



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO POR CLORETO DE COBRE NA RESISTÊNCIA DE UM SOLO ARENOSO COMPACTADO

RONALDO LUIS DOS SANTOS IZZO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP

MAIO - 2003



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO POR CLORETO DE COBRE NA RESISTÊNCIA DE UM SOLO ARENOSO COMPACTADO

RONALDO LUIS DOS SANTOS IZZO

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP
MAIO – 2003

DADOS CURRICULARES

RONALDO LUIS DOS SANTOS IZZO

NASCIMENTO : 01.09.1977 – BOTUCATU / SP

FILIAÇÃO : ANTONIO IZZO FILHO
ROSA MARIA DOS SANTOS IZZO

1995 / 2000 : CURSO DE GRADUAÇÃO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MARILIA

2001 / 2002 : CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE
SEGURANÇA DO TRABALHO
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP – CAMPUS
DE BAURU

DEDICATÓRIA

Ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti pela atenção, dedicação e empenho para que este trabalho fosse possível.

A Antônio Izzo Filho, meu pai, pelo apoio irrestrito e por ter sido como um farol no meio de uma tempestade. À minha família como um todo, às estudantes de medicina Cássia Cristina dos Santos Izzo e Juliana Rother e à estudante de direito Silvia Regina dos Santos Izzo pela colaboração incondicional, a minha mãe Rosa Maria dos Santos Izzo pelo carinho e apoio que me motivaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me deu a vida e a vontade de evoluir intelectualmente e como pessoa, sem as quais seria impossível a realização deste trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. Heraldo Luiz Giacheti por ter sido meu orientador e por ter a disposição, a paciência e a dedicação necessárias para com esse trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. Edmundo Rogério Esquivel cujo auxílio no desenvolvimento do sistema existente no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp de Bauru para realização de ensaios triaxiais, que foram essenciais para a realização desse trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. Lazaro Valentin Zuquette pela preparação dos corpos-de-prova.

Agradeço ao aluno de iniciação científica da Faculdade de Ciências da Computação da FC-Unesp/Bauru Cláudio Eduardo S. Lago pelo auxílio no desenvolvimento do hardware e software do sistema de aquisição de dados.

Aos meus tios Alcides dos Santos Junior e Jorge dos Santos Junior pela inestimável ajuda em momentos difíceis.

Agradeço em particular ao Professor Doutor Alcides Padilha pelo incentivo, pelo apoio e por acreditar que eu seria capaz de realizar este trabalho.

Aos professores do curso de Mestrado da Unesp/Bauru, que contribuíram para a formação de excelentes Mestres.

Aos meus colegas de turma.

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Nessuno effetto
è in natura senza ragione;
intendi la ragione e non ti
bisogna speranza.” (Leonardo
da Vinci)*

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABELAS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT.....	xviii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 - CONTAMINAÇÃO E POLUIÇÃO	4
3.1.1 - CONTAMINAÇÃO DO SOLO E DAS ÁGUAS.....	4
3.1.2 - CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	5
3.1.3 - FONTES DE POLUIÇÃO.....	5
3.1.4 - CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS.....	6
3.2 - DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS. ..	7
3.3 - ENSAIO TRIAXIAL.....	12
3.3.1 - TIPOS DE ENSAIOS TRIAXIAIS.....	14
3.3.2 - ENSAIOS TRIAXIAIS EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.....	16
3.3.3 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO.	18
3.3.4 - CORREÇÕES NECESSÁRIAS EM UM ENSAIO TRIAXIAL.....	22
3.3.5 - MEDIDOR DE VARIAÇÃO DE VOLUME.....	25
3.3.6 - TRAJETÓRIA DE TENSÃO.....	29
3.4 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS	31
3.4.1 - SOLOS ARENOSOS	31
3.4.2 - SOLOS CONTAMINADOS.. ..	38
4 - MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1 - MATERIAIS	46
4.1.1 - EQUIPAMENTOS.....	46
4.1.2 - MEDIDOR DE VARIAÇÃO DE VOLUME.....	48
4.1.3 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	48
4.1.3.1 <i>HARDWARE</i>	48

4.1.3.2	<i>SOFTWARE</i>	50
4.1.4	CALIBRAÇÕES.....	52
4.1.5	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ESTUDADO.....	55
4.1.5.1	<i>COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO</i>	56
4.1.5.2	<i>CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA</i>	56
4.1.5.3	<i>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA</i>	57
4.1.5.3.1	<i>CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA</i>	57
4.1.5.3.2	<i>LIMITES DE CONSISTÊNCIA</i>	58
4.1.5.3.3	<i>MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS</i>	58
4.1.5.3.4	<i>PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO</i>	59
4.1.5.4	<i>CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA</i>	60
4.1.5.5	<i>TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO</i>	61
4.1.5.6	<i>CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO ESTUDADO</i>	62
4.1.6	SOLUÇÃO UTILIZADA PARA A PERCOLAÇÃO NOS CORPOS-DE-PROVA	62
4.1.6.1	<i>CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO</i>	62
4.1.6.2	<i>PREPARO E ARMAZENAMENTO DA SOLUÇÃO</i>	63
4.2	MÉTODOS.....	64
4.2.1	COMPACTAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	64
4.2.2	PERCOLAÇÃO DE ÁGUA DESTILADA E SOLUÇÃO NOS CORPOS-DE-PROVA.....	65
4.2.3	ENSAIOS TRIAXIAIS	68
4.2.3.1	<i>INSTALAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA NA CÂMARA TRIAXIAL</i>	68
4.2.3.2	<i>SATURAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA</i>	70
4.2.3.3	<i>A FASE DE CISLHAMENTO</i>	73
5	RESULTADOS DOS ENSAIOS	77
5.1	SOLO PERCOLADO COM ÁGUA DESTILADA	77
5.2	SOLO PERCOLADO COM SOLUÇÃO DE 50MG/L.....	84

5.3 - SOLO CONTAMINADOS COM SOLUÇÃO DE 300MG/L	91
5.4 - SOLO CONTAMINADOS COM SOLUÇÃO DE 600MG/L	98
6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	106
6.1 - A TÉCNICA DO ENSAIO TRIAXIAL EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.....	106
6.1.1 - SOLO PERCOLADO COM ÁGUA DESTILADA	106
6.1.2 - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A TÉCNICA DO ENSAIO TRIAXIAL EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.....	110
6.2 - INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO NA RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DO SOLO ESTUDADO.....	111
6.2.1 - TRAJETÓRIA DE TENSÕES	111
6.2.2 - RESISTÊNCIA	112
6.2.3 - DEFORMABILIDADE.....	120
6.2.4 - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO NA RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DO SOLO ESTUDADO	121
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE.....	122
7.1 - CONCLUSÕES	122
7.1.1 - QUANTO A TÉCNICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.....	122
7.1.2 - QUANTO A INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO NA RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DO SOLO ESTUDADO.....	123
7.2 - SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE	125
8 - BIBLIOGRAFIA.....	126
ANEXOS1.....	132
ANEXOS2.....	136
ANEXOS3.....	137

Índice de figuras

Figura 3-1 - Sistema de liners de base para aterros de resíduos sólidos urbanos segundo recomendação de alguns países (MANASSERO, 1997; VAN IMPE, 1998; MANASSERO et al. 1998 apud CARVALHO, 1999).....	11
Figura 3-2 – Superfícies potenciais de ruptura em vários tipos de taludes escavados, para depósito de resíduos (SHARMA e LEWIS, 1994).	12
Figura 3-3 - Desenho esquemático de um ensaio triaxial (HEAD, 1986).....	13
Figura 3-4 - Tipos de ensaios triaxiais.	14
Figura 3-5 – Fluxograma para execução dos três tipos de ensaios triaxiais.	17
Figura 3-6 - Determinação do t100 teórico à partir do gráfico raiz do tempo versus variação de volume (HEAD, 1986).	18
Figura 3-7 - Tensão aplicada em um elemento de solo durante um ensaio triaxial : (a) inicialmente, (b) aumento na pressão da câmara triaxial, (c) aumento na tensão desvio, (c) variação resultante.....	21
Figura 3-8 – Foto de uma câmara triaxial destacando o pistão para aplicação de carga vertical.....	24
Figura 3-9 - Atuação da pressão aplicada no interior da câmara triaxial.	25
Figura 3-10 - (A) Leitor analógico de variação de volume incorporado ao painel de poro-pressão(HEAD, 1986) , (B) bureta e (ARARUNA et al., 1995).....	27
Figura 3-11 - Vista em corte do aparelho medidor de variação volumétrica (ARARUNA et al, 1995).	28
Figura 3-12 - Representação de algumas trajetórias de tensão (SOUZA PINTO, 2000).....	30
Figura 3-13 - Resultados para o solo Ndienné (FALL et al., 1997).	32
Figura 3-14 - Granulometria dos solos estudados por MARTINS et. al. (1998).	33

Figura 3-15 – Resultados de ensaios triaxiais obtidos por MARTINS et. al. (1998) para solos residuais de arenito Botucatu.	34
Figura 3-16 – Ensaio de compressão triaxial drenada, (A) Razão da Tensão Principal Efetiva (B) Variação volumétrica (YAMAMURO e LADE, 1996).	35
Figura 3-17 – Gráficos de tensão e poro-pressão versus a deformação para (A) solo amostrado em Kiefan e (B) solo amostrado em Reggae (ISMAEL e MOLLAH, 1998).	37
Figura 3-18 - Gráficos de tensão e poro-pressão versus a deformação na condição natural e percolado com água para (A) solo amostrado em Kiefan e (B) solo amostrado em Reggae (ISMAEL e MOLLAH, 1998).	38
Figura 3-19 - Curvas granulométricas obtidas para solos lateríticos (SOB2), zona mosqueada (SAM2) e saprólito (SAM3), na condição não contaminado (NAT), contaminado com NaCl 1000ppm (SS) e contaminado com chorume (CH). (CORRÊA e SOUZA, 2002).	40
Figura 3-20 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto realizado em corpos-de-prova de areia de Jumoonjin, do sul da Korea, contaminado com diferentes concentrações de óleo cru de Oman (SHIN e DAS, 2000).	41
Figura 3-21 - Distribuição granulométrica do solo arenoso estudado por AL-SANAD et al. (1995).	42
Figura 3-22 - (A) Curvas Tensão x Deformação Axial. (B) Curvas Poro-pressão x Deformação Axial. (AL-SANAD et al., 1995).	43
Figura 3-23 - Envoltórias de tensões efetivas (AL-SANAD et al., 1995).	44
Figura 3-24 - (A) Gráfico Tensão x Deformação. (B) Gráfico Poro-pressão x Deformação. Para solo limpo, contaminado com óleo cru pesado (T=0) e contaminado com óleo cru pesado após 6 meses (AL-SANAD e ISMAEL, 1997).	45

Figura 4-1 – Descrição dos dispositivos utilizados para a realização dos ensaios triaxiais.....	47
Figura 4-2 - Vista geral do equipamento utilizado para Realização de Ensaio Triaxiais no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp – Bauru.....	47
Figura 4-3 - Medidor de variação volumétrica construído.	49
Figura 4-4 - DFD do Sistema de Aquisição de Dados para Ensaio de Compressão Triaxial.....	50
Figura 4-5 - Curva de variação de volume da câmara triaxial versus tensão confinante.....	52
Figura 4-6 - Curva de variação de volume da câmara triaxial versus o deslocamento do pistão.....	53
Figura 4-7 - Gráfico carga versus pressão confinante.....	54
Figura 4-8 - Esboço da distribuição das unidades litoestratigráficas no estado de São Paulo e sua divisão geomorfológica (ALBIERO et. al. , 1993).....	55
Figura 4-9 – Curva granulométrica do solo em estudo.	57
Figura 4-10 - Curva de compactação Proctor Normal e parâmetros de compactação para o solo da Formação Botucatu.....	59
Figura 4-11 - Determinação da tensão de pré-adensamento utilizando o método Pacheco Silva.	61
Figura 4-12 - Equipamento utilizado para compactar os corpos-de-prova.....	64
Figura 4-13 - Equipamento utilizado na percolação dos corpos-de-prova (Departamento de Geotecnia da EESC-USP).....	66
Figura 4-14 – Coluna utilizada para compactar os corpos-de-prova e percolar as soluções e a água.	67
Figura 4-15 - Câmara úmida do Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Engenharia da Unesp – Bauru.....	67
Figura 4-16 - Esquema da ordem de montagem do conjunto base, pedras porosas, papel filtro e topo.....	68
Figura 4-17 - Esquema do posicionamento da membrana de latex (BARDET, 1997).....	69
Figura 4-18 - Vista da câmara triaxial após a montagem.....	69

Figura 4-19 - Esquema geral de montagem do equipamento triaxial utilizado.....	70
Figura 4-20 - Determinação do tempo para ocorrer 100% do adensamento primário (t_{100}).....	74
Figura 4-21 – Representação dos níveis de tensão confinante utilizadas nos ensaios triaxiais realizados.....	75
Figura 5-1 – (CP1) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	78
Figura 5-2 – (CP1) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	79
Figura 5-3 - (CP2) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	80
Figura 5-4 - (CP2) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	81
Figura 5-5 - (CP3) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	82
Figura 5-6 - (CP3) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	83
Figura 5-7 – (CP4) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	85

Figura 5-8 - (CP4) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	86
Figura 5-9 – (CP5) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	87
Figura 5-10 - (CP5) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	88
Figura 5-11 – (CP6) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	89
Figura 5-12 - (CP6) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	90
Figura 5-13 - (CP7) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	92
Figura 5-14 - (CP7) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	93
Figura 5-15 – (CP8) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	94
Figura 5-16 - (CP8) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 300mg/l de cloreto de cobre	

	aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	95
Figura 5-17 – (CP9)	Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	96
Figura 5-18 - (CP9)	Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	97
Figura 5-19 - (CP10)	Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	99
Figura 5-20 - (CP10)	Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	100
Figura 5-21 – (CP11)	Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	101
Figura 5-22 - (CP11)	Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.....	102
Figura 5-23 – (CP12)	Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.....	103
Figura 5-24 - (CP12)	Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro	

Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.	104
Figura 5-25 - Gráfico tensão desviatória versus deformação para todos os ensaios realizados.	105
Figura 5-26 - Gráfico variação volumétrica específica versus a raiz quadrada do tempo para todos os ensaios realizados.	105
Figura 6-1 - Gráfico Tensão Desviatória versus deformação. Resultados do ensaio triaxial em múltiplos estágios do primeiro corpo-de-prova e resultados dos primeiros estágios do segundo e terceiro corpos-de-prova. Solo percolado com água destilada.	107
Figura 6-2 - Resultado de ensaios triaxiais em múltiplos estágios sob confinante de 200 kPa. Solo percolado com água destilada.	108
Figura 6-3 - Determinação da envoltória de resistência em termos de tensões efetivas (A) a partir de ensaios triaxiais convencionais e (B) a partir de um ensaio triaxial em múltiplos estágios.	109
Figura 6-4 - Trajetórias de tensões em termos de tensões efetivas.	112
Figura 6-5 - Gráfico tensão desviatória versus deformação sob confinante de 50 kPa para todos os ensaios realizados.	113
Figura 6-6 - Gráfico tensão desviatória versus deformação sob confinante de 100kPa para todos os ensaios realizados.	114
Figura 6-7 - Gráfico tensão desviatória versus deformação sob confinante de 200kPa para todos os ensaios realizados.	114
Figura 6-8 – Envoltórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com água destilada.	117
Figura 6-9 - Envoltórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso.	117

- Figura 6-10 – Envoltórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso.....118
- Figura 6-11 – Envoltórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso.....118

Índice de Tabelas

Tabela 3-1 - Valores típicos para a deformação na ruptura, HEAD (1986).	19
Tabela 3-2 - Notação MIT e Cambridge (BARDET, 1997).	30
Tabela 3-3 - Resumo das propriedades do solo Ndienné (FALL et al., 1997).	31
Tabela 3-4 - Resumo das propriedades dos solos estudados por ISMAEL e MOLLAH (1998).	36
Tabela 4-1 - Resumo do conteúdo mineralógico da fração fina do solo da Formação Botucatu (LEITE, 2000).	57
Tabela 4-2 - Limites de consistência do solo estudado (LEITE, 2000).	58
Tabela 4-3 - Massa específica dos sólidos (rs) da amostra.	58
Tabela 4-4 - Valores de teores de umidade ótima e massa específica seca máxima do solo estudado.	59
Tabela 4-5 - Propriedades físico-químicas do solo estudado.	60
Tabela 4-6 - Principais características da solução utilizada para percolação.	63
Tabela 4-7 - Características de cada corpo-de-prova compactado.	65
Tabela 4-8 - Exemplo da organização dos dados no procedimento de saturação por contra-pressão registrado a partir do programa de aquisição de dados utilizado neste trabalho.	72
Tabela 4-9 – Condição do solo, número de corpos-de-prova e tensões confinantes aplicadas.	76
Tabela 6-1 - Módulo de deformabilidade determinado a partir do ensaio triaxial convencional e em múltiplos estágios.	110
Tabela 6-2 - Síntese dos resultados dos ensaios triaxiais em múltiplos estágios realizados.	115
Tabela 6-3 - Síntese dos valores da coesão e do ângulo de atrito para o solo ensaiado sob diferentes níveis de contaminação.	119
Tabela 6-4 - Valores do módulo de deformabilidade secante para 50 % da tensão de ruptura.	120

LISTA DE ABRAVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASCE - American Society of Civil Engineers

CP - Corpo-de-prova

CTC - Capacidade de Troca Catiônica.

NBR - Norma Brasileira

PH - Potencial Hidrogeniônico

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área.[L^2]
B	- parâmetro de Skempton.
e	- índice de vazios.
GC	- Grau de Compactação [%]
IP	- Índice de Plasticidade
K	- coeficiente de permeabilidade [L/T]
LL	- Limite de Liquidez.
LP	- Limite de Plasticidade.
n	- porosidade
P	- Carga [M }
SE	- Superfície Específica.
SR	- Grau de Saturação
u	- poro-pressão [P]
V	- Volume [V]

W - Umidade [%]

W_{ot} - umidade ótima [%]

?

? - deformação específica [%]

?

γ_v - Variação volumétrica específica [%]

?

? - Massa específica [g/cm³]

?

γ_d - Massa específica Seca [g/cm³]

?

γ_s - Massa específica dos sólidos [g/cm³]

?

? - Tensão [F/A]

IZZO, R. L. S. *Influência da Contaminação por Cloreto de Cobre na Resistência de um Solo Arenoso Compactado*, 2003. 144p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, *Campus* de Bauru. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de um estudo experimental que tem como principal objetivo avaliar o efeito da contaminação por cloreto de cobre aquoso na resistência de um solo compactado oriundo do arenito da Formação Botucatu.

Para este trabalho corpos-de-prova compactados foram percolados com água destilada e com solução de cloreto de cobre aquoso em concentrações de 50, 300 e 600 mg/l visando, mais especificamente, o estudo da influência de diferentes concentrações de cobre na resistência desse solo.

Tendo em vista o tempo e o custo elevado para se obter corpos-de-prova contaminados, ensaios triaxiais em múltiplos estágios foram realizados e seus resultados foram comparados com os resultados de ensaios triaxiais convencionais. Constatou-se que a técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios levou a uma redução nos parâmetros de resistência e um aumento na rigidez para

o solo estudado. Portanto, essa pode ser considerada uma alternativa interessante apenas quando é praticamente impossível ou inviável se obter amostras em quantidade suficiente para realização de ensaios triaxiais convencionais.

Através da análise dos resultados dos ensaios triaxiais convencionais constatou-se que há uma pequena redução da tensão de ruptura devido à contaminação, mais pronunciada para as tensões confinantes de 50 e 100 kPa. Observou-se ainda uma maior redução da coesão efetiva para o solo percolado com as concentrações de 50 e 300 mg/l de cloreto de cobre aquoso e que praticamente não houve uma variação significativa do ângulo de atrito e no módulo de deformabilidade (E_{50}) provocada por essa contaminação.

Assim, para fins de aplicação prática em projetos de obras civis, a influência da contaminação por cobre na resistência e na rigidez é pouco significativa e não precisa ser considerada para o solo estudado.

IZZO, R. L. S. *Influence of contamination by copper chloride in the resistance of a compacted sandy soil*, 2003. 144 p. Dissertation (Master Degree) – Faculdade de Engenharia, *Campus* de Bauru. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

ABSTRACT

This dissertation presents an experimental study that has as main objective to evaluate the effect of the contamination by copper chloride in the resistance of compacted sand from Botucatu Formation.

For this research samples were compacted and percolated with distilled water and copper chloride solution in concentrations of 50, 300 and 600 mg/l in order to study, more specifically, the influence of different concentration of copper at the resistance of a compacted sandy soil.

Having in mind the time and cost to obtain contaminated samples, multistage triaxial tests have been carried out and the results had been compared with the results of the conventional triaxial test. For the studied the multistage triaxial tests technique carried out to a reduction in the resistance parameters and an increase in the rigidity. Therefore, this only can be considered

an interesting alternative when it is practically impossible or impracticable to get enough samples for accomplishment of conventional triaxial test.

Through the analysis of the conventional triaxials tests results, a small reduction of the peak strength due to contamination was observed, more evident for the confining pressures of 50 and 100 kPa. A higher reduction of the cohesion was observed for the soil percolated with the concentrations of 50 and 300 mg/l of copper chloride and that practically did not have a significant variation on the shear angle and the Young's module (E_{50}) provoked by this contamination.

Thus, for ends of practical application in projects of civil engineering, the influence of the contamination by copper in the resistance and the rigidity is little significant and it is not necessary to be considered for the sand soil studied.

1 - INTRODUÇÃO

Segundo BENSON et al. (1994), o sucesso do projeto e da construção de uma barreira de contenção envolve diversos fatores, tais como: seleção de materiais; avaliação da compatibilidade química entre a barreira e o resíduo; determinação da metodologia de construção; análise da estabilidade dos taludes e capacidade de suporte; avaliação da subsidência; consideração de fatores ambientais (fissuras, dissecação, etc) e desenvolvimento e execução de um plano de segurança quanto aos aspectos construtivos. Ensaio laboratoriais possuem grande utilidade como instrumento de análise preliminar, visto que simulam várias das condições reais impostas a este tipo de obra.

Deve-se considerar também que um dos fatores que contribuem para o elevado custo de construção de barreiras de contenção é o material que irá ser utilizado na construção, bem como, a distância entre o local de construção e o local de origem deste material.

A fim de avaliar o desempenho de materiais naturais que ocorrem no interior do estado de São Paulo que sirvam aos propósitos de barreiras de proteção, estão sendo feitos estudos com solos das Formações Botucatu e Serra Geral. A disponibilidade local dos materiais gera grandes perspectivas em função do baixo custo, já que os gastos com transporte seriam evitados. Entretanto percebe-se a grande carência de informações com relação a fatores técnicos inerentes aos materiais.

O Departamento de Geotecnia da EESC-USP vem desenvolvendo um estudo abrangente sobre o comportamento de misturas entre solos da Formação Botucatu e da Formação Serra Geral que ocorrem na região de Ribeirão Preto/SP, para uso em barreiras de contenção (ZUQUETTE, 2001). Para avaliar o efeito da contaminação sobre esses solos e essas mistura, foram utilizadas soluções iônicas de Potássio (K^+), Cloro (Cl^-), Sódio (Na^+) e Cobre

(Cu^{++}). Estas pesquisas vêm sendo feitas a partir de ensaios de coluna em laboratório. LEITE (2000), afirma que os íons de Potássio são mais comuns de se encontrar em aterros sanitários urbanos e que os íons de Cobre são mais abundantes em resíduos industriais.

Além da permeabilidade, para elaboração do projeto de uma barreira de proteção há a necessidade de avaliar a resistência e a deformabilidade do solo a ser utilizado como liner e de igual importância é avaliar como a resistência desse solo é afetada pela contaminação.

O material estudado nessa pesquisa, solo da Formação Botucatu, é um solo arenoso, entretanto, quando compactado apresenta permeabilidade da ordem de 10^{-8} a 10^{-9} m/s. Essa baixa permeabilidade quando compactado faz com que alguns autores, como por exemplo CALÇAS (2001), sugiram o emprego de materiais desse tipo como barreira de proteção em aterros sanitários de cidades de pequeno porte, onde não existem recursos disponíveis para emprego de solo argilosos, misturas ou geosintéticos.

Visando colaborar com os estudos que vem sendo realizados no Departamento de Geotecnia da EESC-USP e tendo em vista a pouca informação existente na literatura sobre a influência da contaminação nos parâmetros mecânicos dos solos, especialmente na sua resistência, o presente trabalho apresenta e discute os resultados de ensaios de compressão triaxial do tipo adensado e não drenado realizados, nessa primeira etapa, em amostras de solo compactado da Formação Botucatu oriundo da região de Ribeirão Preto, percolado com água destilada e com uma solução cloreto de cobre aquoso, visando o estudo da influência do íon de cobre na resistência do solo estudado.

Devido à dificuldade, o tempo e o custo elevado para se obter corpos-de-prova contaminados, realizou-se, neste trabalho, uma avaliação da técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios. Concluiu-se que a utilização da

técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios, para o solo estudado nessa pesquisa, só pode ser considerada uma alternativa interessante em último caso, quando é praticamente impossível ou inviável obter amostras em quantidade suficiente para emprego da técnica convencional.

Avaliou-se a influência da contaminação por três diferentes concentrações de cloreto de cobre aquoso na resistência do solo estudado. Concluiu-se que há uma diminuição da tensão de ruptura, devida à contaminação, mais pronunciada para o solo sob as pressões confinantes de 50 e 100 kPa. Observou-se uma maior diminuição da coesão efetiva para os solos percolados com as soluções de 50 e 300 mg/l de cloreto de cobre aquoso. O módulo de elasticidade (E_{50}) não apresentou uma variação significativa com essa contaminação.

2 - OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho será:

- ?? Estudar a influência da percolação de uma solução de cloreto de cobre aquoso na resistência e na deformabilidade de um solo arenoso da Formação Botucatu, compactado e saturado, a partir da realização de ensaios triaxiais do tipo adensado rápido (CU).

Para atingir o objetivo principal este trabalho terá ainda os seguintes objetivos meios:

- ?? Montar e desenvolver junto ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp - Bauru os equipamentos necessários para realização de ensaios de compressão triaxial devido à necessidade de ensaiar corpos-de-prova de dimensões não convencionais.
- ?? Avaliar a técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios para determinação da resistência ao cisalhamento desse solo.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - CONTAMINAÇÃO E POLUIÇÃO

3.1.1 - Contaminação do Solo e das Águas

Poluição, segundo a lei nº 997 de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre o Controle de Poluição de Meio Ambiente no Estado de São Paulo, é definida como a presença, lançamento ou liberação na água, no ar ou no solo de qualquer forma de matéria ou energia, em intensidade, quantidade e concentração que :

?? possam tornar a água, o ar ou o solo impróprios, nocivos ou ofensivos à saúde;

?? inconvenientes ao bem estar público;

?? danosos aos materiais, à fauna e a flora;

?? prejudiciais à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais de comunidade;

As normas de potabilidade a serem observadas são as da Organização Mundial de Saúde (1970) ou as da ABNT (PB-19).

3.1.2 - Contaminação das Águas Subterrâneas

A contaminação ou a poluição da água subterrânea pode ser do tipo físico (alta temperatura ou radioatividade), químico (metais pesados ou sais em excesso, etc) ou biológico (bactérias ou vírus patogênicos).

Segundo BOSCOV (1997), as águas superficiais são menos protegidas contra a poluição que as subterrâneas, porém os aquíferos subterrâneos, se contaminados, têm maior dificuldade em retornar a seu estado original dada a baixa velocidade de fluxo que os caracteriza.

Ainda segundo BOSCOV (1997), a contaminação do solo é a principal causa da deterioração das águas subterrâneas e dentre as principais fontes de poluição do solo e das águas subterrâneas estão os depósitos de resíduos industriais ou domésticos.

3.1.3 - Fontes de Poluição

LEITE (1995) cita que o solo e a água podem ser contaminados pelos mais diversos tipos de fontes. Segundo LUNDGREN (1986) apud LEITE (1995), as fontes de contaminação são classificadas em dois grandes grupos: fontes pontuais e fontes não pontuais. As fontes pontuais incluem:

- ?? tanques e fossas sépticas
- ?? sistemas de coleta e tratamento empregado em manejo de resíduo municipal (resíduos domésticos e industrial)
- ?? solo nos quais são lançados lodo ou efluentes do sistema de tratamento de esgoto municipal
- ?? represamento de resíduos industriais
- ?? minas (resíduos de minas consistindo de químicos inorgânicos e minerais)

?? operações de perfuração (salmoura ou água salgada trazida para a superfície)

As fontes não pontuais incluem :

?? solos de agricultura e áreas de pasto suburbano (fertilizantes, pesticidas e esterco)

?? solos irrigados de agricultura

?? áreas urbanas (óleo, gasolina...)

?? massa de ar (contaminantes transportados pelo ar)

Esta definição é interessante, pois define de forma simples as fontes de contaminação, o que é importante para o entendimento deste trabalho.

3.1.4 - Contaminação por Metais Pesados

YONG et al. (1992) apud LEITE (2000) cita que os metais pesados que têm recebido maior atenção com relação à acumulação nos solos, assimilação pelas plantas, contaminação e poluição da água subsuperficial são o chumbo (Pb), o cádmio (Cd), o cobre (Cu), o zinco (Zn), o níquel (Ni), o cromo (Cr) e o mercúrio (Hg). A concentração desses metais, em conjunto, varia de 0-100 ppm nos resíduos sólidos municipais a 100-10.000 ppm na água de esgoto, em resíduos de mineração e em vários resíduos industriais.

Segundo YARLAGADDA et al. (1995), as categorias de contaminantes de solo normalmente encontrados são os orgânicos voláteis, os orgânicos hidrofílicos e hidrofóbicos, metais pesados e materiais radioativos. Destaca ainda, que em 1991 de um total de 498 locais contaminados, 330 tinham

metais pesados como principal contaminante e que os mais frequentemente encontrados foram o Pb, Hg, As, Cr, Cd e o Cu.

YARLAGADDA et al. (1995) discute ainda, que baseado na análise dos metais pesados encontrados por frações de tamanho das partículas de solo, em três amostras estudadas, o chumbo e o cobre foram encontrados em elevadas concentrações por toda a faixa de tamanho das partículas, com nenhuma localização específica em nenhum tamanho de partícula do solo.

3.2 - DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS.

O crescimento notório da indústria, tanto no âmbito nacional quanto no âmbito internacional, juntamente com a tão propalada globalização, gerou não só um aumento de fontes diretas de contaminação mas também um aumento da produção de lixo urbano e de lixo industrial. Conseqüentemente, a busca de locais apropriados para disposição de resíduos que respeitem a legislação ambiental se torna cada vez mais difícil.

Segundo BOSCOV (1997), resíduo pode ser definido como qualquer matéria, independentemente do valor, que é descartada ou abandonada ao longo de atividades industriais, comerciais, domésticas ou outras, ou ainda, pode ser definido como os produtos secundários não prontamente evitáveis para os quais não há demanda econômica e para os quais é necessária disposição.

Os resíduos podem se apresentar sob a forma de sólidos, líquidos, semi-sólidos ou gases. Os resíduos podem ter origem doméstica, industrial, comercial ou afim e são geralmente classificados segundo sua periculosidade ou dificuldade em tratar, armazenar ou dispor.

A disposição de resíduos sólidos diretamente no solo dá-se desde os primórdios da civilização humana. Acompanhando a evolução da humanidade, a disposição destes resíduos sofreu uma racionalização e otimização, caminhando para a forma de disposição que é conhecida atualmente como Aterro de Resíduos.

Apesar de haver viabilidade tecnológica para outros métodos de disposição (incineração, compostagem, reciclagem, compactação e alternativas como trituração e enfardamento), que tem como principal objetivo à diminuição do volume de resíduos, os aterros ainda constituem o principal método de disposição em diferentes partes do mundo.

O Aterro de Resíduos é o método de disposição mais difundido em todo o mundo por ser a solução mais econômica quando comparada com outros processos.

O Aterro de Resíduos são denominados de acordo com o resíduo a ser nele disposto. Assim, pode-se citar três tipos básicos de aterros : Aterro de Resíduos Sólidos (lixo doméstico), Aterro de Resíduos Industriais e Aterro de Resíduos Perigosos.

O tipo de Aterro de Resíduos mais comum é o Aterro de Resíduos Sólidos ou Aterro Sanitário, que é o principal sistema de destino final dos resíduos sólidos domésticos hoje no Brasil (LEITE, 1995).

Denomina-se percolado o fluido efluente da massa de resíduos resultante da percolação de águas de precipitação e da própria decomposição dos resíduos.

CARVALHO (1999), destaca que no caso de Aterros Sanitários, o percolado e o gás produzido são resultantes dos processos de transformações físico-químicas e biológicas decorrente da decomposição da matéria orgânica.

Os líquidos percolados de um Aterro de Resíduos apresentam elevadas concentrações de espécies químicas que podem infiltrar-se no solo, e assim, poluir e contaminar as águas subterrâneas e superficiais vindo a corroborar com a perda de mais e mais recursos de água potável, os quais se tornam a cada dia mais escassos.

O termo *liner* refere-se a todo tipo de barreira, seja de materiais naturais (solos argilosos, argilas compactadas, misturas compactadas), artificiais (geosintéticos em geral), ou mesmo a combinação dos dois tipos, que oferece proteção para obras de engenharia projetadas para disposição de resíduos /ou rejeitos (LEITE, 1997). Os *liners* constituem barreiras físicas e químicas, selando e protegendo quanto à percolação de fluidos contaminados e, em certos casos, resguardando o ambiente circundante (solos, água subterrânea etc).

Solos arenosos que possuem alta resistência e baixa deformabilidade nunca podem ser usados como uma barreira impermeabilizante, pois, como SHARMA e LEWIS (1994) afirmam, a principal característica a ser considerada em um material que será utilizado como barreira de contenção é a permeabilidade não devendo a barreira ser tratada como um elemento estrutural.

Apesar da condutividade hidráulica ser a principal característica a ser considerada em um solo que será utilizado como barreira de contenção, este solo não necessariamente deve ser argiloso, pois diversos trabalhos científicos como por exemplo o de CALÇAS (2001) mostram que um solo arenoso compactado pode apresentar valores de condutividade hidráulica acima de 10^{-7} m/s começando, portanto, a permitir o uso deste solo arenoso como uma barreira de contenção em alguns casos.

Apresenta-se, na Figura 3-1, alguns modelos de *liners* de base para aterros de resíduos sólidos urbanos propostos segundo regulamentações e recomendações de diferentes países (MANASSERO, 1997; VAN IMPE, 1998; MANASSERO et al. 1998).

Na atualidade os *liners* têm ampla aplicação, sendo utilizados em canais, reservatórios, diques, lagoas de tratamento de resíduos, lagoas de rejeito, aterros sanitários, etc (FOLKES, 1982). A crescente demanda por aplicações geoambientais tem promovido a realização de inúmeras pesquisas, seja quanto aos aspectos construtivos, parâmetros de migração e atenuação de contaminantes, ou mesmo a busca por materiais mais adequados. FOLKES (1982) cita alguns dos diversos tipos de matérias que normalmente são utilizados em *liners* para aplicações geoambientais:

- argilas compactadas;
- areia acrescida de bentonita;
- solo-cimento;
- jato de asfalto;
- membranas de polímeros;

Em Aterros Sanitários, lagoas de estabilização ou qualquer outra tecnologia de disposição de resíduos não inertes, a etapa de construção do *liner* exige critério e principalmente um controle rígido, porém, poucos são os estudos que mostrem a influência da percolação de um contaminante na resistência mecânica de um *liner*.

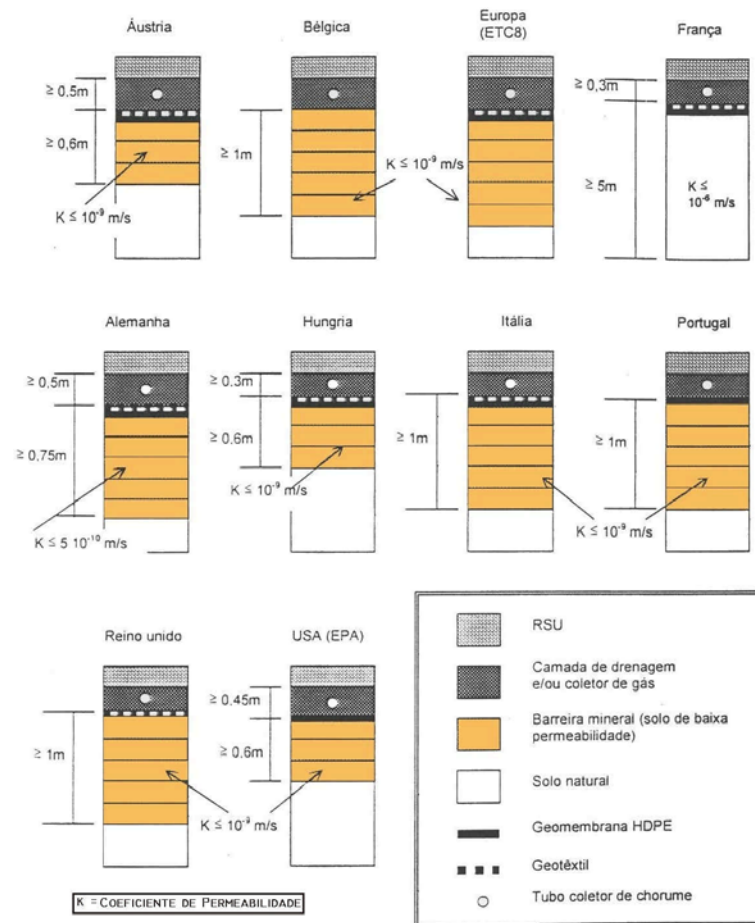


Figura 3-1 - Sistema de *liners* de base para aterros de resíduos sólidos urbanos segundo recomendação de alguns países (MANASSERO, 1997; VAN IMPE, 1998; MANASSERO et al. 1998 apud CARVALHO, 1999).

Na Figura 3-2, tem-se várias superfícies potenciais de ruptura em diferentes tipos de taludes escavados para depósito de resíduos, apresentados por SHARMA e LEWIS (1994).

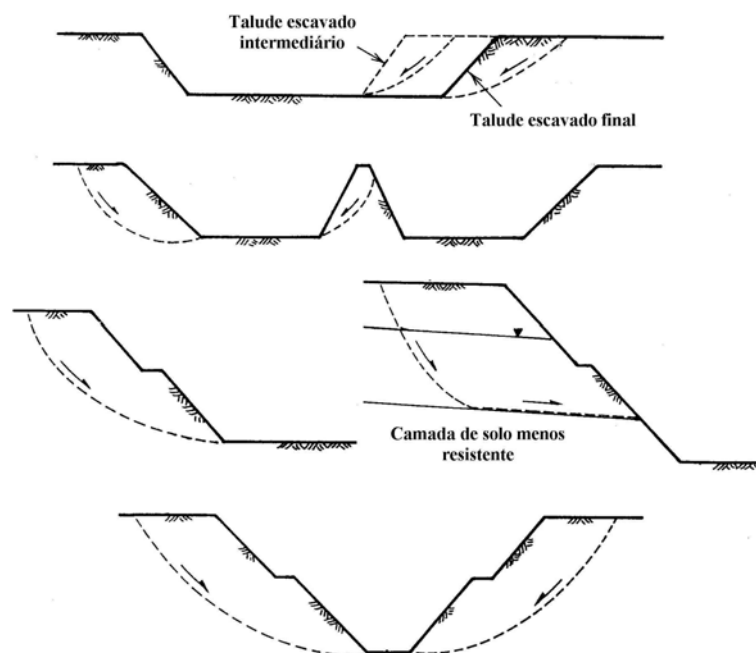


Figura 3-2 – Superfícies potenciais de ruptura em vários tipos de taludes escavados, para depósito de resíduos (SHARMA e LEWIS, 1994).

Segundo SHARMA e LEWIS (1994), existem várias tensões impostas em uma barreira de contenção, o que inclui, compressão, tração e tensões cisalhantes. Estas tensões podem ser causadas pela acomodação e peso próprio dos resíduos, por cargas pontuais e mudanças de temperaturas. A característica principal que deve ser considerada em um projeto de uma barreira de contenção é a permeabilidade, não devendo a barreira de contenção ser tratada como um elemento estrutural, entretanto, a aplicação e o surgimento de tensões na barreira de contenção não pode ser inteiramente descartada sendo necessário, portanto avaliar sua resistência ao cisalhamento.

3.3 - ENSAIO TRIAXIAL.

O ensaio de compressão triaxial é o ensaio laboratorial para determinação da resistência ao cisalhamento de um solo que permite um maior

grau de controle das condições a que o solo é submetido. O ensaio triaxial é consagrado no meio técnico, e para sua realização é necessário utilizar três corpos-de-prova para se obter uma envoltória de resistência, o que nem sempre é possível devido a dificuldade de, em algumas situações, se obter amostras em quantidade suficiente. Autores como HEAD (1982), apresentam um método alternativo utilizando apenas um único corpo-de-prova para se obter a envoltória de resistência.

O ensaio de compressão triaxial convencional consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo-de-prova cilíndrico de solo. Para isto, o corpo-de-prova é colocado dentro de uma câmara de ensaio (Figura 3-3), envolto por uma membrana de borracha. A câmara é preenchida com água, a qual se aplica uma pressão, que é chamada pressão confinante.

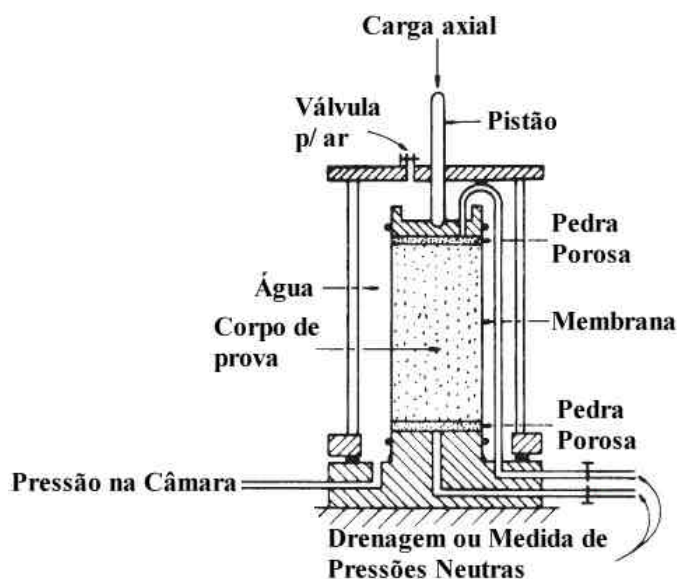


Figura 3-3 - Desenho esquemático de um ensaio triaxial (HEAD, 1986).

Basicamente são três os tipos de ensaios triaxiais, sendo a diferença básica entre eles a condição de drenagem, conforme representado na Figura 3-4.

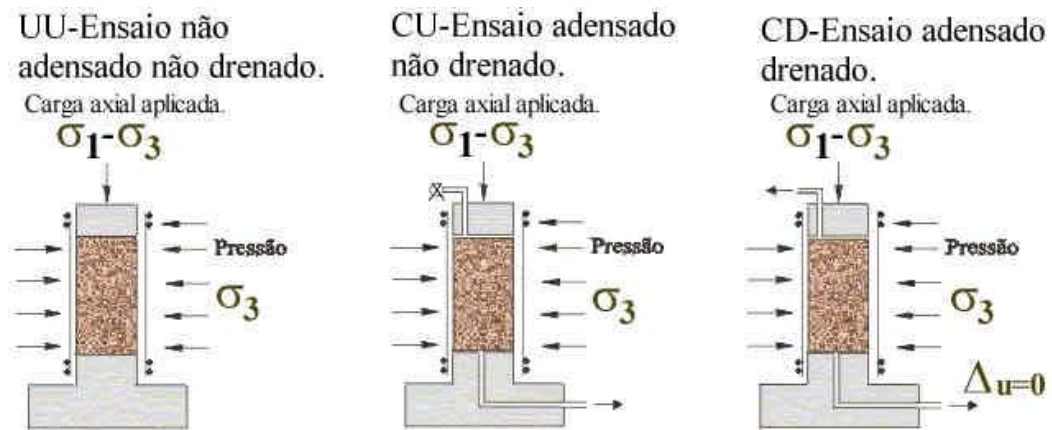


Figura 3-4 - Tipos de ensaios triaxiais.

3.3.1 - Tipos de Ensaios Triaxiais.

3.3.1.1 Ensaio Não Adensado e Não-drenado (UU).

Segundo SOUZA PINTO (2000), neste tipo de ensaio o corpo-de-prova é submetido à pressão confinante e, a seguir, ao carregamento axial, sem que se permita qualquer drenagem. O teor de umidade permanece constante e se o corpo-de-prova estiver saturado, não haverá variação de volume. O ensaio é, geralmente, interpretado em termos de tensões totais. O símbolo UU origina-se de “*unconsolidated undrained*”.

