Campus de São Carlos

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO
COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE
UMA ARGILA ADENSADA
UNIDIRECIONALMENTE**

Gene Stancati

Orientador: Prof. Dr. Caio Leister de Almeida Barros

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

✓

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UMA ARGILA
ADENSADA UNIDIRECIONALMENTE

ENG^a GENE STANCATI

ORIENTADOR: PROF. DR. CAIO LEISTER DE
ALMEIDA BARROS

DEDALUS - Acervo - EESC

31100013646

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Pau
lo, como requisito parcial à obtenção
do Título de Doutor em Engenharia - Área
Geotecnia.

AOS MEUS PAIS

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Caio Leister de Almeida Barros pela orientação e apoio intelectual ao trabalho.

A FAPESP e CNPq pelo auxílio financeiro que possibilitaram a aquisição de materiais e equipamentos.

Ao Professor Toshiaki Takeya pela orientação na utilização dos equipamentos eletrônicos.

A Transdutec pela execução e assistência técnica dos equipamentos eletrônicos.

Ao Professor Heraldo Luiz Giacheti pela sua participação e assistência nos programas de microcomputador.

Ao técnico Aparecido Clementino de Godoy Bueno da Oficina Mecânica da EESC-USP pela execução de equipamentos.

Aos técnicos Milton Tadeu Bogno e José Luis Guerra do Laboratório de Geotecnia pelo auxílio na execução de ensaios.

Ao técnico Benedito Osvaldo de Souza pelo auxílio, na digitação de dados e na utilização de micro-computador.

A secretária Maristela Ap. Zotesso Batissaco pelos serviços de datilografia.

Ao desenhista Antonio Claret Carriel pelas ilustrações do trabalho.

E aos professores e funcionários do Departamento de Geotecnia pelas sugestões, incentivos e apoio moral durante o trabalho.

RESUMO

O trabalho é um estudo experimental do comportamento tensão-deformação, em argila adensada unidirecionalmente, após mistura com água. Para sua execução, foram desenvolvidos equipamentos para adensamento de grandes quantidades de Lama, e medidores eletrônicos específicos para deformações volumétricas e radiais, usados em ensaios de compressão triaxial. O modelo da teoria clássica elasto-linear, para solos com comportamento anisotrópico é utilizado, após desenvolvimento algébrico, na obtenção dos parâmetros da argila. Nos cálculos, são aplicados processos estatísticos de regressões polinomiais. São analisadas as correlações dos parâmetros elásticos iso e anisotrópicos (Módulos de Elasticidade, Coeficientes de Poisson e Módulos de Elasticidade Transversal), com as tensões confinantes dos ensaios triaxiais, e com os índices de pré-adensamento OCR das Lamas.

ABSTRACT

This work is an experimental study of the stress-strain behavior on clay one-dimensionally consolidated, after mixing with water. A consolidation equipment designed for great mass of mud and specific electronic apparatus for volumetric and lateral displacements on the triaxial tests were developed for this study. The classical theory of elasto-linear model for anisotropic soils is used, after algebraic manipulation, to obtain clay parameters. Multiple regressions are used for variables computations. Iso and anisotropic elastic parameters (Young modulus, Poisson ratio and shear modulus) are correlated with the confinant stresses and the over-consolidation-ratios (OCR).

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

1. FIGURAS

Figura 4.1 - Esquema do equipamento para execução da Lama	32
Figura 4.2 - Esquema para adensamento da Lama	35
Figura 4.3 - Esquema de disposição dos "strain gages" no interior do Medidor de Pressões Laterais para adensamento, Modelo TLT - Transdutech	39
Figura 4.4 - Esquema de distribuição dos "strain gages" no inte- rior das células de carga TCT	51
Figura 4.5 - Esquema do Transdutor para medida de pressão neu- tra, modelo TPT-Transdutech	55
Figura 4.6 - Esquema do medidor de deslocamentos axiais mode- lo TDT-10 - Transdutech	57
Figura 4.7 - Esquema do medidor de Variação de Volume, modelo TVT-10, Transdutech	60
Figura 4.8 - Esquema da versão inicial do medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2, Transdutech	64
Figura 4.9 - Esquema do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, em montagem de calibração, versão 2	69
Figura 5.1 - Curva Granulométrica do Solo Estiva	82
Figura 5.2 - Curva Proctor Normal do Solo Estiva	82
Figura 5.3 - Difractometria de Raio X em amostras do solo argi- loso de Estiva, à temperatura ambiente e após aque- cimento a 550°C.	83
Figura 6.1 - Esquema de Fatiamento e Divisão dos Bolos de Solo ...	91
Figura 7.1 - Tensões Aplicadas x Tempo decorrido, para as Lamas 1, 2, 3.	98
Figura 7.2 - Tensões Aplicadas x Tempo decorrido, para as Lamas 4, 5, 6.	99
Figura 7.3 - Deslocamentos das Lamas x Tempo, durante o adensa- mento	101
Figura 7.4 - Deslocamentos das Lamas x Tempo Inicial no aden- samento	101
Figura 7.5 - Adensamentos Oedométricos, amostras de Lamas 1 a 6. Retas resultantes das Regressões Lineares para carregamentos e descarregamentos	103

