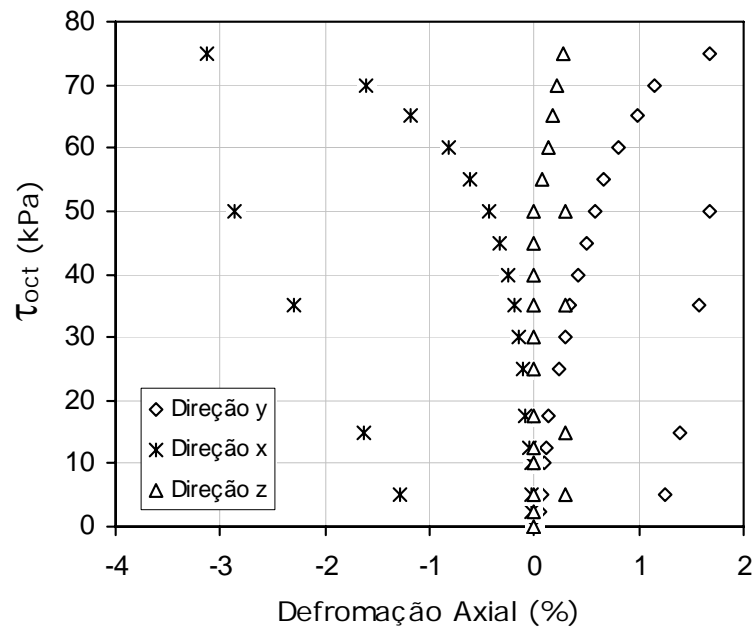


Figura 5.32: Ensaio com $\sigma_{oct} = 100$ kPa , $\theta_{oct} = 30^\circ$ e sucção matricial ($u_a - u_w$) nula (saturado).

Observa-se que a deformação principal intermediária (direção z) é praticamente nula até cerca de 40% do valor da tensão de ruptura. Daí para frente, o ensaio deixa de apresentar valores de deformação típicos de uma condição de equilíbrio de deformação plana.

Na Figura 5.33 apresentam-se as curvas de tensão de cisalhamento octaédrica *versus* distorção octaédrica e de deformação volumétrica *versus* distorção octaédrica.