O ensaio também é chamado de ensaio rápido, por não requerer que se proporcione tempo para drenagem.

3.3.1.2 Ensaio Adensado Não-drenado (CU).

Segundo SOUZA PINTO (2000), neste tipo de ensaio aplica-se a pressão confinante e deixa-se dissipar a pressão neutra correspondente. Portanto

o corpo-de-prova adensa sobre a ação da pressão confinante. A seguir, carrega-se axialmente sem permitir a drenagem. Este ensaio também é chamado ensaio rápido pré-adensado.

Este ensaio indica a resistência não drenada em função da tensão de adensamento. Se as pressões neutras forem medidas, a resistência em termos de tensões efetivas também é determinada, razão pela qual é um ensaio muito empregado, pois permite determinar a envoltória de resistência em termos de tensões efetivas num prazo de tempo muito menor do que no ensaio CD.

3.3.1.3 Ensaio Adensado Drenado (CD).

É o tipo de ensaio que demanda maior tempo de execução, pois a drenagem do corpo-de-prova é permanente. Segundo SOUZA PINTO (2000), o ensaio consiste em aplicar-se à pressão confinante e esperar que o corpo-de-prova adense, ou seja, que a pressão neutra se dissipe. A seguir, a tensão axial é aumentada lentamente, para que a água sob pressão possa sair, ou seja, não gere excesso de poro-pressão. Desta forma, a pressão neutra durante todo o carregamento é praticamente nula, e as tensões totais aplicadas indicam as tensões efetivas que estejam ocorrendo.

Durante o carregamento axial, a quantidade de água que sai do corpo-de-prova pode ser medida e se o corpo-de-prova estiver saturado, indicará a variação de volume. O símbolo CD origina-se da expressão “*consolidated drained*”. Este ensaio também é conhecido como ensaio lento, sendo que, esta expressão não se refere à velocidade de carregamento, mas sim à condição de ser tão lento quanto o necessário para a dissipação das pressões neutras dependendo, portanto do solo a ser ensaiado. Caso seja um solo muito permeável, o ensaio pode ser realizado em poucos minutos, mas no caso de argilas, o carregamento axial pode durar dias.

3.3.2 - Ensaios Triaxiais em MULTIPLOS ESTÁGIOS.

A principal vantagem em se utilizar este tipo de ensaio triaxial é a economia de tempo e de corpos-de-prova. O procedimento de ensaio consiste em aplicar uma pressão confinante (estágio 1) seguida de um carregamento axial até que a curva tensão versus deformação indique que a ruptura é iminente, logo em seguida descarrega-se, aumenta-se a pressão confinante procedendo um novo ciclo de carga e descarga (estágio 2). Em seguida novamente aumenta-se a pressão confinante e aplica-se um carregamento até que a ruptura seja constatada. As etapas do ensaio triaxial em múltiplos estágios podem ser visualizadas no fluxograma da Figura 3-5.

Segundo HEAD (1986), o ensaio triaxial em múltiplos estágios deve ser restrito para solos de baixa sensibilidade, que tenham uma estrutura estável e que necessitem relativamente de uma pequena tensão e variação de volume para induzir a ruptura, sendo assim uma alternativa quando se tem uma quantidade limitada de amostras.

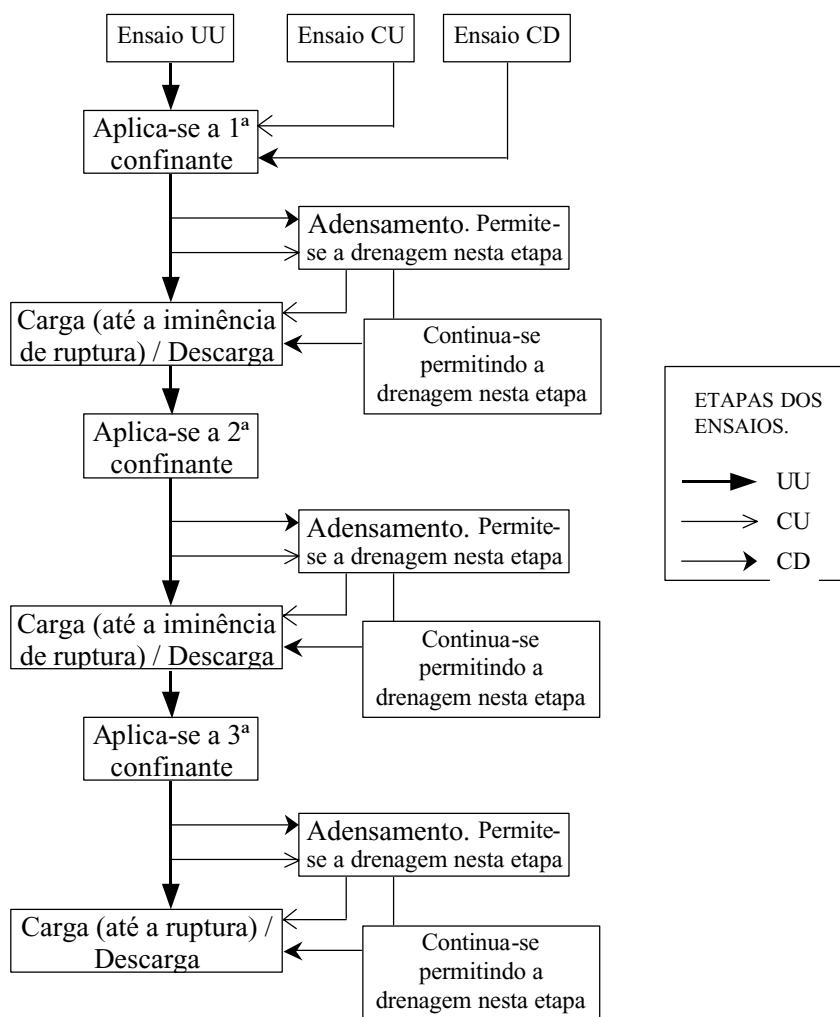


Figura 3-5 – Fluxograma para execução dos três tipos de ensaios triaxiais.

O solo estudado nesse trabalho atinge a ruptura com uma baixa variação de volume, alta tensão e possui uma estrutura estável encaixando-se, portanto, nas características do solo recomendado para ser submetido a um ensaio triaxial em múltiplos estágios.

3.3.3 - Procedimento de Ensaio.

3.3.3.1 Estimativa do Tempo para Ruptura de um Corpo-de-Prova.

O tempo para que ocorra a ruptura (t_f) pode ser estimado a partir do tempo para que ocorra 100% do adensamento (t_{100}) e é dado como se segue :

Sem drenagem lateral : $t_f = 0,51 \times t_{100}$ minutos.

Com drenagem lateral: $t_f = 1,8 \times t_{100}$ minutos.

O valor de t_{100} é obtido à partir do resultado da fase de adensamento, ou seja, à partir do gráfico raiz quadrada do tempo versus variação volumétrica, de acordo com apresentado na Figura 3-6.

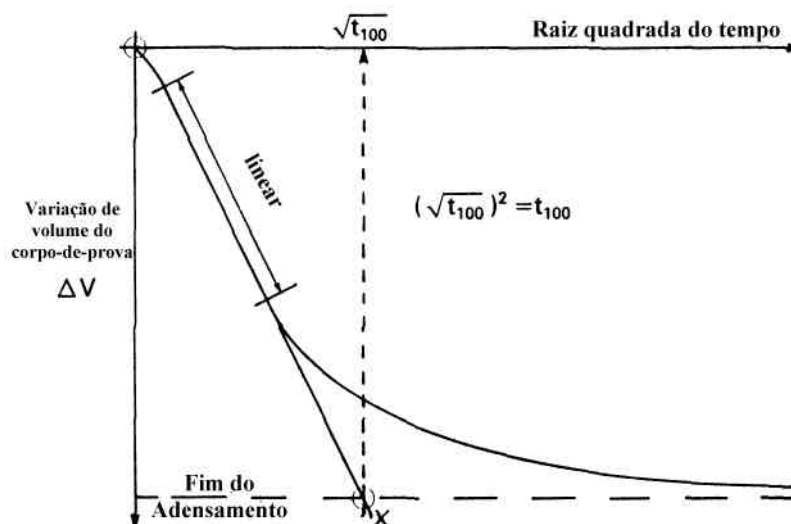


Figura 3-6 - Determinação do t_{100} teórico à partir do gráfico raiz do tempo versus variação de volume (HEAD, 1986).

A deformação na ruptura (ϵ_f) deve ser estimada, dependendo do tipo e condições do solo. Um valor que pode ser assumido para ϵ_f está apresentado

na Tabela 3-1, no entanto, esta estimativa deve ser preferencialmente baseada na experiência com o solo ensaiado..

Tabela 3-1 - Valores típicos para a deformação na ruptura, HEAD (1986).

Tipo de solo	Valores típicos para a deformação na ruptura, $\epsilon_f(\%)$	
	Ensaio tipo CU	Ensaio tipo CD
Argila não perturbada:		
normalmente adensada	15-20	15-20
Sobre-adensada	20+	4-15
Argila re-moldada	20-30	20-25
Solos frágeis	1-5	1-5
Compactado (boulder clay):		
Ramo Seco	3-15	4-6
Ramo Úmido	15-20	6-10
Silte arenoso compactado	8-15	10-15
Areia saturada :		
Densa	25+	5-7
Fofa	12-18	15-20

3.3.3.2 Velocidade do Ensaio.

A velocidade máxima a ser utilizada em um ensaio CU, ou seja, para que não seja gerado excesso de poro-pressão na fase de ruptura, pode ser estimada pela expressão :

$$V_{\text{máx}} \leq \frac{\epsilon_f \cdot L}{100 \cdot t_f} \quad \text{Equação 3-1}$$

onde :

L = altura inicial do corpo-de-prova (mm)

ϵ_f = deformação na ruptura (%)

t_f = tempo para que ocorra a ruptura (min)

3.3.3.3 Saturação do Corpo-de-Prova.

A principal vantagem da saturação, mais particularmente em um ensaio triaxial, é a possibilidade em se obter leituras confiáveis da poro-pressão, o que não ocorre quando se trabalha com solo parcialmente saturado, pois deve-se considerar a poro-pressão devido ao ar, a qual, é diferente da poro-pressão gerada pela água, e ainda, a medida da poro-pressão devida ao ar é de difícil e complicada execução, por isso optou-se nesse trabalho saturar todos os corpos-de-prova por contra-pressão, além disso, um liner de fundo na maioria das situações trabalha saturado.

Segundo HEAD (1986), a saturação é feita pelo aumento da poro-pressão a um nível alto o suficiente para que o ar presente nos vazios do solo seja dissolvido na água. Ao mesmo tempo, a pressão confinante é elevada de forma a manter uma pequena e positiva pressão efetiva na amostra de solo.

Uma das maneiras de se saturar um corpo-de-prova, utilizando o equipamento triaxial, é a saturação por contra-pressão onde utiliza-se o parâmetro B de SKEMPTON (1954).

3.3.3.4 Verificação da Saturação

A relação entre as variações na poro-pressão e na tensão total em um solo podem ser expressas em termos do coeficiente de poro-pressão B.

Na Figura 3-7 tem-se um elemento de solo durante um ensaio triaxial. Em um instante inicial (Figura 3-7a) tanto a pressão confinante quanto a poro-pressão são iguais a zero. Em um ensaio triaxial a tensão é aplicada em duas

etapas : aumento da pressão confinante $\Delta \sigma_3$ (Figura 3-7b), causando um aumento da poro-pressão Δu_c , e um aumento da tensão axial (Figura 3-7c), causando um aumento da poro-pressão Δu_d . A variação resultante total na poro-pressão é igual a:

$$\Delta u = \Delta u_c + \Delta u_d \quad \text{Equação 3-2}$$

O componente de poro-pressão Δu_c , é definido pela equação :

$$\Delta u_c = B \Delta \sigma_3 \quad \text{Equação 3-3}$$

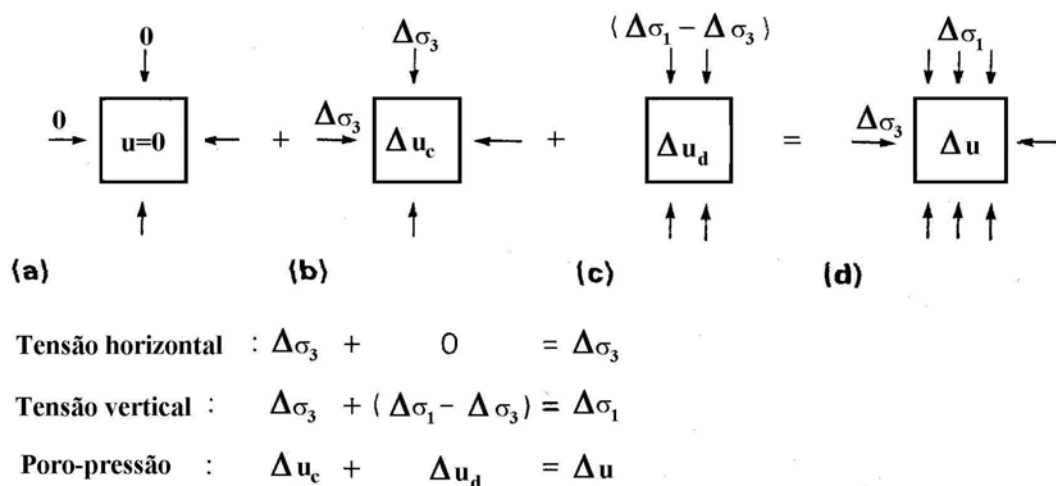


Figura 3-7 - Tensão aplicada em um elemento de solo durante um ensaio triaxial : (a) inicialmente, (b) aumento na pressão da câmara triaxial, (c) aumento na tensão desvio, (d) variação resultante.

O parâmetro B é descrito por HEAD (1986) como sendo a relação entre a variação da poro-pressão e a variação da pressão confinante, assim sendo :

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Equação 3-4

Nota-se pela Equação 3-4 que caso haja uma variação da poro-pressão equivalente a uma variação da pressão confinante o parâmetro B será igual a 1, indicando que o corpo-de-prova está completamente saturado.

3.3.4 - Correções Necessárias em um ensaio triaxial.

Nesse capítulo, foram estudadas as correções necessárias a um ensaio triaxial, devido à necessidade de incorporar estas informações ao programa de aquisição de dados desenvolvido, permitindo assim, que as correções fossem feitas automaticamente durante a execução do ensaio.

3.3.4.1 Correção da Área.

Quando um corpo-de-prova cilíndrico de solo é comprimido com um carregamento axial, sua altura diminui e a relação entre essa mudança na altura com a altura inicial (L_0) é a deformação sofrida em porcentagem do corpo-de-prova. Em um ensaio triaxial não-drenado, onde não se permite que a água saia do corpo-de-prova e estando o solo saturado e, além disso, assumindo que, tanto a água como os grãos do solo são incompressíveis, o volume do corpo-de-prova permanecerá inalterado. Sendo assim, o volume perdido em altura corresponderá a um aumento no diâmetro do corpo-de-prova. HEAD (1982), chama este fenômeno de “*barreling*” devido ao fato da aparência do corpo-de-prova assumir o formato de um barril de madeira tradicional.

Este aumento em diâmetro causa um aumento da área da seção transversal e, portanto tem-se uma tensão menor do que a calculada usando-se a área original. Esta correção é chamada de correção da área do corpo-de-prova e dá aplicando a Equação 3-5, cuja dedução apresenta-se no ANEXO 1.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P(1 + e_i)}{A_0(1 + \frac{\Delta V_i}{V_0})} \quad \text{Equação 3-5}$$

onde :

$\sigma_1 - \sigma_3$ = Tensão desviatória.

P = Carga.

A_0 = Área inicial.

V_0 = Volume inicial.

e_i = Deformação no instante i.

ΔV_i = Variação de volume no instante i.

3.3.4.2 Atrito do Pistão.

A correção do carregamento axial devido o atrito do pistão na câmara é outra correção importante a ser feita quando se utiliza uma célula de carga externa. O êmbolo é uma peça da câmara triaxial que durante o ensaio transmite a carga aplicada pela prensa ao corpo-de-prova.

Na verdade, a câmara triaxial é empurrada para cima e o êmbolo, que está apoiado no pórtico de reação, desliza para o interior da câmara através de um orifício na parte superior da câmara triaxial, como pode-se observar na Figura 3-8.

Corrige-se a influência deste atrito sobre o valor do carregamento axial preenchendo-se a câmara com água, aplicando-se uma pressão no interior da câmara e imprimindo um deslocamento visando com que o êmbolo passe pelo orifício na parte superior da câmara por completo.



Figura 3-8 – Foto de uma câmara triaxial destacando o pistão para aplicação de carga vertical.

Assim, levando em consideração o carregamento devido à pressão no interior da câmara, é possível se obter o gráfico da carga devida ao atrito versus o deslocamento.

3.3.4.3 Outros tipos de correção.

Quando submetido à pressão, o sistema como um todo sofre um aumento de volume, o que deve ser corrigido para evitar erros nas leituras da

variação de volume do corpo-de-prova. Esta variação é corrigida registrando-se a variação volumétrica em função da pressão confinante.

Outra correção necessária é a correção da carga devido à pressão confinante. Quando a pressão é aplicada na câmara triaxial, esta impõe um estado de tensões que atua em todo o interior da câmara, inclusive no embolo responsável pela aplicação da carga axial no corpo-de-prova. Um esquema da atuação da pressão confinante aplicada pode ser observado na Figura 3-9.

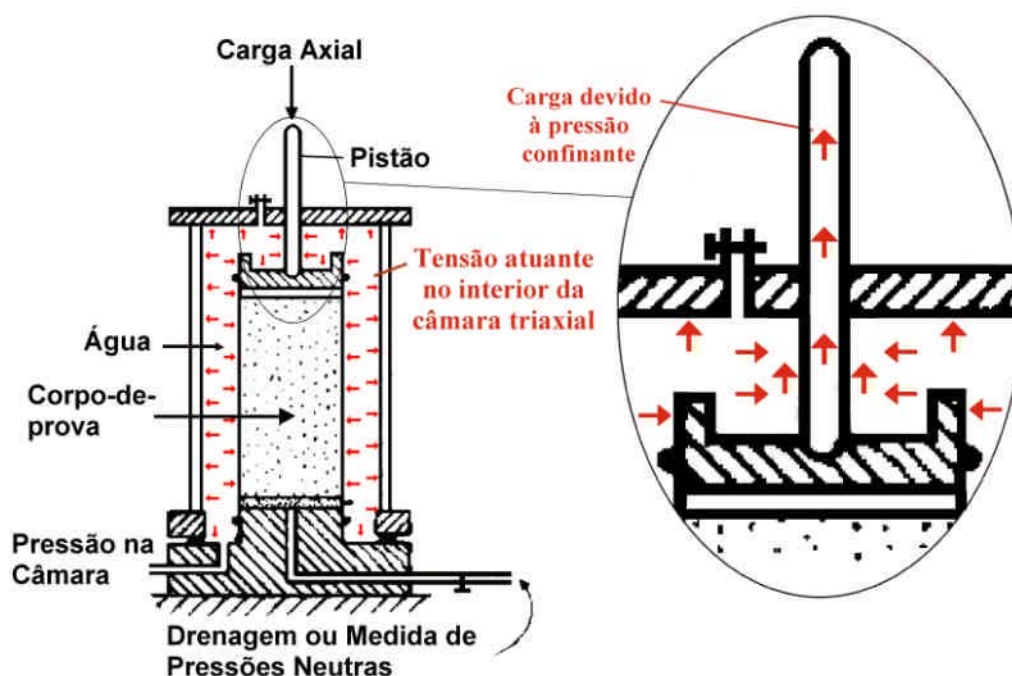


Figura 3-9 - Atuação da pressão aplicada no interior da câmara triaxial.

3.3.5 - Medidor de Variação de Volume.

Um dado importante que se deve obter em um ensaio triaxial é a variação volumétrica do corpo-de-prova. Esta informação permite a correção da área do corpo-de-prova durante o ensaio e permite a constatação da ocorrência do

adensamento do corpo-de-prova durante uma das fases de um ensaio triaxial adensado.

O dispositivo tradicional foi originalmente desenvolvido em 1956 e consiste de dois tubos conectados em série, válvulas e parafina com corante vermelho (Figura 3-10A). Este aparelho de medida era construído de forma a prevenir excesso de fluxo de água do corpo-de-prova. Os aparelhos de medida de volume mais sofisticados que utilizam o mesmo princípio tinham como diferença básica o sistema de válvulas. A desvantagem desse sistema é a imprecisão nas leituras.

Autores como ALSHIBI e AL-HAMDAN (2001), propuseram um método baseado em imagens planares para estimar a variação volumétrica dos corpos-de-prova ensaiados triaxialmente. Esta proposta visa substituir o método convencional de medida que é feito utilizando-se colunas de água com leitura analógica. Segundo os autores a medida precisa da variação de volume do corpo-de-prova durante o ensaio triaxial fornece informações úteis relacionadas ao fenômeno da instabilidade em solos, além de ser um método econômico.

Existem várias outras formas de se medir a variação volumétrica do corpo-de-prova, sendo que, dentre estas formas as mais modernas utilizam transdutores digitais (Figura 3-10B) e as mais antigas utilizavam colunas de água e as leituras eram feitas de forma analógica.

Outros autores, porém, propõe o uso e adaptação de transdutores de deslocamento e de pressão para monitorar a variação de volume do corpo-de-prova, como por exemplo ARARUNA et al. (1995) sugeriram a construção de um aparelho simples e econômico onde se utiliza um transdutor de pressão diferencial para medir a variação volumétrica. O esquema deste aparelho pode ser observado na Figura 3-11.

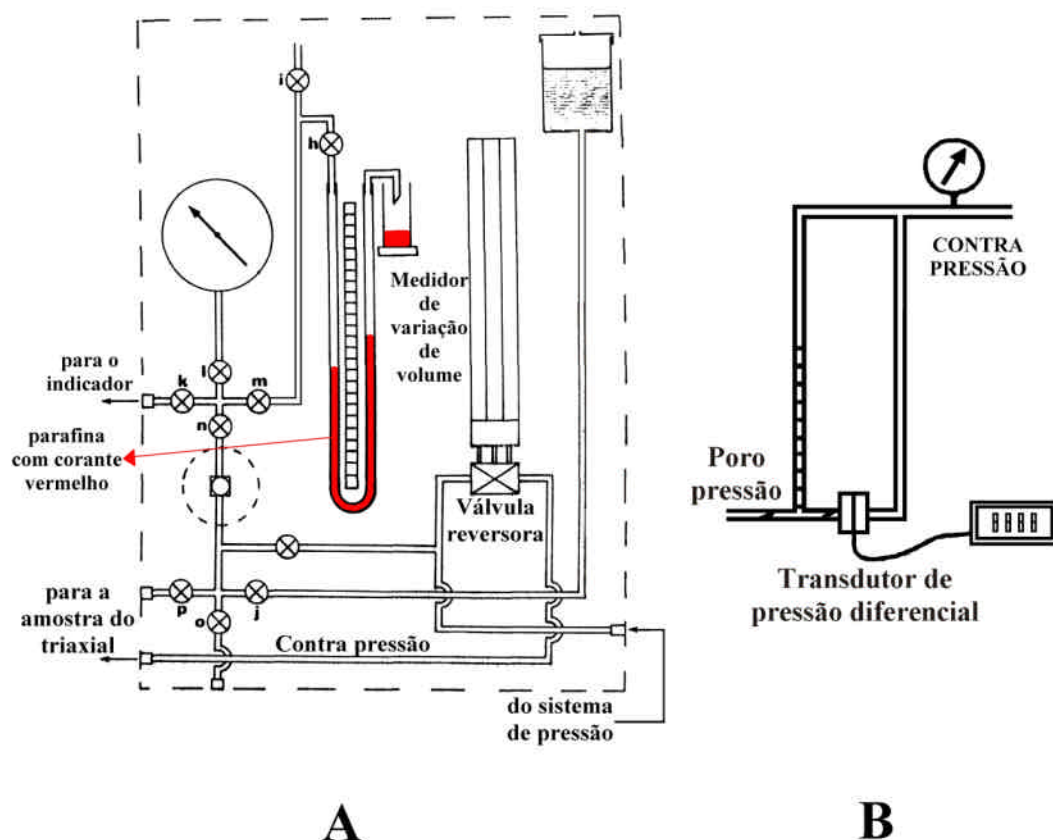


Figura 3-10 - (A) Leitor analógico de variação de volume incorporado ao painel de poro-pressão(HEAD, 1986) , (B) bureta e (ARARUNA et al., 1995).

As vantagens deste aparelho são a utilização de materiais disponíveis em laboratório, boa precisão das leituras, a leitura digital do parâmetro medido, não utiliza substâncias tóxicas como o mercúrio, não sofre o efeito de histerese mecânica, pois não tem nenhuma parte móvel e tem uma concepção mais simples quando comparado a outros transdutores que medem variação de volume.

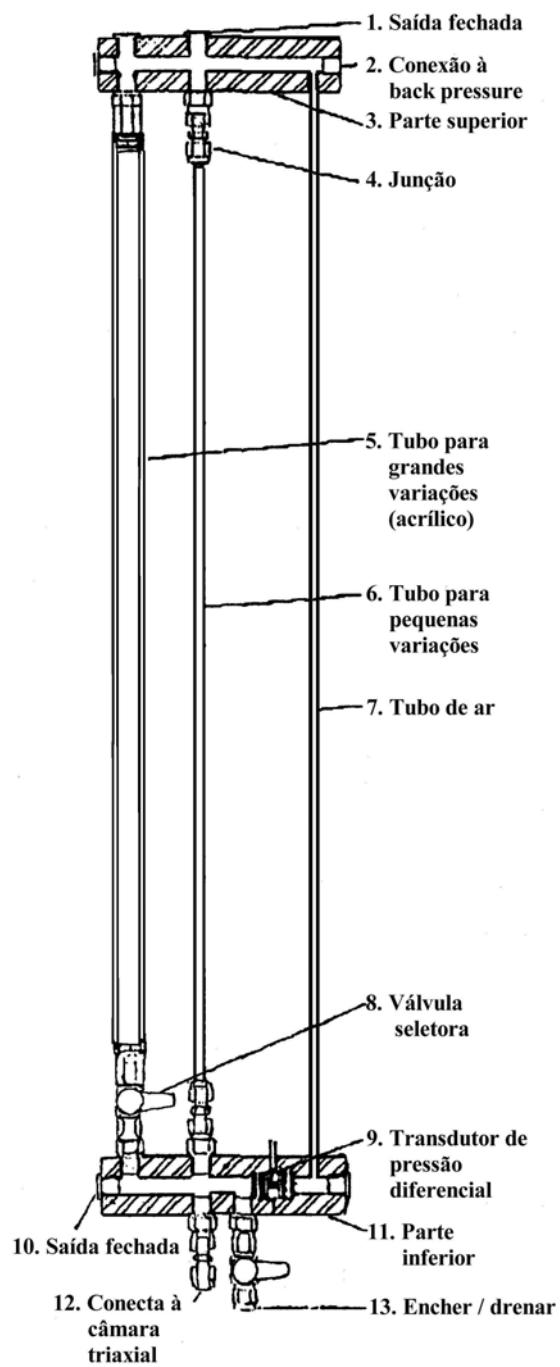


Figura 3-11 - Vista em corte do aparelho medidor de variação volumétrica (ARARUNA et al, 1995).

3.3.6 - Trajetória de Tensão.

Segundo HEAD (1986), durante um ensaio laboratorial em uma amostra de solo ou quando um carregamento é aplicado em um maciço de solo, cada elemento de solo sofre mudanças no estado de tensões. A trajetória de tensões fornece uma representação contínua da relação entre os componentes de tensão em um determinado ponto no instante em que essa mudança ocorre. O uso da trajetória de tensões é um meio prático de identificar o mecanismo do comportamento dos solos.

Segundo BARDET (1997) o estado de tensões, numa trajetória, é expresso pelos parâmetros s e t , notação usada pelo MIT, cuja definição é:

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Na Figura 3-12 as trajetórias de tensões são representadas para os seguintes tipos de carregamentos (SOUZA PINTO, 2000):

- Curva I – confinante constante e axial crescente.
- Curva II – confinante decrescente e axial crescente.
- Curva III – confinante decrescente e axial crescente com iguais valores absolutos.
- Curva IV – confinante e axial crescentes numa razão constante.
- Curva V – confinante e axial variáveis em razões diversas.

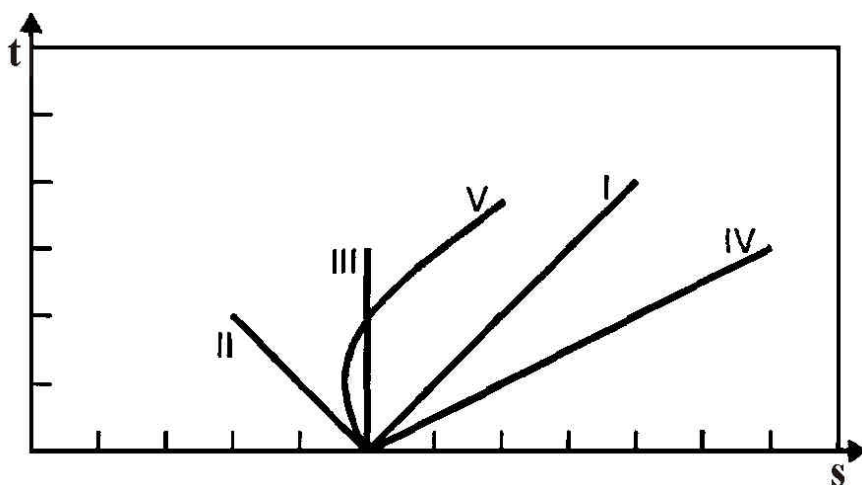


Figura 3-12 - Representação de algumas trajetórias de tensão (SOUZA PINTO, 2000).

BARDET (1997), resume as notações usadas, em termos de tensão, pelo MIT e por Cambridge. Estas notações são apresentadas na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Notação MIT e Cambridge (BARDET, 1997).

Tensões Principais	Notação MIT tensões s - t e s' - t	Notação Cambridge tensões p - q e p' - q
$s_1 = s'_1 + u$	$s = \frac{1}{2} (s_1 + s_3) = s' + u$	$p = ? \quad (s_1 + 2s_3) = p' + u$
$s'_1 = s_1 - u$	$s' = \frac{1}{2} (s'_1 + s'_3) = s - u$	$p' = ? \quad (s'_1 + 2s'_3) = p - u$
$s_3 - s'_3 + u$	$t = \frac{1}{2} (s_1 - s_3)$	$q = s_1 - s_3$
$s'_3 = s_3 - u$	$t' = t = \frac{1}{2} (s'_1 - s'_3)$	$q' = q = s'_1 - s'_3$
s'_1	$s'_1 = s' + t$	$s'_1 = p' + ? \quad q$
s'_3	$s'_3 = s' - t$	$s'_3 = p' - ? \quad q$

3.4 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS

3.4.1 - Solos Arenosos

FALL et al.(1997) estudaram o comportamento mecânico de três solos arenosos lateríticos, compactados, do oeste do Senegal. Os corpos-de-prova ensaiados foram compactados com 160 mm de altura e 70 mm de diâmetro e saturados com uma contra-pressão de 100 kPa e uma pressão na câmara de 120 kPa. Os corpos-de-prova foram ensaiados com tensões confinantes de 50, 100, 150, 200, 400 e 600 kPa. Um resumo das propriedades do solo estudado pelos autores é apresentado na Tabela 3-3. Os resultados obtidos para o arenito Ndienné são apresentados na Figura 3-13.

Tabela 3-3 - Resumo das propriedades do solo Ndienné (FALL et al., 1997).

W_1 (%)	W_p (%)	I_p (%)	>2 mm (%)	>0,1 mm (%)
21	13	8	26	6
γ_{dmax} (kN/m ³)	K (m/s)	W_{omc} (%)	CBR (%)	Sistema de Classificação Unificada
20,9	7×10^{-9}	8,6	113	Gw* a Gc*

Peso específico dos sólidos em relação a granulometria (kN/m ³)			
# < 4 mm	4 mm < # < 10 mm	# > 10 mm	Todo o Solo
28,9	30,4	30,7	30,04

* Gw = solo arenoso bem graduado.

* Gc = areia siltosa.

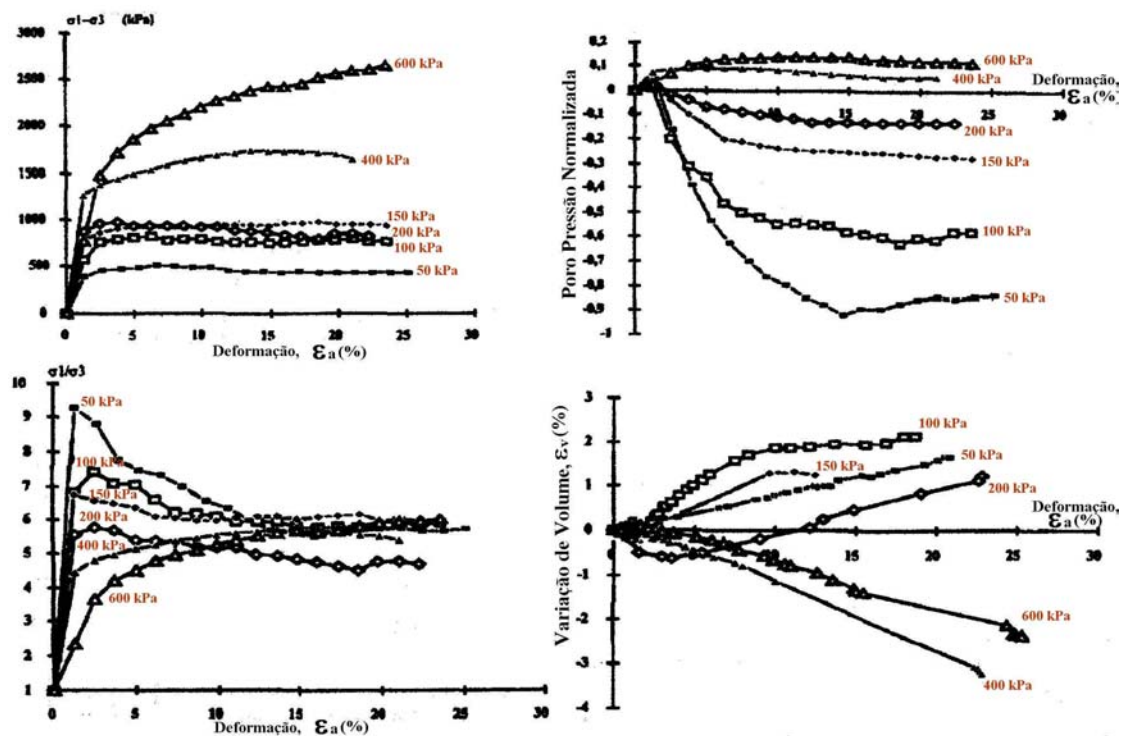


Figura 3-13 - Resultados para o solo Ndienné (FALL et al., 1997).

FALL et al. (1997) concluem que o comportamento não-drenado dos três solos lateríticos estudados depende da densidade inicial seca e da pressão de pré-adensamento e que a baixas pressões confinantes os solos apresentam comportamento compressivo durante o ensaio triaxial, mas com pressões mais elevadas os solos apresentam comportamento dilatante.

Existe, na literatura, pouca informação sobre as propriedades mecânicas de solos que provem da Formação Botucatu, no entanto autores como MARTINS et. al. (1998) estudaram o comportamento tensão versus deformação de dois solos residuais de arenito Botucatu, sendo um dos solos proveniente de uma antiga jazida em Vila Scharlau, município de São Leopoldo, RS, e o outro proveniente de uma zona de empréstimo usada durante o asfaltamento da rodovia RS239, no mesmo estado.

As curvas granulométricas dos dois solos estudados por MARTINS et al. (1998) são apresentadas na Figura 3-14.

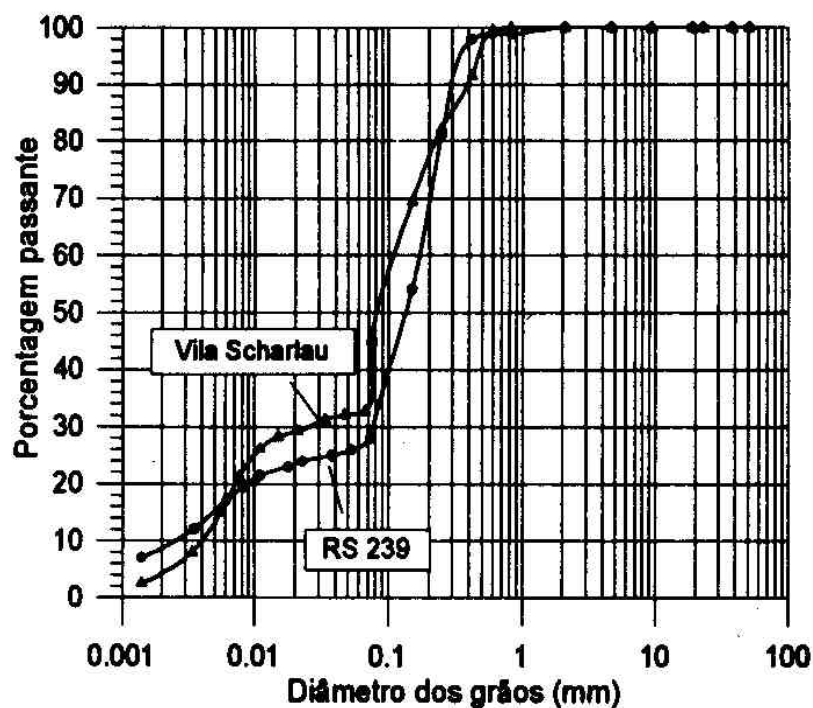


Figura 3-14 - Granulometria dos solos estudados por MARTINS et. al. (1998).

Segundo MARTINS et al. (1998), as duas amostras indeformadas de solo ensaiadas são bastante similares sendo basicamente a diferença entre elas a porosidade inicial. Os resultados dos ensaios triaxiais do tipo CD podem ser observados na Figura 3-15.

Os autores concluíram o trabalho afirmando que para baixos níveis de tensões as duas amostras apresentaram comportamento semelhante, destacando que o mesmo não ocorria para maiores níveis de tensão, onde o solo de menor densidade inicial apresentou comportamento compressível não sendo alcançada a envoltória de resistência ao cisalhamento e o solo de maior densidade inicial apresentou um comportamento dilatante com formação de um pico de

resistência ao cisalhamento que coincide com a máxima taxa de expansão volumétrica em todas as tensões confinantes.

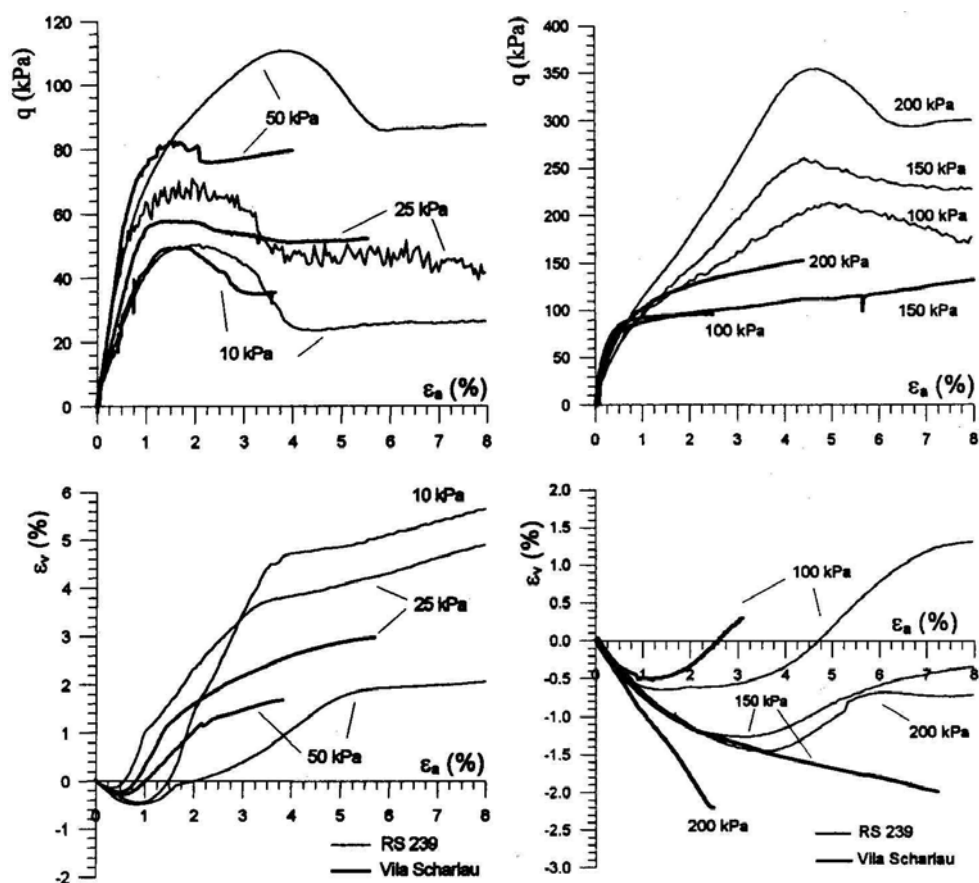


Figura 3-15 – Resultados de ensaios triaxiais obtidos por MARTINS et. al. (1998) para solos residuais de arenito Botucatu.

YAMAMURO e LADE (1996), estudaram a influência do aumento da pressão confinante e o efeito de altas pressões em um solo arenoso, cujo diâmetro dos grãos estava entre 0,83 e 2,00 mm, executando séries de ensaios triaxiais do tipo CD. Na Figura 3-16 são apresentados os resultados desses ensaios.

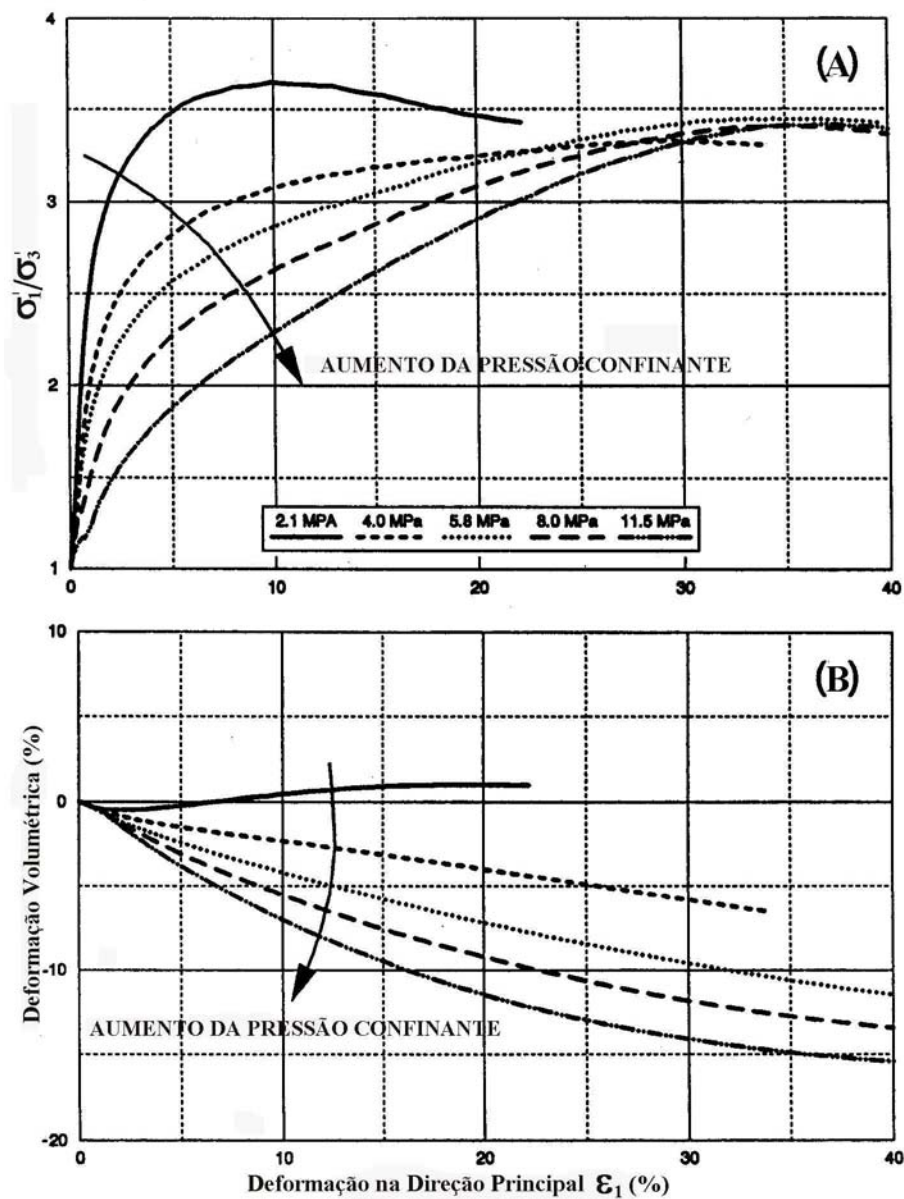


Figura 3-16 – Ensaio de compressão triaxial drenada, (A) Razão da Tensão Principal Efetiva (B) Variação volumétrica (YAMAMURO e LADE, 1996).