Figura 7.6 - Curvas de Adensamento Oedométricos executadas nos corpos de prova para três posições de eixo (V,H,I) dos Bolos 1, 2 e 3.	106
Figura 7.7 - Curvas de Adensamento Oedométricos executadas nos corpos de prova para três posições de eixo (V,H,I) dos Bolos 4, 5 e 6.	107
Figura 7.8 - Curvas Médias dos Ensaio de Adensamentos dos Bolos 1, 2 e 3.	109
Figura 7.9 - Curvas Médias dos Ensaio de Adensamento dos Bolos 4, 5 e 6.	110
Figura 7.10 - Tensões Verticais totais médias versus Tensões Horizontais totais médias, de ruptura, ($\sigma_{v\text{rup}} \times \sigma_{h\text{rup}}$)	119
Figura 7.11 - Tensões Verticais Efetivas médias versus Tensões Horizontais Efetivas médias, de ruptura, ($\sigma'_{v\text{rup}} \times \sigma'_{h\text{rup}}$)	120
Figura 7.12 - Diferença entre deformações horizontais medidas no TDR-05/2, ϵ_h , e deformações calculadas pela variação volumétrica, $\epsilon_{r\text{vol}}$, em função das deformações verticais, ϵ_v	121
Figura 7.13 - Módulo de Elasticidade Vertical, E_v , versus Módulo de Elasticidade Horizontal, E_h	129
Figura 7.14 - Coeficiente de Poisson ν_{vh} versus Coeficiente de Poisson ν_h	129
Figura 7.15 - Módulo de Elasticidade Transversal G_v versus Módulo de Elasticidade Transversal G_h	130
Figura 7.16 - Módulos de Elasticidade E_v e E_h , em função das tensões horizontais $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova verticais e horizontais, respectivamente.	131
Figura 7.17 - Coeficientes de Poisson, ν_{vh} e ν_h , em função das tensões horizontais, $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova verticais e horizontais, respectivamente	132
Figura 7.18 - Módulos de Elasticidade Transversal G_v e G_h , em função das tensões horizontais, $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova inclinados e horizontais, respectivamente	132
Figura 7.19 - Módulos de Elasticidade E_v e E_h versus Índice de Pré-Adensamento OCR	133
Figura 7.20 - Coeficientes de Poisson ν_{vh} e ν_h versus Índice de Pré-Adensamento OCR.	134

Figura 7.21 - Módulos de Elasticidade Transversal G_v e G_h versus Índice de Pré-Adensamento OCR	134
Figura 7.22 - Variação do Índice de Pré-Adensamento OCR com tensões confinantes $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova verticais, horizontais e inclinados	135
Figura 7.23 - Variação do Módulo de Elasticidade Isotrópico, E , com a Tensão Confinante, $\bar{\sigma}_h$	137
Figura 7.24 - Coeficiente de Poisson Isotrópico, ν , versus Tensões Confinantes, $\bar{\sigma}_h$	138
Figura 7.25 - Módulo de Elasticidade Transversal Isotrópico, G , versus Tensões Confinantes, $\bar{\sigma}_h$	138
Figura 7.26 - Módulo de Elasticidade Isotrópico, E , versus Índice de Pré-Adensamento OCR	139
Figura 7.27 - Coeficiente de Poisson Isotrópico, ν , versus Índice de Pré-Adensamento OCR	139
Figura 7.28 - Módulo de Elasticidade Transversal Isotrópico, G , versus Índice de Pré-Adensamento OCR	140
Figura 7.29 - Difratometria de Raio X em amostras de Bolo, à temperatura ambiente e após aquecimento a 55°C	142

2. Fotos

Foto 4.1 - Vista geral da Galga de Moagem	29
Foto 4.2 - Destorroamento de solo na galga	30
Foto 4.3 - Equipamento para execução da Lama	31
Foto 4.4 - Batedor para execução da Lama	33
Foto 4.5 - Mistura solo-água	33
Foto 4.6 - Conjunto do equipamento de adensamento	34
Foto 4.7 - Pistão de adensamento	36
Foto 4.8 - Disco-tampa do cilindro de adensamento	36
Foto 4.9 - Equipamento de adensamento completo	37
Foto 4.10 - Drenagem no disco da base	38
Foto 4.11 - Drenagem no pistão	38
Foto 4.12 - Célula de carga TLT, para medida de pressões laterais no adensamento	40
Foto 4.13 - Célula de carga TLT, no cilindro de adensamento	40
Foto 4.14 - Célula de carga TLT, no conjunto de adensamento	41
Foto 4.15 - Pedra porosa no disco de base	42
Foto 4.16 - Pedra porosa no pistão	42
Foto 4.17 - Molde para pedra porosa	44
Foto 4.18 - Areia e Araldite para a pedra porosa	45