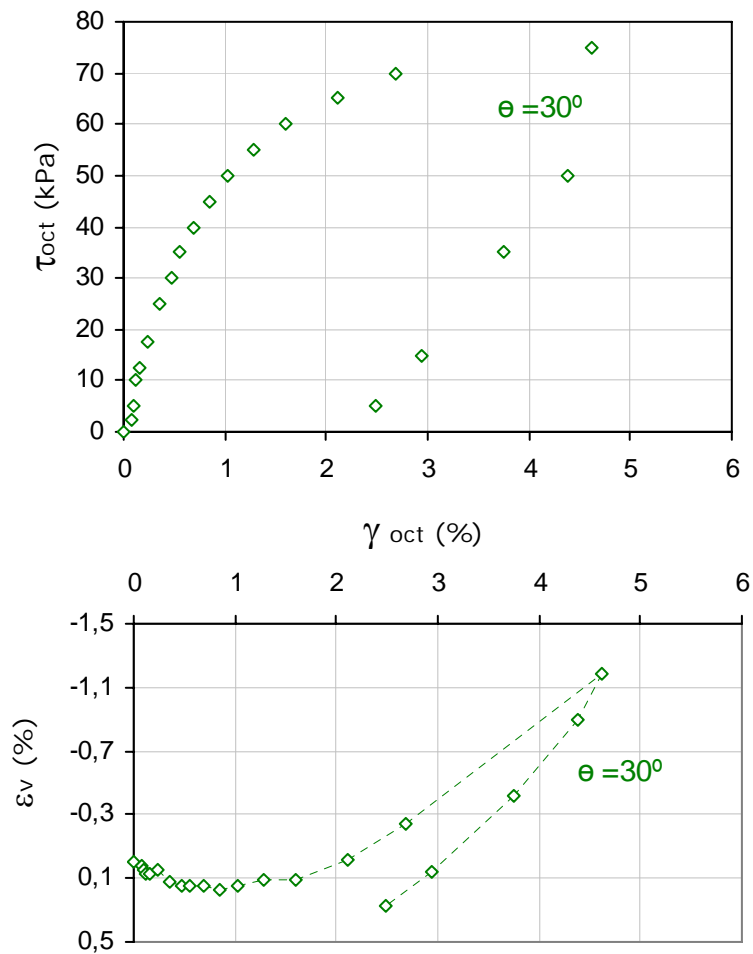


Figura 5.33: Curva de tensão de cisalhamento octaédrica (τ_{oct}) versus distorção angular octaédrica (γ_{oct}), e curva deformação volumétrica (ϵ_v) versus distorção angular octaédrica (γ_{oct}), para $\sigma_{oct} = 100$ kPa, $\theta_{oct} = 30^\circ$, com sucção matricial ($u_a - u_w$) nula

Na Figura 5.34 apresenta-se, no plano octaédrico correspondente a $\sigma_{oct} = 100$ kPa, os valores das tensões de cisalhamento octaédricas na ruptura obtidas nos ensaios realizados. Observa-se que as superfícies de ruptura têm um formato não-circular e aumentam com o aumento da sucção.

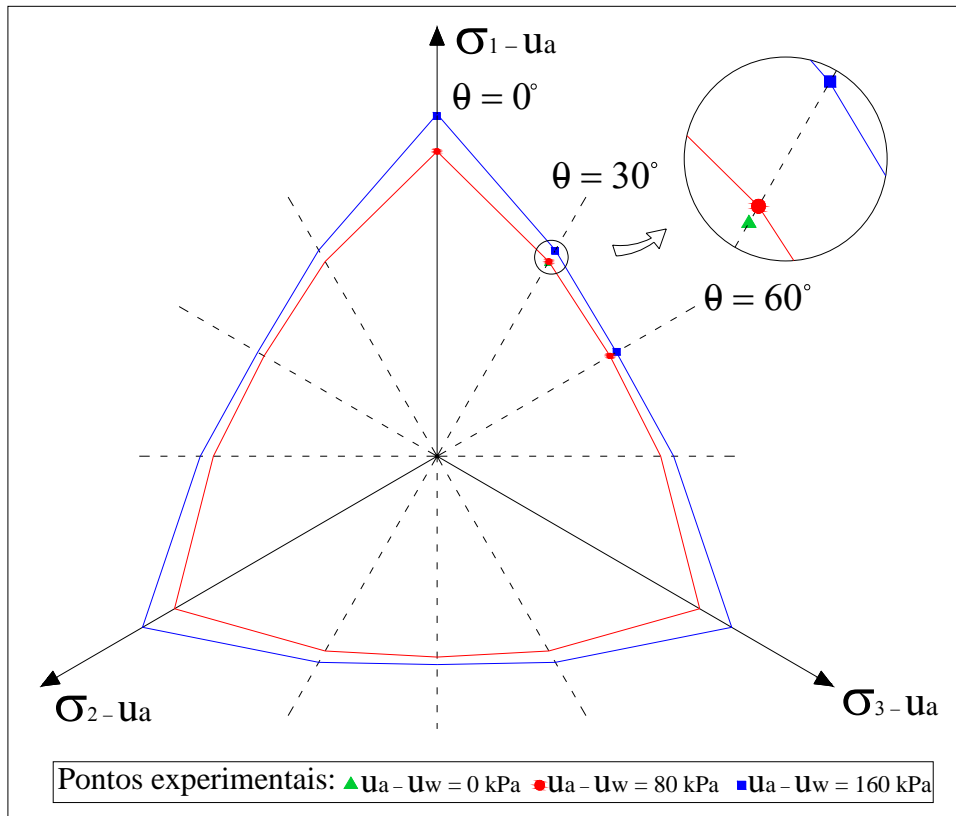


Figura 5.34: Projeção da envoltória de ruptura no plano octaédrico com $\sigma_{oct} = 100$ kPa.