Nota-se, pela Figura 3-16, que com o aumento da pressão confinante o solo arenoso deixou de expandir e a variação de volume passou a ter somente valores negativos.

ISMAEL e MOLLAH (1998) estudaram o efeito da água em um solo arenoso e cimentado do Kuwait. Foram amostrados solos de dois locais, Kiefan e Reggae que é um distrito localizado 15 Km a sul da Cidade do Kuwait. Os dois locais de amostragem foram escolhidos para assegurar que amostras de solo com baixo e alto nível de cimentação seriam ensaiados e suas propriedades antes e depois de serem percolados com água foram determinadas.

Apresenta-se, na Tabela 3-4, um resumo das propriedades dos solos estudados por ISMAEL e MOLLAH (1998). Os corpos-de-prova foram obtidos a partir de amostras indeformadas e os ensaios triaxiais foram do tipo CU.

Apresentam-se, na Figura 3-17, os gráficos da tensão e poro-pressão versus a deformação, para o solo de Kiefan (A) e para o solo de Reggae (B).

Tabela 3-4 - Resumo das propriedades dos solos estudados por ISMAEL e MOLLAH (1998).

Local	Tipo de amostra	Método de Peneiramento	Umidade natural (%)	Peso específico Natural (kN/m ³)	e_0	D ₅₀ (mm)
Kiefan	Natural	úmido	13,8	1,855	0,643	0,22
Reggae	Natural	seco	5,2	1,96	0,433	0,34
Reggae	—	úmido	—	—	—	0,25
Densidade Relativa dos sólidos	Pedregulho (>4,75 mm) (%)	Areia Grossa (2,00 – 4,75 mm) (%)	Areia Média (0,425 – 2,00 mm) (%)	Areia Fina (0,075 – 0,425 mm) (%)	Silte e Argila (<0,075 mm) (%)	Sistema de Classificação Unificado
2,66	0	1,2	18,8	58,2	21,8	SM*
2,67	0,2	3,0	40,1	52,4	4,3	SM*
—	0	2,3	28,8	51,5	17,4	SM*

*SM = areia siltosa ou mistura de areia e silte.

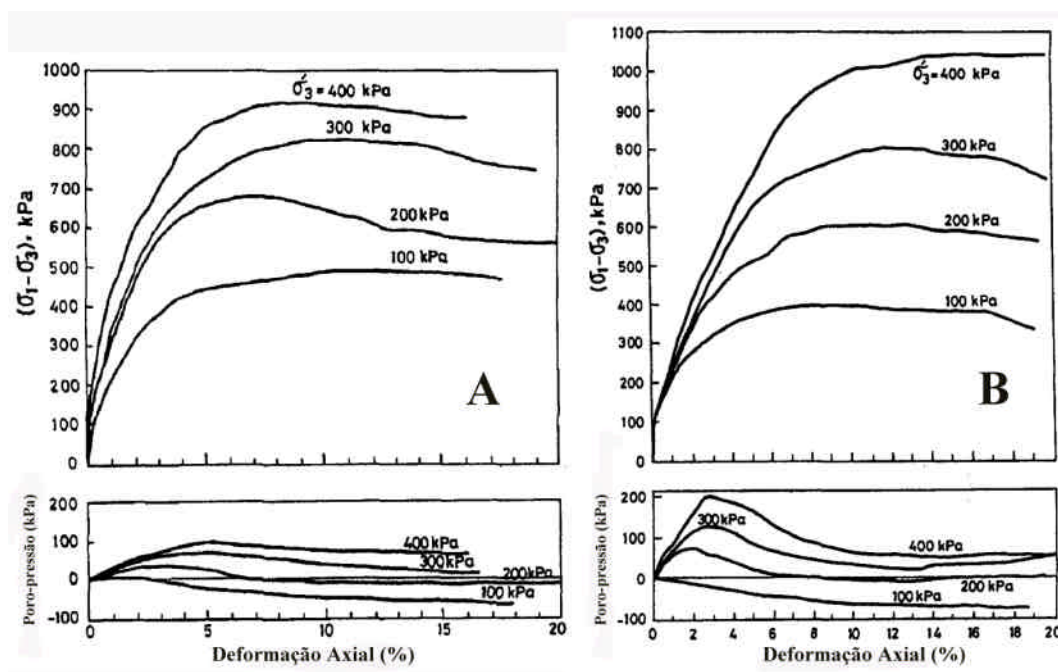


Figura 3-17 – Gráficos de tensão e poro-pressão versus a deformação para (A) solo amostrado em Kiefan e (B) solo amostrado em Reggae (ISMAEL e MOLLAH, 1998).

Na Figura 3-18 apresenta-se os gráficos da tensão e poro-pressão versus a deformação axial para corpos-de-prova do solo de Kiefan natural lixiviado com água destilada (A) e para o solo de Reggae natural lixiviado com água destilada (B).

ISMAEL e MOLLAH (1998) concluem que os parâmetros de resistência c' e ϕ' diminuíram devido à percolação de água. A redução do intercepto de coesão c' é devida principalmente à dissolução das diversas substâncias cimentantes do solo e suavização de outras propriedades. A redução do ângulo de atrito interno, da ordem de 1 a 3°, normalmente ocorre com a percolação de água.

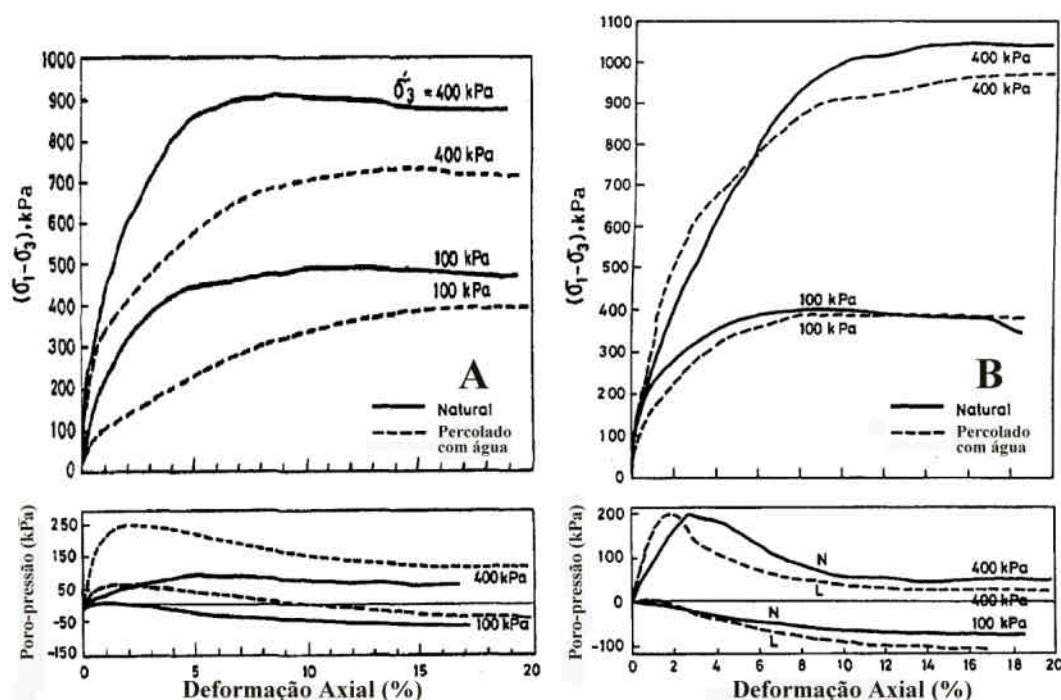


Figura 3-18 - Gráficos de tensão e poro-pressão versus a deformação na condição natural e percolado com água para (A) solo amostrado em Kiefan e (B) solo amostrado em Reggae (ISMAEL e MOLLAH, 1998).

3.4.2 - solos contaminados

A disposição tanto dos resíduos sólidos urbanos quanto dos resíduos industriais necessita de uma análise e de um conhecimento técnico apurado sobre o meio receptor. Autores como CORRÊA e SOUZA (2002) ressaltam que no Brasil não se leva em consideração, na escolha de áreas para disposição, as características e particularidades dos solos tropicais.

CORRÊA e SOUZA (2002) estudaram as alterações em amostras de solo laterítico, zona mosqueada e saprolito encontradas em Brasília, para tanto, as amostras foram moldadas no ramo úmido da curva de compactação e, estas amostras, foram percoladas com água destilada, solução salina a 1000

ppm de NaCl e chorume. Foram realizados ensaios de coluna com permeâmetro de paredes rígidas, ensaios de granulometria, ensaios de expansão livre, determinação das curvas características de sucção matricial e determinação da biomassa do solo. Para realização da granulometria foi utilizada a técnica não convencional do granulômetro a laser, que vem sendo empregada pelos pesquisadores da UNB (LIMA et al., 2002).

CORRÊA e SOUZA (2002) concluíram que houve a indicação de que ocorreu um rearranjo das partículas do solo devido à contaminação, uma vez que constatou-se um deslocamento das curvas granulométricas do solo contaminado para a esquerda (Figura 3-19), o que indicaria um aumento de partículas discretizadas em relação ao solo natural. Outro indicativo seria a menor capacidade de sucção matricial apresentada pelas curvas características dos solos contaminados em relação às curvas dos respectivos solos naturais. Além disso, a redução dos limites de liquidez e plasticidade ocorrida devido à contaminação seria um indicativo da destruição parcial das micro-concreções do solo.

SHIN e DAS (2000), estudaram as propriedades físicas de uma areia não saturada contaminada com óleo, demonstrando que as propriedades físicas do solo são alteradas. SHIN e DAS (2000) resumem os resultados relativos à compactação, condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento. Somente um tipo de areia foi estudado a princípio, em graus de compactação distintos, entretanto, foram usados 3 diferentes óleos como contaminantes com a finalidade de avaliar os efeitos da viscosidade cinética de cada um desses três óleos nos parâmetros geotécnicos estudados.

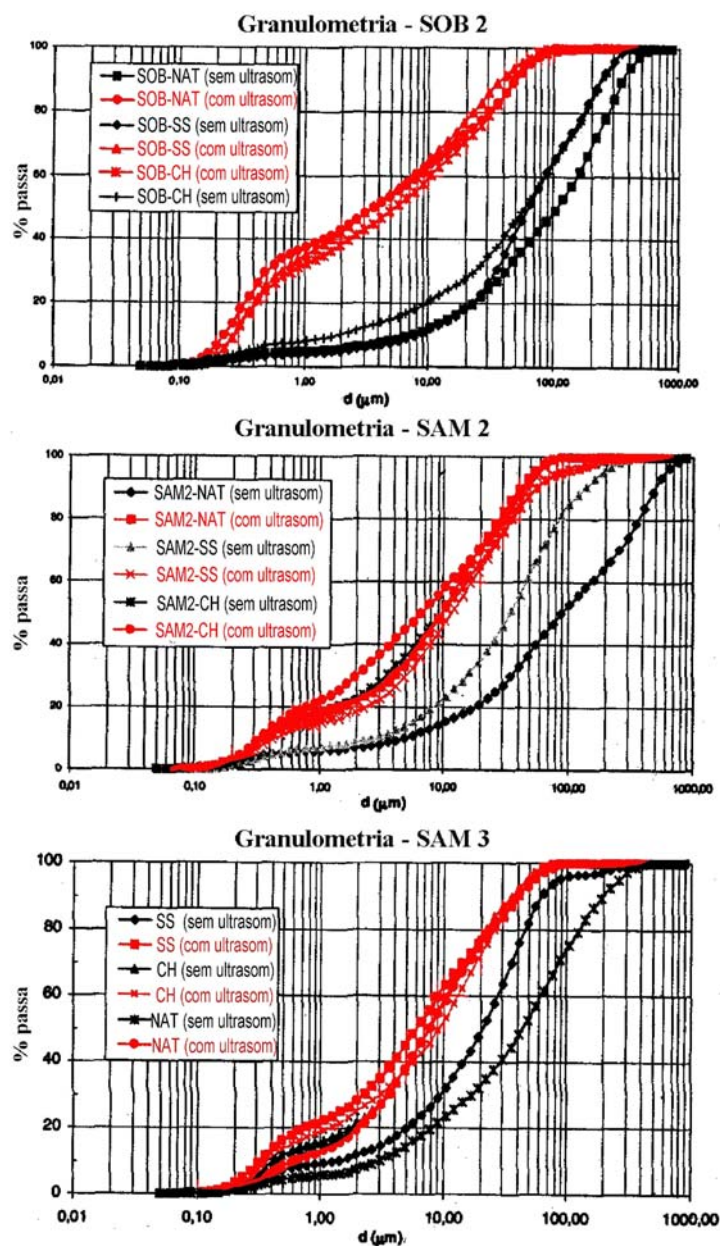


Figura 3-19 - Curvas granulométricas obtidas para solos lateríticos (SOB2), zona mosqueada (SAM2) e saprólito (SAM3), na condição não contaminado (NAT), contaminado com NaCl 1000ppm (SS) e contaminado com chorume (CH). (CORRÊA e SOUZA, 2002).

Os resultados de ensaios de cisalhamento direto apresentados por SIN e DAS (2000) mostram a variação da resistência ao cisalhamento de um corpo-de-prova compactado, da areia estudada, e contaminada com um dos três

tipos de óleo estudados. A densidade relativa do óleo contaminante era de 75% e a tensão normal de 62 kN/m^2 , são apresentados na Figura 3-20.

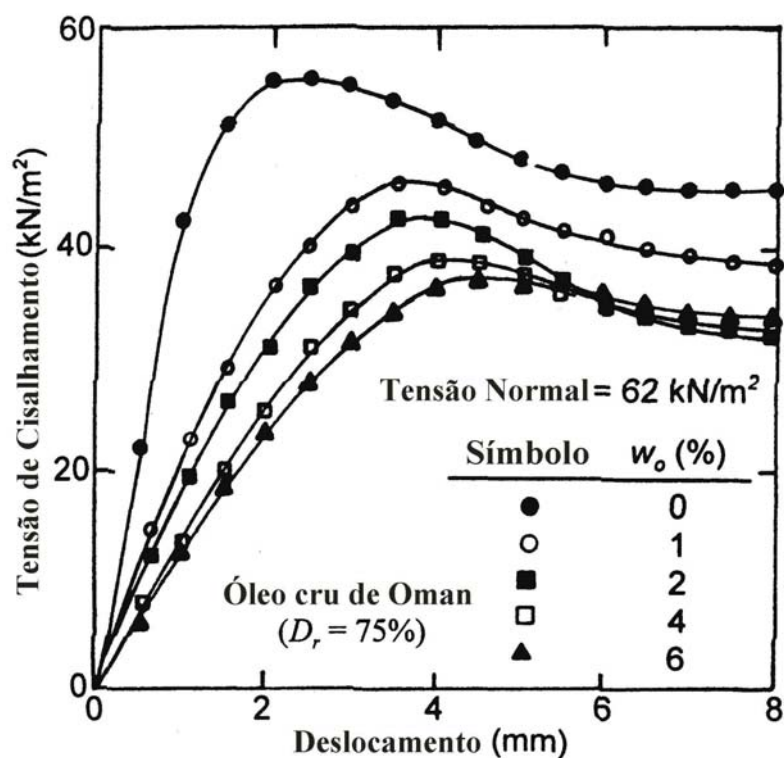


Figura 3-20 - Resultado do ensaio de cisalhamento direto realizado em corpos-de-prova de areia de Jumoonjin, do sul da Korea, contaminado com diferentes concentrações de óleo cru de Oman (SHIN e DAS, 2000).

SHIN e DAS (2000) concluíram que a contaminação por óleo aumenta a compactabilidade da areia estudada e reduziram a condutividade hidráulica e a resistência ao cisalhamento.

AL-SANAD et al. (1995), estudaram as alterações nas propriedades de um solo arenoso de Jahra, Kuwait, contaminado com óleo logo após a guerra do Golfo. Quatro tipos de óleos foram estudados, no entanto, ênfase foi dada ao solo contaminado com 6% do peso de óleo cru pesado. A curva de distribuição granulométrica do solo arenoso de Jahra é apresentada na Figura 3-21. O solo foi classificado pelo Sistema de Classificação Unificada como uma

areia mal graduada. Esta areia tem 2,6% de finos, máximo e mínimo peso específico seco de $19,25 \text{ KN/m}^3$ e $16,40 \text{ KN/m}^3$ respectivamente. Para esta areia a condutividade hidráulica era de $1,72 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e a densidade relativa foi de 60%.

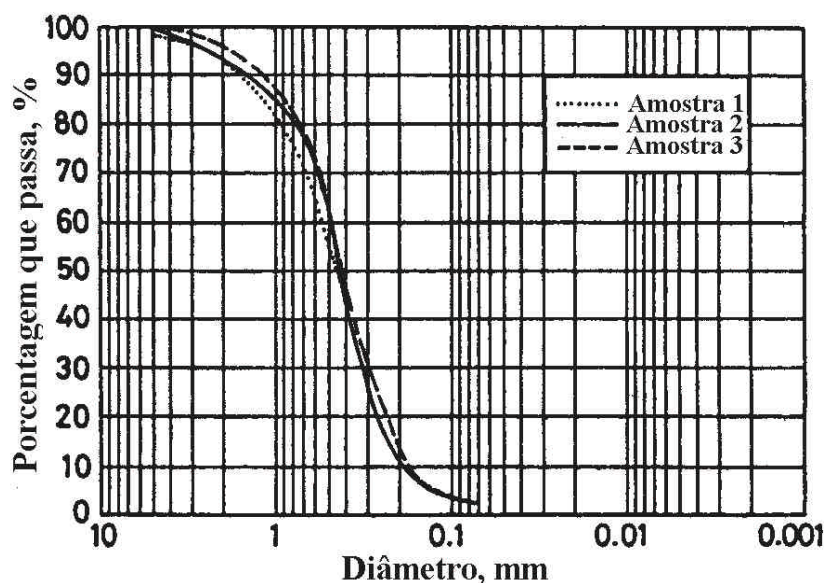


Figura 3-21 - Distribuição granulométrica do solo arenoso estudado por AL-SANAD et al. (1995).

Foram feitos ensaios triaxiais do tipo CU, com corpos-de-prova com 38mm de diâmetro por 80mm de altura, preparados com densidade de 60% e saturados por contra-pressão.

Na Figura 3-22, são apresentados os resultados obtidos por AL-SANAD et al. (1995) para a areia limpa e para a areia contaminada com 6% de óleo cru pesado.

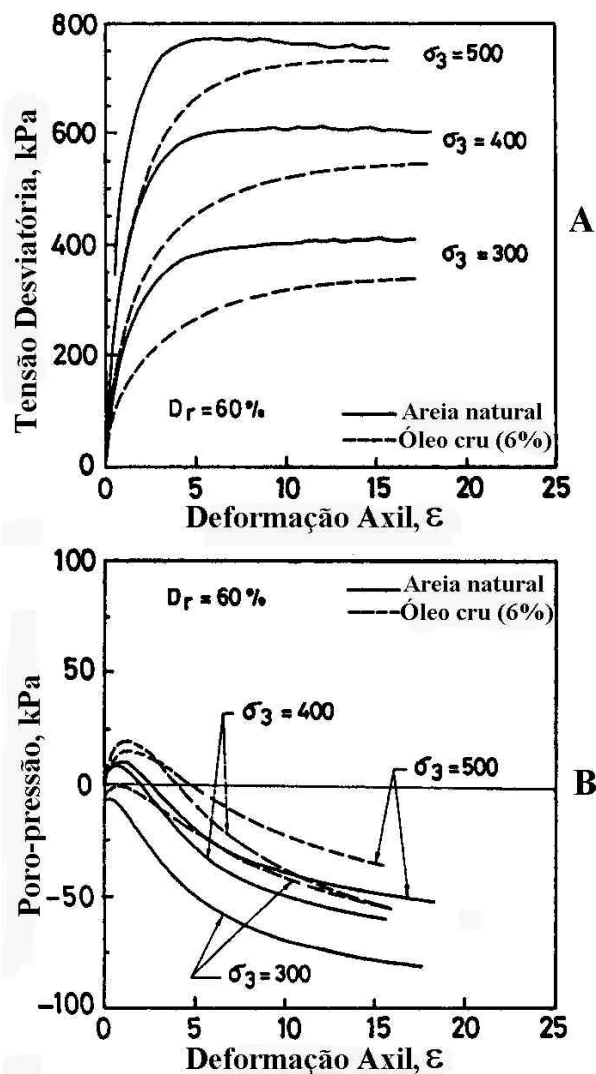


Figura 3-22 - (A) Curvas Tensão x Deformação Axial. (B) Curvas Poro-pressão x Deformação Axial. (AL-SANAD et al., 1995)

Com relação as curvas Tensão versus Deformação (Figura 3-22), AL-SANAD et al.(1995) afirmam que, diferentemente do solo arenoso limpo o solo arenoso contaminado não apresenta nenhum pico de tensão visível para todos os níveis de pressões confinantes. A poro-pressão, em ambos os casos, é típica do comportamento de um solo compacto. O módulo inicial, ou tangente à origem (E_i), para o solo contaminado, foi cerca de metade do valor correspondente para o solo natural.

Na Figura 3-23, apresentam-se as envoltórias de tensões efetivas para o solo arenoso natural e para o mesmo solo contaminado com 6% de óleo cru pesado. AL-SANAD et al. (1995), afirmam que, os parâmetros de resistência para a areia natural e para a areia contaminada ($c'=0$ e $\phi'=32^\circ$) e ($c'=0$ e $\phi'=30^\circ$), respectivamente, indicam uma redução modesta no ângulo de atrito devido à contaminação por óleo.

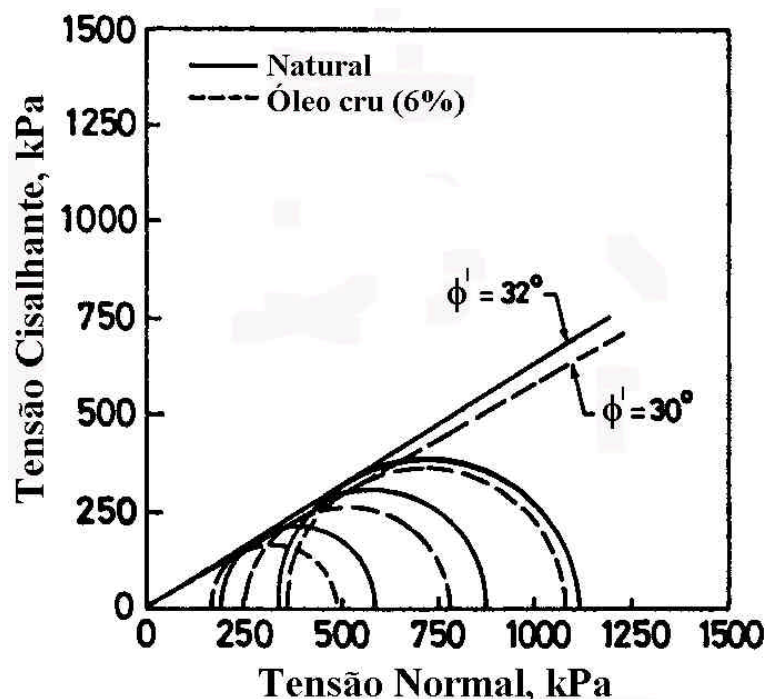


Figura 3-23 - Envoltórias de tensões efetivas (AL-SANAD et al., 1995).

AL-SANAD et al. (1995) concluíram que a contaminação por óleo cru pesado diminui a permeabilidade e a resistência ao cisalhamento do solo, porém, essas mudanças, não são significativas. O uso desta areia contaminada, para a construção de pavimentos rodoviários seria possível do ponto de vista da engenharia, ainda assim, seria recomendável estudar o comportamento e as propriedades a longo prazo desta areia contaminada devido à perda de componentes voláteis do óleo.

AL-SANAD e ISMAEL (1997) estudaram o efeito do tempo na contaminação com 6% de óleo cru pesado no solo arenoso de Jahra, Kuwait. Apresentam-se na Figura 3-24 as curvas de tensão e poro-pressão versus a deformação.

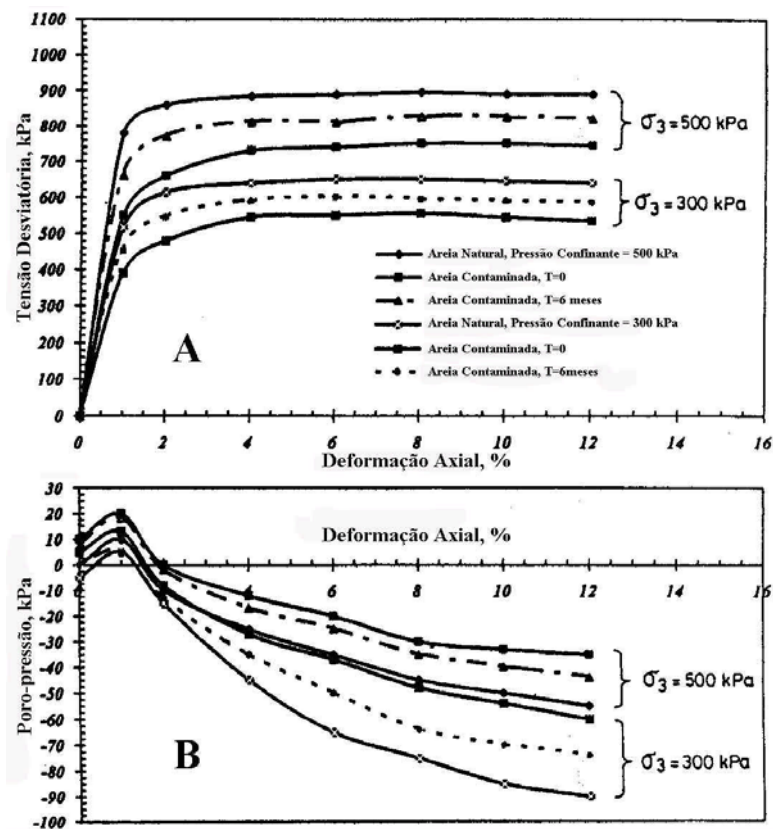


Figura 3-24 - (A) Gráfico Tensão x Deformação. (B) Gráfico Poro-pressão x Deformação. Para solo limpo, contaminado com óleo cru pesado (T=0) e contaminado com óleo cru pesado após 6 meses (AL-SANAD e ISMAEL, 1997).

AL-SANAD e ISMAEL (1997) concluíram que o aumento com o tempo da resistência da areia estudada, contaminada com óleo cru pesado, foi devido à perda de componentes voláteis do óleo e que, apesar da recuperação dessa resistência do solo contaminado após 6 meses, ela ainda continuou menor do que a resistência da areia limpa.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - MATERIAIS

A maioria dos equipamentos utilizados nesse trabalho estava disponível no Laboratório da Unesp/Bauru, adquiridos para realização de outras pesquisas. Alguns desses equipamentos não eram, a princípio, específicos para realização de ensaios triaxiais, sendo assim tiveram que ser adaptados e montados de forma apropriada para permitir a realização desse tipo de ensaio.

Na Figura 4-1 são apresentados os dispositivos necessários para a realização dos ensaios triaxiais com registro digital de todas as informações obtidas nesse ensaio e na Figura 4-2 tem-se os dispositivos utilizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp de Bauru.

4.1.1 - Equipamentos

Os dispositivos utilizados foram os seguintes:

- ?? Prensa mecânica modelo Digital Tritest 50 (T-1325A), com capacidade de 50kN, velocidade: 0.00001 até 9.99999 mm/min (subida).
- ?? Transdutor de Pressão modelo Sensotec com capacidade de 300 psi.
- ?? Transdutor de Pressão modelo Sensotec com capacidade de 200 psi.
- ?? Transdutor de deslocamento modelo Sensotec (060-5653-03).
- ?? Célula de Carga, para até 8800kN.
- ?? Câmara para ensaios triaxiais, resistente até 1MPa.
- ?? Sistema de aquisição de dados.
- ?? Medidor de variação de Volume.
- ?? Painel de controle de pressão.

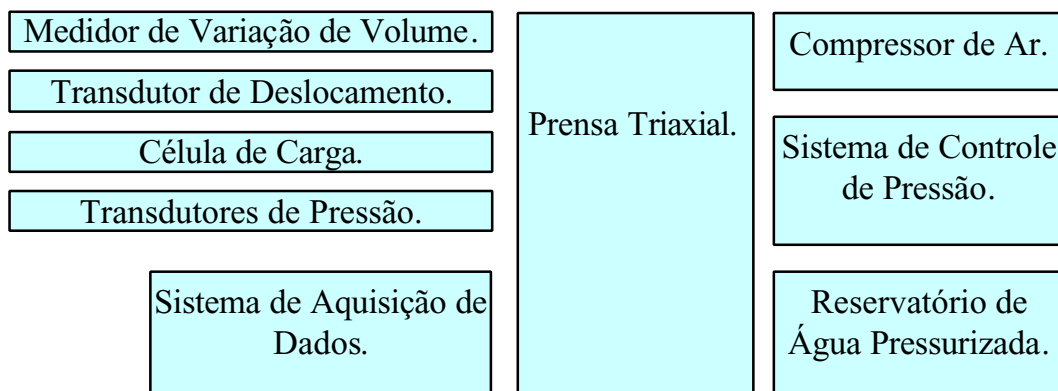


Figura 4-1 – Descrição dos dispositivos utilizados para a realização dos ensaios triaxiais.

Para possibilitar a medida da variação de volume foi necessário desenvolver um instrumento que permitisse o registro digital dos dados. Optou-se por desenvolver um dispositivo conforme sugerido por ARARUNA et al.(1995), devido ser de simples concepção, apresentar uma boa precisão e pelo fato de que havia disponível no laboratório um transdutor de pressão diferencial.



Figura 4-2 - Vista geral do equipamento utilizado para Realização de Ensaios Triaxiais no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp – Bauru.

4.1.2 - Medidor de Variação de Volume

O instrumento para medir variação de volume construído é composto por três tubos, sendo que dois deles são tubos de acrílico e um é feito de aço galvanizado (Figura 4-3).

O instrumento foi montado sobre uma moldura de madeira com 1,80 metros de altura, este valor foi escolhido em função dentre outras coisas do pé direito da edificação onde o aparelho iria ser posicionado e também da altura em que a prensa triaxial se encontra instalada.

4.1.3 - Sistema de Aquisição de Dados

4.1.3.1 Hardware

O sistema desenvolvido para execução de ensaios triaxiais consiste de um conjunto de transdutores e acessórios (item 4.1.1), todos disponíveis comercialmente. O sistema de aquisição de dados propriamente dito é composto por:

- ?? Placa de Multiplexação Computer Boards CIO-EXP-GP com capacidade para 8 transdutores.
- ?? Placa de Aquisição de dados Computer Boards CIO-DAS801 com resolução de 12 bits.
- ?? Computador PC Pentium 400 Mhz, 128Mb RAM, HD 2.0 GB.

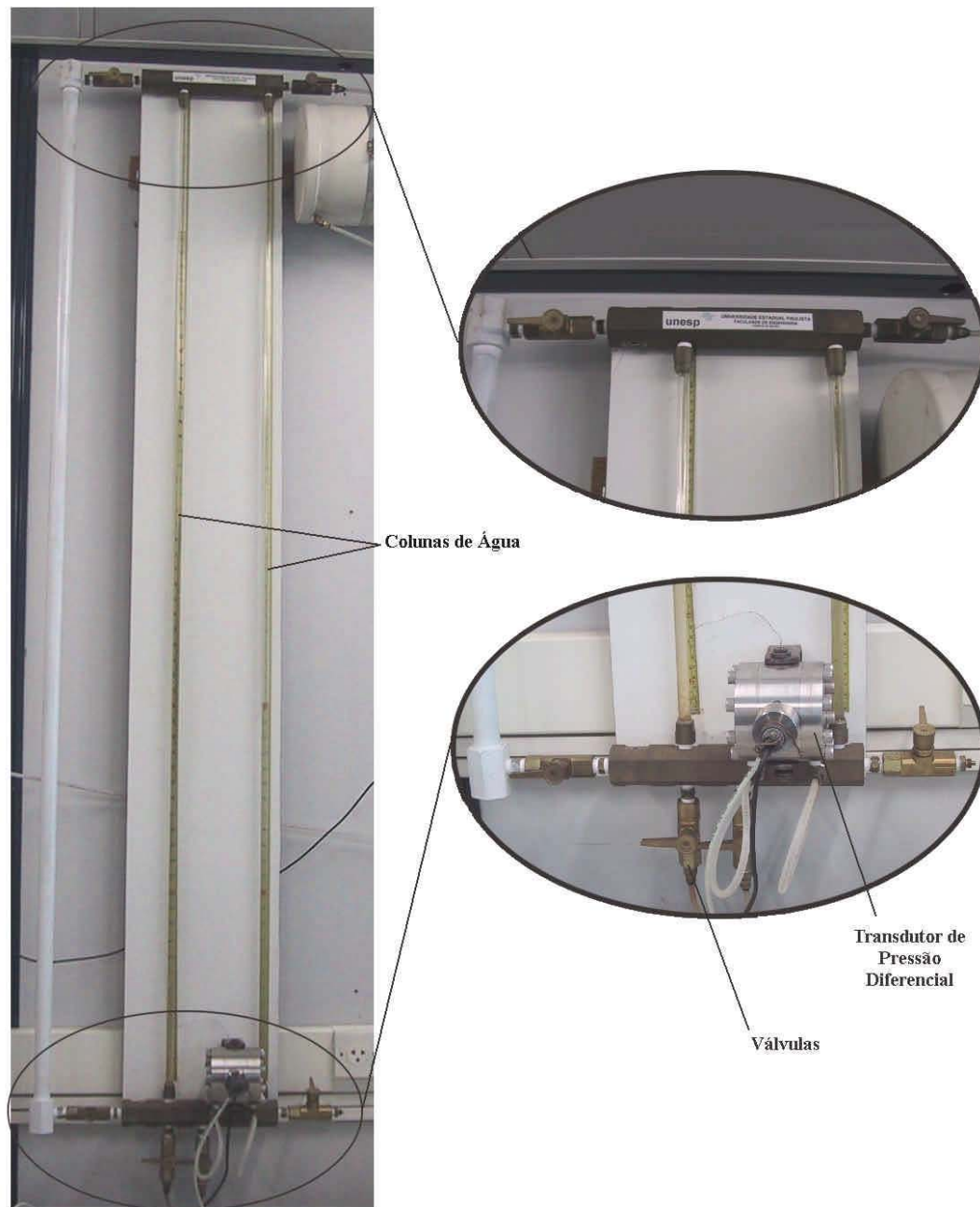


Figura 4-3 - Medidor de variação volumétrica construído.

4.1.3.2 Software

O sistema de aquisição de dados para ensaios de compressão triaxial possui um software que pode ser classificado como E/S (Entrada e Saída) programada em nível de usuário, utilizando para isso o método polled, o qual, basicamente consiste em se fazer constantes leituras a uma entrada de dados. Este software possibilita realizar ensaios de compressão triaxial com múltiplos estágios, drenados ou não.

O Diagrama de Fluxo de Dados (DFD) apresentado na Figura 4-4 tem por objetivo dar uma visão geral do funcionamento do software. O usuário deve fornecer as características iniciais do corpo-de-prova, escolher o tipo de ensaio (drenado ou não drenado), o tipo de controle da aquisição (por deformação ou por deslocamento), se a área do corpo-de-prova deve ser corrigida durante o ensaio e o nome do arquivo de saída.

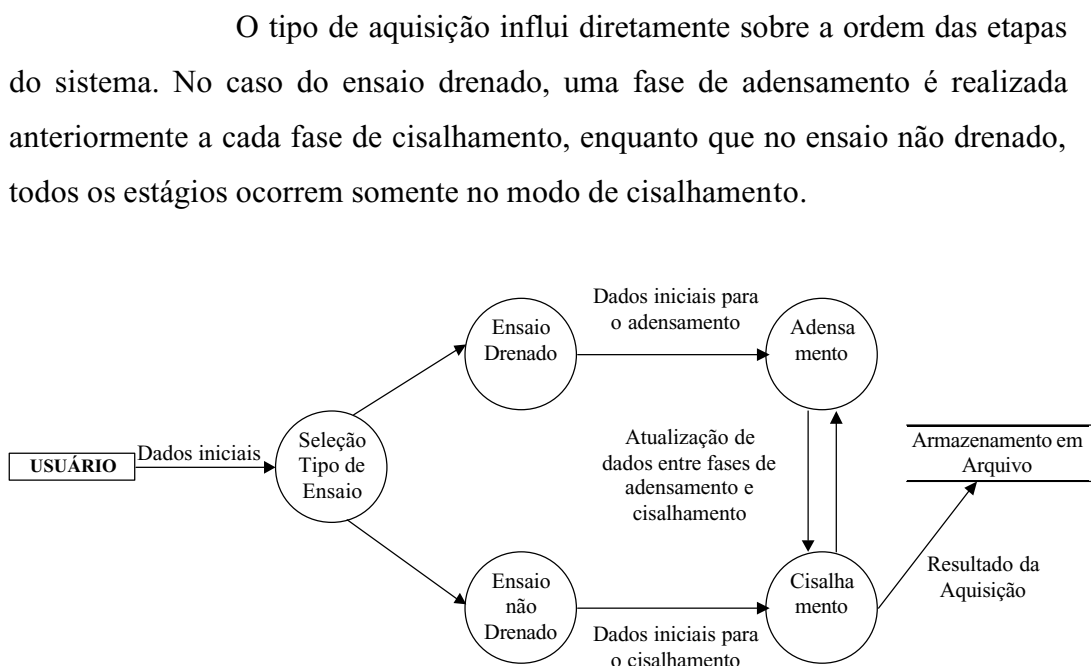


Figura 4-4 - DFD do Sistema de Aquisição de Dados para Ensaio de Compressão Triaxial.

Após o término de cada fase, os dados são gravados em arquivos que possuem como base o nome definido pelo usuário no início do programa.

O software possibilita ainda a visualização durante o ensaio do comportamento do corpo-de-prova através de gráficos que são atualizados periodicamente.

O usuário do software de aquisição de dados tem a possibilidade de alterar as escalas dos gráficos que apresentam o comportamento do corpo-de-prova e também de modificar as constantes de calibração dos transdutores em tempo de execução, o que permite conseguir uma melhor visualização.

Durante a fase de cisalhamento o controle de aquisição é feito através das variáveis de controle selecionadas pelo usuário no início da execução do programa (deformação ou deslocamento) enquanto que na fase de adensamento a variável de controle é o tempo (extraído do recurso de contador de tempo real encontrado nos computadores atuais).

Os dados obtidos durante o ensaio triaxial são armazenados em arquivos ASCII formatados em tabelas, de forma a poderem ser recuperados pelos mais diversos programas de planilha eletrônica. Além dos resultados dos ensaios, já tratados considerando as constantes de calibração, são armazenados também os valores dos conversores A/D em cada aquisição. A ferramenta de programação utilizada é o Visual Basic 6.0 e o sistema operacional é o Windows 98.

4.1.4 - Calibrações

Para eliminar a influência da expansão da câmara triaxial nas leituras do medidor de variação de volume construído, determinou-se a curva da variação de volume do conjunto câmara triaxial e tubulação com a tensão confinante (Figura 4-5). A expressão que permite a correção do volume da câmara em função da pressão confinante está apresentada nessa Figura.

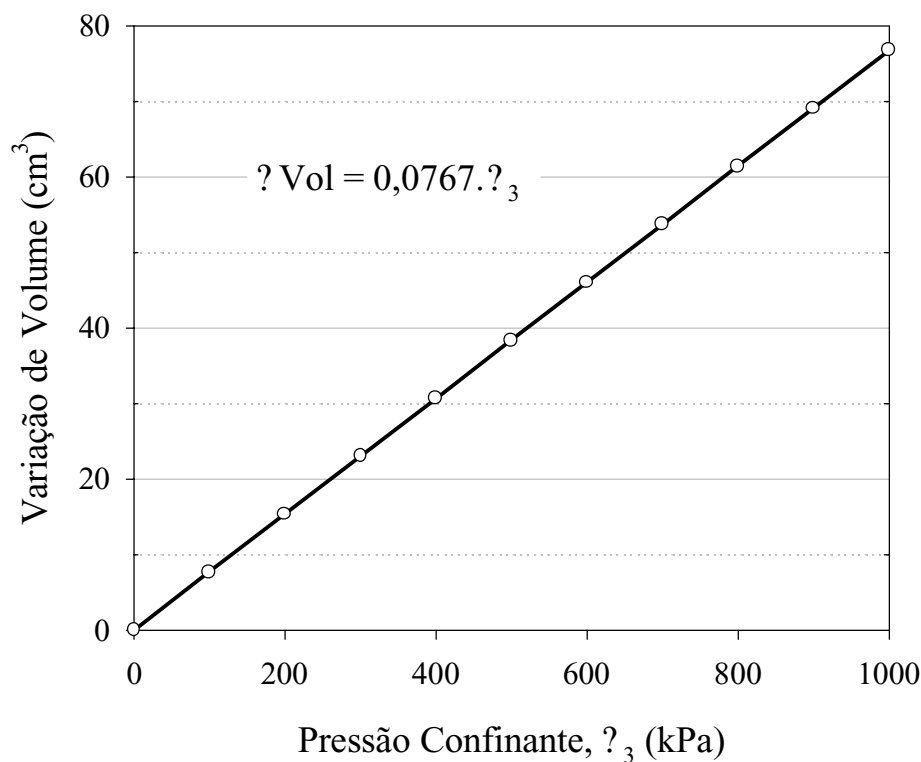


Figura 4-5 - Curva de variação de volume da câmara triaxial versus tensão confinante.

Outra calibração feita foi para corrigir a variação de volume causada pela entrada do embolo na câmara triaxial. O resultado dessa calibração é apresentada na Figura 4-6 onde também se encontra a expressão que permite a correção do volume versus o deslocamento do pistão.

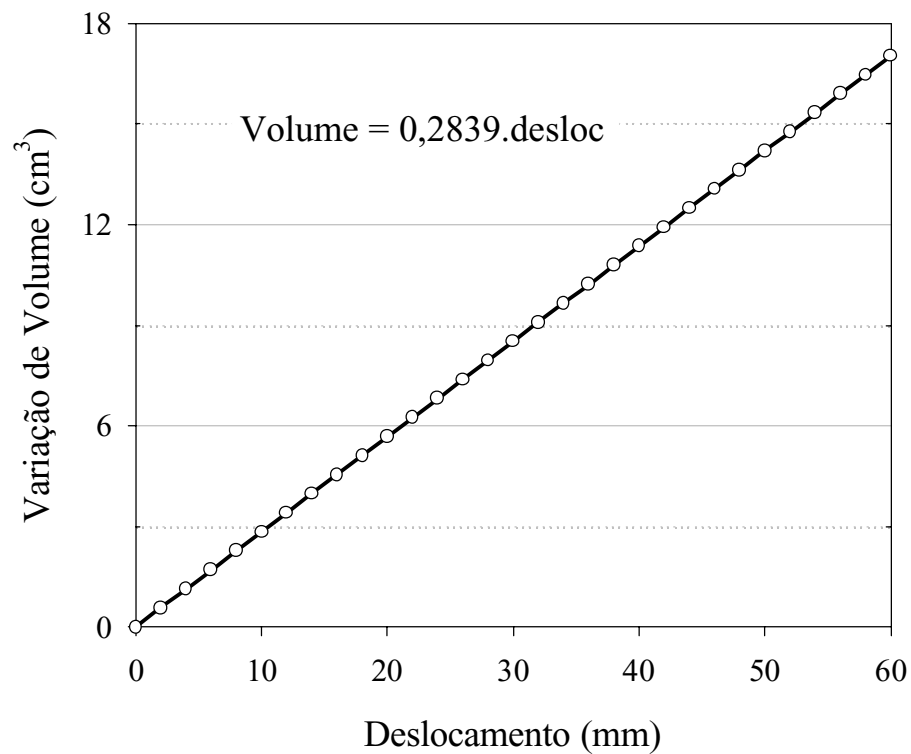


Figura 4-6 - Curva de variação de volume da câmara triaxial versus o deslocamento do pistão.

Visando eliminar a influência da pressão confinante no valor da leitura feita pela célula de carga apresenta-se na Figura 4-7 o resultado da calibração onde destaca-se a expressão resultante.