Foto 4.19 - Mistura da Areia e Araldite	45
Foto 4.20 - Areia e Araldite misturadas	46
Foto 4.21 - Modelagem da pedra porosa	46
Foto 4.22 - Secagem da pedra porosa	47
Foto 4.23 - Pedra porosa pronta	47
Foto 4.24 - Câmara Triaxial WF 11.000, adaptada para altas pressões	49
Foto 4.25 - Base adaptada da Câmara WF 11.000	50
Foto 4.26 - Calibração da célula de carga modelo TCT-Transdutech ..	52
Foto 4.27 - Calibração da célula de carga modelo TCT-Transdutech ..	52
Foto 4.28 - Detalhe da superfície inferior da célula de carga modelo TCT-Transdutech	53
Foto 4.29 - Câmara Triaxial WF 11.000, com Anel Dinamométrico WF 14.100	54
Foto 4.30 - Transdutor para medida de pressão neutra, modelo TPT - Transdutech	55
Foto 4.31 - Transdutor para medidas de pressões neutras modelo TPT-Transdutech com bloco deaerador	56
Foto 4.32 - Transdutor LVDT para medida de deslocamentos axiais, modelo TDT-10, Transdutech	58
Foto 4.33 - Calibração do transdutor de medidas de deslocamento axial, modelo TDT-10, Transdutech	58
Foto 4.34 - Transdutor LVDT, modelo TDT-10 Transdutech, posicio- nado na base da câmara WF 11.000	59
Foto 4.35 - Medidor de Variação de Volume, modelo TCT-10, Trans- dutech	61
Foto 4.36 - Medidor de Variação de Volume, modelo TVT-10, Trans- dutech, adaptado ao painel WF	61
Foto 4.37 - Medidor de Variação de Volume, Wykeham Farrance, WF 17.038	62
Foto 4.38 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2, Trans- dutech, primeira versão	65
Foto 4.39 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2, Trans- dutech, primeira versão	65
Foto 4.40 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2, Trans- dutech, primeira versão	66
Foto 4.41 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2, Trans- dutech, primeira versão	66
Foto 4.42 - Calibração do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, Transdutech, primeira versão	68

Foto 4.43 - Calibração do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, Transdutech, versão 2	69
Foto 4.44 - Calibração do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, Transdutech, versão 2	70
Foto 4.45 - Operação de ajuste com calibre, para a aferição do TDR-05/2	71
Foto 4.46 - Final do "ajuste zero" no Medidor de Deformação Radial TDR-05/2	71
Foto 4.47 - Montagem do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2 para utilização no ensaio triaxial	72
Foto 4.48 - Montagem do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2 para utilização no ensaio triaxial	72
Foto 4.49 - Estrutura/Suporte de alumínio, usado na montagem do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2	73
Foto 4.50 - Corpo de Prova de solo montado na base da Câmara Triaxial com as hastes verticais de alinhamento	74
Foto 4.51 - Corpo de Prova de solo montado na base da Câmara Triaxial sem as hastes verticais de travamento da estrutura de alumínio	74
Foto 4.52 - Aplicação do adesivo para fixação do núcleo ferromagnético ao corpo de prova de solo	75
Foto 4.53 - Transdutor TDR-05/2, para medidas de deformação radial, em posição de operação	76
Foto 4.54 - Indicadores Digitais, modelos TMDE e TMDL, da Transdutech	78
Foto 4.55 - Conjunto de equipamentos para execução do ensaio triaxial	78
Foto 4.56 - Conjunto de equipamentos para execução do ensaio triaxial	79
Foto 6.1 - Mistura solo com água	86
Foto 6.2 - Regularização da Lama, após a mistura homogênea do solo com água	87
Foto 6.3 - Retirada do cilindro de adensamento para liberação do Bolo	89
Foto 6.4 - Retirada do cilindro de adensamento para liberação do Bolo	89
Foto 6.5 - Bolo de solo após adensamento da Lama	90
Foto 6.6 - Fatiamiento do Bolo de solo	90
Foto 6.7 - Drenagem lateral do corpo de prova	93

3. Tabelas

Tabela 5.1 - Solos amostrados na região norte do Estado de São Paulo	81
Tabela 5.2 - Análise Química dos Argilo-Minerais do Solo de Estiva	84
Tabela 7.1 - Características das Lamas	97
Tabela 7.2 - Características dos Bolos	97
Tabela 7.3 - Tempo decorrido para a Aplicação das Pressões Verticais Máximas no Adensamento das Lamas	102
Tabela 7.4 - Equações das Curvas de Adensamento Oedométricos para carregamentos e descarregamentos dos Bolos, calculadas por Regressão Polinomial Múltipla	108
Tabela 7.5 - Determinação das pressões de Pré-Adensamento e Retas de Compressão dos Bolos	111
Tabela 7.6 - Tensões máximas Médias dos Corpos de Prova Verticais, Horizontais e Inclinação, de cada Bolo, obtidas nos Ensaios de Compressão Triaxial	118
Tabela 7.7 - Parâmetros Elástico-Lineares Anisotrópicos	128
Tabela 7.8 - Parâmetros Elástico-Lineares Isotrópicos	136
Tabela 7.9 - Análise Química dos Argilo-Minerais de Amostra do Bolo	141