5.4 Ensaio com papel filtro e câmara de sucção

A seguir são apresentados os resultados encontrados na ensaio de obtenção da curva de retenção de água através do uso do papel filtro Whatman nº 42 e da câmara de sucção. Na Figura 5.35 essa curva é apresentada por meio da relação entre o teor de umidade volumétrico (θ_w) versus a sucção matricial ($u_a - u_w$). O do teor de umidade volumétrico foi calculado usando-se a relação:

$$\theta_w = \frac{G \cdot w}{(1 + e)} \quad (5.4)$$

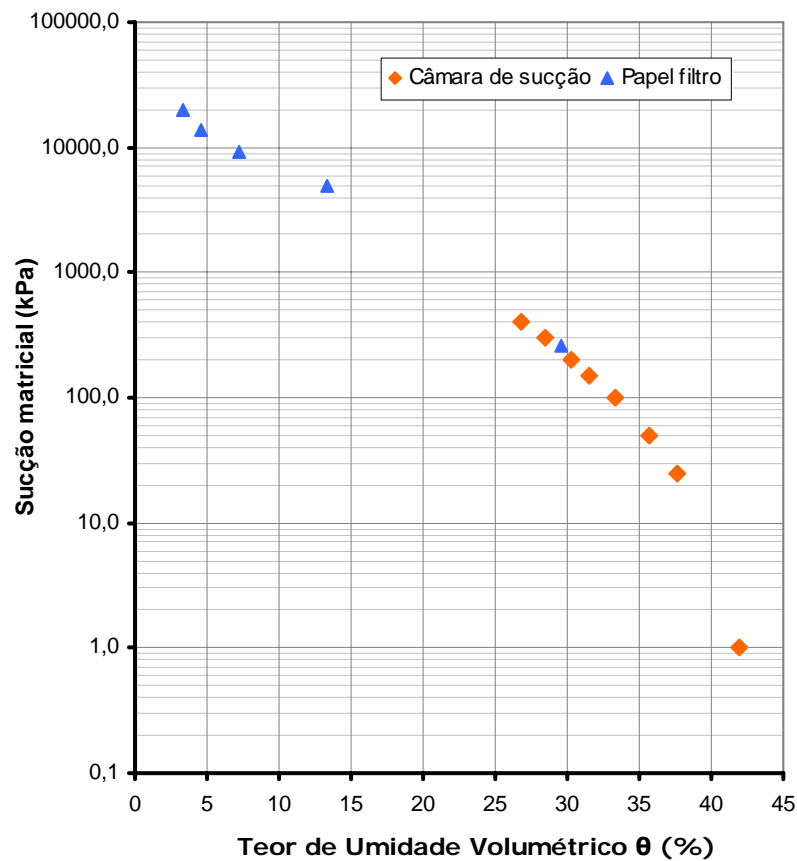


Figura 5.35: Curva característica do solo, teor de umidade volumétrico (θ) versus sucção matricial.

Observando a Figura 3.55 pode-se notar que os pontos obtidos utilizando os dois métodos, câmara de sucção e papel filtro, se complementaram de forma coerente. Para obter uma representação matemática da curva característica usou-se a equação de Gardner (1958), apresentada por FREDLUND & XING (1994), equação 5.5.

$$\Theta = \frac{1}{(1 + \alpha \psi^\eta)} \quad (5.5)$$

Na qual $\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}$, sendo θ teor de umidade volumétrico, θ_r o teor de

umidade volumétrico residual, e θ_s teor de umidade volumétrico saturado α e η são parâmetros de ajuste de Gardner.

No Quadro 5.4 apresentam-se os valores dos parâmetros usados no ajuste com a equação de Gardner e na Figura 5.36 apresenta-se a comparação entre os pontos experimentais e analíticos.