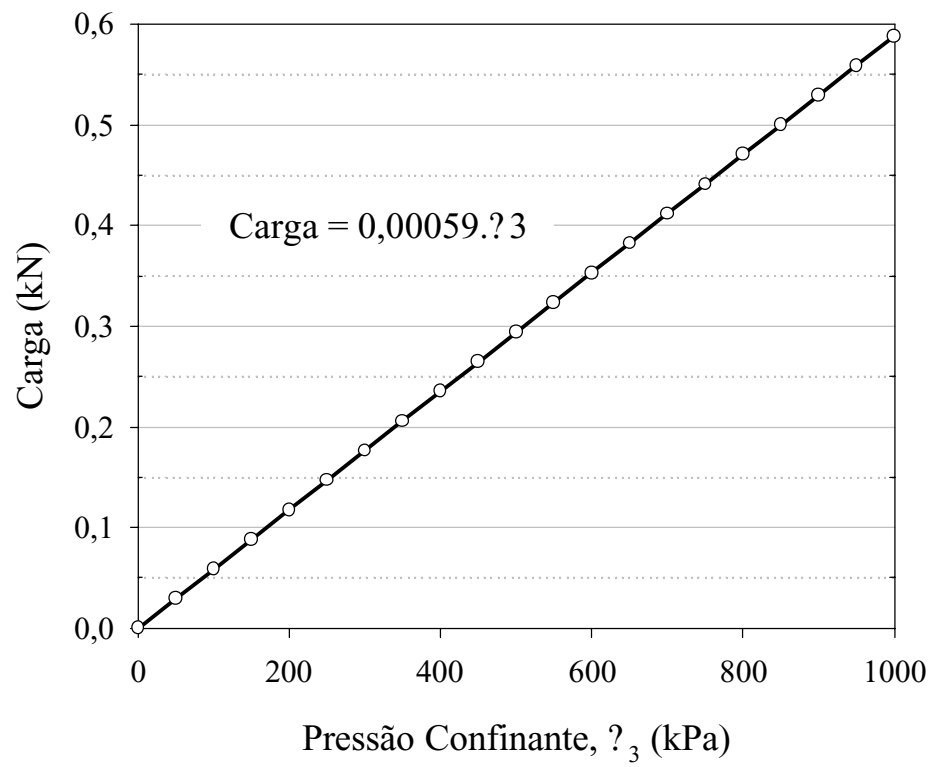


Figura 4-7 - Gráfico carga versus pressão confinante.

4.1.5 - Caracterização do Solo Estudado

O material inconsolidado empregado nos ensaios provêm do material resultante do intemperismo dos arenitos de granulação fina a média que constituem a Formação Botucatu cuja idade é Triássico/Jurássico. A Formação Botucatu apresenta grandes co-seqüências de estratos cruzados que podem atingir até uma centena de metros, os grãos apresentam boa seleção e são normalmente foscas.

O solo residual do Arenito Botucatu tem ocorrência em cerca de 1/5 do Estado de São Paulo, portanto, torna-se importante conhecer seu comportamento. A Formação Botucatu em conjunto com as Formações Pirambóia e Serra Geral formam o Grupo São Bento, destacado na Figura 4-8.

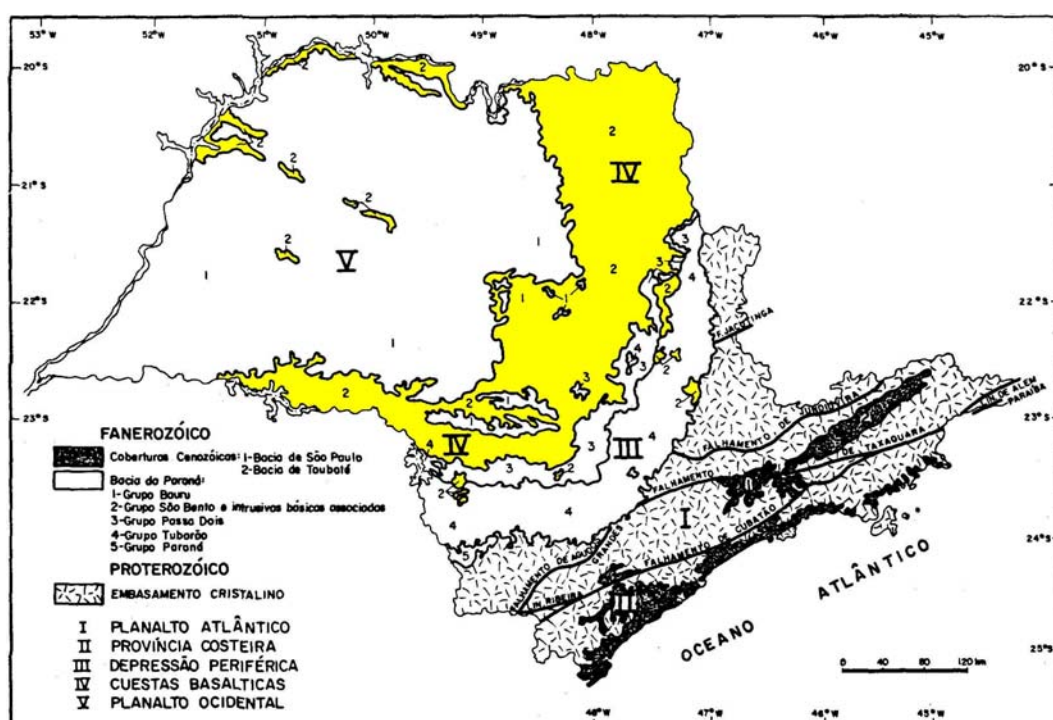


Figura 4-8 - Esboço da distribuição das unidades litoestratigráficas no estado de São Paulo e sua divisão geomorfológica (ALBIERO et. al. , 1993).

4.1.5.1 Coleta das Amostras de Solo

O solo estudado foi extraído na área de encontro da zona urbana da cidade de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. As amostras coletadas são do tipo deformada e foram retiradas à profundidade de aproximadamente 3 m, a fim de serem atenuadas influências da matéria orgânica, da incidência direta de raios solares e da atividade antrópica. Esse material geológico apresenta coloração intensamente avermelhada, indicando a presença de óxidos de ferro, característicos de regiões tropicais.

Foram coletados cerca de 300 Kg desse material e levados ao Laboratório de Geotecnia da EESC-USP para secagem ao ar, destorroamento manual e, em seguida, o peneiramento, em sistema vibratório mecânico de peneiras quadradas de malhas de 1 e 2 mm. A fração superior a 2 mm de diâmetro passou por novo processo de destorroamento e peneiramento (malha de 1 mm) sendo, após, misturada e homogeneizada no restante da amostra. A homogeneização foi executada exaustivamente, por processo manual, a fim de se obter uma amostra do material bem uniforme.

4.1.5.2 Caracterização Mineralógica

LEITE (2000) apresenta a análise térmica e a análise difratométrica da fração fina e afirma que a mineralogia das frações argila e silte do solo estudado é coerente para latossolos, onde a intensa lixiviação não favorece a formação de argilo-minerais de alta troca catiônica.

Na Tabela 4-1 é apresentado o resumo do conteúdo mineralógico obtidos por LEITE (2000) para o solo estudado.

Tabela 4-1 - Resumo do conteúdo mineralógico da fração fina do solo da Formação Botucatu (LEITE, 2000).

AMOSTRA	MÉTODO	CONTEÚDO MINERALÓGICO
Botucatu	Análise Térmica Diferencial	caulinita, óxidos e hidróxidos de Fe
	Difratometria de Raios-X	quartzo, caulinita, gibbsita

4.1.5.3 Caracterização Física

4.1.5.3.1 Curva de Distribuição Granulométrica

Para a determinação da curva granulométrica o processo utilizado foi a Análise Granulométrica Conjunta por peneiramento e sedimentação, conforme descrito pela NBR 7181/82. Na sedimentação, pelo processo do densímetro, o defloculante utilizado foi o Hexametáfosfato de Sódio. Apresenta-se a curva granulométrica na Figura 4-9.

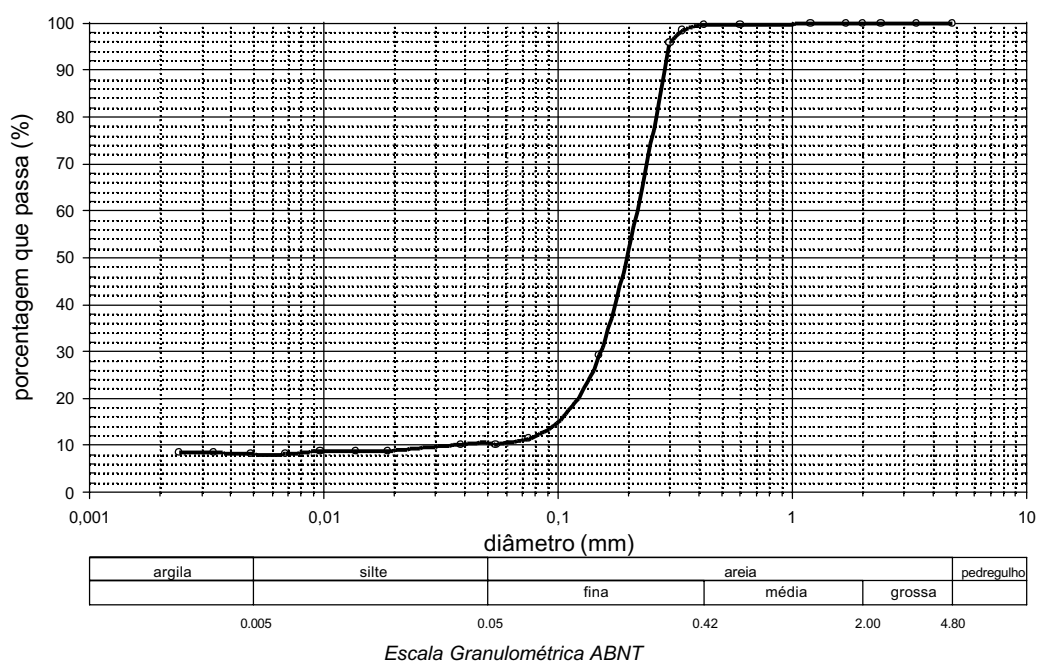


Figura 4-9 – Curva granulométrica do solo em estudo.

4.1.5.3.2 Limites de Consistência

Foram determinados por LEITE (2000), de acordo com as normas ABNT NBR 6459, ABNT NBR 7180/82 e ABNT 7183/84. Os valores encontrados para o solo estudado são coerentes com o tipo de material analisado. A amostra Botucatu apresentou os seguintes resultados :

Tabela 4-2 - Limites de consistência do solo estudado (LEITE, 2000).

AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Botucatu	19	15	4

4.1.5.3.3 Massa Específica dos Sólidos

Utilizando-se o processo usual do Picnômetro (NBR 6508/80), determinou-se a massa específica dos sólidos (γ_s) fazendo-se a média de 5 determinações. O valor determinado está de acordo com aqueles apresentados por LEITE (2000) e por BOFF (1999).

Tabela 4-3 - Massa específica dos sólidos (γ_s) da amostra.

AMOSTRA	γ_s (g/cm³) este trabalho	γ_s (g/cm³) BOFF (1999)	γ_s (g/cm³) LEITE (2000)
Botucatu	2,648	2,721	2,680

4.1.5.3.4 Parâmetros de Compactação

As características de compactação foram obtidas segundo o método ABNT-NBR 7182/82. Os valores da umidade ótima e da massa específica seca máxima da amostra Botucatu confirma os valores encontrados por LEITE (1997), e os resultados encontrados por LEITE (2000). Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Valores de teores de umidade ótima e massa específica seca máxima do solo estudado.

		LEITE (1997)	LEITE (2000)
$W_{ótima} (\%)$	9,2	11,26	11,23
$\gamma_{dmáx} (g/cm^3)$	1,920	1,960	1,960

A curva de compactação desse solo na energia de Proctor Normal (NBR 7182/82) é apresentada na Figura 4-10 onde tem-se também representados os parâmetros de compactação.

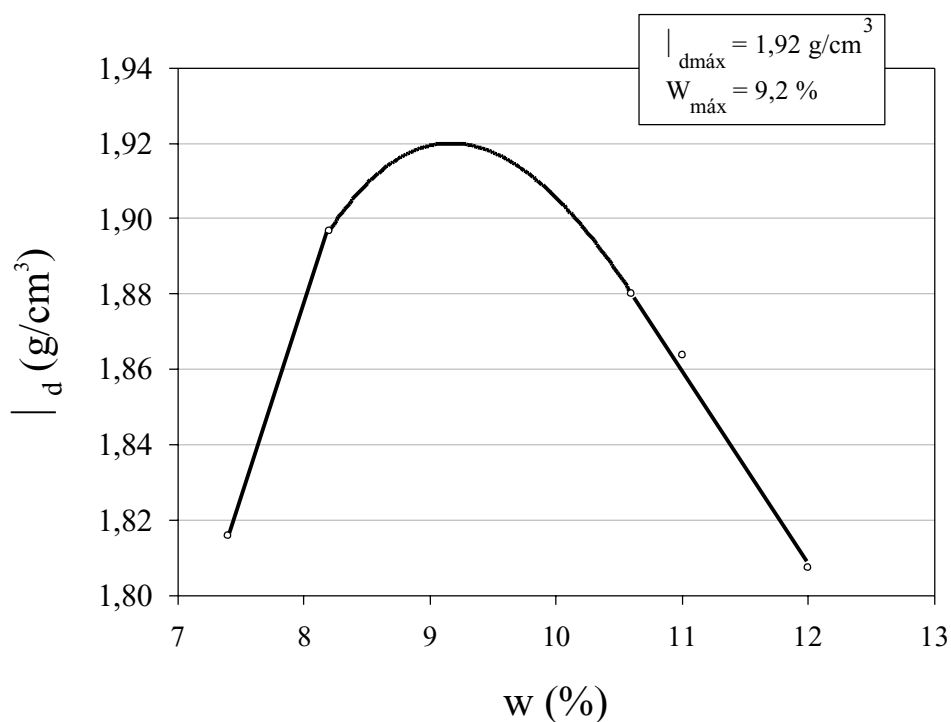


Figura 4-10 - Curva de compactação Proctor Normal e parâmetros de compactação para o solo da Formação Botucatu.

A compactação dos corpos-de-prova foi realizada no Laboratório de Geotecnia da EESC/USP, em cilindros construídos especialmente para percolar líquidos através do corpo-de-prova e cujo volume era diferente de 1000 cm^3 . Por esta razão, como no trabalho de LEITE (2000) foi feita uma compensação no número de golpes, que variou conforme as dimensões do cilindro, de forma a imprimir a mesma energia que a do ensaio de Proctor normal ($5,95 \text{ Kgf.cm/cm}^3$).

4.1.5.4 Caracterização Físico-Química

As informações sobre as propriedades físico-químicas do solo estudado são importantes pois podem explicar possíveis processos que possam ocorrer durante o contato entre o solo e as soluções contaminantes.

LEITE (1997) e LEITE (2000) estudaram estas propriedades e uma síntese dos resultados estão na Tabela 4-5 onde tem-se a capacidade de troca catiônica (CTC), superfície específica (SE), pH e condutividade elétrica.

Tabela 4-5 - Propriedades físico-químicas do solo estudado.

	LEITE (1997)	LEITE (2000)
CTC(meq/100g)	1,64	1,99
SE (m^2/g)	7,83	9,50
pH (H_2O)	5,31	5,03
pH (KCl)	5,39	5,04
Cond. Elétrica (extrato aquoso – ?mhocm^{-1})	16,34	----

4.1.5.5 Tensão de Pré-adsensamento

O resultado do ensaio de adsensamento realizado em uma amostra do solo estudado, compactado nas mesmas condições dos corpos-de-prova ensaiados triaxialmente e saturados com água destilada é apresentado na Figura 4-11. O ensaio de compressão endométrica também foi realizado com o corpo-de-prova de solo compactado e saturado com água destilada antes do início do 1º estágio do ensaio.

A tensão de pré-adsensamento foi obtida utilizando o método gráfico de Pacheco Silva pois é de fácil utilização e pelo fato de já ter demonstrado que o mesmo apresenta resultados compatíveis com aqueles obtidos por outros métodos. Assim, conforme pode ser observado na Figura 4-11, a tensão de pré-adsensamento para esse solo é de 24 kPa.

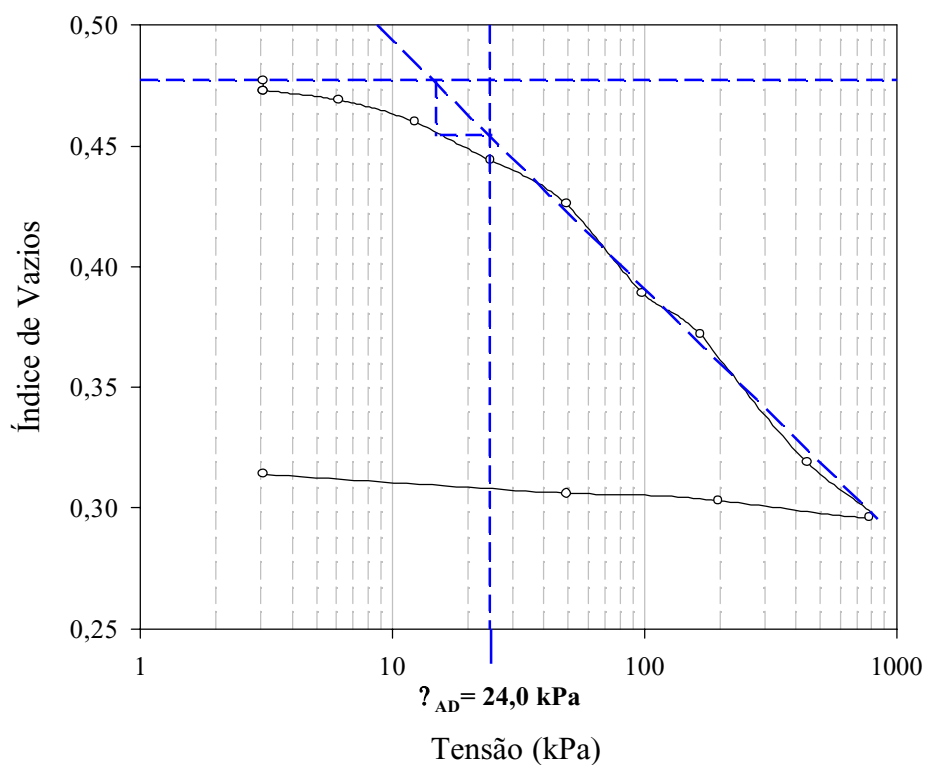


Figura 4-11 - Determinação da tensão de pré-adsensamento utilizando o método Pacheco Silva.

4.1.5.6 Condutividade Hidráulica do Solo Estudado

A condutividade hidráulica para o solo estudado nesse trabalho compactado é de $5,6 \times 10^{-9}$ m/s (LEITE, 1997). Esse valor demonstra a viabilidade do uso desse material como uma barreira de contenção, uma vez que os valores recomendados na literatura para uso do solo como uma barreira de contenção variam de 10^{-7} a 10^{-8} cm/s.

4.1.6 - SOLUÇÃO UTILIZADA PARA A PERCOLAÇÃO NOS CORPOS-DE-PROVA

4.1.6.1 Características da Solução

O cobre faz parte do grupo dos metais pesados e constitui-se em elemento de alta toxicidade. Ele forma compostos de números de valência +1 (cuproso), +2 (cúprico) e poucos compostos instáveis +3. Há dois isótopos, com pesos atômicos de 63 e 65.

O cobre é considerado um elemento perigoso à saúde humana, já que causa efeitos agudos (no sistema gástrico), crônico (cancerígeno) e tóxico (desordem no metabolismo pelo cobre, cirrose hepática). O cobre é comumente despejado no meio ambiente pelas atividades das indústrias beneficiadoras de cobre ou daquelas que o utilizam como sais e catalizadores. Os principais mecanismos de atenuação do cobre nos solos são a adsorção, a troca iônica e a precipitação.

Dados publicados sobre a composição do chorume, com relação aos íons metálicos, pode ser encontrada na compilação feita por ALKER et al.

(1995). Os referidos autores reuniram dados provenientes de 24 diferentes aterros do Reino Unido, da Suíça e dos Estados Unidos. Os valores para o cobre indicam variações de concentração de 0,04 a 9,9 mg/L. Com base nesses valores, foram determinadas as concentrações iônicas que foram utilizadas para preparação dos corpos-de-prova que foram submetidos aos ensaios triaxiais realizados.

4.1.6.2 Preparo e Armazenamento da Solução

Através dos corpos-de-prova de solo compactado foram percoladas duas substâncias, solução aquosa de cloreto de cobre e água destilada, esta última visando obter as provas em branco. A solução foi preparada com o seguinte reagente : $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (fórmula em peso 170,481 g). As principais características da solução percolada através dos corpos-de-prova são apresentadas na Tabela 4-6.

Tabela 4-6 - Principais características da solução utilizada para percolação.

CONCENTRAÇÕES IÔNICAS (mg/l)	pH	Eh (mV)	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)
$\text{Cu}^+ = 50$	5,70	549	191,4
$\text{Cu}^+ = 300$	5,10	520	1058
$\text{Cu}^+ = 600$	4,96	547	1959

As concentrações de íons de cobre foram determinadas no Laboratório de Geotecnia da EESC-USP, usando-se um espectrofotômetro de absorção atômica, marca VARIAN, modelo AA175, com boa precisão na escala de 0 a 10 ppm. Após o preparo nesse mesmo laboratório, a solução era conservada em balão de vidro, sob temperatura controlada.

4.2 - MÉTODOS

4.2.1 - Compactação dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova foram compactados próximos da umidade ótima (W_{ot}) e com um grau de compactação próximo de 100% do Proctor Normal. Devido às dimensões não convencionais dos corpos-de-prova foi feito, na compactação, um controle em termos de massa, volume e umidade do solo estudado sem haver a preocupação com o número de golpes aplicado.

Utilizando o aparelho apresentado na Figura 4-12, quatro camadas com uma massa de solo em uma determinada umidade são compactadas em um dado volume. Assim, com a utilização desse procedimento, o controle da compactação é feito através do controle da densidade e não através da energia aplicada.



Figura 4-12 - Equipamento utilizado para compactar os corpos-de-prova.

Na Tabela 4-7 apresentam-se os índices físicos de todos os corpos-de-prova compactados ensaiados bem como as concentrações das soluções percoladas por esses corpos-de-prova.

Tabela 4-7 - Características de cada corpo-de-prova compactado.

Coluna N°	Concentração de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	Massa Compactada (gr)	Volume da coluna (cm^3)	γ_s (g/cm^3)	γ_{d,γ_s} (g/cm^3)	w_{compact} (%)	e (Índice de vazios)	SR grau de sat. (%)	GC (%) (Grau de Compact.)
1	0	2324,5	1112,4	2,090	1,917	8,9	0,381	62,5	99,9
5	0	2266,4	1082,6	2,093	1,921	8,9	0,379	62,9	100,0
-	0	2246,5	1082,6	2,075	1,905	8,9	0,390	60,5	99,2
1	50	2331,7	1116,2	2,089	1,916	9,0	0,382	62,4	99,8
2	50	2289,1	1093,8	2,093	1,920	9,0	0,379	62,9	100,0
3	50	2294,8	1097,5	2,091	1,918	9,0	0,380	62,6	99,9
4	300	2271,3	1086,3	2,091	1,918	9,0	0,380	62,6	99,9
5	300	2339,6	1120,0	2,089	1,916	9,0	0,382	62,4	99,8
6	300	2302,6	1101,3	2,091	1,918	9,0	0,380	62,6	99,9
7	600	2271,3	1086,3	2,091	1,918	9,0	0,380	62,6	99,9
8	600	2308,3	1105,0	2,089	1,916	9,0	0,382	62,4	99,8
9	600	2284,9	1093,8	2,089	1,916	9,0	0,382	62,4	99,8
Desvio Padrão				0,005	0,004	0,045	0,003	0,633	0,209
Média				2,089	1,917	8,975	0,381	62,424	99,834
Coeficiente de Variabilidade				0,002	0,002	0,005	0,007	0,010	0,002

Observando a Tabela 4-7 nota-se uma baixa variabilidade entre as características de todos os corpos-de-prova, que é resultado do controle proporcionado pelo método de compactação que foi utilizado. Assim, pode se afirmar que não existiu uma variabilidade tal que influenciou nos resultados.

4.2.2 - Percolação de Água Destilada e Solução nos Corpos-de-Prova

Três corpos-de-prova foram percolados com água destilada e deionizada, e nove outros com uma solução de cloreto de cobre, sendo que, três com solução à concentração de 50mg/l, três com solução à concentração de 300mg/l e três com solução à concentração de 600mg/l de íons de cobre.

Todos os corpos-de-prova foram compactados e percolados no Laboratório de Geotecnia da EESC/USP, utilizando o equipamento descrito por LEITE (2000), apresentado na Figura 4-13. O solo estudado foi compactado e percolado na coluna apresentada na Figura 4-14.

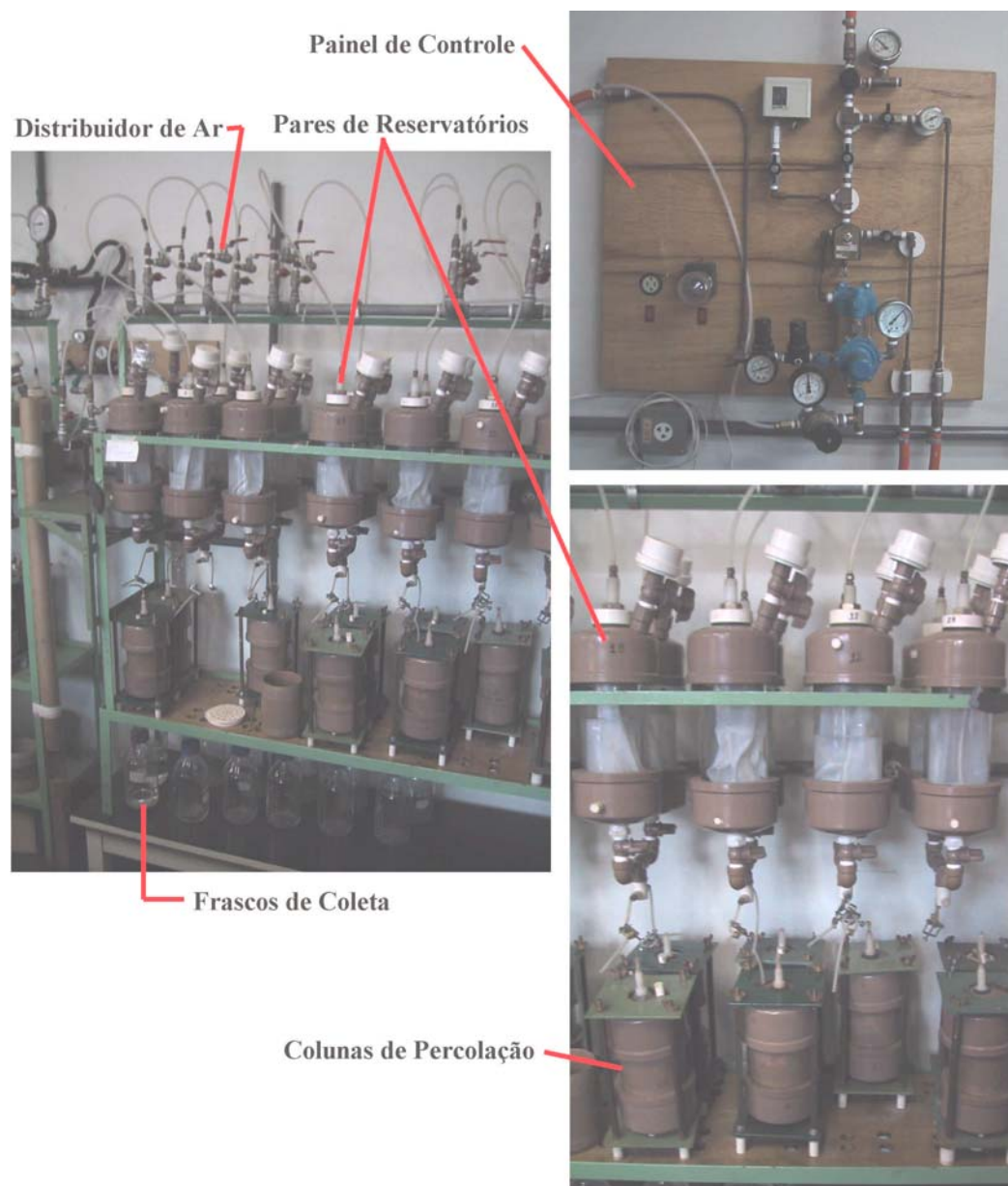


Figura 4-13 - Equipamento utilizado na percolação dos corpos-de-prova (Departamento de Geotecnia da EESC-USP).



Figura 4-14 – Coluna utilizada para compactar os corpos-de-prova e percolar as soluções e a água.

Os corpos-de-prova, após a percolação, ficaram armazenados, à espera de serem ensaiados, na câmara úmida do Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Engenharia da Unesp – Bauru (Figura 4-15). Tal medida foi tomada visando minimizar eventuais perdas de umidade.



Figura 4-15 - Câmara úmida do Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Engenharia da Unesp – Bauru.

4.2.3 - Ensaios Triaxiais

4.2.3.1 Instalação do Corpo-de-Prova na Câmara Triaxial

Para dar início ao ensaio triaxial o molde do corpo-de-prova era desmontado e o corpo-de-prova extrudado para, em seguida, ser pesado. O corpo-de-prova, com diâmetro de 9,79 cm e a altura de 14,5cm agora livre, era preparado para o ensaio. Posicionava-se o corpo-de-prova na base da câmara triaxial seguindo-se o esquema apresentado na Figura 4-16.

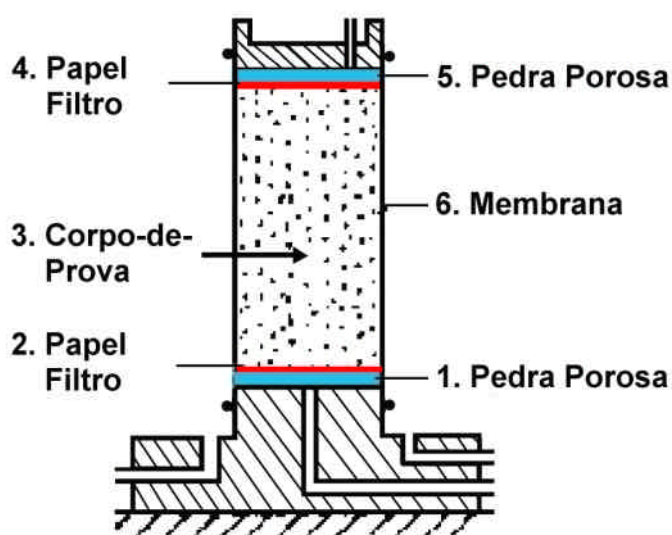


Figura 4-16 - Esquema da ordem de montagem do conjunto base, pedras porosas, papel filtro e topo.

A utilização dos papéis de filtro tiveram como único objetivo a preservação das pedras porosas e não afetaram nos resultados dos ensaios.

Em seguida, o corpo-de-prova era encamisado com uma membrana de látex, conforme representado no esquema da Figura 4-17. Para este procedimento foi construído um dispositivo para posicionar a membrana de látex.

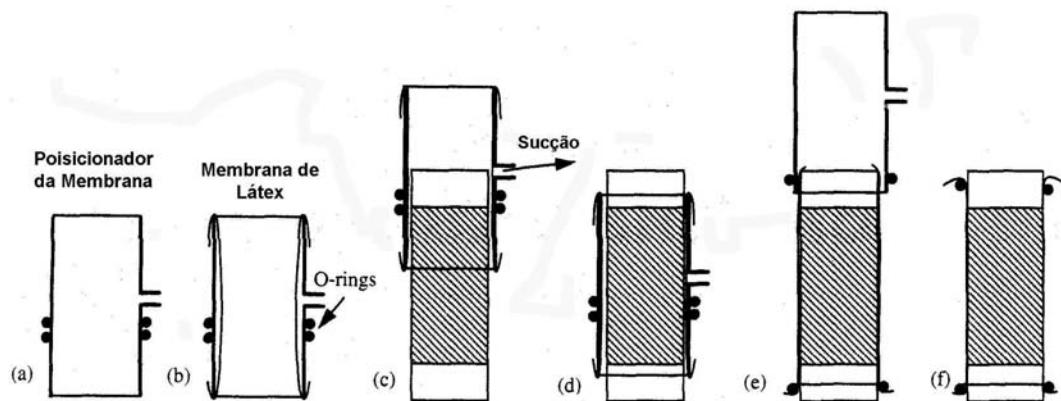


Figura 4-17 - Esquema do posicionamento da membrana de latex (BARDET, 1997).

Após o término da montagem, o conjunto corpo-de-prova e câmara triaxial podem ser vistos na Figura 4-18. Na Figura 4-19 tem-se representado o esquema geral do equipamento de ensaio triaxial utilizado.



Figura 4-18 - Vista da câmara triaxial após a montagem.

4.2.3.2 Saturação do Corpo-de-Prova

Após a montagem da câmara triaxial e a devida conexão aos registros e dispositivos de medida dava-se início, então, a fase de saturação do corpo-de-prova. Esse procedimento visa garantir e uniformizar a saturação de todos os corpos-de-prova para simular em laboratório a situação em que o solo estaria saturado, por ser esta a condição mais crítica. Esse procedimento foi realizado aplicando-se contra-pressão conforme descrito por HEAD (1986).

Para acompanhamento e avaliação dessa etapa foi desenvolvido um software específico para controlar e organizar a aquisição dos dados já descrito no item 4.1.3.2.

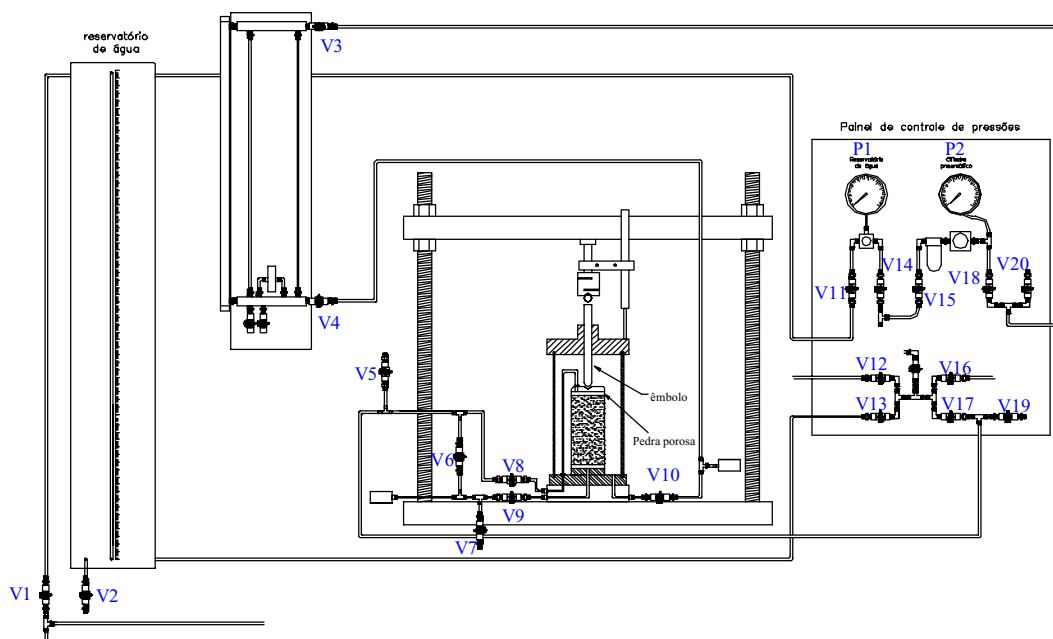


Figura 4-19 - Esquema geral de montagem do equipamento triaxial utilizado.

O procedimento de saturação inicia-se com a entrada dos dados iniciais no programa de aquisição, ou seja, o diâmetro inicial e a altura inicial do corpo-de-prova. Em seguida, aplica-se 50 kPa na câmara triaxial acionando-se a válvula V10 (Figura 4-19). Calcula-se então o primeiro valor do parâmetro B utilizando a seguinte equação apresentada no item 3.5.1, assim:

$$B = \frac{u - u_{inicial}}{\sigma_3 - \sigma_{3inicial}}$$

Em seguida, eleva-se a poro-pressão mantendo sempre seu valor 10 kPa menor que a pressão confinante. Ao término da aplicação da pressão confinante a poro-pressão será 40 kPa. A pressão é aplicada no corpo-de-prova com a abertura da válvula V8 (Figura 4-19). Aguarda-se então, que o valor da poro-pressão na base do corpo-de-prova iguale-se à do topo.

A igualdade entre a poro-pressão da base e do topo do corpo-de-prova é verificada, fechando-se a válvula V6 e abrindo a válvula V9. Assim que verifica-se essa igualdade fechando-se a válvula V8 para evitar uma variação volumétrica indesejável e aguarda-se por cerca de 10 a 15 minutos, monitorando constantemente a poro-pressão.

Caso, neste intervalo de tempo, haja um decréscimo na poro-pressão, aplica-se novamente pressão através da abertura da válvula V8 fazendo com que o valor da poro-pressão fique novamente 10 kPa abaixo da pressão confinante.

Armazena-se no disco rígido do computador a leitura da pressão confinante e da poro-pressão e com as válvulas V8 e V6 fechadas, procede-se um aumento de 50 kPa na pressão confinante, o que, acarretará em um aumento na poro-pressão, calculando-se então um segundo valor para o parâmetro B.

Eleva-se novamente a poro-pressão a um valor 10 kPa inferior ao da pressão confinante, ou seja, estando a pressão confinante em 100 kPa a poro-pressão deve ser 90 kPa. Repete-se então todo o procedimento de aguardar, monitorar a poro-pressão e gravar os valores da pressão confinante e da poro-pressão. Eleva-se novamente a pressão confinante, mas desta vez, em 100 kPa, repetindo-se todo o procedimento para o cálculo do parâmetro B. Deste nível de tensão em diante repete-se o procedimento já descrito elevando-se a pressão confinante sempre em 100 kPa.

Na Tabela 4-8 tem-se apresentados os resultados desse procedimento: valores das pressões confinantes, das poro-pressões e dos parâmetros B calculados.

Tabela 4-8 - Exemplo da organização dos dados no procedimento de saturação por contra-pressão registrado a partir do programa de aquisição de dados utilizado neste trabalho.

Número da Leitura	Tempo (min)	Pressão Confinante (kPa)	Poro-Pressão (kPa)	Dif.Poro Pressão (kPa)	B
0	0,0	18,1	18,7		
1	0,0	49,3	28,7	10,0	0,32
2	22,1	50,7	41,0	12,3	
3	0,0	100,6	55,0	14,0	0,28
4	48,8	101,9	92,1	37,0	
5	0,0	200,4	144,4	52,4	0,53
6	70,7	200,1	195,1	50,7	
7	0,0	299,9	277,9	82,7	0,83
8	93,8	300,1	295,2	17,4	
9	0,0	401,1	382,6	87,4	0,87
10	128,8	400,6	393,3	10,7	
11	0,0	500,2	482,0	88,7	0,89
12	151,8	498,8	489,4	7,3	
13	0,0	600,6	580,4	91,1	0,89
14	188,1	599,7	590,8	10,3	
15	0,0	700,2	682,8	92,1	0,92
16	208,6	700,6	689,9	7,0	
17	0,0	799,3	782,3	92,4	0,94
18	225,7	798,4	789,3	7,0	
19	0,0	906,4	895,3	106,1	0,98

Interrompeu-se o procedimento de saturação sempre quando a pressão confinante atingia o valor de 900 kPa pois a execução de mais um estágio poderia comprometer o ensaio uma vez que a pressão limite da câmara triaxial utilizada é de 1 MPa.

Assim o procedimento de saturação foi realizado para todos os corpos-de-prova ensaiados de maneira idêntica a descrita.

4.2.3.3 A Fase de Cisalhamento

Para essa etapa do ensaio foi desenvolvido um software para gerenciar os dados, tanto durante o adensamento quanto durante a compressão do corpo-de-prova.

As pressões confinantes foram definidas admitindo-se uma condição hipotética de solicitação de liner de fundo submetido ao peso de um aterro de resíduos sólidos de cerca de 15 metros. Considerou-se o peso específico deste resíduo como sendo aproximadamente 10 kN/m^3 , o que resultou em uma tensão máxima no liner de aproximadamente 150 kPa. Assim, as pressões confinantes definidas para realização dos ensaios triaxiais foram de 50, 100 e 200 kPa.

A velocidade de ensaio foi definida conforme sugere HEAD (1986), apresentadas no item 3.4 e determinou-se o valor de t_{100} á partir de um dos primeiros ensaios realizados. A determinação de t_{100} é apresentada na Figura 4-20. Assim sendo, t_{100} igual a 400 minutos, tem-se:

$$t_f = 0,51 \cdot 400 = 204 \text{ minutos}$$

A deformação na ruptura (ϵ_f) foi estimada como sendo 5%. Assim, a velocidade de ensaio adotada foi de 0,05 mm/minuto.

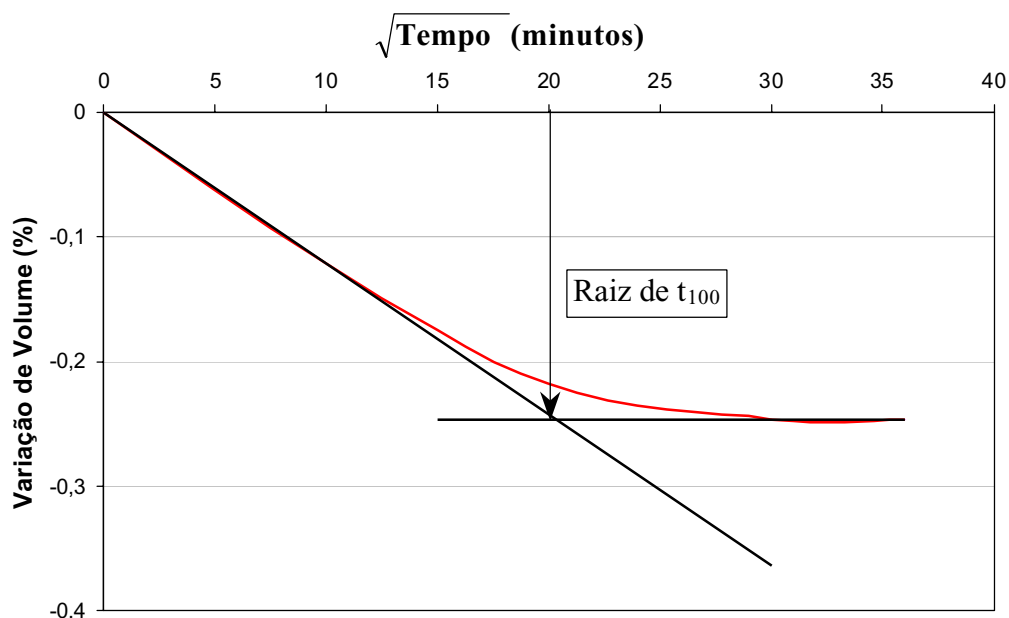


Figura 4-20 - Determinação do tempo para ocorrer 100% do adensamento primário (t_{100}).

O ensaio é iniciado aplicando-se a primeira tensão confinante (50 kPa) ao corpo-de-prova e permitindo que haja a drenagem (V6 fechada, V8 e V5 abertas), ou seja, permitindo o adensamento do corpo-de-prova. O sistema de aquisição de dados, nesta etapa do ensaio, armazena informações sobre a variação volumétrica, pressão confinante e poro-pressão do corpo-de-prova. Para esse solo observou-se que, em média, o tempo para o adensamento do corpo-de-prova foi cerca de 12 horas.

Após constatação que a variação de volume estabilizava passou-se para a etapa de ruptura do corpo-de-prova. Fechou-se a drenagem (V8 e V5 fechadas), preparou-se o programa de aquisição de dados e acionou-se a prensa triaxial na velocidade definida previamente. O critério adotado para definir-se a

ruptura foi o de máxima tensão de pico. Verificando-se que a ruptura ocorreu, procedia-se a descarga do corpo-de-prova.

Em todos os ensaios realizados, a técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios foi utilizada. Após o primeiro estágio, que compreendia a etapa de adensamento e ruptura para uma dada pressão confinante, eram realizados mais dois outros estágios com o mesmo corpo-de-prova, porém, com pressões confinantes maiores. Apresenta-se na Figura 4-21, a seqüência das pressões confinantes utilizadas para cada série de três corpos-de-prova. Destaca-se na Figura 4-21, os estágios que possibilitaram a comparação entre a técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios e o ensaio triaxial convencional.