SIMBOLOGIA

- a,b,c - Coeficientes paramétricos das Regressões Polinomiais Lineares.
- d - Desvio padrão de Regressão Linear entre deformações horizontais e verticais.
- D_i - Diâmetro final dos corpos de prova nos ensaios de Compressão Triaxial, após o adensamento.
- D_o - Diâmetro inicial dos corpos de prova nos ensaios de Compressão Triaxial, antes do confinamento.
- e - Índice de vazios
- E - Módulo de Elasticidade Isotrópico
- E_h - Módulo de Elasticidade Anisotrópico na direção horizontal.
- E_v - Módulo de Elasticidade Anisotrópico na direção vertical.
- G - Módulo de Elasticidade Transversal Isotrópico.
- G_h - Módulo de Elasticidade Transversal Anisotrópico, nos planos horizontais.
- G_v - Módulo de Elasticidade Transversal Anisotrópico, nos planos verticais.
- G_{hh} - Módulo de Elasticidade Transversal Anisotrópico, nos planos horizontais.
- G_{hv} - Módulo de Elasticidade Transversal Anisotrópico, nos planos verticais.
- G_{vh} - Módulo de Elasticidade Transversal Anisotrópico, nos planos verticais.
- H - Direção horizontal do eixo de simetria elástica z.
- H_i - Altura final dos corpos de prova nos ensaios de Compressão Triaxial, após o adensamento.
- H_o - Altura inicial dos corpos de prova nos ensaios de Compressão Triaxial, antes do confinamento.
- I - Direção inclinada 45° com a vertical do eixo de simetria elástica z.
- l_{mol} - Leituras de deformação do anel dinamométrico nos ensaios de Compressão Triaxial.
- l_p - Leituras de deslocamento do prato da prensa de Compressão Triaxial, nos ensaios.
- l_{rad} - Leituras das medidas de variação de diâmetro dos corpos de prova nos ensaios de Compressão Triaxial.
- l_u - Leituras das medidas de pressão neutra nos ensaios de Compressão Triaxial.

- l_{vol} - Leituras das medidas de variação volumétrica nos ensaios de Compressão Triaxial.
 n - Graú de anisotropia.
 N - Número de variáveis utilizadas nos cálculos das Regressões Polinomiais.
 OCR - Índice de Pré-Adensamento.
 p_a - Pressão de pré-adensamento (Ensaio Oedométrico).
 R - Coeficiente de Correlação entre variáveis das Regressões Lineares.
 S - Graú de saturação das amostras.
 u - Pressão neutra.
 u_{max} - Pressão neutra máxima atingida no ensaio de Compressão Triaxial, fase de compressão.
 $u_{max} CON$ - pressão neutra máxima atingida na fase de confinamento do ensaio de Compressão Triaxial.
 $u_{min} DR$ - pressão neutra mínima obtida na fase de drenagem do ensaio de Compressão Triaxial.
 u_{ult} - Pressão neutra atingida na última leitura do ensaio de Compressão Triaxial.
 V - Direção vertical do eixo de simetria elástica z .
 V_s - Volume de sólidos.
 V_w - Volume de água.
 w - Teor de umidade.
 x, y, z - Sistema ortogonal de eixos.
 x', y', z' - Sistema ortogonal de eixos com rotação de 45° dos eixos y e z .
 X_1 - Variável independente das Regressões Polinomiais Lineares.
 X_2 - Variável independente das Regressões Polinomiais Lineares.
 Y - Variável dependente das Regressões Polinomiais Lineares.
 xy - Plano (horizontal) de isotropia no sistema ortogonal.
 z - Eixo (vertical) de simetria elástica no sistema ortogonal.
 $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ - Deformações específicas cisalhantes nos planos xy e yx .
 $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$ - Deformações específicas cisalhantes nos planos yz e zy .
 $\gamma_{zx} = \gamma_{xz}$ - Deformações específicas cisalhantes nos planos zx e xz .
 ΔD - Variação de diâmetro no corpo de prova cilíndrico durante o confinamento e adensamento no ensaio de Compressão Triaxial.
 ΔH - Variação de altura do corpo de prova durante o confinamento e adensamento no ensaio de Compressão Triaxial.
 ΔV - Variação volumétrica do corpo de prova lida durante o ensaio de Compressão Triaxial.

- ϵ_h - Deformação horizontal (ou radial) específica dos corpos de prova no ensaio de Compressão Triaxial.
- ϵ_{hH}^A - Deformações horizontais específicas: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial, na direção x do plano de isotropia xy ; para corpos de prova com eixo y , do plano de isotropia xy , na direção vertical.
- ϵ_{hH}^B - Deformações horizontais específicas: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial, na direção z , eixo de simetria elástica; para corpos de prova com eixo y , do plano de isotropia xy , na direção vertical.
- ϵ_{hI}^A - Deformações horizontais específicas: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial, na direção $x = x'$, do plano de isotropia xy ; para corpos de prova com eixo de simetria elástica z , inclinado 45° em relação à vertical.
- ϵ_{hI}^B - Deformações horizontais específicas: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial, na direção y' , inclinada 45° em relação à direção y do plano de isotropia xy ; para corpos de prova com eixo de simetria elástica z , inclinado 45° em relação à vertical.
- $\epsilon_{h\text{ ult}}$ - Deformação horizontal específica atingida na última leitura do ensaio de Compressão Triaxial.
- ϵ_{hV} - Deformação horizontal específica: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial em corpos de prova com eixo de simetria elástica z , na direção vertical.
- $\epsilon_{r\text{ vol}}$ - Deformação radial calculada em função das deformações volumétrica e axial específicas, obtidas no ensaio de Compressão Triaxial.
- $\epsilon_{r\text{ vol ult}}$ - Deformação radial calculada em função das últimas leituras de deformações volumétrica e axial atingidas no ensaio de Compressão Triaxial.
- ϵ_v - Deformação vertical (ou axial) específica dos corpos de prova no ensaio de Compressão Triaxial.
- ϵ_{vH} - Deformação vertical específica: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial; para corpos de prova com eixo y do plano de isotropia xy , na direção vertical.
- ϵ_{vI} - Deformação vertical específica: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial; para corpos de prova com eixo de simetria elástica z , inclinado 45° em relação à vertical.
- ϵ_{vol} - Deformação volumétrica específica, medidas em ensaios de Compressão Triaxial.