Quadro 5.4: Valores dos parâmetros de Gardner α , η , e θ_r e θ_s .

α	η	θ_r	θ_s
0,044	0,72	0,02	0,42

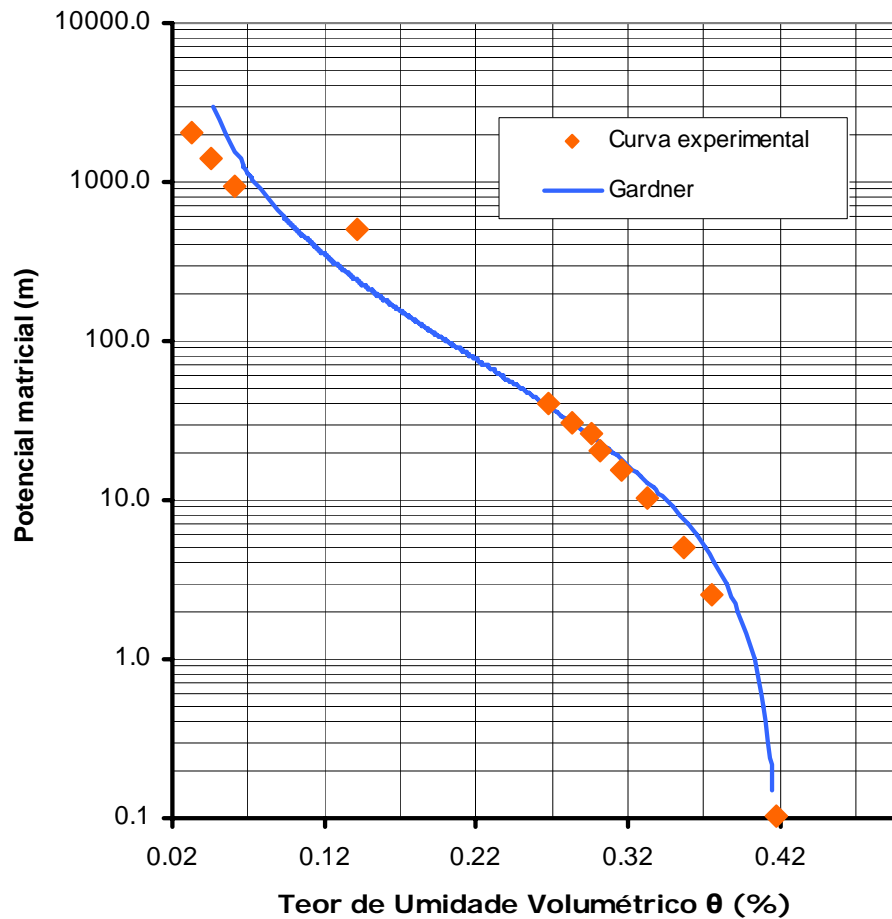


Figura 5.36: Ajuste da curva característica usando a equação de Gardner (1958).

Como pode ser observado na Figura 5.36, a equação de Gardner se ajusta muito bem à curva característica do solo analisado, sendo, portanto uma boa representação matemática dessa curva.

Outra representação matemática da curva característica é a equação de Van Genuchten (1980), apresentada por FREDLUND & XING (1994), dada pela equação 5.6.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha \psi^n)^m} \quad (5.6)$$

Observando a equação 5.6 nota-se que, se o parâmetro m for igual a 1, essa equação fica idêntica à equação de Gardner (1958).

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivos, primeiro, desenvolver uma célula triaxial cúbica para realizar ensaios em solos não saturados com sucção matricial controlada. E, segundo, realizar ensaios que comprovem o bom funcionamento do novo equipamento e permitam avaliar a influência da sucção na deformabilidade e resistência de solos não saturados quando submetidos a trajetórias de tensão não convencionais, nas quais as três tensões principais variam independentemente.