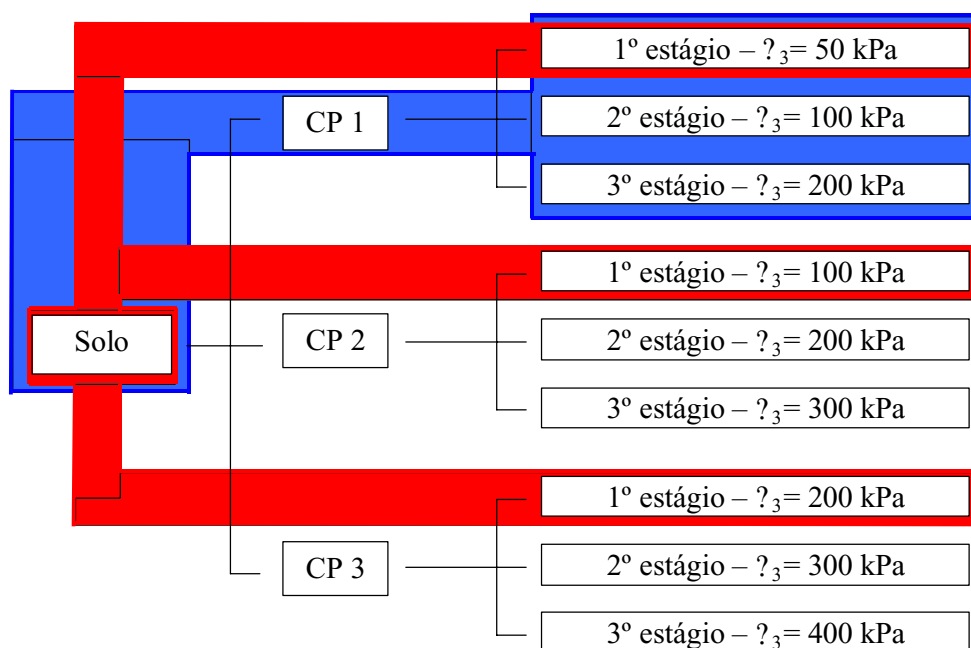


Figura 4-21 – Representação dos níveis de tensão confinante utilizadas nos ensaios triaxiais realizados.

Desta maneira, com os dados obtidos à partir de três corpos-de-prova, foi possível traçar a envoltória de tensões a partir do primeiro estágio de cada corpo-de-prova (Figura 4-21 área em vermelho), sendo esse o procedimento convencional adotado. Foi possível também avaliar a técnica do ensaio triaxial em

múltiplos estágios (Figura 4-21 área em azul). Esses resultados serão apresentados e discutidos posteriormente nesse trabalho.

Foram realizados ensaios triaxiais em corpos-de-prova percolados com água destilada e soluções de cloreto de cobre aquoso com três diferentes concentrações, 50, 300 e 600 mg/l. A quantidade de corpos-de-prova ensaiados bem como as pressões confinantes utilizadas estão na Tabela 4-9.

Tabela 4-9 – Condição do solo, número de corpos-de-prova e tensões confinantes aplicadas.

Condição do Solo	Quantidade de CPs	σ_3 do 1º Estágio (kPa)	σ_3 dos Estágios Seguintes (kPa)
Percolado com Água Destilada	3	50	100
			200
		100	200
			300
		200	300
			400
Percolado com 50mg/l $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3	50	100
			200
		100	200
			300
		200	300
			400
Percolado com 300mg/l $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3	50	100
			200
		100	200
			300
		200	300
			400
Percolado com 600mg/l $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3	50	100
			200
		100	200
			300
		200	300
			400

Ao todo, foram compactados e ensaiados 12 corpos-de-prova, sendo que, em todos, foi utilizada a técnica do ensaio triaxiais em múltiplos estágios.

5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1 - SOLO PERCOLADO COM ÁGUA DESTILADA

Nesta série de ensaios os corpos-de-prova foram percolados com água destilada, a ruptura para os três níveis de tensões aplicadas foi em forma de “barril” e em nenhum dos corpos-de-prova ensaiados constatou-se uma superfície nítida de ruptura (fig ANEXO2).

O resultado da saturação por contra pressão e o da fase de adensamento do corpo-de-prova CP1 ensaiado sob tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa são apresentados respectivamente na Figura 5-1A e Figura 5-1B. Para esse mesmo corpo-de-prova, na fase de cisalhamento, tem-se o gráfico da tensão desviatória (Figura 5-2A), poro-pressão (Figura 5-2B) e variação volumétrica (Figura 5-2C) *versus* o deslocamento.

Analogamente, para o corpo-de-prova CP2, ensaiados sob s_3 igual a 100, 200 e 300 kPa e CP3, com s_3 igual a 200, 300 e 400 kPa tem-se, respectivamente, os gráficos com o resultado da saturação por contra pressão e adensamento na Figura 5-3, para o CP2 e na Figura 5-5, para o CP3.

Os resultados da fase de cisalhamento, que incluem o gráfico da tensão desviatória, poro-pressão e variação volumétrica *versus* deslocamento para o CP2 e CP3 estão apresentados na Figura 5-4 e na Figura 5-6, respectivamente.

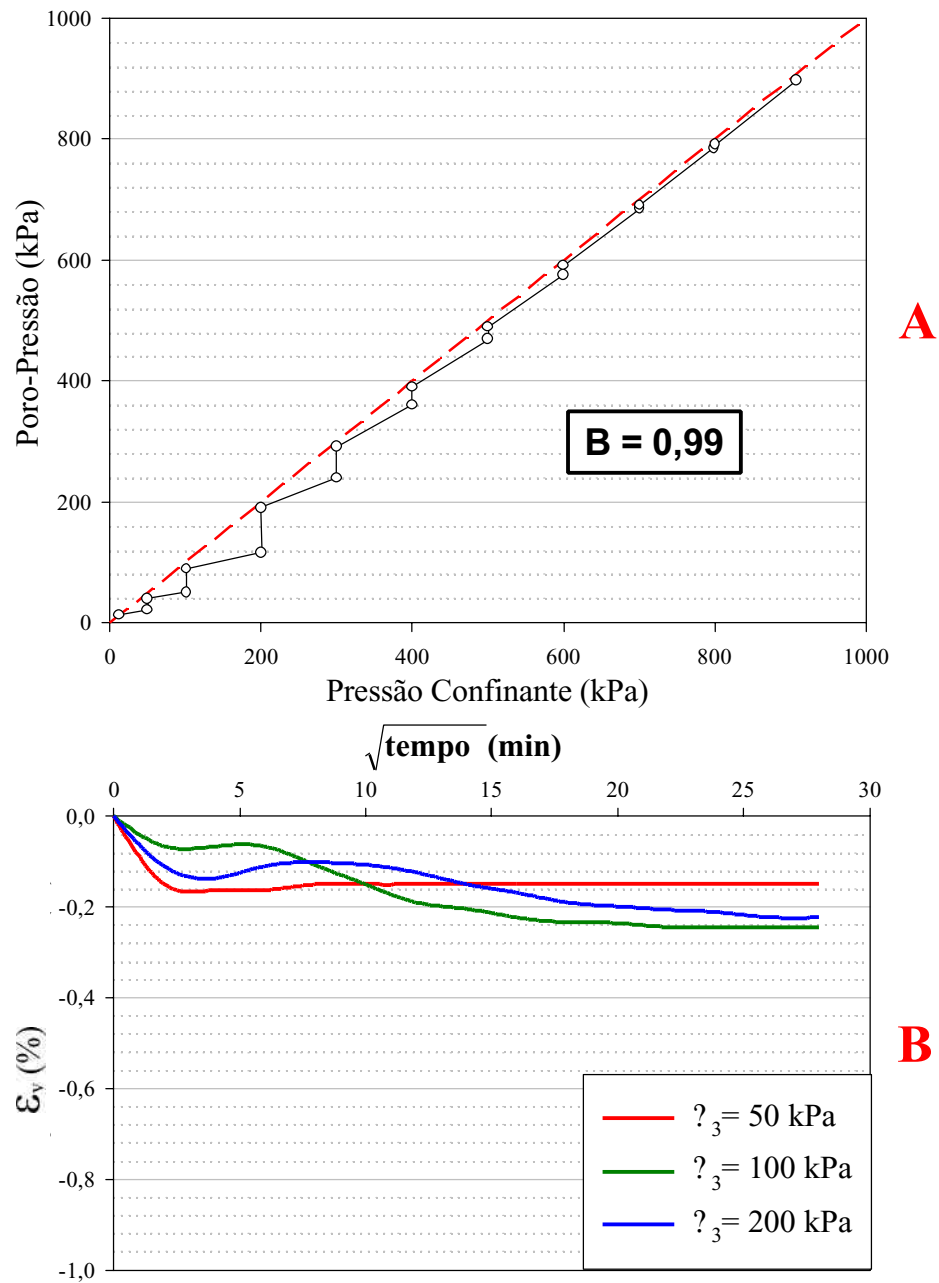


Figura 5-1 – (CPI) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada.
(A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.

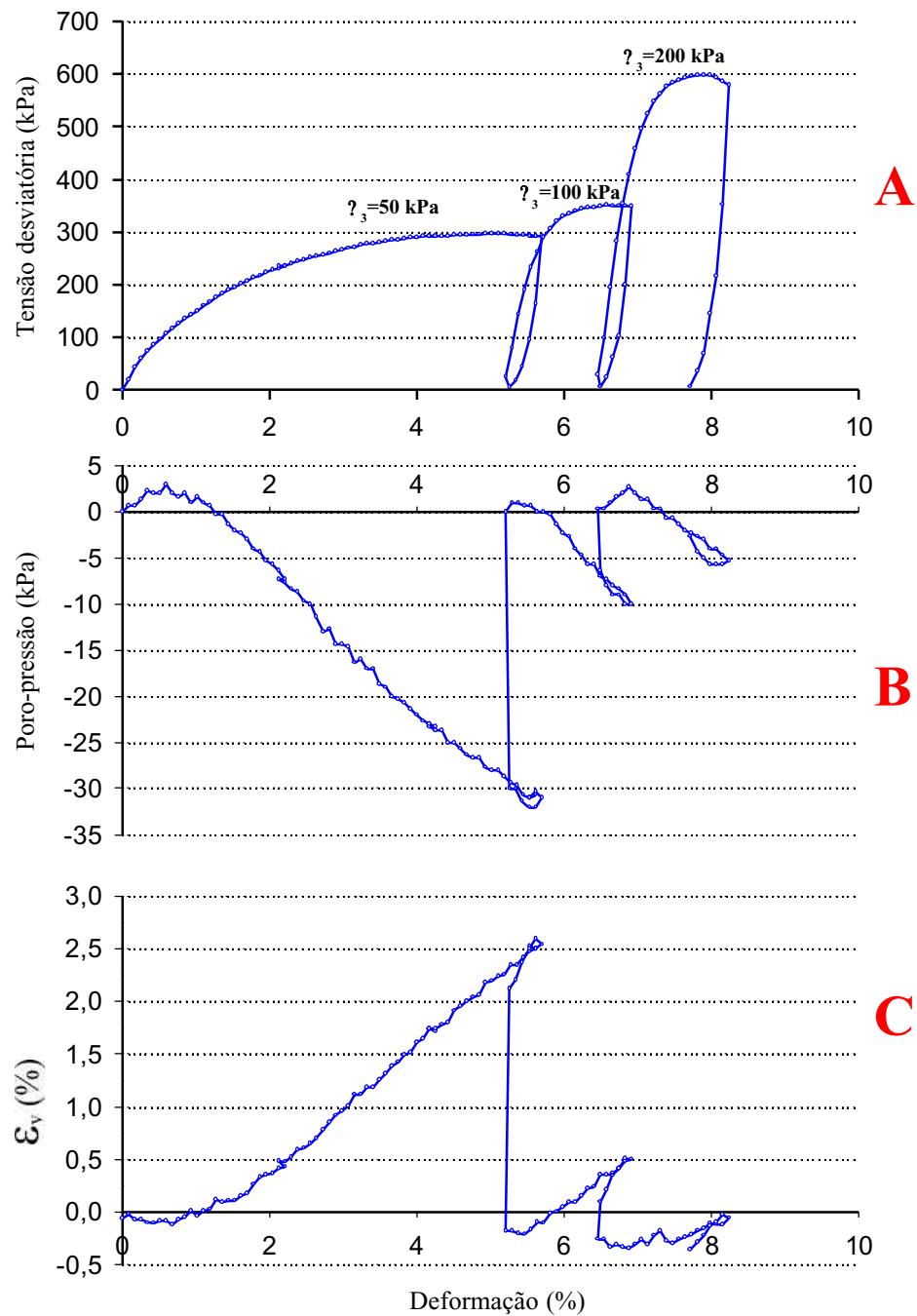


Figura 5-2 – (CP1) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada.
(A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

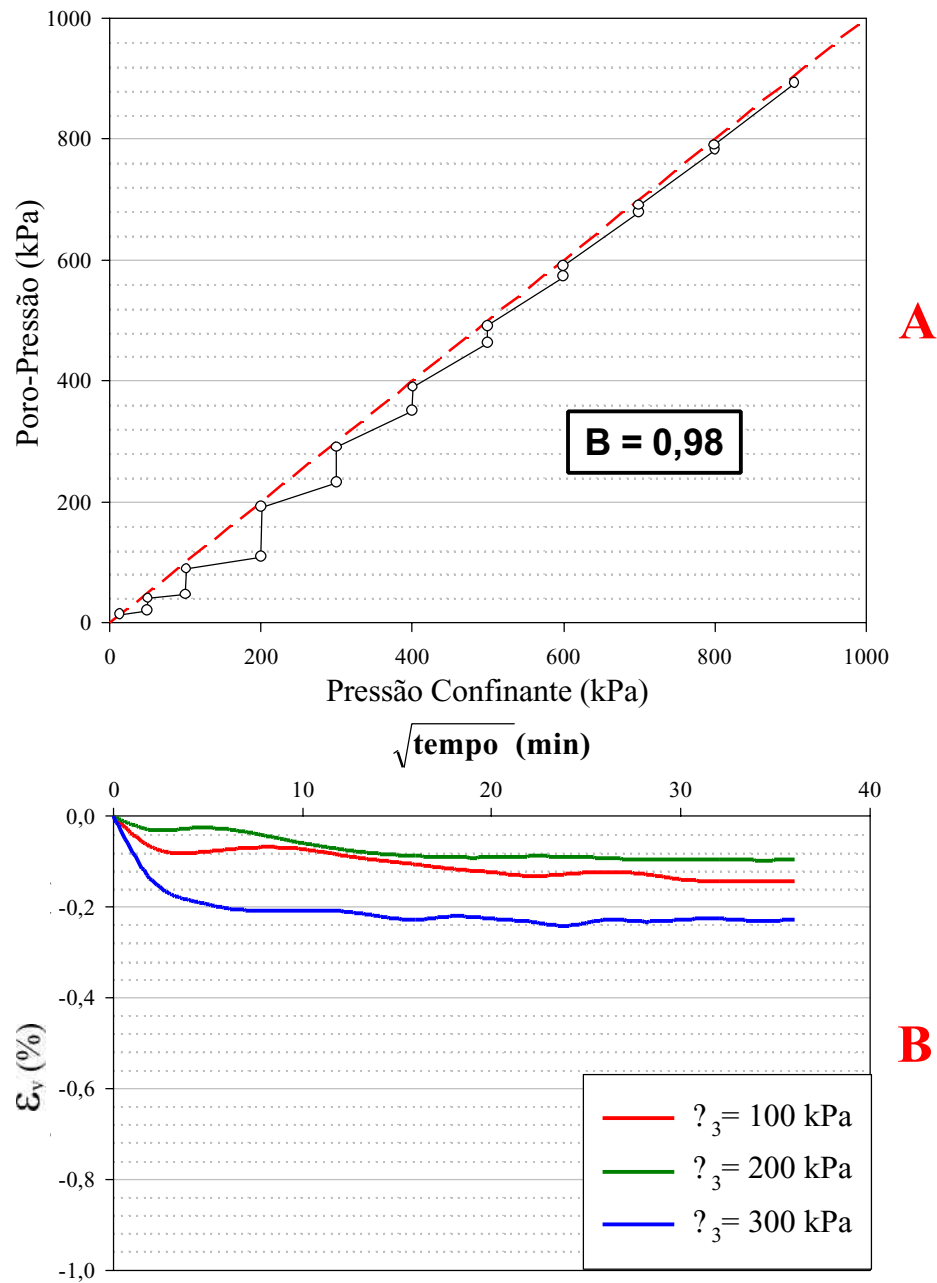


Figura 5-3 - (CP2) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.

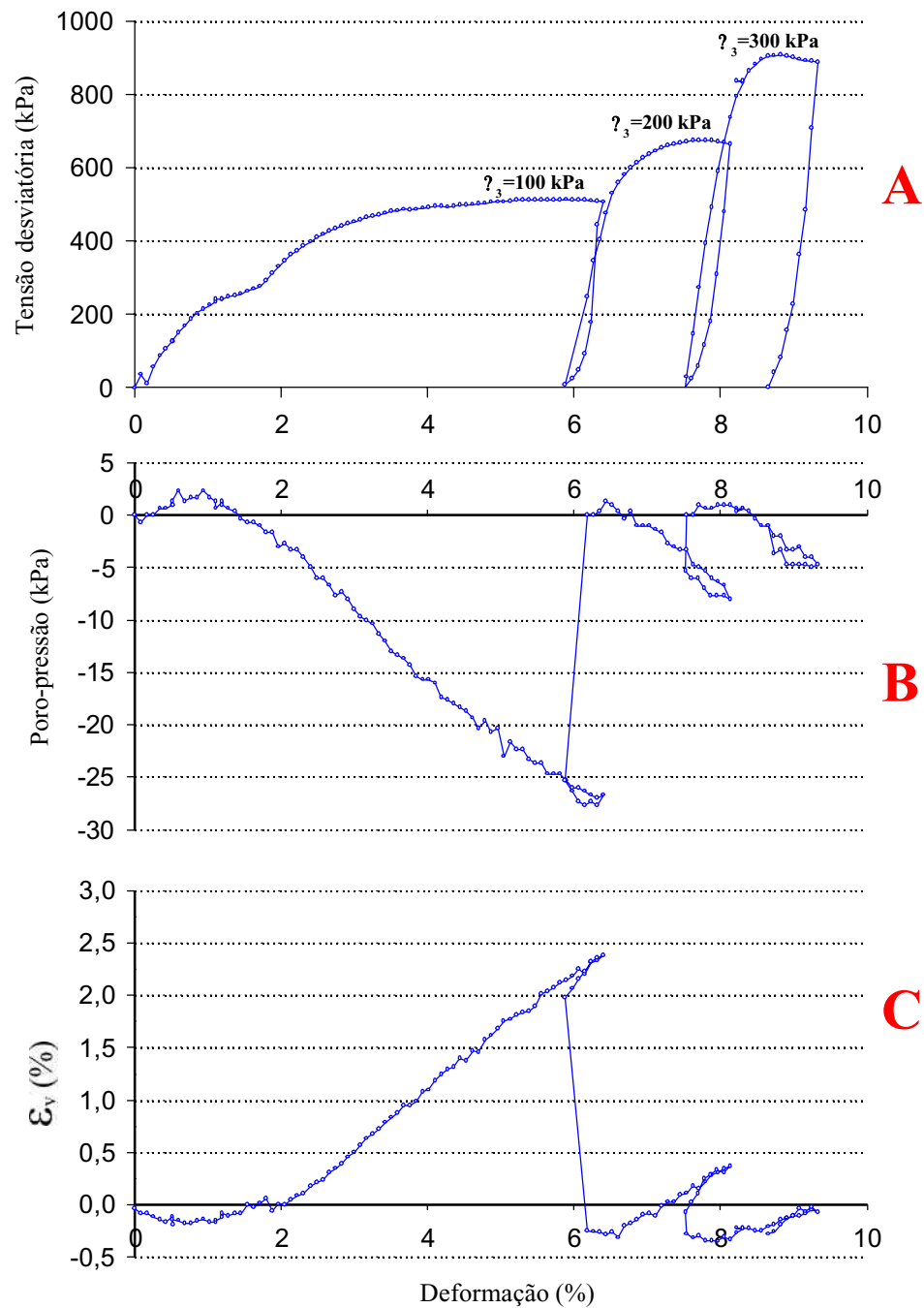


Figura 5-4 - (CP2) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada.
(A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

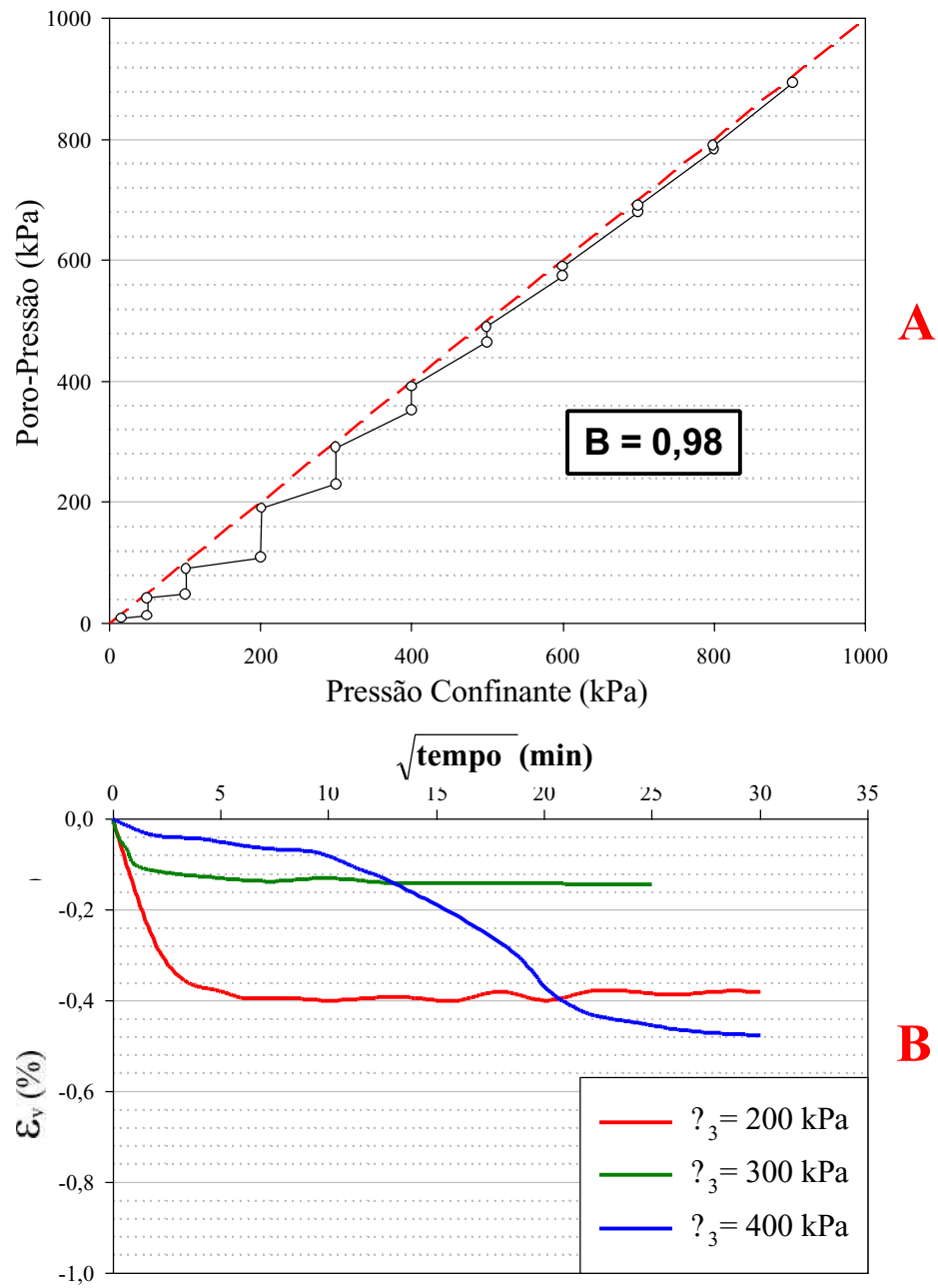


Figura 5-5 - (CP3) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada. (A) Poro Pressão versus Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica versus Raiz do Tempo.

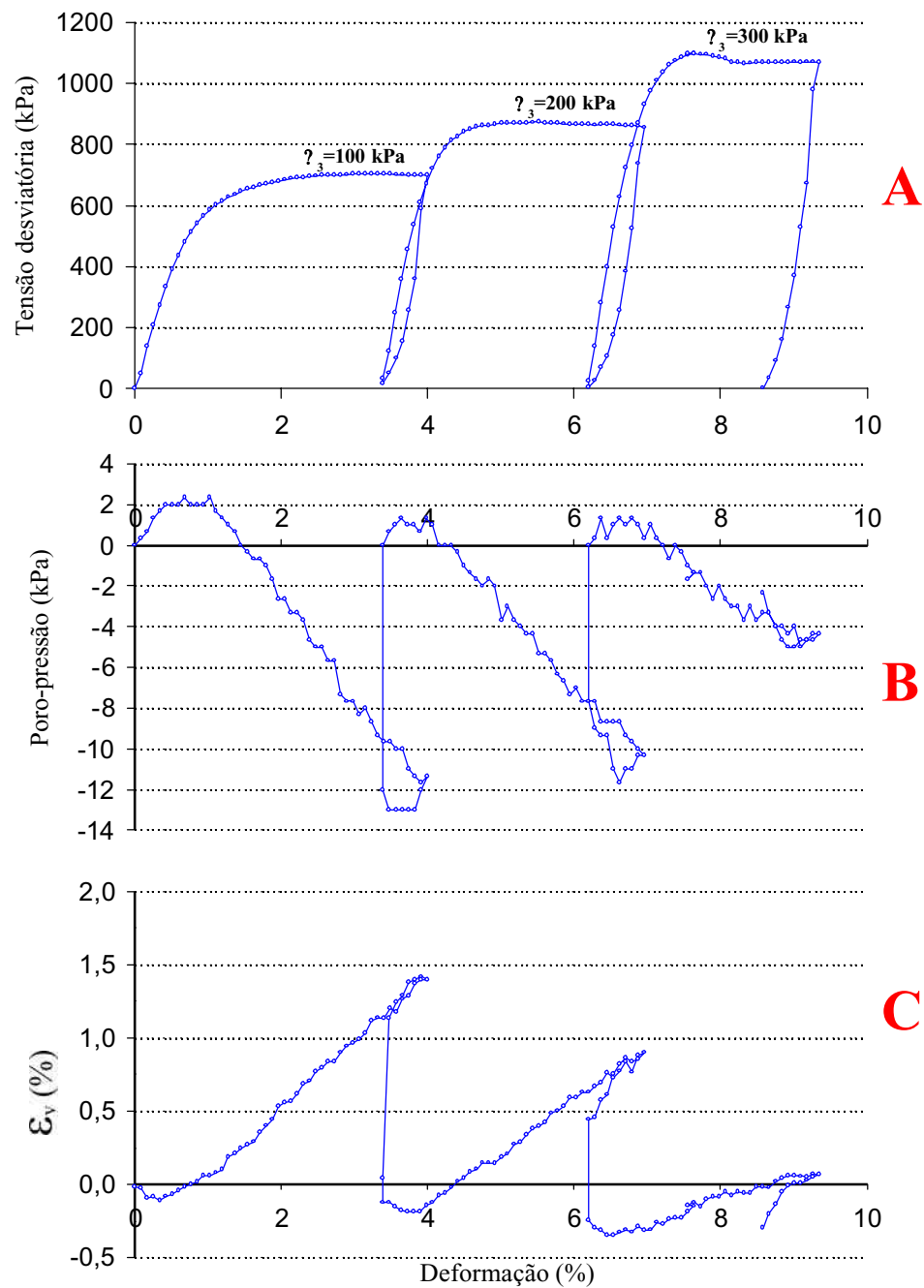


Figura 5-6 - (CP3) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com água destilada.
(A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

5.2 - SOLO PERCOLADO COM SOLUÇÃO DE 50MG/L

Nesta série de ensaios os corpo-de-prova foram percolados com uma solução de 50 mg/l de cloreto de cobre aquoso, a ruptura para os três níveis de tensões aplicadas foi em forma de “barril”, sendo que para as tensões confinantes de 50 e 200 kPa constatou-se uma superfície nítida de ruptura com aproximadamente 60° (fig ANEXO2).

O resultado da saturação por contra pressão e o da fase de adensamento do corpo-de-prova CP4 ensaiado sob tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa são apresentados respectivamente na Figura 5-7A e Figura 5-7B. Para esse mesmo corpo-de-prova, na fase de cisalhamento, tem-se o gráfico da tensão desviatória (Figura 5-8A), poro-pressão (Figura 5-8B) e variação volumétrica (Figura 5-8C) *versus* o deslocamento.

Analogamente, para o corpo-de-prova CP5, ensaiados sob s_3 igual a 100, 200 e 300 kPa e CP6, com s_3 igual a 200, 300 e 400 kPa tem-se, respectivamente, os gráficos com o resultado da saturação por contra pressão e adensamento na Figura 5-9, para o CP5 e na Figura 5-11, para o CP6.

Os resultados da fase de cisalhamento, que incluem o gráfico da tensão desviatória, poro-pressão e variação volumétrica *versus* deslocamento para o CP5 e CP6 estão apresentados na Figura 5-10 e na Figura 5-12 respectivamente.