- $\epsilon_{vol\ max}$ - Deformação volumétrica específica máxima obtida nos ensaios de Compressão Triaxial.
- $\epsilon_{vol\ ult}$ - Deformação volumétrica específica atingida na última leitura dos ensaios de Compressão Triaxial.
- ϵ_{vV} - Deformação vertical específica: medidas obtidas em ensaios de Compressão Triaxial; em corpos de prova com eixo de simetria elástica z, na direção vertical.
- $\epsilon_{v\ ult}$ - Deformação vertical específica atingida na última leitura dos ensaios de Compressão Triaxial.
- ϵ_x - Deformação específica na direção x do sistema ortogonal xyz.
- ϵ_y - Deformação específica na direção y do sistema ortogonal xyz.
- ϵ_z - Deformação específica na direção z do sistema ortogonal xyz.
- ν - Coeficiente de Poisson Isotrópico.
- ν_h - Coeficiente de Poisson Anisotrópico para efeito das tensões horizontais nas deformações horizontais.
- ν_{hh} - Coeficiente de Poisson Anisotrópico para efeito das tensões horizontais nas deformações horizontais.
- ν_{hv} - Coeficiente de Poisson Anisotrópico para efeito das tensões horizontais nas deformações verticais.
- ν_{vh} - Coeficiente de Poisson Anisotrópico para efeito das tensões verticais nas deformações horizontais.
- ρ - Massa específica do solo.
- σ_h - Tensão horizontal (confinante), total, aplicada no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ'_h - Tensão horizontal (confinante), efetiva, aplicada no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ_{hH} - Tensão horizontal (ou confinante) aplicada no ensaio de Compressão Triaxial, em corpos de prova com eixo y do plano de isotropia xy, na direção horizontal.
- σ_{hI} - Tensão horizontal (ou confinante) aplicada no ensaio de Compressão Triaxial, em corpos de prova com eixo de simetria elástica z, inclinado 45° em relação à direção vertical.
- $\sigma_{h\ rup}$ - Tensão horizontal (ou confinante) total atingida na ruptura do corpo de prova no ensaio de Compressão Triaxial.
- $\sigma'_{h\ rup}$ - Tensão horizontal (ou confinante) efetiva atingida na ruptura do corpo de prova no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ_{hV} - Tensão horizontal (ou confinante) aplicada no ensaio de Compressão Triaxial, em corpos de prova com eixo de simetria elástica z, na direção vertical.

- σ_L - Pressão lateral medidas no adensamento unidirecional das Lamas.
- σ_N - Pressão normal aplicada no adensamento unidirecional das Lamas.
- σ_{oct} - Tensão octaédrica determinada para as Lamas, em função de σ_N e σ_L .
- σ_3 - Tensão horizontal (confinante), total, aplicada no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ'_3 - Tensão horizontal (confinante), efetiva, aplicada no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ_1 - Tensão vertical (ou axial), total medida no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ'_1 - Tensão vertical (ou axial), efetiva, medida no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ_v - Tensão vertical (ou axial) total, medida no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ'_v - Tensão vertical (ou axial) efetiva, medida no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ_{vH} - Tensão vertical (ou axiais), medidas nos ensaios de Compressão Triaxial, em corpos de prova com eixo y, do plano de isotropia xy, na direção vertical.
- σ_{vI} - Tensão vertical (ou axial), medida no ensaio de Compressão Triaxial, em corpos de prova com eixo de simetria elástica z, inclinado 45° em relação à direção vertical.
- $\sigma_{v\text{rup}}$ - Tensão vertical (ou axial) total atingida na ruptura do corpo de prova no ensaio de compressão triaxial.
- $\sigma'_{v\text{rup}}$ - Tensão vertical (ou axial) efetiva atingida na ruptura do corpo de prova no ensaio de compressão triaxial.
- σ_{vV} - Tensão vertical (ou axial) medida no ensaio de Compressão Triaxial, em corpos de prova com eixo de simetria elástica z, na direção vertical.
- $(\sigma_v - \sigma_h)_{\text{max}}$ - Diferença de tensões máximas atingidas no ensaio de Compressão Triaxial.
- $(\sigma_v - \sigma_h)_{\text{rup}}$ - Diferença de tensões de ruptura atingidas no ensaio de Compressão Triaxial.
- σ_x - Tensão principal na direção x do sistema ortogonal xyz.
- σ_y - Tensão principal na direção y do sistema ortogonal xyz.
- σ_z - Tensão principal na direção z do sistema ortogonal xyz.

$\tau_{xy} = \tau_{yx}$ - Tensões cisalhantes nos planos xy e yx.

$\tau_{yz} = \tau_{zy}$ - Tensões cisalhantes nos planos yz e zy.

$\tau_{zx} = \tau_{xz}$ - Tensões cisalhantes nos planos zx e xz.