Para isso realizou-se um programa de ensaios de laboratório que envolveu ensaios em trajetórias de tensão convencionais e não convencionais, com amostras saturadas e não saturadas de um solo residual jovem coletado em um perfil típico de solo residual de gnaiss da cidade de Viçosa-MG. Esse solo foi escolhido por ter sido o que REIS (2004) usou na sua tese de doutoramento, possibilitando, dessa forma, comparações que permitiriam comprovar o funcionamento da nova célula desenvolvida.

O trabalho realizado conduziu às seguintes conclusões.

- a) Os resultados dos ensaios triaxiais realizados com o novo equipamento em trajetórias convencionais, com amostras saturadas e não saturadas do solo, forneceram resultados parecidos com os obtidos por REIS (2004). Concluiu-se, portanto, que a célula triaxial cúbica desenvolvida está funcionando adequadamente.

- b) A célula triaxial cúbica desenvolvida parece ser particularmente adequada para a realização de ensaios em solos não saturados, primeiro porque as deformações na ruptura são, normalmente, pequenas, não gerando, portanto, maiores interferências entre as membranas adjacentes. E, segundo, porque a medição de variação de volume,

quase sempre problemática em ensaios com solos não saturados, é bastante simples de ser feita na célula triaxial cúbica.

- c) O procedimento de execução dos ensaios triaxiais cúbicos proposto no qual, inicialmente, instalava-se a sucção fora da célula cúbica, em câmaras de pressão especialmente projetadas para isso, agilizaram bastante a execução dos ensaios não saturados.
- d) A função hiperbólica proposta por REIS (2004) para representar o aumento da coesão com a sucção, ajustou bastante bem com os resultados encontrados nessa dissertação, com parâmetros não muito diferentes dos obtidos por REIS (2004). Desta forma, os resultados obtidos nesta tese confirmam que o parâmetro ϕ^b não é constante
- e) O ajuste hiperbólico do aumento da coesão com a sucção proposta por REIS e VILAR (2004) foi adequado para representar os resultados encontrados na dissertação.
- f) O efeito da sucção na variação volumétrica não ficou claro com o conjunto de ensaios realizados. Em alguns ensaios, a variação volumétrica diminuía à medida que a sucção aumentava, enquanto que em outros, não se observava esse comportamento. Atribui-se esse comportamento a características peculiares do solo residual.
- g) Como se esperava, o módulo de elasticidade aumentou com o aumento da sucção e da tensão de confinamento.
- h) O coeficiente de Poisson aumentou com a sucção e, para uma mesma sucção, não ficou constante com a variação da tensão de confinamento.
- i) Nos ensaios com trajetória de tensão não convencionais, observou-se que, para um mesmo valor de sucção, as tensões na ruptura diminuía

à medida que o ângulo de Lode aumentava. Entretanto, a rigidez do solo não sofre variações significativas com a variação do ângulo de Lode, principalmente, para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 30^\circ$.

- j) Com o conjunto de ensaios realizados, não foi possível chegar a uma conclusão a respeito da anisotropia inerente do solo e do efeito da sucção na anisotropia. Em condições saturadas, o solo apresentou um comportamento anisotrópico que não se confirmou nos ensaios com sucção matricial de 80 kPa, mas voltou a ficar nítido nos ensaios com sucção matricial de 160 kPa.
- k) Os pontos que definem a curva característica obtidos com a câmara de pressão e com a técnica do papel filtro foram parecidos e resultaram numa curva do tipo “S” que pode ser ajustada razoavelmente bem pela equação proposta por Gardner (1958) e a de Van Genuchten (1980) desde que o parâmetro m seja igual a 1.