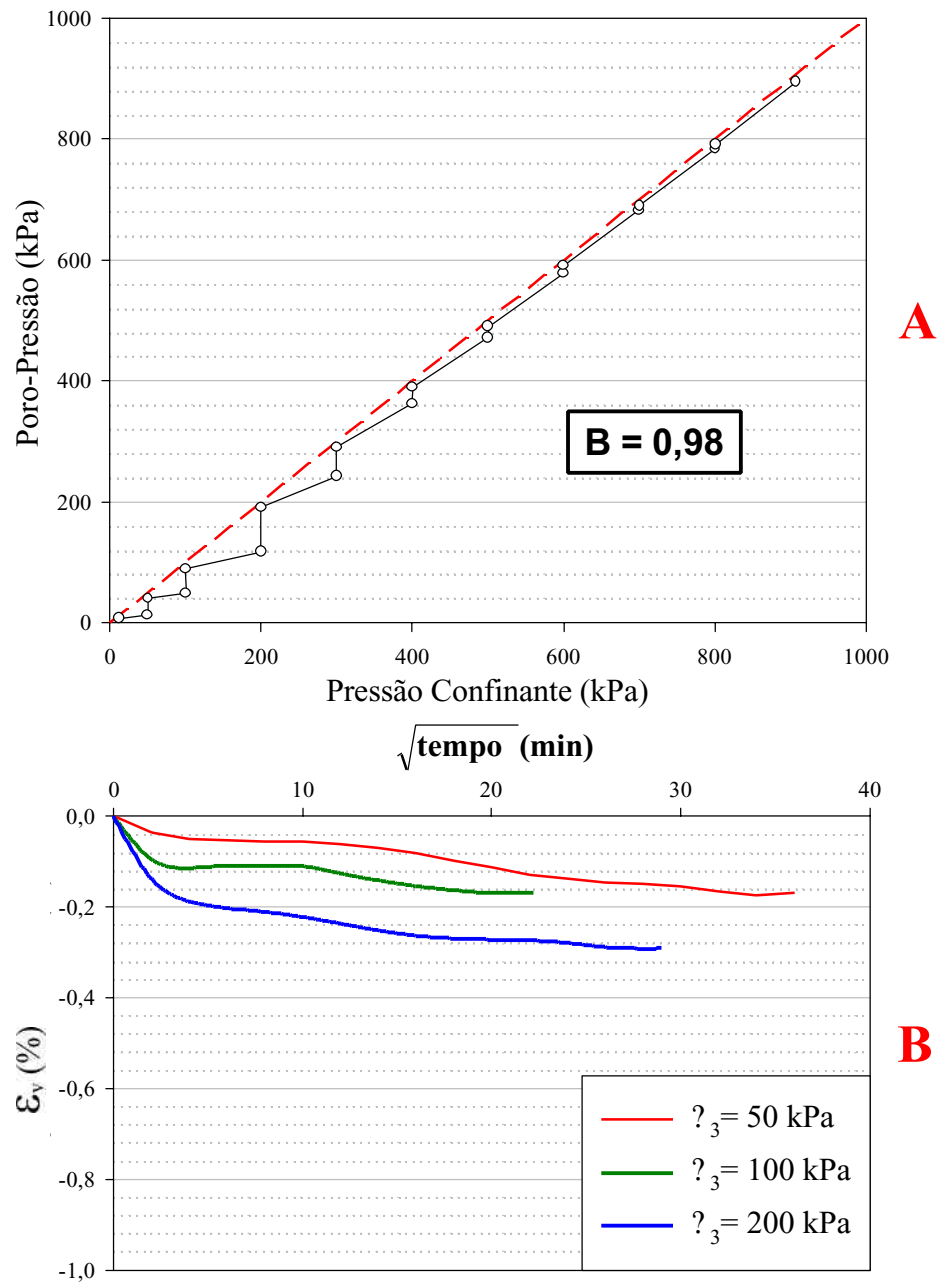


Figura 5-7 – (CP4) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

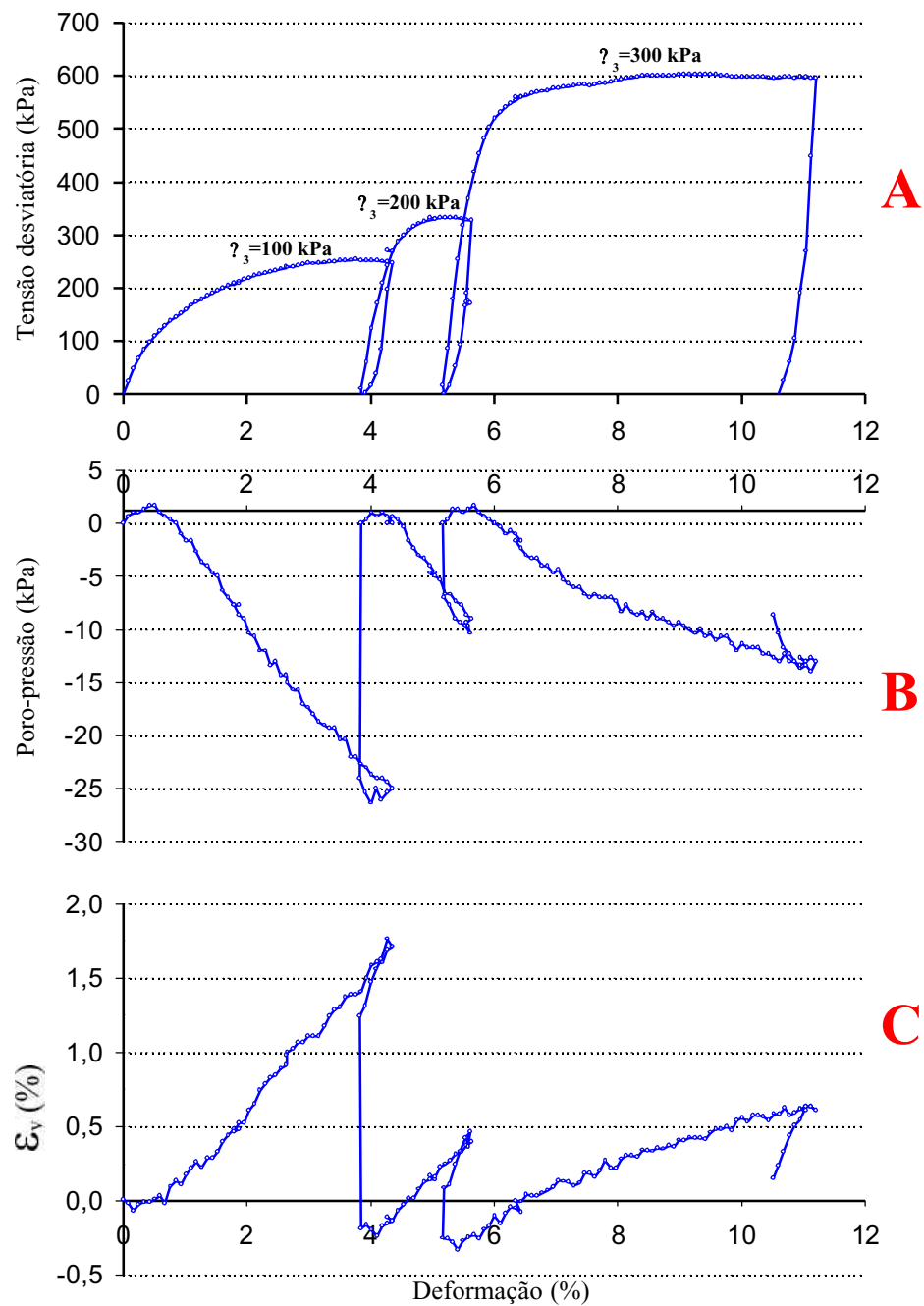


Figura 5-8 - (CP4) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

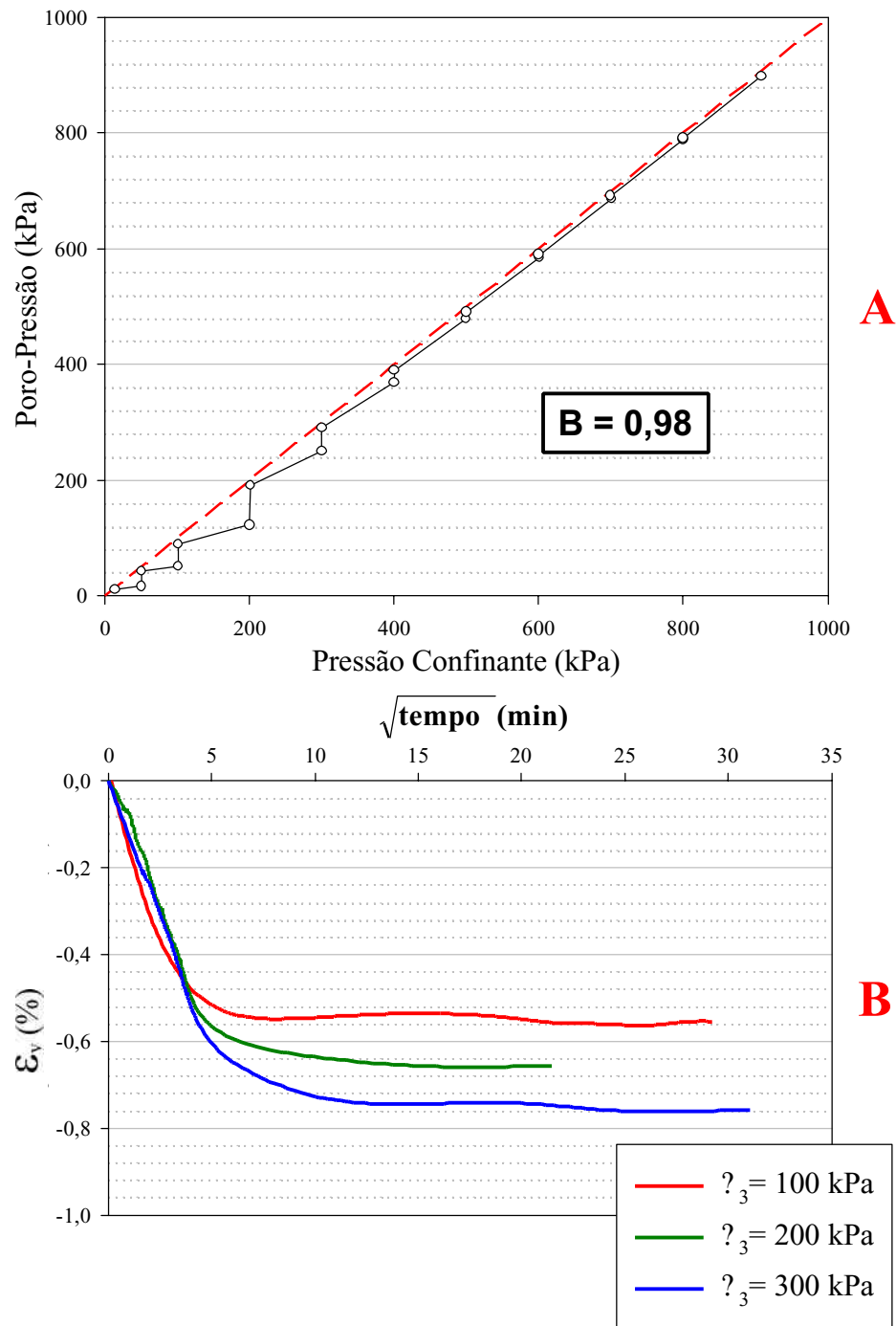


Figura 5-9 – (CP5) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

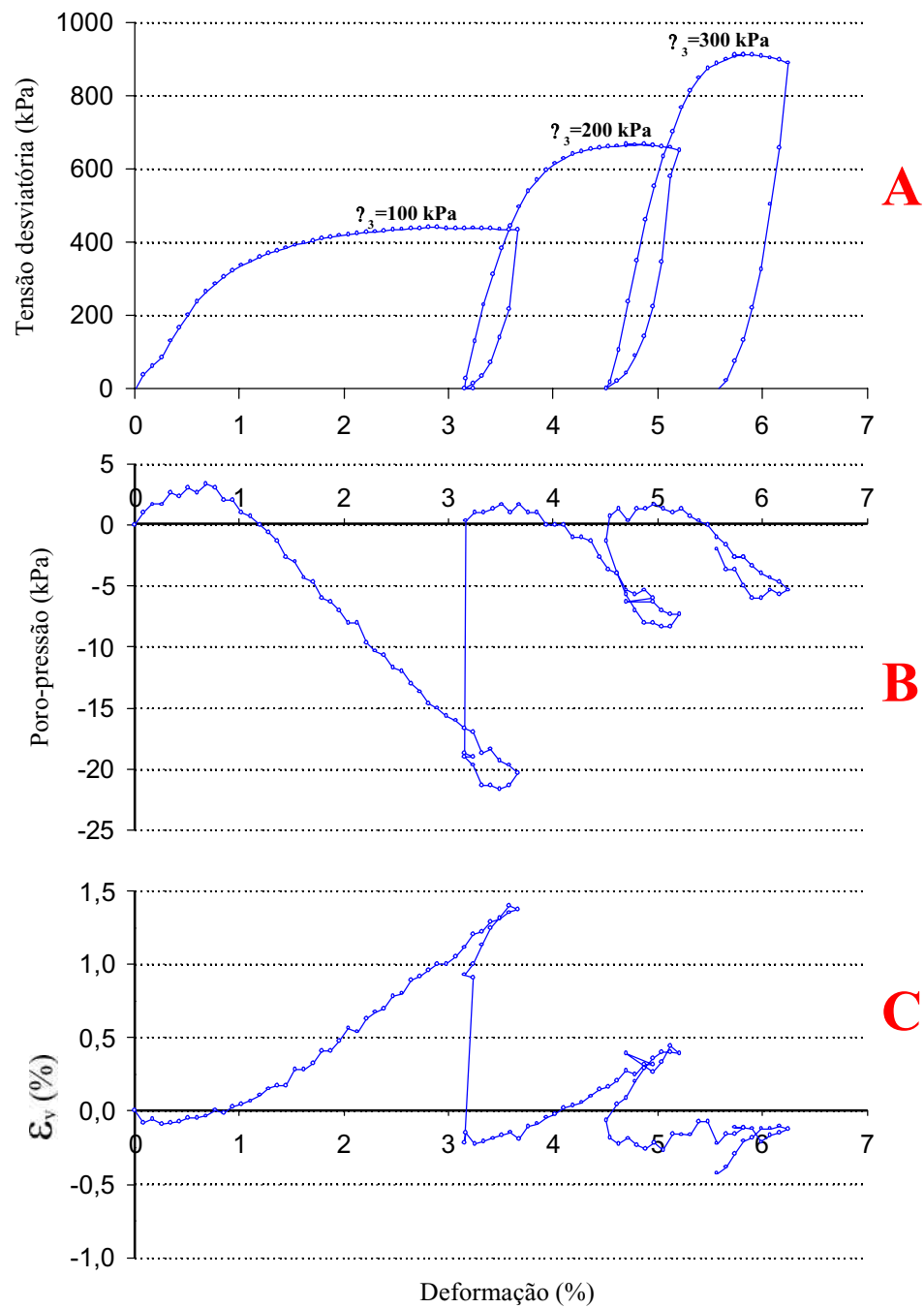


Figura 5-10 - (CP5) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

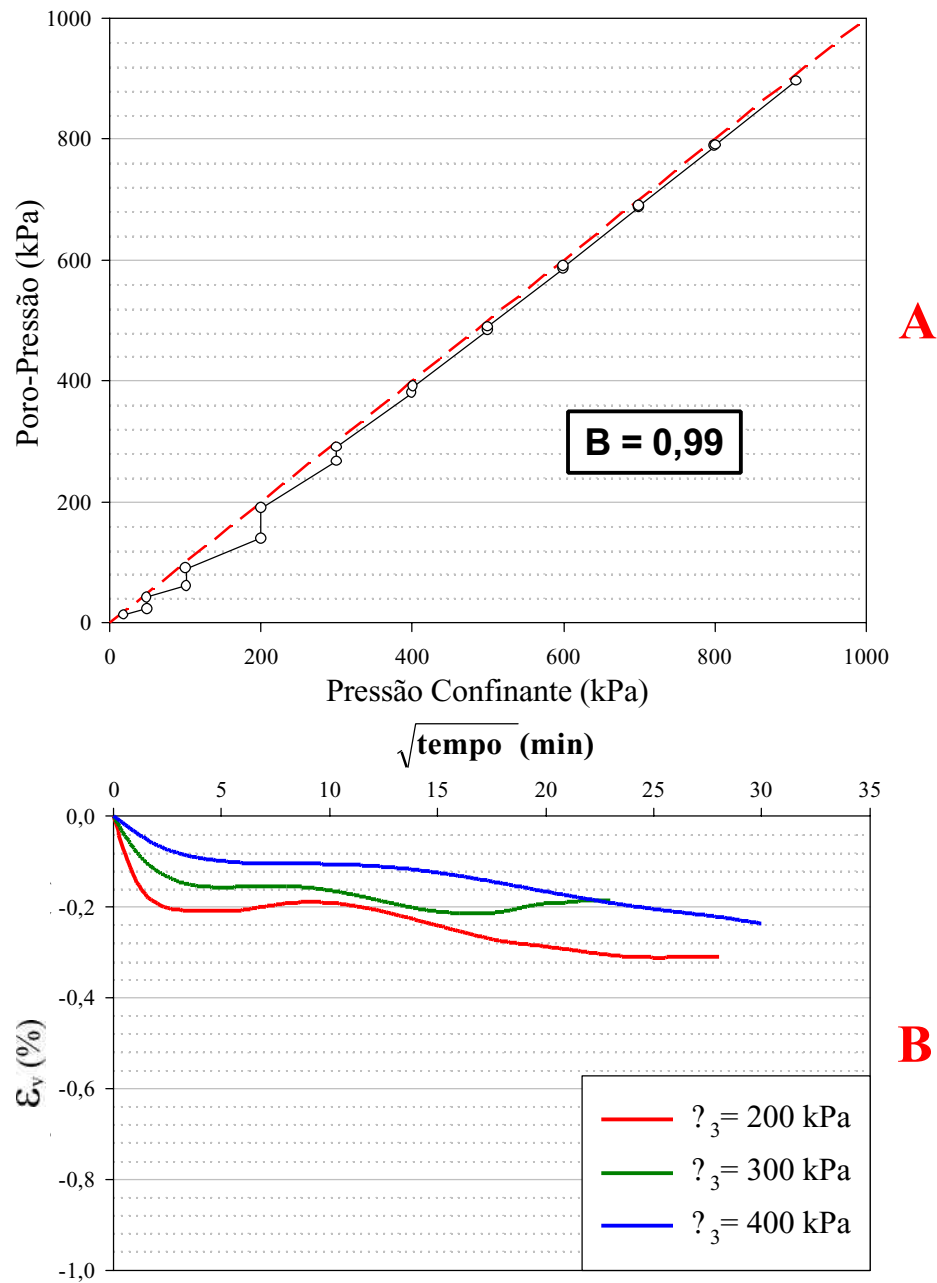


Figura 5-11 – (CP6) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

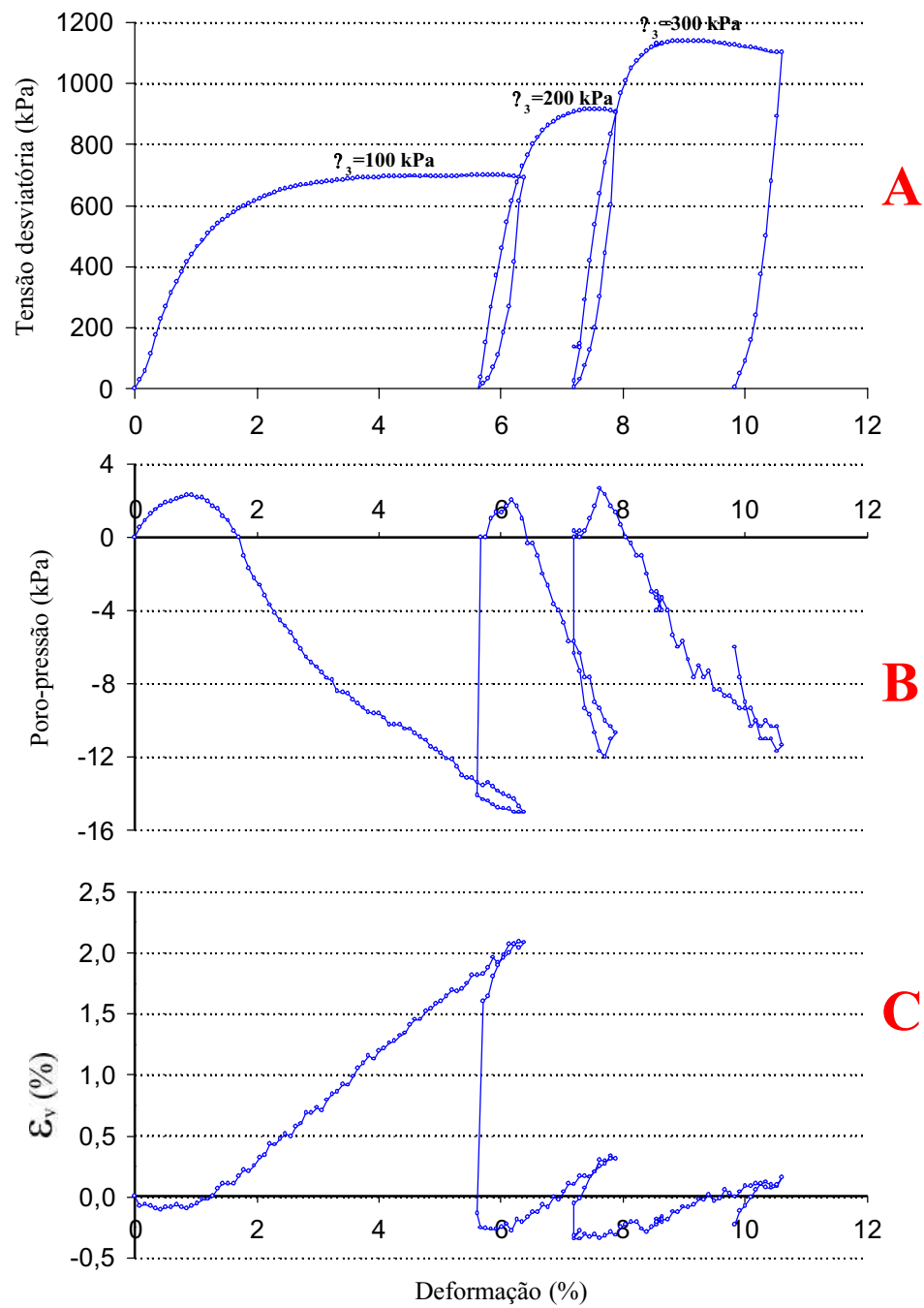


Figura 5-12 - (CP6) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 50mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

5.3 - SOLO CONTAMINADO COM SOLUÇÃO DE 300MG/L

Nesta série de ensaios os corpos-de-prova foram percolados com uma solução de 300 mg/l de cloreto de cobre aquoso, a ruptura para os três níveis de tensões aplicadas foi em forma de “barril”, sendo que para a tensão confinante de 50 kPa constatou-se uma superfície nítida de ruptura com aproximadamente 60° (fig ANEXO2).

O resultado da saturação por contra pressão e o da fase de adensamento do corpo-de-prova CP7 ensaiado sob tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa são apresentados respectivamente na Figura 5-13A e Figura 5-13B. Para esse mesmo corpo-de-prova, na fase de cisalhamento, tem-se o gráfico da tensão desviatória (Figura 5-14A), poro-pressão (Figura 5-14B) e variação volumétrica (Figura 5-14C) *versus* o deslocamento.

Analogamente, para o corpo-de-prova CP8, ensaiados sob s_3 igual a 100, 200 e 300 kPa e CP9, com s_3 igual a 200, 300 e 400 kPa tem-se, respectivamente, os gráficos com o resultado da saturação por contra pressão e adensamento na Figura 5-15, para o CP8 e na Figura 5-17, para o CP9.

Os resultados da fase de cisalhamento, que incluem o gráfico da tensão desviatória, poro-pressão e variação volumétrica *versus* deslocamento para o CP8 e CP9 estão apresentados na Figura 5-16 e na Figura 5-18 respectivamente.

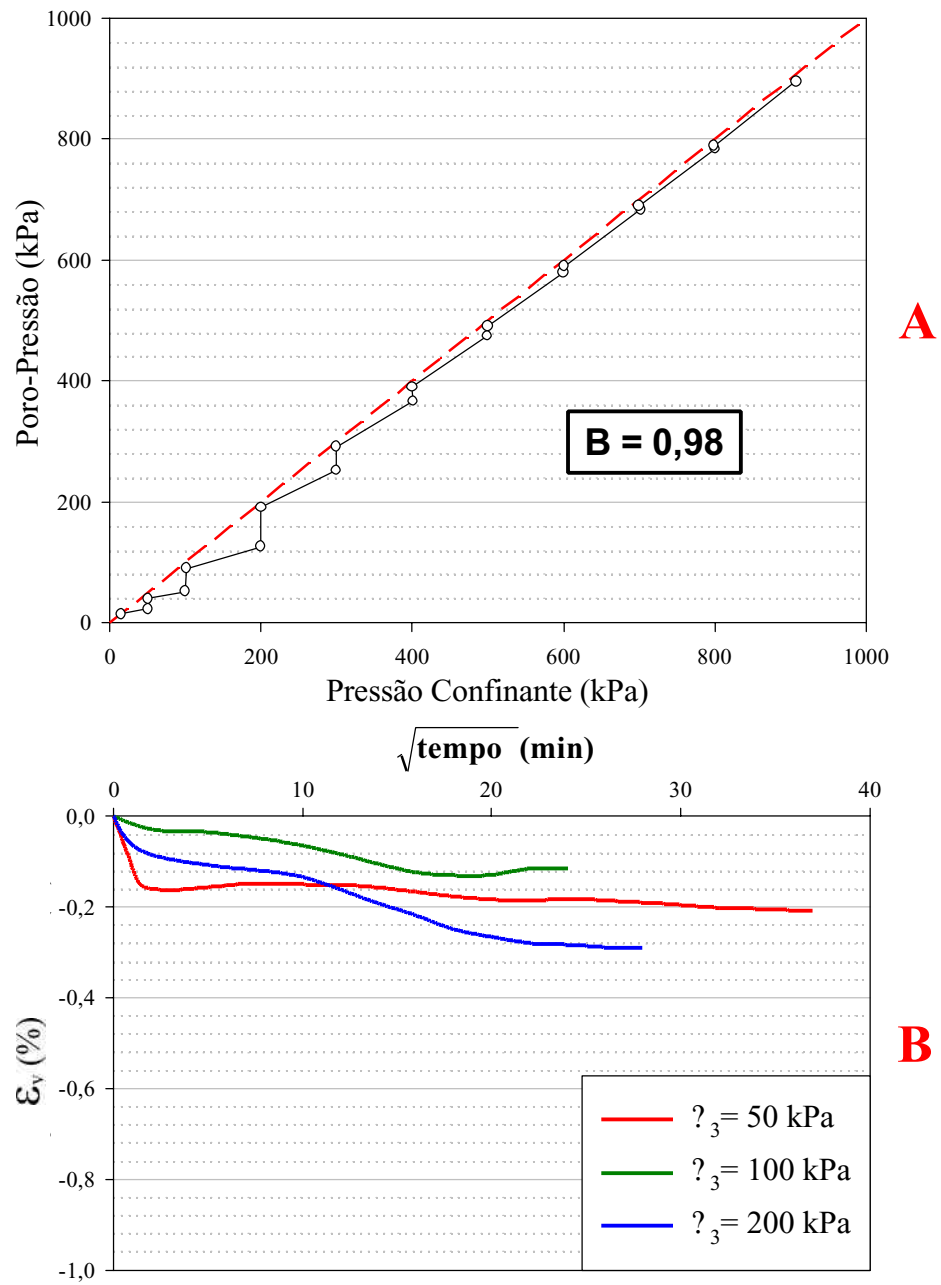


Figura 5-13 - (CP7) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

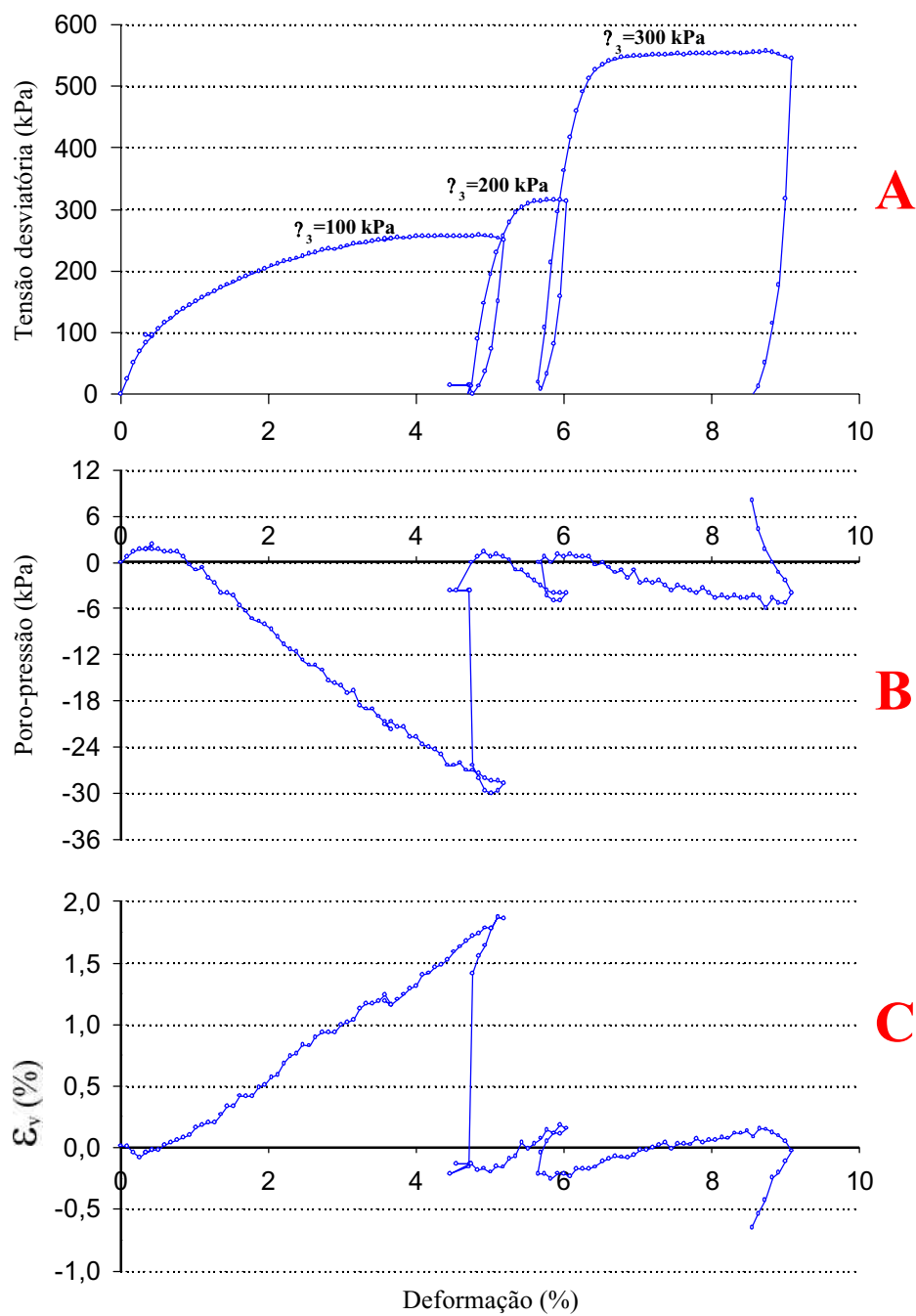


Figura 5-14 - (CP7) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

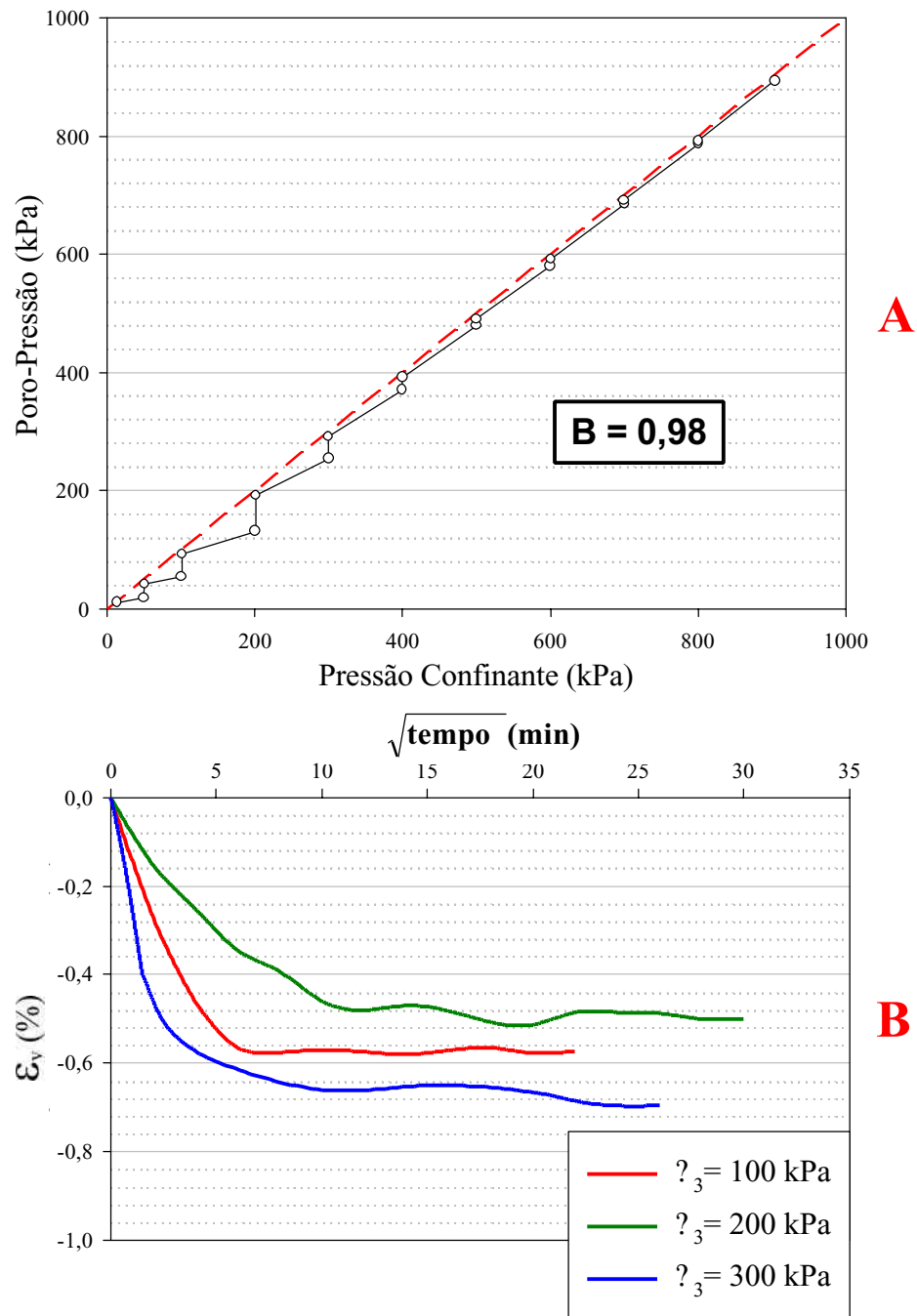


Figura 5-15 – (CP8) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

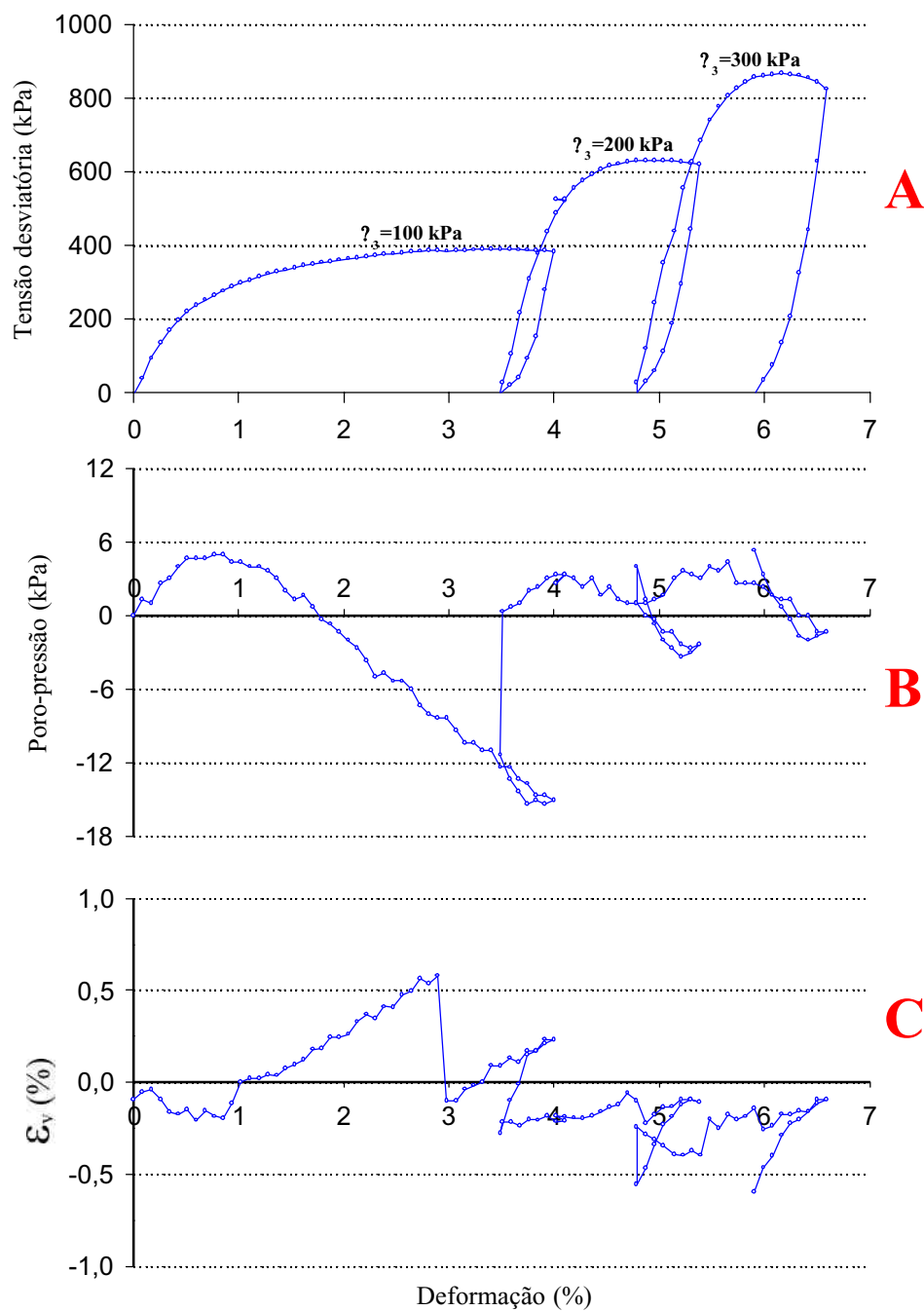


Figura 5-16 - (CP8) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

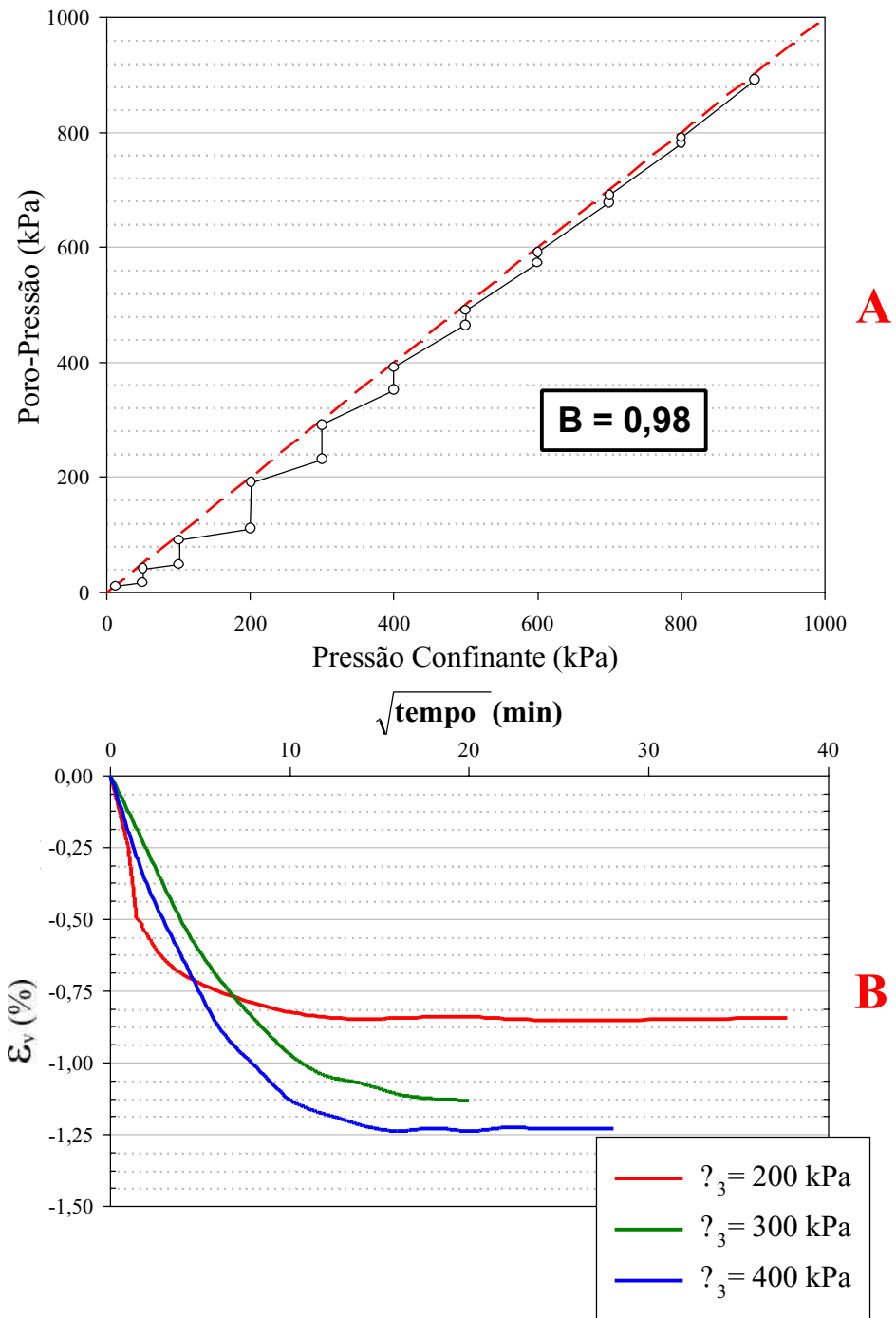


Figura 5-17 – (CP9) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

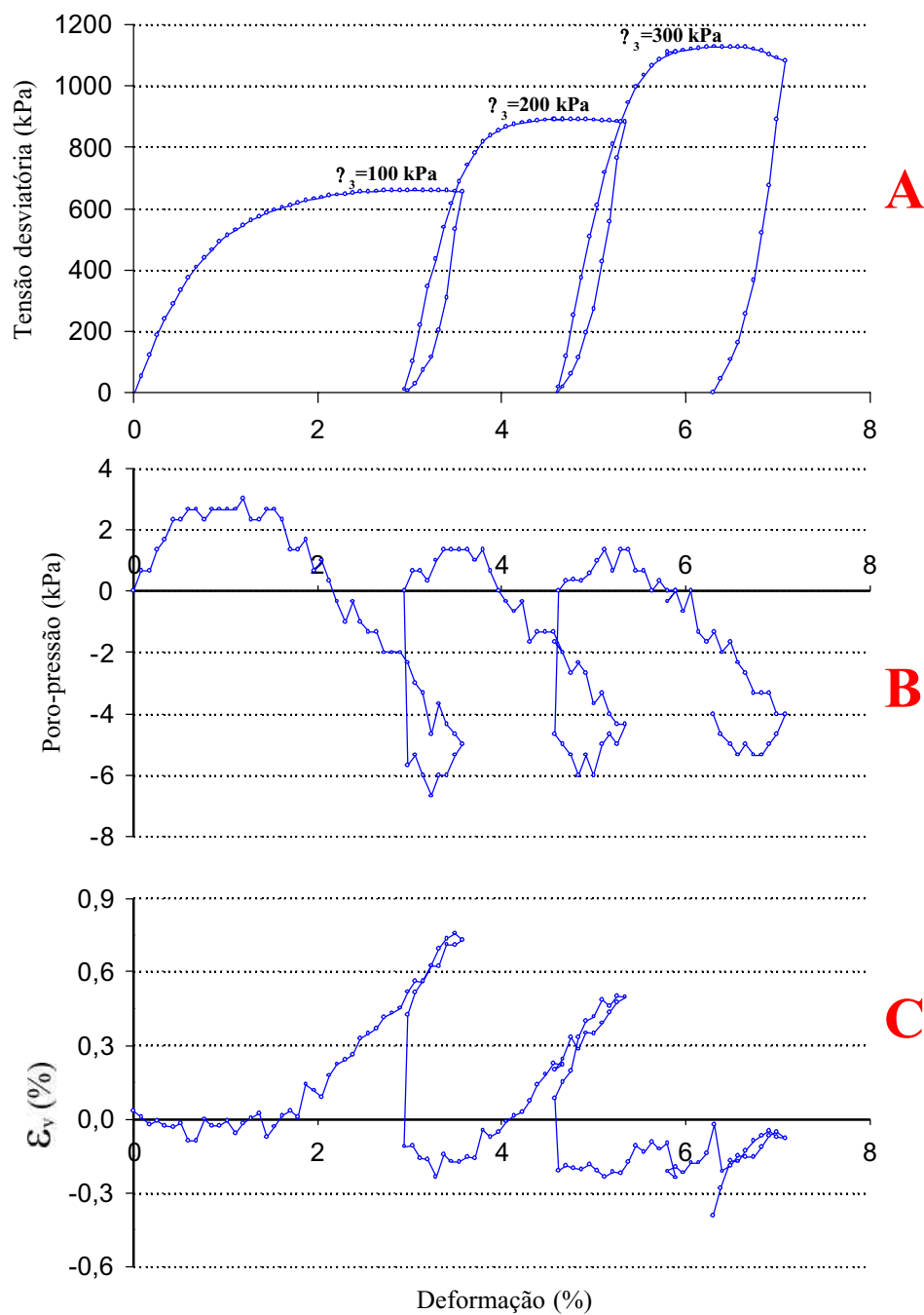


Figura 5-18 - (CP9) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 300mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

5.4 - SOLO CONTAMINADO COM SOLUÇÃO DE 600MG/L

Nesta série de ensaios os corpos-de-prova foram percolados com uma solução de 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso, a ruptura para os três níveis de tensões aplicadas foi em forma de “barril” e em nenhum dos corpos-de-prova ensaiados constatou-se uma superfície nítida de ruptura (fig ANEXO2).

O resultado da saturação por contra pressão e o da fase de adensamento do corpo-de-prova CP10 ensaiado sob tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa são apresentados respectivamente na Figura 5-19A e Figura 5-19B. Para esse mesmo corpo-de-prova, na fase de cisalhamento, tem-se o gráfico da tensão desviatória (Figura 5-20A), poro-pressão (Figura 5-20B) e variação volumétrica (Figura 5-20C) *versus* o deslocamento.

Analogamente, para o corpo-de-prova CP11, ensaiados sob s_3 igual a 100, 200 e 300 kPa e CP12, com s_3 igual a 200, 300 e 400 kPa tem-se, respectivamente, os gráficos com o resultado da saturação por contra pressão e adensamento na Figura 5-21, para o CP11 e na Figura 5-23, para o CP12.

Os resultados da fase de cisalhamento, que incluem o gráfico da tensão desviatória, poro-pressão e variação volumétrica *versus* deslocamento para o CP11 e CP12 estão apresentados na Figura 5-22 e na Figura 5-24 respectivamente.