ÍNDICE GERAL

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO/ABSTRACT	III
ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	IV
SIMBOLOGIA.....	X
ÍNDICE GERAL	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3. MODELO TEÓRICO	15
4. EQUIPAMENTOS	28
4.1 - Galga	29
4.2 - Misturador	30
4.3 - Conjunto de Adensamento	34
4.4 - Pedras Porosas	42
4.5 - Conjunto para Compressão Triaxial	48
4.5.1 - Câmara Triaxial	48
4.5.2 - Células de Carga	50
4.5.3 - Medidores de Pressão Neutra	54
4.5.4 - Medidor de Deslocamento Vertical	57
4.5.5 - Medidores de Variação de Volume	59
4.5.6 - Medidor de Deformação Radial	63
4.5.7 - Indicadores Digitais	77
5. SOLO	80
6. TÉCNICA EXPERIMENTAL	85
6.1 - Homogeneização e Pré-Adensamento	85

6.2 - Compressão Triaxial	92
7. OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	96
7.1 - Adensamentos	96
7.2 - Compressão Triaxial	112
7.3 - Aplicação do Modelo Teórico	124
8. DISCUSSÃO FINAL	143
9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	146
9.1 - Conclusões	146
9.2 - Recomendações	146
10. BIBLIOGRAFIA	148
ANEXO 1 - ENSAIOS OEDOMÉTRICOS	162
ANEXO 2 - ÍNDICES FÍSICOS DOS CORPOS DE PROVA NA COMPRESSÃO TRIAXIAL	164
ANEXO 3 - FASES CONFINAMENTO E ADENSAMENTO NA COMPRESSÃO TRIAXIAL	166
ANEXO 4 - PROGRAMA DE CÁLCULO DA COMPRESSÃO TRIAXIAL	168
. Listagem do Programa	168
. Exemplos de Cálculo	174
ANEXO 5 - PRINCIPAIS VARIÁVEIS MEDIDAS NA COMPRESSÃO TRIAXIAL	216
. Parte 1	216
. Parte 2	218
ANEXO 6 - DIFERENÇAS ENTRE DEFORMAÇÕES RADIAIS MEDIDAS DIRETAS E CALCULADAS PELA VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA	220
ANEXO 7 - CORRELAÇÕES LINEARES ENTRE DEFORMAÇÕES RADIAIS E AXIAIS.	222
. Parte 1 - Deformações Radiais Medidas x Deformações Axiais	222
. Parte 2 - Deformações Radiais Calculadas x Deformações Axiais .	225
. Parte 1 - Exemplos	228
. Parte 2 - Exemplos	234

ANEXO 8 - COEFICIENTES DAS REGRESSÕES POLINOMIAIS LINEARES - PA- RÂMETROS ANISOTRÓPICOS	240
ANEXO 9 - COEFICIENTES DAS REGRESSÕES POLINOMIAIS LINEARES - PA- RÂMETROS ISOTRÓPICOS	243
ANEXO 10- COEFICIENTE DE POISSON CALCULADO PELAS VARIAÇÕES VO- LUMÉTRICAS	244

1. INTRODUÇÃO

A idéia de melhor compreensão das leis físicas que governam os materiais é o impulso motivador das pesquisas. Os modelos matemáticos devem evoluir de forma a expressar o comportamento dos materiais através de valores obtidos experimentalmente, aperfeiçoando a lei de comportamento dos mesmos.

Na engenharia geotécnica, cada solo pesquisado, devido à sua natureza variável, pode induzir a novos modelos matemáticos e/ou aperfeiçoamento dos existentes, em função de novos recursos experimentais e numéricos, disponíveis.

Continua sendo de grande interesse da área, obter dados e informações sobre o comportamento tensão-deformação dos solos, principalmente no que se refere a ordem de grandeza e variações dos parâmetros, para utilização em cálculo numérico.

Por outro lado, a precisão dos parâmetros dos solos, para utilização ágil e racional em modelos matemáticos, estão associados aos processos experimentais utilizados. Por isso, o desenvolvimento de equipamentos apropriados é de fundamental importância para que os objetivos sejam alcançados com segurança e qualidade.

O exposto é em síntese a linha seguida neste trabalho.

Seu enfoque teórico baseia-se no equacionamento clássico da Elasticidade Linear para solos com comportamento anisotrópico. Sobre tais equações é elaborado um rearranjo algébrico apropriado para tensões e deformações, objetivando melhores correlações das variações obtidas experimentalmente, na análise de Regressão Polinomial Estatística.

A parte experimental é desenvolvida em um solo argiloso extraído de depósito natural, misturado e homogeneizado com água, em forma de Lama, adensada unidirecionalmente. Este procedimento teve como objetivo pesquisar solos finos não industrializados, tendo em vista que grande parte dos estudos até o presente, foram desenvolvidos, utilizando o caulim na forma industrializada.

Neste trabalho desenvolveu-se equipamento apropriado para a mistura e adensamento unidirecional das Lamas.

A indução à anisotropia provocada no adensamento unidirecional é analisada através de Ensaios de Compressão Triaxial, executados em corpos de prova talhados com direções de eixo: vertical V (coincidente com o de adensamento); horizontal H (ortogonal ao de adensamento); inclinado I (inclinado 45° em relação ao de

adensamento).

Para obtenção das variáveis tensões x deformações nos ensaios de Compressão Triaxial, desenvolveu-se equipamentos eletrônicos específicos para medidas de deformações radiais, axiais, volumétricas e de tensões axiais. Durante o trabalho experimental, os equipamentos projetados passaram por modificações em função de melhores desempenhos, e agilização dos objetivos a serem alcançados.

As variáveis obtidas nos ensaios de Compressão Triaxial são tratadas em processos numéricos estatísticos e fornecem os parâmetros elásticos anisotrópicos da argila: Módulos de Elasticidade Vertical e Horizontal; Coeficientes de Poisson e Módulos de Elasticidade Transversal.

O comportamento dos parâmetros elásticos assim obtidos são então analisados em função dos índices de pré-adensamento das lamelas e das tensões de confinamento dos ensaios de Compressão Triaxial.