Por fim, como sugestão para a continuação desta linha de pesquisa recomenda-se:

- a) Em relação ao equipamento, sugere-se que o programa AqDados seja modificado de tal forma que os resultados (curvas de tensão X deformação, deformação volumétrica X deformação axial, etc.) sejam desenhados automaticamente durante a realização dos ensaios, sem ser necessário levar os dados para uma planilha Excel.
- b) Em relação ao uso do equipamento, sugere-se a execução de um amplo programa de ensaios com um solo compactado para, posteriormente, fazer-se a mesma coisa com solos residuais. A utilização de um solo residual nessa dissertação deveu-se, exclusivamente, à possibilidade de comparações que permitiram validar o funcionamento do equipamento desenvolvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO E.E., GENS A., and HIGHT D.W. (1987) Special problems soils. General Reports. In proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin. Vol.3.
- AVERSA, S. & NICOTERA, M. V., (2002). A triaxial and oedometer apparatus for testing unsaturated soils. Geotechnical testing journal, GTJODJ, vol. 25, No. 1, March 2002, pp.3-15.
- AZEVEDO, R. F., (2006) Notas de aula – CIV 632. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa –MG.
- BISHOP, A. W., (1959). The principle of effective stress. Tecknisk Ukeblad, v. 106, n.39.
- BISHOP, A. W., ALPAN, G. E., BLIGHT, G. E. & DONALD, B. I. (1960) Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils. In: Research Conference on shear strength of Cohesive Soils, Boulder, 1960. Proceedings. American Society of Civil Engineers, 1960.
- BISHOP, A. W., & DONALD, I. B., (1961). The experimental study of party saturated soil in the triaxial apparatus. 5 th ICSMFE, Paris.

- BOCKING, K. A. & FREDLUND, D. G. (1980). Limitation of the axis translation technique. In: International Conference on Expansive Soils, 4., Denver, 1980. Proceeding.
- CAMPOS, T. M. P & CARRILO, C. W. (1995). Direct shear testing on unsaturated soil from Rio de Janeiro. Departamento de engenharia civil, Pontifícia Católica do Rio de Janeiro , R.J.,Brasil.
- CARRILO, C. W. (1993). Resistência ao cisalhamento dos solos coluvionares e residuais não saturados da Vista Chinesa, RJ. MSc Thesis, PUC-Rio.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G., (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. Proceeding of the Institute of Civil Engineering.
- DELAGE, P., SURAJ DE SILVA, G. P. R. & DE LAURE, E. (1987). Um novel appareil triaxial pour lês sol nom satures. In: European conference on Soil Mechanic and Foudation Engineering, 9., Dublin, 1987. proceedings. Rotterdam, A. A. Balkema.
- DESAI, C. S., & SIRIWARDANE, H. J., (1984). Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geologic materials. By prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- ESCÁRIO, V.,(1980). Suction controlled penetration and shear tests. In: International Conference on expansive soils, 4., Denver, 1980. Proceeding.

ESCÁRIO, V., & SAEZ, J. (1987). Shear strength of partly saturated soils versus suction. In: International Conference on Expansive Soils, 6., new Delhi.Proceeding. v.2.

FARIAS, M. M.; AZEVEDO, R. F.,(1986). Ensaio Triaxiais Cúbicos em Areia Seca. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 1986, Porto Alegre. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. 1986. v. 2, p. 33-44.

FARIAS, M. M. (1986) Construção e utilização de uma célula triaxial cúbica. Rio de Janeiro, RJ: PUC, 1986, 177p. Dissertação (Mestrado em geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

FARIAS, M. M. (2004). Modelagem constitutiva para o comportamento mecânico de solos não saturados. Universidade de Brasília, DF. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2004, São Carlos – SP.

FREDLUND, D.G., MORGENSTERN, N. R., WIDGER, R. A., (1978). Shear strength of unsaturated soils. Geotechnique, v.15, n.3.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley and Sons, INC., New York.

FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H., and GAN, J.K.M., (1987). Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils. Proceedings, 6th International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India.

FREDLUND, D.G., & XING, A., (1994). Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal.

HILF, J. W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. Denver, 1956. 109p (Doutorado – Faculty of the graduate school of the Uniniverty of Colorado).

GAN, J. K.M., FREDLUND, D.G., and RAHARDJO, H. (1988). Determination of the shear strength parameter of an unsaturated soil using the direct shear test. Canadian Geotechnical Journal.