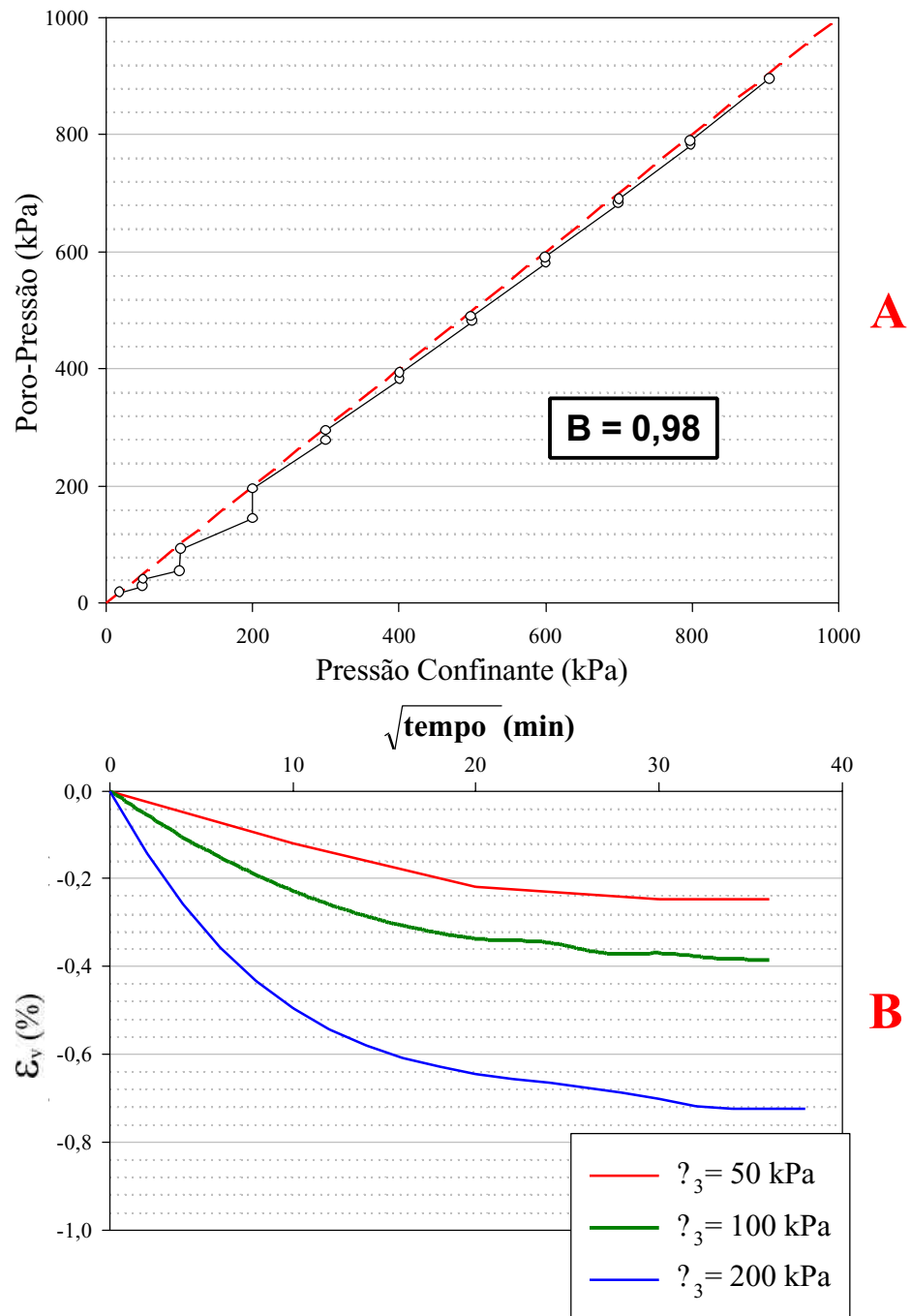


Figura 5-19 - (CP10) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

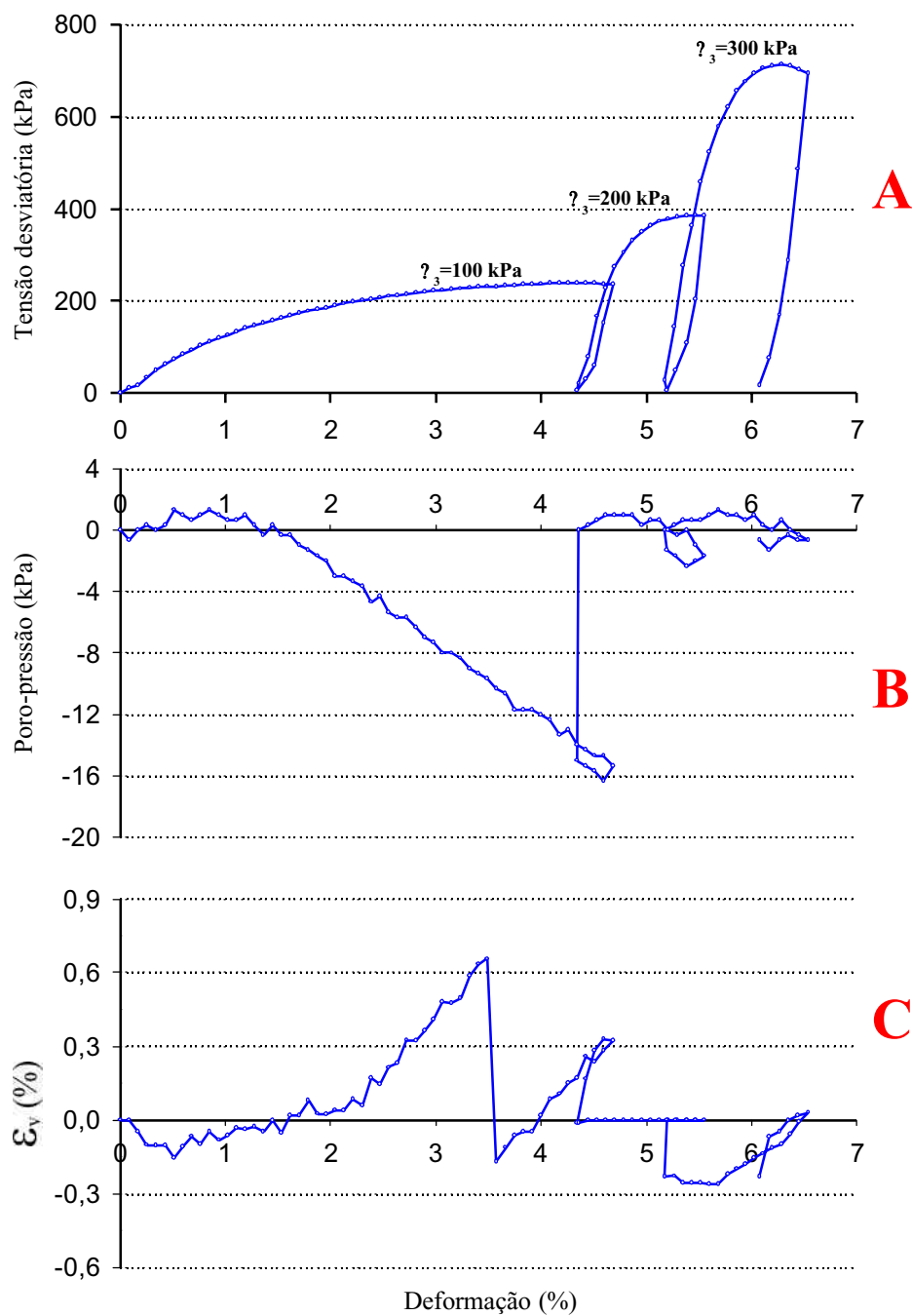


Figura 5-20 - (CP10) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

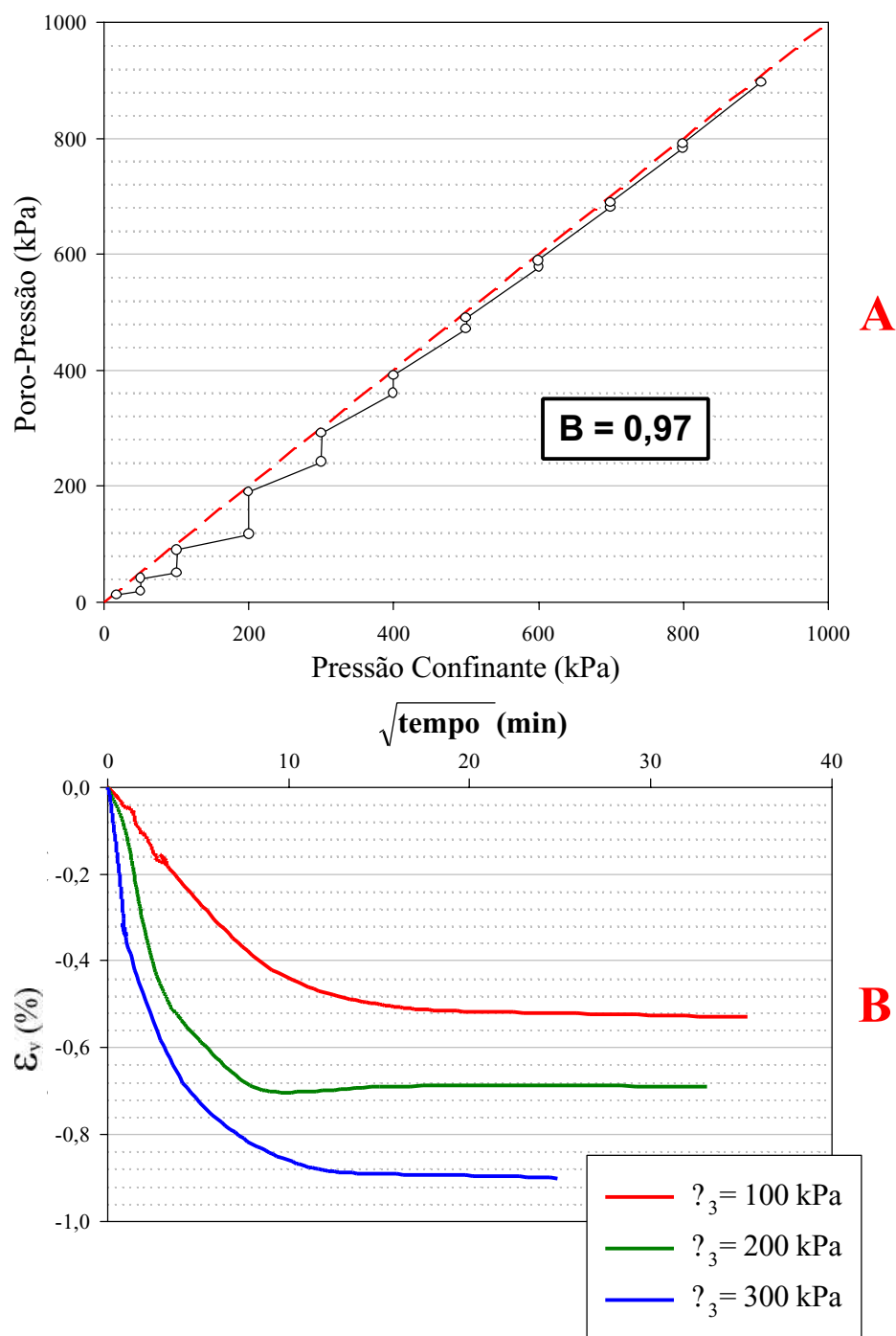


Figura 5-21 – (CP11) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

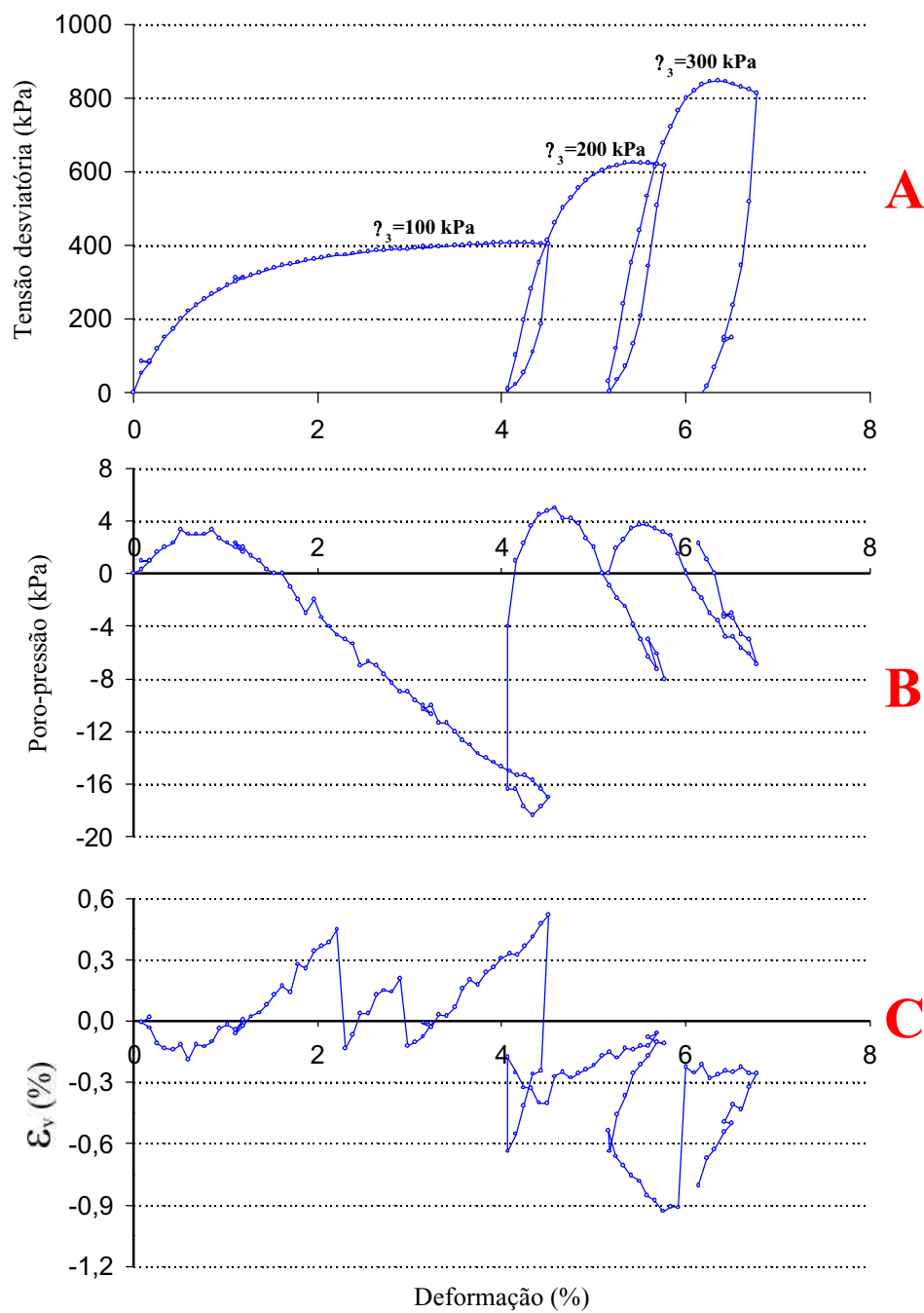


Figura 5-22 - (CP11) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

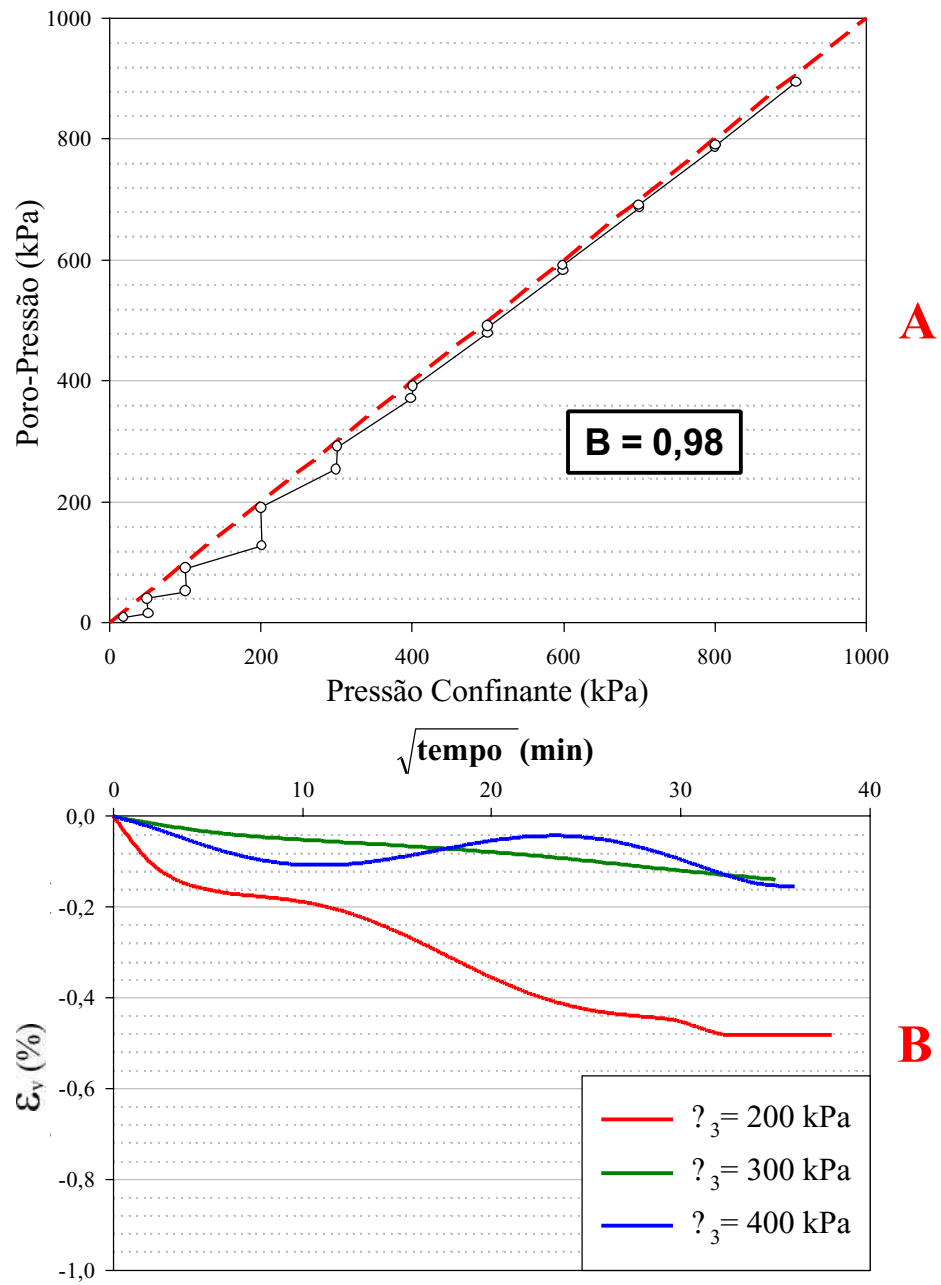


Figura 5-23 – (CP12) Resultado de ensaios triaxiais para solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Poro Pressão *versus* Pressão Confinante, (B) Variação Volumétrica *versus* Raiz do Tempo.

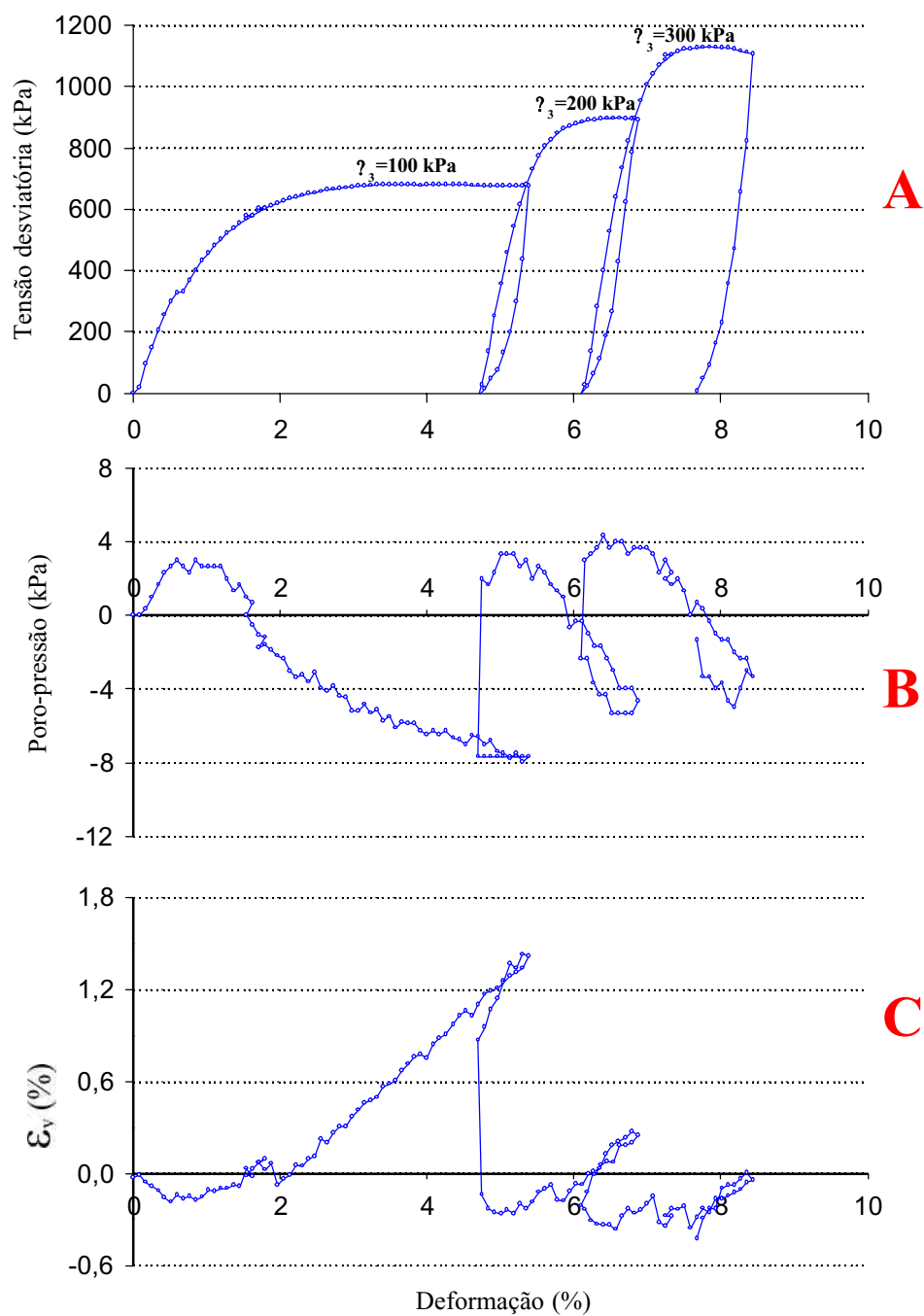


Figura 5-24 - (CP12) Resultados dos ensaios triaxiais para solo percolado com solução de 600mg/l de cloreto de cobre aquoso. (A) Tensão desviatória, (B) Poro Pressão e (C) Variação Volumétrica versus deformação.

Na Figura 5-25 apresenta-se a síntese dos resultados obtidos em termos da tensão desviatória *versus* a deformação para todos os corpos-de-prova ensaiados, ou seja, para o solo percolado com água destilada e para o solo percolado com solução de 50, 300 e 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso.

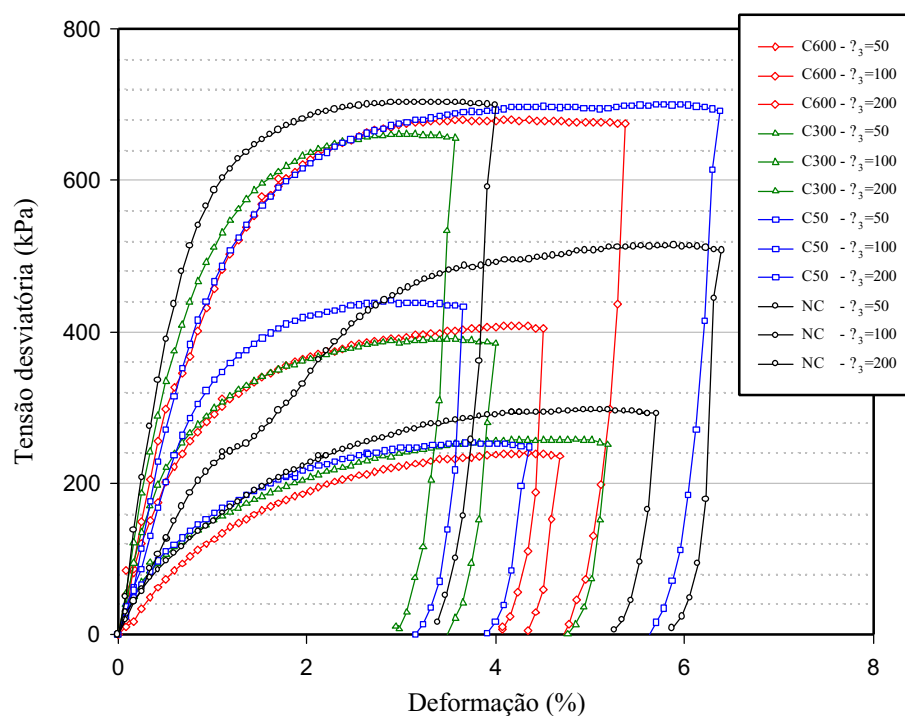


Figura 5-25 - Gráfico tensão desviatória *versus* deformação para todos os ensaios realizados.

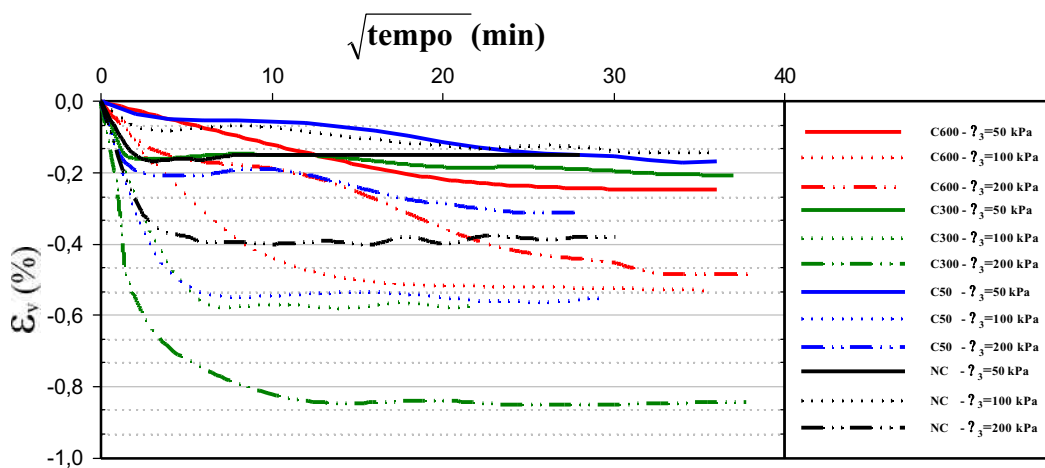


Figura 5-26 - Gráfico variação volumétrica específica *versus* a raiz quadrada do tempo para todos os ensaios realizados.

6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 - A TÉCNICA DO ENSAIO TRIAXIAL EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS

A fim de avaliar as diferenças entre os parâmetros de resistência e deformabilidade determinados através da técnica convencional e em múltiplos estágios os resultados obtidos a partir desse estudo serão comparados e discutidos a seguir.

6.1.1 - Solo Percolado com Água Destilada

6.1.1.1 Resistência

Os resultados de ensaios triaxiais realizados em corpos-de-prova de solo percolado com água destilada são apresentados na Figura 6-1. Tem-se apresentado na cor preta a curva tensão desviatória *versus* deformação para tensões de 50, 100 e 200 kPa do CP1, a curva para a tensão confinante de 100 kPa do CP2 na cor vermelha e a curva obtida para o CP3 com tensão confinante de 200 kPa na cor azul.

Na Figura 6-1 é possível observar diferenças significativas entre os valores máximos da tensão desviatória para os ensaios triaxiais convencionais e múltiplos estágios para as tensões confinantes de 100 e 200 kPa. Destaca-se que, para a tensão confinante de 100 kPa, calculando-se a diferença relativa entre a tensão de ruptura do ensaio triaxial em múltiplos estágios e a tensão de ruptura do

ensaio triaxial convencional, houve uma diminuição de 33%. Já, para a tensão confinante de 200 kPa, essa redução foi de 15%.

Também para demonstrar a influência do ensaio triaxial em múltiplos estágios na tensão de ruptura, tem-se na Figura 6-2, os resultados obtidos para tensão confinante de 200 kPa para diferentes estágios de um ensaio triaxial. Observa-se, nessa figura, a redução na tensão de ruptura do 2º estágio, a qual se torna mais pronunciada no 3º estágio.

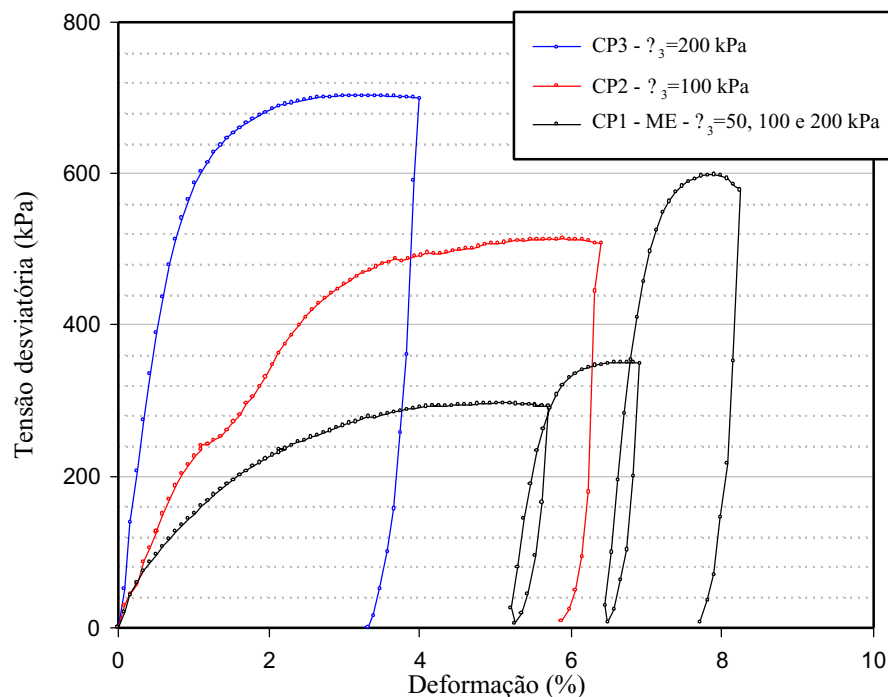
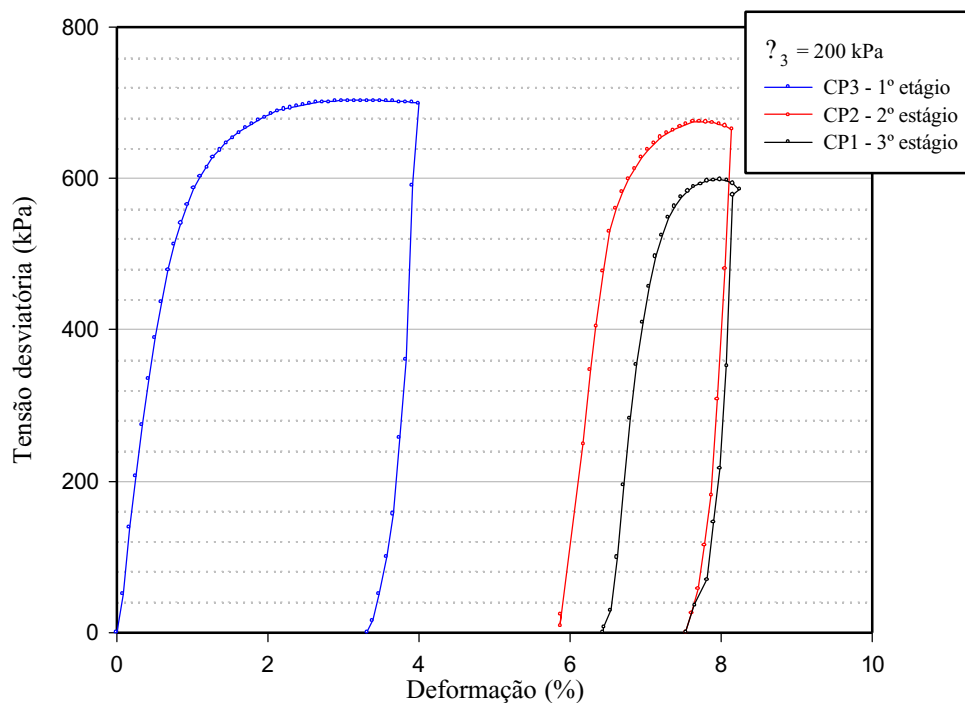


Figura 6-1 - Gráfico Tensão Desviatória *versus* deformação. Resultados do ensaio triaxial em múltiplos estágios do primeiro corpo-de-prova e resultados dos primeiros estágios do segundo e terceiro corpos-de-prova. Solo percolado com água destilada.



**Figura 6-2 - Resultado de ensaios triaxiais em múltiplos estágios sob confinante de 200 kPa.
Solo percolado com água destilada.**

Na Figura 6-3 tem-se as envoltórias em termos de tensões efetivas obtidas a partir de um ensaio triaxial em múltiplos estágios e dos ensaios triaxiais convencionais. Observa-se, que o ângulo de atrito foi de $37,5^\circ$ a partir dos ensaios convencionais (Figura 6-3A) enquanto no ensaio em múltiplos estágios obteve-se um valor muito menor, igual a $33,2^\circ$ (Figura 6-3B). Já, o intercepto de coesão teve seu valor aumentado de 19 para 26 kPa, quando se compara o ensaio triaxial convencional com o ensaio triaxial em múltiplos estágios.

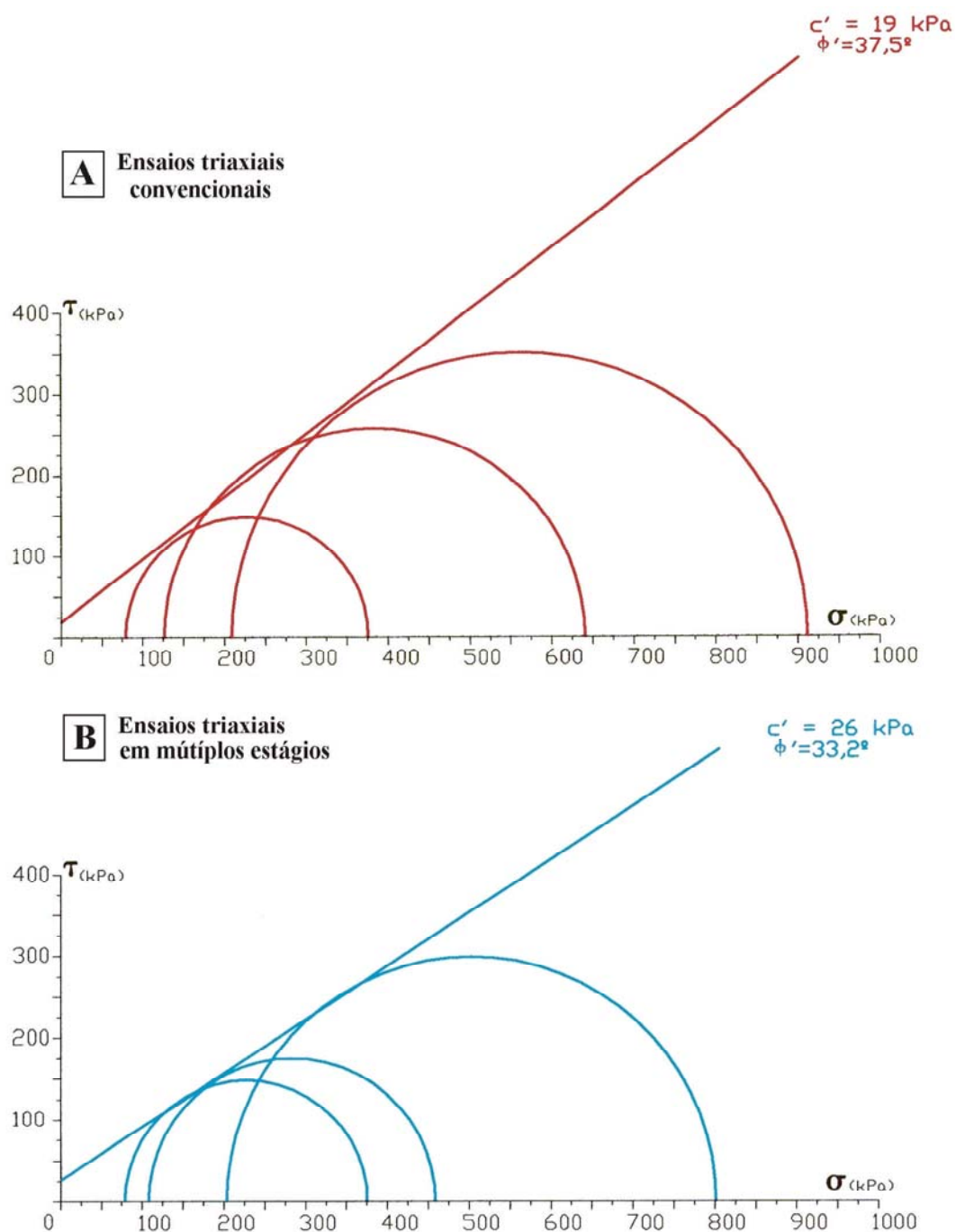


Figura 6-3 - Determinação da envoltória de resistência em termos de tensões efetivas (A) a partir de ensaios triaxiais convencionais e (B) a partir de um ensaio triaxial em múltiplos estágios.

6.1.1.2 Deformabilidade

Na Tabela 6-1 tem-se os valores dos módulos de deformabilidade (E_{50}) obtidos a partir do ensaio triaxial convencional e a partir do ensaio triaxial em múltiplos estágios.

Nota-se, nessa tabela, que para a tensão confinante de 100 kPa o segundo estágio do ensaio triaxial em múltiplos estágios levou a um aumento na rigidez do solo, que era de 19 MPa e passou para 76 MPa. Já, para a tensão confinante de 200 kPa, o módulo E_{50} era de 76 MPa no ensaio triaxial convencional e passou para 105 MPa.

Tabela 6-1 - Módulo de deformabilidade determinado a partir do ensaio triaxial convencional e em múltiplos estágios.

σ_3 (kPa)	E_{50} ensaio convencional (MPa)	E_{50} múltiplos estágios (MPa)	Diferença relativa (%)
50	15	*	*
100	19	76	300
200	76	105	38

* valor não determinado

6.1.2 - Algumas Considerações Sobre a Técnica do Ensaio Triaxial em Múltiplos Estágios

Os resultados apresentados mostram diferenças significativas tanto para a curva tensão *versus* deformação como para os parâmetros de resistência do solo estudado quando se utiliza a técnica de ensaio triaxial em múltiplos estágios ao invés da técnica do ensaio triaxial convencional. O emprego

da técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios levou a uma redução no ângulo de atrito e um acréscimo na coesão do solo compactado e percolado com água destilada. Isso se deve a ruptura provocada em cada estágio previamente realizado, conforme demonstrado na Figura 6-1 e na Figura 6-2.

Quando se compara os valores de E_{50} determinados a partir do ensaio triaxial convencional com aquele determinado a partir do ensaio triaxial em múltiplos estágios, observa-se um aumento da rigidez do solo mais pronunciado para a tensão confinante de 100 kPa, onde o valor do E_{50} do múltiplo estágio foi quatro vezes maior que o valor do E_{50} do ensaio convencional.

Assim, a técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios só pode ser considerada uma alternativa interessante no estudo da resistência de solos quando é praticamente impossível se obter amostras em quantidade suficiente, em situações de projeto onde é necessário uma avaliação preliminar dos parâmetros de resistência.

Por estas razões optou-se, nesse trabalho, em considerar apenas os resultados de ensaios triaxiais convencionais para avaliar o efeito da contaminação na resistência e deformabilidade do solo estudado.

6.2 - INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO NA RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DO SOLO ESTUDADO

6.2.1 - Trajetória de Tensões

Apresenta-se na Figura 6-4 as trajetórias de tensões para o solo percolado com água destilada e para o solo percolado com diferentes concentrações da solução de cloreto de cobre aquoso.

Observa-se, nessa figura, as mesmas trajetórias de tensões para o solo percolado com água destilada e para o solo percolado com as diferentes concentrações da solução de cloreto de cobre aquoso, para as mesmas tensões confinantes, o que possibilita a comparação entre os resultados dos ensaios triaxiais realizados.

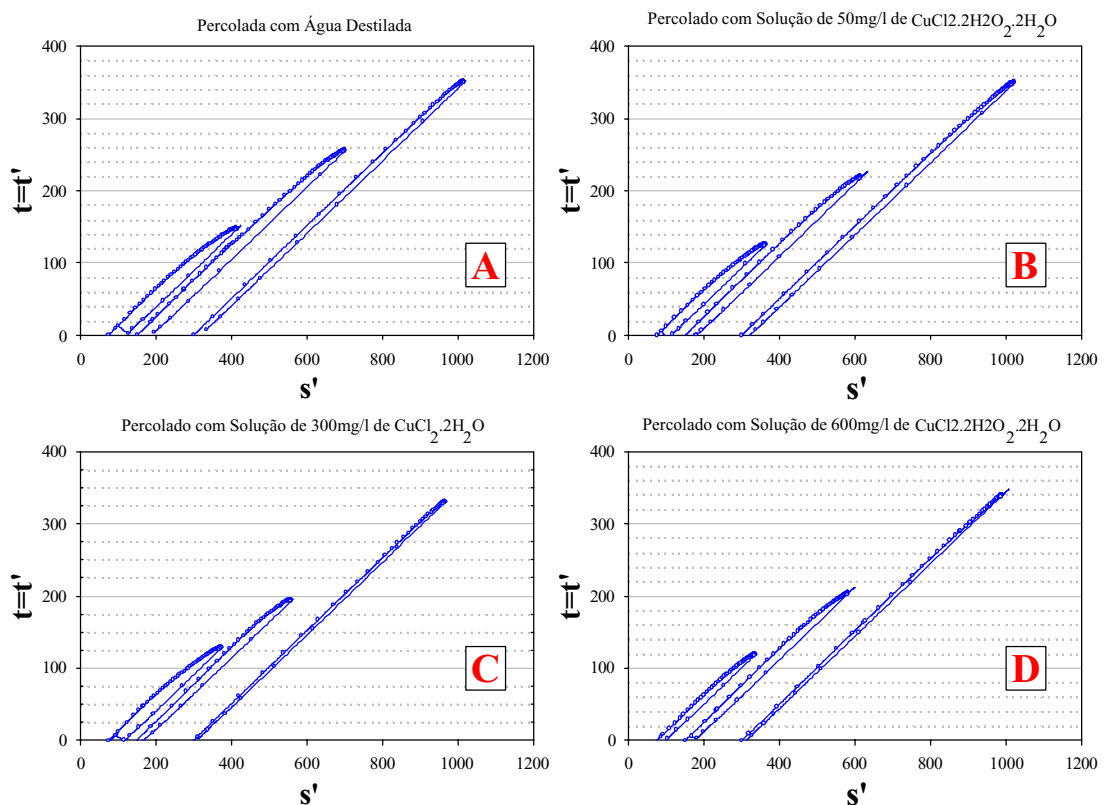


Figura 6-4 - Trajetórias de tensões em termos de tensões efetivas.

6.2.2 - Resistência

A Figura 6-5, Figura 6-6 e Figura 6-7 mostram os gráficos da tensão desviatória *versus* deformação respectivamente para as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa.

Pode-se observar, na Figura 6-5 e na Figura 6-6, uma redução na resistência com o aumento da concentração da solução de cloreto de cobre aquoso para as pressões confinantes de 50 e 100 kPa, o que praticamente não ocorreu sob a pressões confinante de 200 kPa (Figura 6-7).

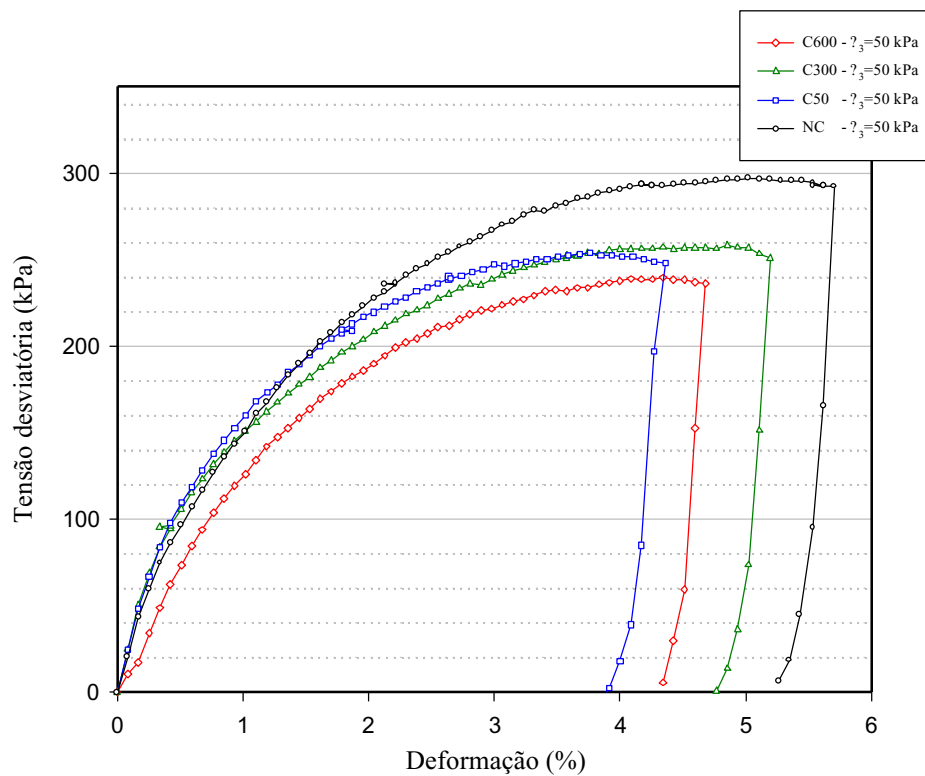


Figura 6-5 - Gráfico tensão desviatória *versus* deformação sob confinante de 50 kPa para todos os ensaios realizados.

Na Tabela 6-2 apresenta-se a síntese dos resultados dos ensaios triaxiais realizados, ou seja: parâmetro B, tensões confinantes (s_3) e tensões de ruptura ($s_{1 \text{ ruptura}}$) para cada um dos estágios de cada corpo-de-prova ensaiado.

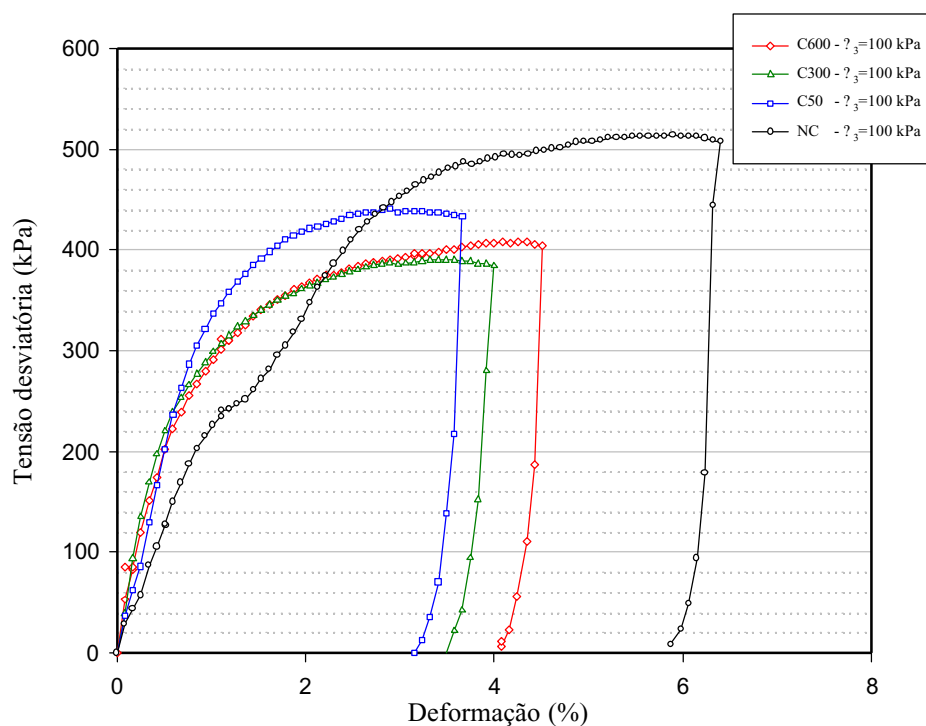


Figura 6-6 - Gráfico tensão desviatória *versus* deformação sob confinante de 100kPa para todos os ensaios realizados.

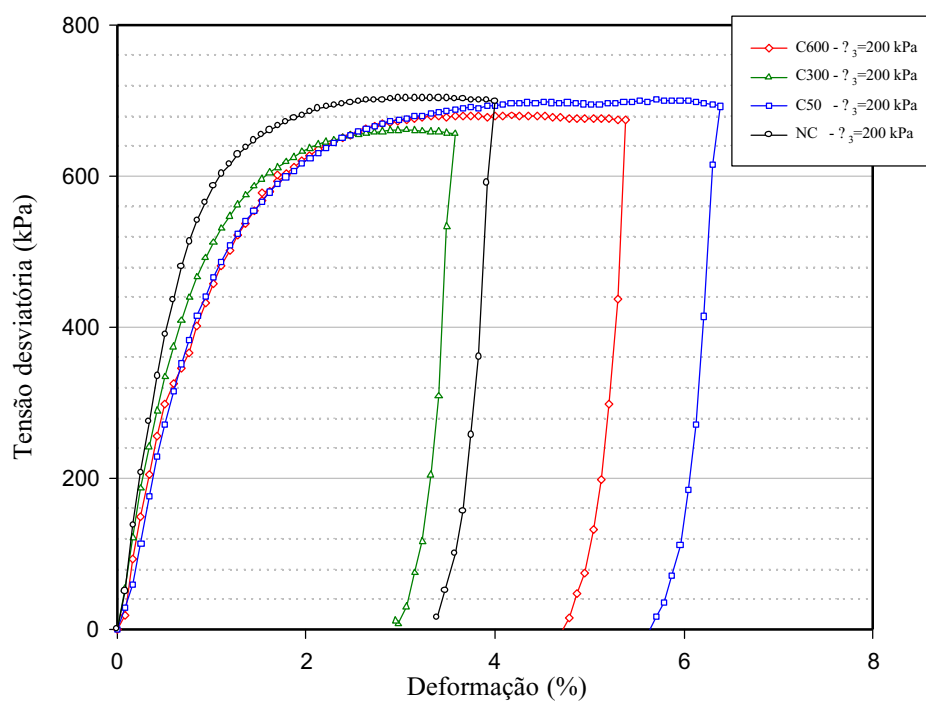


Figura 6-7 - Gráfico tensão desviatória *versus* deformação sob confinante de 200kPa para todos os ensaios realizados.

As variações volumétricas dos corpos-de-prova durante o cisalhamento apresentado na Figura 5-2 C para o solo percolado com água destilada, que é representativo do comportamento dos corpos-de-prova contaminados, indicam uma pequena compressão no início do ensaio, passando a expandir com o acréscimo de tensões. Esse comportamento é característico de solos arenosos compactados que dilatam quando rompem.

A partir da Tabela 6-2, comparando-se os valores da tensão de ruptura ($\sigma_1'_{ruptura}$) para o solo percolado com água destilada com os valores determinados para solo percolado com 50 mg/l da solução de cloreto de cobre aquoso, observa-se uma redução da ordem de 13% para as tensões confinantes de 50 e 100 kPa, o que praticamente não ocorre para a tensão confinante de 200 kPa.

Tabela 6-2 - Síntese dos resultados dos ensaios triaxiais em múltiplos estágios realizados.

CP Nº	Concentração da Solução de Cu Cl ₂ . 2H ₂ O percolada (mg/l)	B	σ_3 (kPa)	$\sigma_1'_{ruptura}$ (kPa)	Diferença relativa $\sigma_1'_{ruptura}$ (%)
CP1	0	0,99	50	375,7	0,0
CP2		0,98	100	640,3	0,0
CP3		0,98	200	911,8	0,0
CP4	50	0,98	50	326,0	-13,2
CP5		0,98	100	557,1	-13,0
CP6		0,99	200	915,0	0,4
CP7	300	0,98	50	336,4	-10,5
CP8		0,98	100	503,4	-21,4
CP9		0,98	200	865,2	-5,1
CP10	600	0,98	50	299,0	-20,4
CP11		0,97	100	523,8	-18,2
CP12		0,98	200	887,2	-2,7

Da mesma maneira, comparando-se os valores de s_1' ruptura para o solo percolado com água destilada com os valores determinados para o solo percolado com 300 mg/l da solução de cloreto de cobre aquoso, observa-se uma redução na tensão de ruptura de 10,5 % para a tensão confinante de 50 kPa e de 21,4 % para a tensão confinante de 100 kPa, diferença essa muito menor para a tensão confinante de 200 kPa, apenas de -5,1 %.

Comparando-se os valores de s_1' ruptura para o solo percolado com água destilada com os valores determinados para o solo percolado com 600 mg/l da solução de cloreto de cobre aquoso, observa-se uma redução de 20,4 % para a tensão confinante de 50 kPa e uma redução de 18,2 % para a confinante de 100 kPa. Para a tensão confinante de 200 kPa, praticamente não houve diminuição, já que a diferença relativa foi de apenas -2,7 %.

Nota-se portanto, uma redução mais pronunciada na tensão de ruptura provocada pela contaminação quando os corpos-de-prova foram confinados com 50 e 100 kPa.

A fim de avaliar o efeito da contaminação nos parâmetros de resistência do solo estudado tem-se, nas Figura 6-8, Figura 6-9, Figura 6-10 e Figura 6-11, as envoltórias de resistência determinadas a partir dos primeiros estágios de cada ensaio triaxial realizado, respectivamente nos corpos-de-prova percolados com água destilada, 50, 300 e 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso.

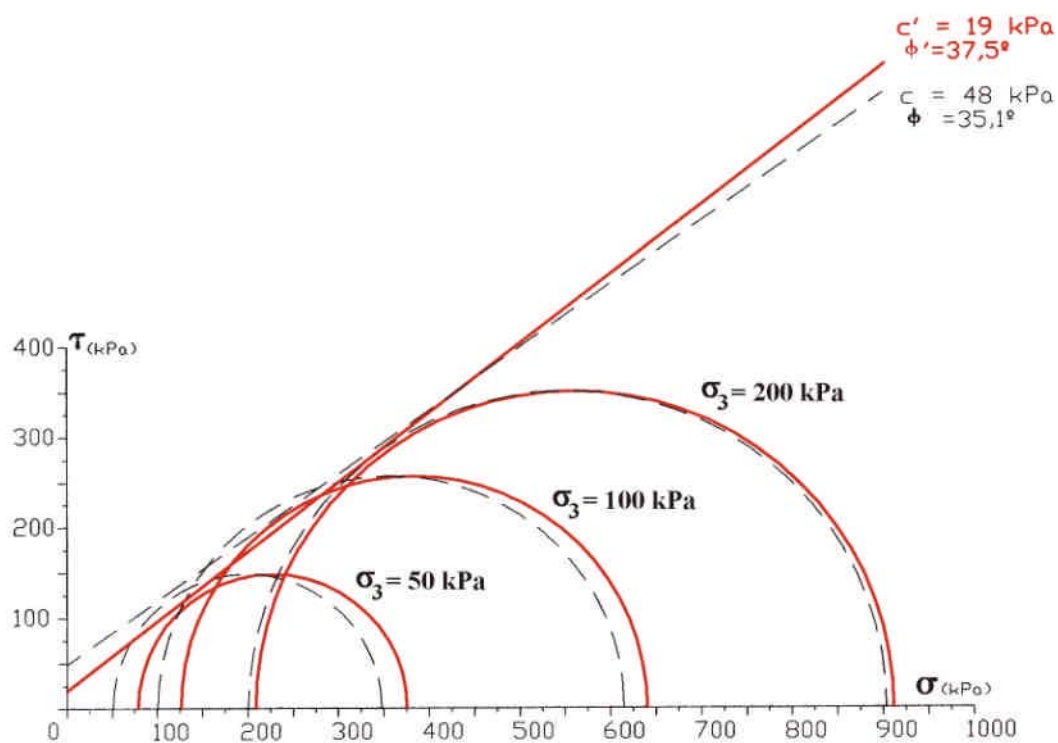


Figura 6-8 – Envolvórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com água destilada.