Uma extensão é feita no trabalho objetivando, para as mesmas variáveis obtidas nos ensaios com corpos de prova em diferentes direções de eixo, a determinação de parâmetros elásticos isotrópicos. Estes parâmetros, são também analisados em função de pressões índices de pré-adensamento das lamelas e de suas tensões de confinamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos do comportamento tensão x deformação dos solos, na evolução da ciência da engenharia, buscam mais conhecimentos, diversificam os enfoques de projeto e atualizam rumos assumidos em pesquisas iniciais.

Sendo assim, pode-se observar tendências nítidas nos trabalhos consultados.

Uma separação é a dos estudos de controle da deformabilidade e a dos estudos de controle de tensões de ruptura do solo. Isto é induzido pelo interesse respectivamente nos parâmetros de deformabilidade e de resistência do material. Dentro destes dois grupos se encontram as subdivisões de estudos teóricos e experimentais com os respectivos enfoques nas limitações matemáticas e físicas.

Os trabalhos tornam-se ainda mais específicos quando levam em consideração variáveis de anisotropia elástica.

Na tentativa de cobrir o maior número possível de informações sobre o comportamento tensão x deformação do solo, tendo em vista a deformabilidade elástica, foram consultados diversos trabalhos dos quais procuramos resumir e destacar, com certa ordem cronológica, pontos de interesse para a pesquisa que aqui foi desenvolvida.

Bardem (1963) na apresentação de trabalho sobre os efeitos da anisotropia do solo nos recalques de superfície, para cargas verticais pontuais, cita Wolf K, em 1935, como o pioneiro no estudo de anisotropia no solo, o que se poderia considerar como o início das pesquisas com objetivos definidos. O próprio Barden então busca, através do equacionamento clássico para um material elástico com anisotropia cruzada, definir a influência dos parâmetros nos recalques de superfície. No levantamento de pesquisas realizadas até então, foram observadas: que há tendências de orientação horizontal das partículas em adensamento anisotrópico; que as argilas indeformadas apresentam o grau de anisotropia correlacionado com a pressão de pré adensamento; e que do ponto de vista de compressibilidade, argilas normalmente adensadas são isotrópicas e pré-adensadas são anisotrópicas. Mas, ensaios de adensamento em amostras de argilas lamelares pouco adensadas, apresentaram pouca diferença entre as compressibilidades vertical e horizontal. O mérito do trabalho consiste em observar analiticamente que a distribuição de tensões

verticais no solo é pouco afetada pela anisotropia. Ou melhor, que a variação do Coeficiente de Poisson, interfere mais nos valores das tensões nas direções horizontais que nas verticais.

Ladd (1964), estudando o comportamento tensão-deformação de argilas indeformadas e moldadas em ensaios triaxiais não drenados, observou que o Módulo de Elasticidade E , é bastante afetado por diversos fatores aqui resumidos: o nível de tensão cisalhante relativo à resistência ao cisalhamento não drenado, que é o fator mais importante em qualquer tipo de ensaio; anormalidades e distúrbios por movimentos na amostra; adensamento anisotrópico; e sistemática e magnitudes dos acréscimos de tensões aplicadas durante o ensaio de pré-adensamento. Recomenda ensaios triaxiais adensados-não drenados, ao invés de não adensados-não drenados para eventuais correlações entre os parâmetros de laboratório e de campo.

Duncan e Seed (1966) estudaram a variação da resistência ao cisalhamento não drenada de lama caulinitica adensada unidirecionalmente a 150 kPa e readensada anisotropicamente a $\sigma'_1 = 900$ kPa e $\sigma'_3 = 550$ kPa e constataram que a orientação dos planos de ruptura é caracterizada por maior resistência nas amostras verticais. As amostras talhadas de forma que o plano de ruptura coincida aproximadamente com o plano horizontal, são as que apresentam a menor resistência (e não necessariamente amostras com orientação de eixo horizontal). Entretanto no mesmo trabalho são relacionados resultados não coincidentes tais como: para compressão simples na argila de Londres (Bishop, 1948), a resistência de amostras indeformadas inclinadas de 30° com a horizontal apresentaram resistência 28% menor que amostras com orientação vertical. Ward (1956) observou que amostras indeformadas da argila de Londres, em ensaios triaxiais não drenados, apresentaram resistência, para a direção horizontal, 15% a 39% maiores que a direção vertical; as diferentes profundidades das amostras da argila de Londres, afetam diferentemente a ordem de grandeza de sua resistência em relação à posição de eixo; isto é, uma amostra inclinada, à pequena profundidade, tem resistência 28% menor que a amostra vertical enquanto que uma amostra inclinada a grandes profundidades tem redução de sua resistência em somente 1% que em relação a amostra vertical. Jacobson (1955), ensaiando amostras indeformadas da argila marinha da Suécia, chegou a diferenças de resistência entre quaisquer duas amostras (verticais, horizontais ou inclinadas), de 14% e como o erro médio entre as medidas foi também 14%, conclui por isotropia do material; Hvorslev (1960) em ensaios de

compressão simples em argilas remoldadas de Viena e Little Belt, com o mesmo histórico de tensões, chegou a resistências diferentes; além disso as variações foram opostas em relação às posições de moldagem do corpo de prova, isto é, para a primeira: resistência vertical > resistência inclinada > resistência horizontal; e para a segunda: resistência horizontal > resistência inclinada > resistência vertical; Lo (1965) em ensaios de compressão simples em argilas indeformadas do Canadá observou em amostras talhadas com eixo horizontal, resistências 20% a 36% menores que as talhadas com eixo vertical. A comparação de ensaios feitas por Duncan e Seed, levou a conclusão que o solo é anisotrópico com relação à resistência não drenada, mas a relação entre resistência e orientação do plano de ruptura varia com o tipo de solo.