HOYOS, L. R., Jr. & MACARI, E. J., (2001). Development of a stress/suction-controlled true triaxial testing device for unsaturated soils. Geotechnical testing journal, GTJODJ, vol. 24 No. 1, March 2001 pp.5-13.

JOSA, A., ALONSO, E. E., LLORET, A., GENS, A., (1987). Stress-strain behavior of partially saturated soils. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANIC AND FOUADATION. ENGINEERING, 9, 1987, Dublin. Proceeding...Dunblin: 1987 . v. 2, p. 561-564.

LOPES, M. B. L., CAMPOS, T. M. P., ANTUNES, F.S., e VILLAR, L. F. S., (2006). Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito da região metropolitana de Belo Horizonte (MG). In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTECNICA E IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS – COBRAMSEG'2006, Curitiba, PR. Anais...Curitiba , 2006. v.1, p 349-354.

LU, N. & LIKOS, W.J., (2004). Unsaturated soil mechanics. United States of America.

MACARI, E. J. & HOYOS, L. R., Jr., (2001). Mechanical behavior of an unsaturated soil under multi-axial stress states. Geotechnical testing journal, GTJODJ, vol. 24 No. 1, March 2001 pp.14-22.

MACHADO, S. L. (1998). Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos.

MACHADO, S. L. & ZUQUETTE, L. V. (2004). Transporte de massa e mecanismo de retenção em solos não saturados. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. São Carlos/SP, Anais...São Carlos, 2004, v. 2, p. 545-572.

MATSUOKA, H., SUN, D. A., ANDO, M., KOGANE, A., e FUKUZAWA, N., (1999). Deformation and strength of unsaturated soil by true triaxial tests. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 27 a 30 August, 1998 – Beijing, China, International Academic Publishers.

OLIVEIRA, O. M (2004). Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, 330p.

REIS, R. M., (1998). Desenvolvimento e utilização de um equipamento triaxial cúbico no estudo da anisotropia de um solo residual de gnaiss da região de Viçosa (Minas Gerais). Dissertação (Mestrado em geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

REIS, R. M., (2004). Comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de gnaiss. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos.

REIS, R. M.; AZEVEDO, R. F., (1998). Características de deformabilidade e resistência de um solo residual de gnaiss da região metropolitana da cidade de Viçosa. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998, Brasília. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 1998. v. 1, p.213-220.

REIS, R. M.; AZEVEDO, R. F.,(1999). Anisotropic Study of Residual Soil Based on Cubical Triaxial Test Results. In: XI PANAMERICAN CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1999, Foz do Iguaçu. XI PANAMERICAN CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 1999. v. 1, p. 141-146.

REIS, R. M.; VILAR, O. M., (2004). Resistência ao cisalhamento de dois solos residuais de gnaiss não saturados. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. São Carlos/SP, Anais...São Carlos, v. 1, p. 109-114.

ROHM , S. A.,(1997). Solos não saturados. Monografia geotécnica nº 04, 135 p. Escola de Engenharia de São Carlos- Departamento de Geotecnia. Universidade de São Paulo/USP.

ROHM , S. A., VILAR, O. M. (1994). A influência da estrutura de um solo arenoso laterizado não saturado na sua resistência ao cisalhamento. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 2, Recife, Anais... Recife: UFPE.

ROHM , S. A., VILAR, O. M. (1995). Shear strength of na unsaturated sandy soil. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURETED SOILS – UNSAT’95, 1, Paris. Proceedings...Paris: l’ école nationale Des Ponts et Chaussées.

TEIXEIRA, R. S., & VILAR, O. M. (1997). Resistência ao cisalhamento de um solo compactado não saturado. In : SIMPÓSIO BRASILEIRO SE SOLOS NÃO SATURADOS – Ñ SAT’ 97, 3, 1997. Rio De Janeiro. Anais...Rio de janeiro Freitas bastos, 1997. v. 1, p.161-169.