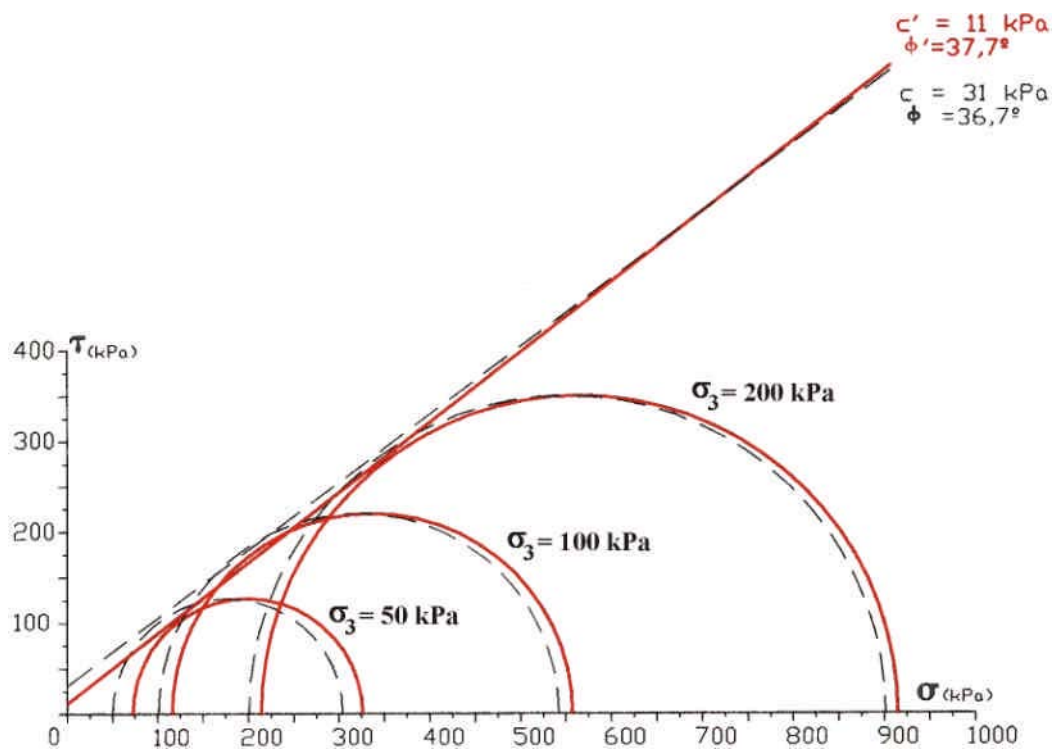


Figura 6-9 - Envolvórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com 50mg/l de cloreto de cobre aquoso.

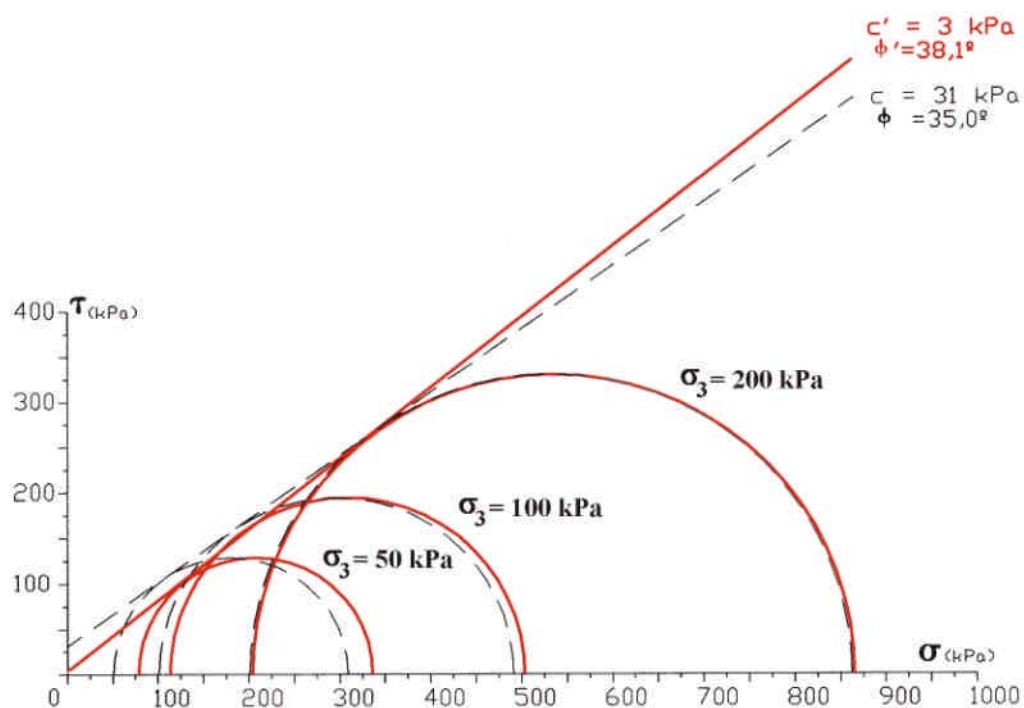


Figura 6-10 – Envoltórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com 300mg/l de cloreto de cobre aquoso.

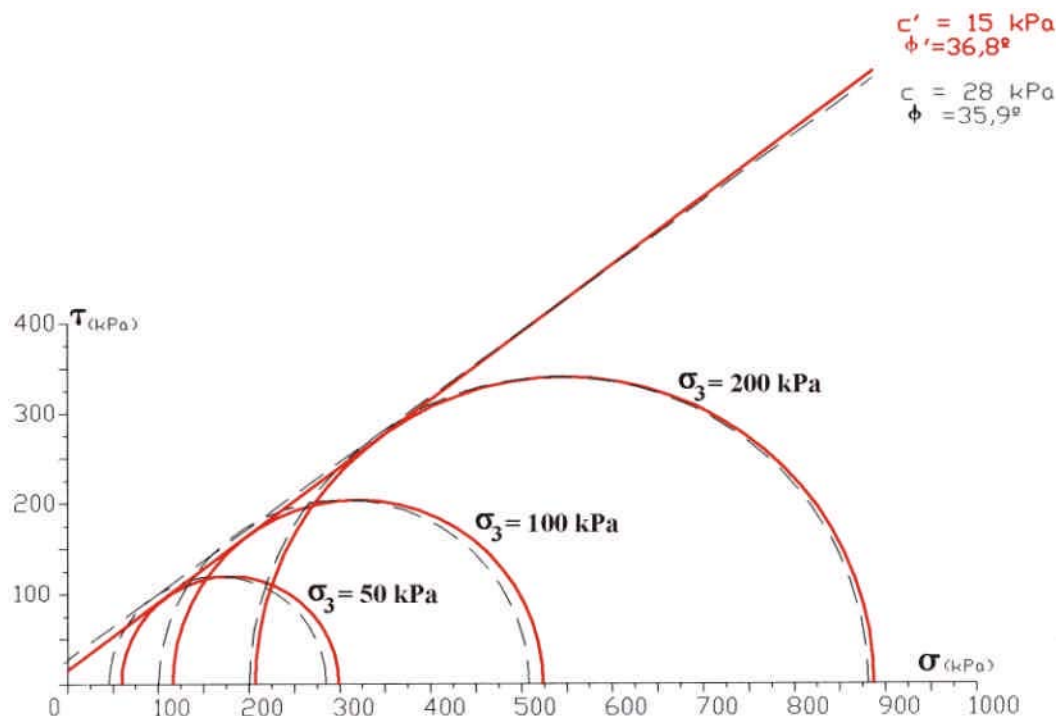


Figura 6-11 – Envoltórias de resistência em termos de tensões totais (preto) e efetivas (vermelho). Solo percolado com 600mg/l de cloreto de cobre aquoso.

Na Tabela 6-3 apresenta-se a síntese dos valores de coesão e ângulo de atrito obtidos a partir das envoltórias de resistência em termos de tensões totais e efetivas. Determinadas para o solo ensaiado sob diferentes níveis de contaminação

Nota-se, pela Tabela 6-3, que houve uma diminuição do valor da coesão efetiva, de 19 para 11 kPa enquanto o valor do ângulo de atrito efetivo praticamente permaneceu constante quando se compara o solo percolado com água destilada com o solo percolado com solução de 50 mg/l de cloreto de cobre aquoso. O solo percolado com solução de 300 mg/l de cloreto de cobre aquoso apresentou uma redução no valor da coesão efetiva de 19 para 3 kPa e o ângulo de atrito variou muito pouco, já que era 37,5 e passou para 38,1°, quando comparado com o solo percolado com água destilada. Com relação ao solo percolado com 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso, tanto a coesão como o ângulo de atrito efetivo quase não variaram, uma vez que a coesão efetiva era 19 e passou para 15 kPa e o ângulo de atrito era 37,5 e passou para 36,8°.

Tabela 6-3 - Síntese dos valores da coesão e do ângulo de atrito para o solo ensaiado sob diferentes níveis de contaminação.

	c (kPa)	ϕ (graus)	c' (kPa)	ϕ' (graus)
Percolado com Água Destilada	48	35,1	19	37,5
Percolado com Solução de 50 mg/l de Cu Cl₂ . 2H₂O	31	36,7	11	37,7
Percolado com Solução de 300 mg/l de Cu Cl₂ . 2H₂O	31	35,0	3	38,1
Percolado com Solução de 600 mg/l de Cu Cl₂ . 2H₂O	28	35,9	15	36,8

Destaca-se, portanto, que houve uma redução mais significativa da coesão efetiva para o solo percolado com a concentração de 50 mg/l e 300 mg/l de cloreto de cobre aquoso, o mesmo não ocorrendo para o solo percolado com 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso. O ângulo de atrito efetivo praticamente não sofreu alteração significativa em todas as situações estudadas.

6.2.3 - Deformabilidade

Na Tabela 6-4 apresentam-se os valores do módulo de deformabilidade secante a 50 % da tensão de ruptura (E_{50}) e as diferenças relativas do módulo E_{50} determinados para o solo percolado com água destilada e para os solos percolados com as diferentes concentrações da solução de cloreto de cobre aquoso.

Nota-se, na Tabela 6-4, que o módulo de deformabilidade (E_{50}) tanto aumentou como diminuiu com a percolação da solução com diferentes concentrações de cloreto de cobre aquoso, praticamente para as três tensões confinantes aplicadas. Observa-se ainda, nessa tabela, que essa diferença variou entre -16 % a +34 %, portanto pode-se considerar que não houve uma alteração significativa nesse parâmetro provocada pela contaminação do solo.

Tabela 6-4 - Valores do módulo de deformabilidade secante para 50 % da tensão de ruptura.

		Percolado com Água Destilada	Percolado com Solução de 50 mg/l de $\text{Cu Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		Percolado com Solução de 300 mg/l de $\text{Cu Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		Percolado com Solução de 600 mg/l de $\text{Cu Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Estágio	σ_3 (kpa)	E_{50} (Mpa)	E_{50} (Mpa)	Diferença relativa (%)	E_{50} (Mpa)	Diferença relativa (%)	E_{50} (Mpa)	Diferença relativa (%)
1º	50	15	19	29	18	21	12	-16
	100	76	62	-18	77	1	91	19
	200	105	95	-9	117	12	141	34

6.2.4 - Algumas Considerações Sobre a Influência da Contaminação na Resistência e Deformabilidade do Solo Estudado

A redução dos parâmetro de resistência e da tensão de ruptura devido a contaminação por cloreto de cobre foi menor do que a observada por AL-SANAD et al. (1995) para solos arenosos contaminados por substâncias orgânicas.

No entanto, os resultados experimentais mostram certa semelhança do comportamento do solo contaminado por cloreto de cobre, estudado neste trabalho, com o observado para solos arenosos contaminados com substâncias orgânicas, AL-SANAD et al. (1995) e AL-SANAD et al. (1997), ou seja, com o aumento da pressão confinante observou-se uma diminuição da diferença entre os parâmetros obtidos para o solo percolado com água destilada e para o solo percolado com o contaminante.

Constatou-se também que a deformabilidade do solo estudado foi menos afetada pela contaminação com cloreto de cobre, do que o observado em solos arenosos contaminados com substâncias orgânicas (AL-SANAD et al., 1995 e AL-SANAD et al., 1997). Acredita-se que isto ocorra devido as diferentes características entre a substância contaminante estudada neste trabalho (íon de cobre) e as substâncias orgânicas.

7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

7.1 - CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios e estudar a influência da contaminação por cloreto de cobre aquoso na resistência de um solo arenoso compactado. A partir desses estudos pode-se concluir o seguinte :

7.1.1 - Quanto a Técnica de Ensaio Triaxiais em Múltiplos Estágios

Apesar do solo arenoso estudado apresentar as características descritas por HEAD (1986) que possibilitariam o ensaio triaxial em múltiplos estágios os resultados obtidos não foram os esperados, posto que:

?? Constatou-se uma redução significativa na tensão de ruptura quando se comparou os resultados dos ensaios triaxiais convencionais com os resultados dos ensaios triaxiais em múltiplos estágios. Essa redução se deve ao ciclo de carga e descarga sofrida pelo corpo-de-prova durante o ensaio triaxial em múltiplos estágios, que causa uma ruptura previa do corpo-de-prova.

?? Os parâmetros de resistência, coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo, sofreram um aumento de 37% e uma redução de 11,5% respectivamente, quando se utilizou a técnica do ensaio triaxial em

múltiplos estágios. O módulo de deformabilidade (E_{50}), para as tensões confinantes de 100 e 200 kPa, teve um aumento significativo quando os valores determinados a partir do ensaio triaxial convencional foram comparados com aqueles determinados a partir do ensaio triaxial em múltiplos estágios. Esse aumento de rigidez provocado pelo múltiplo estágio se deve ao fato de que o cisalhamento prévio do corpo-de-prova torna o solo mais compacto, aumentando assim sua rigidez.

??

A análise dos resultados obtidos através dos ensaios triaxiais realizados com o equipamento montado e desenvolvido junto ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp – Bauru mostram que a técnica do ensaio triaxial em múltiplos estágios levou a uma redução nos parâmetros de resistência e um aumento na rigidez do solo estudado e só pode ser considerada uma alternativa interessante quando é praticamente impossível ou inviável se obter amostras em quantidade suficiente para realização de ensaios triaxiais convencionais.

7.1.2 - Quanto a Influência da Contaminação na Resistência e Deformabilidade do Solo Estudado

Apesar do material estudado nesse trabalho ser um solo arenoso, os resultados dos ensaios laboratoriais realizados mostraram que a permeabilidade foi da ordem de 10^{-8} a 10^{-9} m/s, o que sugere a possibilidade do seu uso como barreira de contenção em algumas situações específicas, como no caso de aterros sanitários de cidades de pequeno porte que não dispõe de recursos para viabilizar uma solução com custo mais elevado, apesar de que o mais indicado seria o uso de misturas entre solos arenosos e argilosos.

Visando colaborar com o estudo da influencia da contaminação por cobre na resistência de solos, apresentam-se a seguir as seguintes conclusões dessa pesquisa:

- ?? Os resultados dos ensaios triaxiais realizados pelo método tradicional mostram que houve uma diminuição da tensão de ruptura devido à contaminação por cloreto de cobre aquoso, mais pronunciada quando o solo está sob as pressões confinantes de 50 e 100 kPa.
- ?? Em relação aos parâmetros de resistência, observou-se uma redução da ordem de 42% e 84% na coesão efetiva para o solo percolado com a concentração de 50 mg/l e 300 mg/l de cloreto de cobre aquoso. Para o solo percolado com 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso essa redução foi menor, da ordem de 20%. Constatou-se que não houve uma variação significativa no ângulo de atrito quando os resultados dos ensaios realizados no solo percolado com água destilada foram comparados com aqueles determinados para os solos percolados com as soluções de 50, 300 e 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso. Constatou-se ainda que essa redução é menos significativa do que tem sido observado em solos arenosos contaminados por substâncias orgânicas.
- ?? O módulo de deformabilidade (E_{50}) praticamente não apresentou uma variação significativa provocada pela contaminação do solo uma vez que se observou um aumento máximo nesse parâmetro de 34 % apenas para o solo percolado com 600 mg/l de cloreto de cobre aquoso sob tensão confinante de 200 kPa.
- ?? De uma maneira geral pode-se concluir que a contaminação por cloreto de cobre aquoso no solo arenoso estudado provocou uma pequena redução na resistência e pouco influenciou na rigidez. Assim, no projeto de obras civis,

não é necessário considerar a influência da contaminação por cobre na resistência e na rigidez desse solo, uma vez que ela é pouco significativa para fins de aplicação prática.

7.2 - SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE

??

O solo arenoso estudado apresenta uma boa resistência ao cisalhamento e uma baixa deformabilidade, no entanto, apesar de ser uma sua permeabilidade quando compactado não é o material mais apropriado para emprego como barreira de proteção, a menos de situações especiais onde outros fatores devem ser levados em conta. Por essa razão, o Departamento de Geotecnia da EESC-USP vem estudando misturas entre o solo da Formação Botucatu, utilizado nesse trabalho, com solo argiloso da Formação Serra Geral. Recomenda-se, portanto, a realização de ensaios triaxiais convencionais nestas misturas para avaliar o efeito da contaminação nesses materiais e verificar a validade das conclusões aqui obtidas para esse outro material. Para isso o equipamento desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp-Bauru pode ser utilizado, uma vez que este se mostrou apropriado para este fim.

??

Para utilização do equipamento montado e desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp – Bauru, recomenda-se promover alterações no software de aquisição de pois, apesar deste ter se mostrado eficiente e confiável, fazem-se necessários alguns ajustes para tornar seu uso mais prático, assim como melhorar seu aspecto visual. Recomenda-se ainda integrar os aplicativos desenvolvidos para a etapa de saturação do corpo-de-prova com aquele desenvolvido para a fase de cisalhamento, possibilitando assim gerar uma única versão executável do software.

8 - BIBLIOGRAFIA

ALBIERO et. al., **Solos do Interior de São Paulo**, Departamento de Geotecnia da USC/SC, São Carlos, 1993, 399p.

ALKER, S. C.; SARSBY, R. W. e HOWELL, R. **The Composition of Leachate from Waste Disposal Sites**. Waste Disposal by Landfill. Proc. of the Symposium GREEN'93 – Geotechnics Related to Environment, Bolton, UK. 1995. pp 215-223.

AL-SANAD, H. A.; ISMAEL, N. F. **Aging Effects on Oil-Contaminated Kuwaiti Sand**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , v.123 , n. 3. 1997. p. 290-293.

AL-SANAD, H. A.; EID, W. K.; ISMAEL, N. F. **Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand**. Journal of Geotechnical Engineering , v.121 , n. 5. 1995. p. 407-412.

ALSHIBLI, K. A.; HAMDAN, M. Z. **Estimating Volume Changer of Triaxial Soil Specimens from Planar Images**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Malden, USA. 2001. 415-421 p.

ARARUNA JR., J. T.; HARWOOD, A. H.; CLARKE, B. G. **A practical economical and precise volume measurement device**. Geotechnique. 1995. 541-544p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 6508: **Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 6459: **Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 7180: **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 7182: **Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 7183: **Solo – Determinação do Limite e Relação de Contração**. Rio de Janeiro, 1984.

BARDET, J. P. **Experimental Soil Mechanics**. USA, New Jersey. Prentice Hall. 1997.

BENSON, C.H. ; ZHAI, H. ; RASHAD, M. **Statiscal sample size for construction of soil liners**. Journal of Geotechnical Engineering , v.120 , n. 10. 1994. p. 1704-1725

BOFF, F. E. **Avaliação do Comportamento de Uma Mistura Compactada de Solos Lateríticos Frente a Soluções de Cu⁺⁺, K⁺ e Cl⁻ em Colunas de Percolação**. 1999. São Carlos, v1, 180p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BOSCOV, M. E. G. **Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos**. 1997. São Paulo, v1, 269p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CALÇAS, D. A. N. Q. P. **Atenuação da Carga Orgânica do Chorume de Aterro Sanitário em Solos Arenosos Compactados**. 2001. Bauru, 146p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia.

CARVALHO, MIRIAM F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 1999. 300p. Tese (Doutorado em Geotécnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

CORRÊA, A.C.; SOUZA, N.M. **Alteração das Características dos Solos Tropicais Submetidos Contaminação por Chorume**. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Volume 2. 2002. P. 739-747.

FALL, M.; TISOT, J. P.; CISSE, I. K. **Undrained Behaviour of Compacte Gravel Lateritic Ssoils from Western Senegal Under Monotonic and Cyclic Triaxial Loading**. Engineering Geology . Elsevier Science. 1997. 71-87p.

FALL, M.; TISOT, J. P.; CISSE, I. K.. **Undrained Behavier of Compacted Gravel Lateritic Soils from Western Senegal Under Monotonic and Cyclic Triaxial Loading**. Engineering Geology 47. Elsevier Science. 1997. P.71-87.

FOLKES, D.J. **Control of contaminant migration by the use of liners**. Canadian Geotechnical Jounal (Fifth Canadian Geotechnical Colloquium), v.19. 1982. p.320-344.

HEAD, K. . **Manual of Soil Laboratory Testing**. Volume 3. Pentech Press. London: Plymonuth. 1986.

ISMAEL, N. F. e MOLLAH, M. A. **Leaching Effects on Properties of Cemented Sands in Kuwait**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , v.124 , n. 10. 1998. p. 997-1004.

LAMBE, T. WILLIAM; WHITMAN, ROBERT .V. **Soil Mechanics, SI Verson**. New York. John Wiley & Sons. 1979.

LEITE, A. L. **A Difusão Molecular do K⁺ e Cl⁻ em Solos Naturais Compactados: Uma Perspectiva Para Uso em Liners**. 1997. São Carlos, v1. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LEITE, A.L. A. **Difusão Molecular do K⁺ e Cl⁻ em Solos Naturais Compactados: Uma Perspectiva Para Uso em Liners**. , São Carlos, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1997. 144p.

LEITE, J. C. **Estudos Laboratoriais em Misturas de Solos Lateríticos Compactados com Vista à Utilização como Liners**. 2000. São Carlos, v1, 223p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LEITE, J. C. **Metodologia para Elaboração da Carta de Susceptibilidade á Contaminação e Poluição da águas Subsuperficiais**. 1995. São Paulo, v1, 219p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LIMA, M. C., SOUZA, N. M., CARVALHO, J. C., SANTOS NETO, P. M. **Obtenção da curva granulométricautilizando granulômetro a laser**. XII Congresso Brasileiro de Mecanica dos Solos e Engenharia Geotecnica, 2002, São Paulo. XII COBRANSEG. São Paulo SP: ABMS, 2002. v.1. p.457 – 465.

LUNDGREN, L. **Environmental Geology**. New Jersey, Prentice Hall. 1986. 576pp.

MANASSERO, C. M. **Controlled Landfill Design**. ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, TC5 Report. 1997. P.77-111.

MANASSERO, M.; PARKER, R.; PASQUALINI, E.; ALMEIDA, M. S. S.; BOUAZZA, A.; DANIEL, D. E. & ROWE, R. K. **Controlled Landfill Design (Geotechnical aspects)**. In: Proc. Of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Seco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x. 1998. p.1001-1038.

MARTINS, F. B.; FERREIRA, P.M.V.; BRESSANI, L.A.; BICA, A.V.D. **Comportamento Tensão x Deformação de Dois Solos Residuais de Arenito Botucatu**. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Volume 1. 1998. P. 27-33.

OWEIS, I. S. **Stability of Landfill Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Editora David & Daniel. 1993. p. 244-268.

PINTO, CARLOS S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo. Oficina de textos. 2000.

SÃO PAULO. CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo, 2ªed. 2001.

SHIN, E. C.; DAS, B. M. **Some Physical Properties of Unsaturated Oil-Contaminated Sand**. Geotechnics Special Publication, nº99. Denver, Colorado. 2000. P. 142-152.

SKEMPTON, A.W. **The Pore Pressure Coefficients A e B**. Geotechnique. 1954.

STANCANTI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaio de Laboratório em Mecânica dos Solos**. EESC –USP. São Carlos. 1981.

VAN IMPE, W. F.. **Environmental Geotechnics – ITC5 – Reports and Future Goals**. Geotechnical Hazards, Maric, Lisac & Szavits-Nossan (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 9572. 1998. P.127-156.

YAMAMURO, J. A. e LADE, P. V. **Drained Sand Behavior in Axisymmetric Tests at High Pressures**. Journal of Geotechnical Engineering , v.122 , n. 2. 1996. p. 109-119.

YARLAGADDA, P. S.; MATSUMOTO, M. R.; VANBENSCHOTEN, J. E.; KATHURIA, A. **Characteristics of Heavy Metals In Contaminated Soils**. Journal of Environmental Engineering , v.121 , n. 4. 1995. p. 276-286.

YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O. e WARKENTIN, B. P.. **Principles of Contaminant Transport**. Elsevier, Amsterdan. 1992, 327pp.

ZUQUETTE, L. V. **Comunicação pessoal**, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Março/2001.

Bibliografia Complementar

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:** informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro. 2000.

HEAD, K. **Manual of Soil Laboratory Testing**. Volume 1. Pentech Press. London: Plymouth. 1980.

HEAD, K. **Manual of Soil Laboratory Testing**. Volume 2. Pentech Press. London: Plymouth. 1982.

ANEXOS

9 - CORREÇÃO DA ÁREA

Tem-se na Figura L a representação da seção original abcd, e da seção deformada. Assume-se que a seção deformada pode ser representada pela forma idealizada efgh, de diâmetro uniforme mas de mesmo volume da forma deformada real, a qual é igual ao volume inicial. A área da seção transversal do retângulo efgh é chamada de A, sendo a área inicial chamada de A_0 , onde, $A_0 = \pi D^2/4$ e D é o diâmetro do corpo-de-prova.

Sendo o volume inicial do corpo-de-prova igual ao volume do corpo-de-prova após ser deformado, tem-se :

$$A_0 \cdot L_0 = A \cdot L = A \cdot L_0 (1 + e)$$

Equação 9-1

$$A = \frac{L_0 \cdot A_0}{L_0 (1 + e)} = \frac{A_0}{1 + e}$$

Equação 9-2

Lembrando que $\frac{x}{L_0}$ é a deformação sofrida pelo corpo-de-

prova, então :

$$A = \frac{A_0}{1 + e}$$

Equação 9-3

A tensão axial induzida no corpo-de-prova pela ação de uma carga P é igual a P/A , assim :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} = \frac{P(1 - \epsilon)}{A_0}$$

Equação 9-4

Expressando-se em porcentagem, teria-se :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A_0} \left(\frac{100 - \epsilon\%}{100} \right)$$

Equação 9-5

Portanto, a tensão desviatória ($\sigma_1 - \sigma_3$) calculada com base na área original da seção transversal do corpo-de-prova e para um ensaio não drenado, será reduzida pelo fator $\frac{100 - \epsilon\%}{100}$, corrigindo assim o efeito do “*barrelling*” sobre essa tensão.

Stancati et. al. (1981) apresenta a correção da área para um ensaio drenado, calculando a área da seção transversal para cada instante do ensaio, chamando A_i a área da seção transversal em um dado instante i . Assim:

$$A_i = L_i = A_0 = L_0 - V_i$$

Equação 9-6

Então:

$$A_i = \frac{A_0 + H_0 + V_i}{H_i}$$

Equação 9-7

Onde $H_i = L_0 + x_i$, portanto:

$$A_i = \frac{A_0 + H_0 + V_i}{H_i}$$

Equação 9-8

$$A_i = \frac{A_0 + H_0 + V_i}{L_0 + x_i}$$

Equação 9-9

$$A_i = \frac{1 + \frac{V_i}{V_0}}{1 + \frac{x_i}{L_0}} A_0$$

Equação 9-10

Lembrando novamente que $\frac{x_i}{L_0}$ é a deformação ϵ_i sofrida pelo corpo-de-prova, então :

$$A_i = \frac{1 + \frac{\Delta V_i}{V_0}}{1 + e_i} A_0$$

Equação 9-11

Portanto tem-se a correção da área, para um ensaio triaxial drenado, para cada instante i do ensaio, e assim a tensão corrigida será dada pela equação :

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \frac{P + \Delta e_i}{A_0 + 1 + \frac{\Delta V_i}{V_0}}$$

Equação 9-12

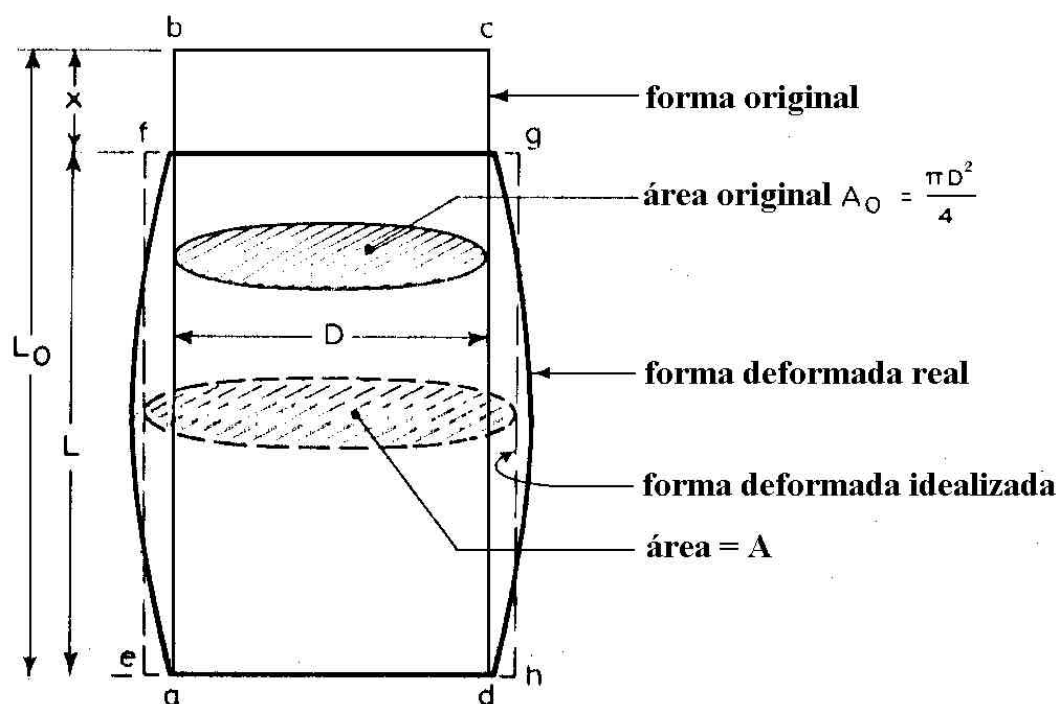


Figura L - Representação da deformação sofrida pelo corpo-de-prova no ensaio triaxial (HEAD, 1982).

10 - CORPOS-DE-PROVA APÓS O ROMPIMENTO

Os corpos-de-prova ensaiados apresentaram o aspecto padrão ilustrado na Figura M Sendo que a maioria rompeu em forma de “barril” sem apresentar uma superfície de ruptura definida.

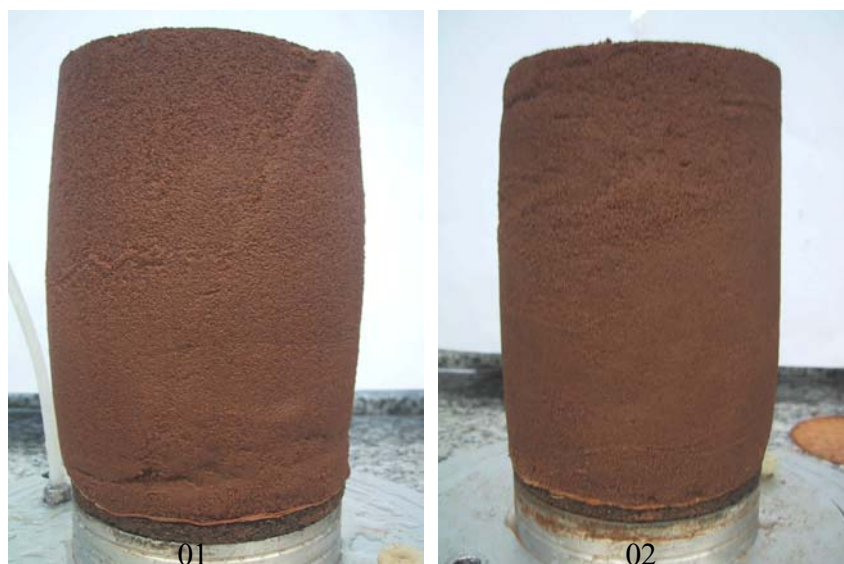


Figura M – (01) Exemplo do visual padrão de um corpo-de-prova utilizando o solo estudado compactado que apresentou ruptura em forma de “barril” com superfície de ruptura definida. (02) Exemplo do visual padrão de um corpo-de-prova utilizando o solo estudado compactado que apresentou ruptura em forma de “barril” e não apresentou superfície de ruptura definida.

11 - PROGRAMA DE AQUISIÇÃO

```

Option Explicit
'variáveis de controle de aquisição
Dim started As Boolean
Dim termina As Boolean
'variáveis compartilhadas
Dim faltam
Dim carga19
Dim carga17
Dim pressao20
Dim pressao22
Dim desloc23
Dim desloc18
Dim carga%
Dim contrapressao%
Dim desloc%
Dim deslocELE%
Dim cargaELE%
Dim pressao%
Dim canal17%
Dim canal21%
Dim canal20%
Dim canal22%
Dim canal23%
Dim canal18%
Dim vvol_inicial As Single

Private Sub btn_cmd_Click()

    Dim erro As Boolean

    If Not baseline Then
        If MsgBox("É necessário tomar as informações iniciais do
ensaio. Gostaria de fazer isso agora?", vbYesNo, "Sistema de
aquisição de dados") = vbYes Then
            desloc% = cbAIn(0, 23, BIP5VOLTS, canal23%)
            pressao% = cbAIn(0, 22, UNI2PT5VOLTS, canal22%)
            contrapressao% = cbAIn(0, 20, UNI10VOLTS, canal20%)
            pressao20 = canal20% * a(4) + y0(4)
            deslocamento_inicial = canal23% * a(5) + y0(5)
            'pressao22 = (canal22% * a(2) + y0(2)) + (0.07679126 *
pressao20) - (0.28392452 * desloctot)
            volume_inicial = (canal22% * a(2) + y0(2)) +
(0.07679126 * pressao20)
            baseline = True
        Else
            Exit Sub
        End If

    End If

    cmd_const.Enabled = False

```

```

    btn_voltar.Enabled = False
    btn_sair.Enabled = False

    termina = Not termina

    If Not started Then
        started = True
        erro = QueryPerformanceCounter(startAt)
        deslocamento = 0
    End If

    If Not termina Then
        btn_cmd.Caption = "&Interrompe"
    Else
        btn_cmd.Caption = "Re &Inicio"
    End If

End Sub

Private Sub btn_sair_Click()

    checksave
    check_constants
End

End Sub

Private Sub btn_voltar_Click()

    checksave
    frmParam.Show
    Unload Me

End Sub

Private Sub CGraph1_Click(Index As Integer)

End Sub

Private Sub cmd_const_Click()

    Dim i As Integer
    For i = 0 To 5
        dlg_constantes.txt_y0(i) = y0(i)
        dlg_constantes.txt_a(i) = a(i)
    Next i

    dlg_constantes.Show 1

End Sub

Private Sub cmd_escala_Click()

    Dim Index As Integer

```

```

        For Index = 0 To 5
            dlg_escala.txt_graphdey(Index).Text =
CGraph1(Index).YAxis(0).LinearScale.MinValue
            dlg_escala.txt_graphatey(Index).Text =
CGraph1(Index).YAxis(0).LinearScale.MaxValue
            dlg_escala.txt_graphdex(Index).Text =
CGraph1(Index).XAxis.LinearScale.MinValue
            dlg_escala.txt_graphatex(Index).Text =
CGraph1(Index).XAxis.LinearScale.MaxValue
        Next Index

        dlg_escala.Show
End Sub

Private Sub cmd_fim_Click()

    cmd_const.Enabled = True

    termina = True

    checksave    'salva os dados se estes existem

    btn_voltar.Enabled = True
    btn_sair.Enabled = True
    btn_cmd.Caption = "&Inicio"

    started = False

    If (drenado) Then
        If (MsgBox("Outro estágio?", vbYesNo, "Sistema de
aquisição de dados") = vbYes) Then
            'muda o nome do arquivo
            arquivo = getNextFile(adFileCount, 0)
            frmAdensamento.Show
            Unload Me
        End If
    End If

End Sub

Private Sub Form_Activate()

    'inicia o loop de aquisição
    contrapressao% = cbAIn(0, 20, UNI10VOLTS, canal20%)
    pressao20 = canal20% * a(4) + y0(4)
    pressao% = cbAIn(0, 22, UNI2PT5VOLTS, canal22%) 'era 22
    volume_inicial = (canal22% * a(2) + y0(2)) + (0.07679126 *
pressao20)
    'pressao22 = (canal22% * a(2) + y0(2)) + (0.07679126 *
pressao20) - (0.28392452 * desloctot)
    MainLoop

End Sub

```

```

Private Sub Form_Load()

    Dim erro

    'frmParam.Hide
    Unload frmParam

    btn_cmd.Enabled = True

    'preparando
    started = False
    termina = True
    erro = QueryPerformanceFrequency(frequencia)

    data = Date$
    starttime = Time$

End Sub

Private Sub MainLoop()

    Dim erro As Boolean
    Dim i As Integer

    While True

        '
        =====
        ' Transdutor de deslocamento Sensotec MVL7 para -2" a +2"
        (101.6mm)
        ' Excitacao 3.0 VAC @ 5KHz
        ' Calibration Factor: 2.1864 VRMS/inch ou 0.0860787
        VRMS/mm ou 11.61727mm/VRMS
        ' Adotando BIP5VOLTS o intervalo sera' de -58.086mm a
        +58.086mm
        ' BIP5VOLTS --> resolucao=(58.086*2)/4096 = 0.0283623mm
        ' Transdutor de deslocamento conectado no canal 7 (canal
        23)
        desloc% = cbAIn(0, 23, BIP5VOLTS, canal23%)
        desloc23 = canal23% * a(5) + y0(5)

        '
        =====
        ' Transdutor de deslocamento ELE-Soiltest DA-115 para 0 a
        2" (50.8 mm)
        ' Excitacao 10 VDC
        ' Saida 8.5V ==> 8.5V para 50.8 mm ==>
        ' 1V -> 5.9764 mm ou 0.16732V -> 1 mm
        ' Ganho na GP 1x --> intervalo de -4.62V a +4.7V
        ' BIP5VOLTS --> (9.32/10)*4096=3817 incrementos -->
        resolucao 0.013309 mm
        ' Transdutor de deslocamento conectado no canal 2 (canal
        18)
        deslocELE% = cbAIn(0, 18, BIP5VOLTS, canal18%)
        desloc18 = canal18% * a(0) - y0(0) 'calculado
    
```

```

=====
' Transdutor de pressao Sensotec para 100psi (689.475 kPa)
' Excitacao 10 VDC
' Calibration Factor 9.9470 mV/V ==> 99.470 mV para 100
psi
' Ganho na GP 100x --> intervalo de 0-2.5V
' 2.5V --> 173.287252 kPa
' Adotando UNI2PT5VOLTS o intervalo de variacao sera' de 0
a 173.287252 kPa
' Resolucao = 0.0423064 kPa
' Transdutor de pressao conectado no canal 3 (canal 19)
cargaELE% = cbAIn(0, 21, UNI2PT5VOLTS, canal21%)
carga19 = canal21% * a(1) + y0(1)

'
=====
' Transdutor de pressao diferencial Sensotec Z para 2psi
(13.78952 kPa)
' Excitacao 10 VDC
' Calibration Factor 1.4991 mV/V ==> 14.991 mV para 2psi
' Ganho na GP 100x --> intervalo de 0-1.4991V
' 1.4991V --> 2psi ou 1V --> 1.3341338psi
' Adotando UNI2PT5VOLTS
' Resolucao = 2.5*1.3341338/4096 = 0.0008142psi (0.0056137
kPa)
' Transdutor de pressao diferencial conectada no canal 0
(canal 16)
pressao% = cbAIn(0, 22, UNI2PT5VOLTS, canal22%) 'era 22
pressao22 = (canal22% * a(2) + y0(2)) + (0.07679126 *
pressao20) - (0.28392452 * (desloc23 - deslocamento_inicial))

'
=====
' Celula de carga conectada no canal 1 (canal 17)
carga% = cbAIn(0, 17, UNI10VOLTS, canal17%)
carga17 = canal17% * a(3) + y0(3)

'
=====
' Transdutor de pressao Sensotec para 300psi (2068.425
kPa)
' Excitacao 10 VDC
' Transdutor de pressao conectado no canal 4 (canal 20)
contrapressao% = cbAIn(0, 20, UNI10VOLTS, canal20%)
pressao20 = canal20% * a(4) + y0(4)

'=====

'compensa a força oposta ao pistão
carga17 = carga17 - (pressao20 * 0.0003 - 0.0028)
If (Not termina And (((Abs(desloc23 - deslocamento -
deslocamento_inicial) >= delta) And tipoaquisicao) Or
((Abs(((desloc23 - deslocamento - deslocamento_inicial) / altura)
* 100) >= delta) And (Not (tipoaquisicao))))) Then

```

```

deslocamento = desloc23 - deslocamento_inicial

erro = QueryPerformanceCounter(counter1)

' Grafico 0 mostra deslocamentos
y0val(conta) = desloc23 - y0val(0)
y0counts(conta) = canal23%

' Grafico 1 mostra pressoes diferenciais
y1val(conta) = pressao22
y1counts(conta) = canal22%

'Grafico 2 mostra carga
y2val(conta) = carga17
y2counts(conta) = canal17%

' Grafico 3 mostra contra-pressao
y3val(conta) = pressao20
y3counts(conta) = canal20%

'poro pressao
pp(conta) = carga19

'deformação
deformacao(conta) = ((desloc23 - deslocamento_inicial)
/ altura) * 100

'dvolume
dvolume(conta) = ((pressao22 - volume_inicial) /
volume) * 100

'tensão
If (Not (corrigido)) Then
    tensao(conta) = carga17 / area
Else
    'tensão utilizando área corrigida
    area_corrigida = ((1 - (dvolume(conta) / 100)) /
(1 - deformacao(conta) / 100)) * area
    tensao(conta) = carga17 / area_corrigida
    'novo volume ???
    volume = area_corrigida * 10000 * ((altura -
(desloc23 - deslocamento_inicial)) / 10)
End If

xval(conta) = ((counter1 - startAt) / frequencia) / 60
tempos(conta) = counter1

If xval(conta) > CGraph1(0).XAxis.LinearScale.MaxValue
Then
    'adiciona 4 minutos para cada gráfico
    For i = 0 To 3
        CGraph1(i).XAxis.LinearScale.MaxValue =
CGraph1(i).XAxis.LinearScale.MaxValue + 4
    
```

```

                                CGraph1(i).XAxis.LinearScale.HighAlarmValue =
CGraph1(i).XAxis.LinearScale.MaxValue
                                Next i
                                End If

                                conta = conta + 1

                                End If

                                DoEvents

                                'última leitura realizada em...
                                endtime = Time$
                                enddate = Date$
                                Wend

End Sub

Private Sub trm_atualiza_Timer()

    Dim LabelDisFalta As String
    Dim qualplot As Integer
    Dim resultado As Boolean

    LabelDisFalta = "Faltam: " & Format$(faltam, "###,##0")

    lbl_desloc = Format$(desloc23, "#00.00")
    lbl_volume = Format$((pressao22 - volume_inicial), "#0.00")
    lbl_carga = Format$(carga17, "#0.000")
    lbl_confinante = Format$(pressao20, "#0.00")
    Label3.Caption = Format$(carga19, "#0.00")

    resultado = CGraph1(0).UpdatePlot(qualplot, conta, xval(0),
y0val(0))
    CGraph1(0).DrawPlots

    resultado = CGraph1(1).UpdatePlot(qualplot, conta, xval(0),
y1val(0))
    CGraph1(1).DrawPlots

    resultado = CGraph1(2).UpdatePlot(qualplot, conta, xval(0),
y2val(0))
    CGraph1(2).DrawPlots

    resultado = CGraph1(3).UpdatePlot(qualplot, conta, xval(0),
y3val(0))
    CGraph1(3).DrawPlots

    resultado = CGraph1(4).UpdatePlot(qualplot, conta,
deformacao(0), tensao(0))
    resultado = CGraph1(4).UpdatePlot(1, conta, deformacao(0),
pp(0))
    CGraph1(4).DrawPlots

```



```

        resultado = CGraph1(5).UpdatePlot(qualplot, conta,
deformacao(0), dvolume(0))
        CGraph1(5).DrawPlots

End Sub

Private Sub trm_tempo_Timer()

    LabelDtHr = Format$(Now, "dd-mmm-yyyy    hh:mm:ss    ddd") + "
- " + arquivo

End Sub

Private Sub checksave()

    If conta = 0 Then
        MsgBox "Nada para salvar", vbOKOnly, "Sistema de aquisição
de dados"
    Else
        dlg_save.Show 1
    End If
End Sub

```