Pickering (1970), analisou o conceito de solos como material elástico anisotrópico e fez considerações sobre os limites teóricos dos valores dos parâmetros elásticos relevantes (Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson). Os limites teóricos dos parâmetros elásticos são analisados através de uma superfície parabólica representada tri-dimensionalmente. Dentre as considerações observa que argilas pré-adensadas sob compressão triaxial podem se expandir sem perda de energia, se as tensões verticais forem altas e as horizontais baixas, o que resultaria em variação volumétrica negativa. Para o pesquisador a conclusão é significativa na aplicação do Método dos Elementos Finitos, em solos expansivos com comportamento elástico.

Silveira e Souto (1970) analisaram teoricamente as implicações da anisotropia elástica em solos compactados e propuseram um procedimento experimental para determinação do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson através de manipulação algébrica e estatística das equações clássicas da Teoria da Elasticidade. O trabalho foi posteriormente estendido para determinação do Módulo de Elasticidade Transversal G_v (Souto Silveira, 1973 e Schiel, 1973).

Saada (1970) analisou teoricamente os efeitos de compressão triaxial para argila natural adensada unidirecionalmente, isto é, com propriedades anisotrópicas, comparando-os a ensaios executados em amostras de nylon com as fibras em diferentes direções, e submetidas a compressão simples. Observou que a amostra vertical sujeita a carga axial deverá manter a secção circular enquanto a amostra horizontal assumirá secção transversal elíptica. Nos dois casos a simetria exclui distorções angulares. A situação será bastante diferente para amostras

inclinadas (a diferentes ângulos) em relação ao eixo de simetria elástica quando há compressão triaxial. Neste caso poderiam surgir deformações cisalhantes nas bordas que induziriam às tensões cisalhantes, que mudariam em magnitude e direção com a inclinação da amostra. O pesquisador discorre também sobre os efeitos do tipo de ensaio nos resultados dos parâmetros do solo. Isto é, quando os ensaios não são drenados, como os acréscimos de tensões axiais são contrabalançados por acréscimos nas pressões neutras, as diferenças entre "parâmetros elásticos efetivos" para amostras na posição de eixo vertical e inclinado são tão pequenas, que são apontadas em geral como erros experimentais. Isto leva a classificações arbitrárias da anisotropia tais como anisotropia devido à pressão neutra, anisotropia nos parâmetros de tensões efetivas, anisotropia devido à reorientação das tensões principais, etc. Tais subdivisões não podem ser defendidas por qualquer conceito de micro ou macro-mecanismos e a validade dos ensaios que conduzem a tais argumentos deve ser questionada. Se há anisotropia em termos de desenvolvimento de pressões neutras, deve haver também em termos de parâmetros de tensões efetivas, uma vez que ambas estão definitivamente associadas às deformações.

Barden (1972) no estudo da influência da estrutura na deformação e ruptura em solos argilosos relacionou diversas idéias de outros pesquisadores que ampliariam os horizontes das hipóteses. Até então, quase todas as teorias fisicoquímicas sobre comportamento das argilas se baseavam na interação de placas isoladas; mas a constatação do fato de que tanto argilas naturais como artificiais são conjuntos de placas, agregados em domínios, grupos e fragmentos, modificou tal pensamento e a teoria de placa isolada passou então a ter mais relevância nas suspensões coloidais diluídas. À parte da teoria de agregados, no entanto, há uma tendência de orientação preferencialmente horizontal nas partículas de siltes e argilas, associadas a pressões de sobrecarga e a forças dispersivas do meio eletroquímico. Amostras com partículas lamelares de pequenas dimensões compactadas estaticamente, tais como caulim e fluorita, apresentaram comportamentos, anisotrópico de deformação e isotrópico de resistência. No caso de partículas lamelares de maiores dimensões, como mica e dolerita, a anisotropia se apresentou de deformabilidade e resistência. Há, portanto, dois níveis estruturais para um solo argiloso e cada um pode apresentar, independentemente, propriedades iso ou anisotrópicas e embora complexas estas estruturas mostram tendências de comportamento. Assim, a anisotropia de deformação é

resultante da anisotropia de placas de argila, orientadas em escala microscópica, ou em macro escala, de agregados e macro poros. Nas argilas naturais isto é mais regra que exceção. O comportamento anisotrópico de resistência é resultado de orientação e anisotropia em macro escala, e não em micro, cuja ocorrência é menos comum. Isto porque há evidências de que a reorientação em zonas de ruptura estão mais para efeito que causa.

Kirkpatrick e Rennie (1972) estudaram as propriedades do caulim adensado, após mistura com água. Os resultados dos ensaios de compressão triaxial e deformação plana em corpos de prova talhados em posições de eixo vertical e horizontal levariam a considerações sobre dualidade de comportamento. Isto é, amostras adensadas isotropicamente tem comportamento isotrópico com relação à propriedades de resistência e deformabilidade. Amostras adensadas anisotropicamente são isotrópicas em relação à resistência porém são mais compressíveis na direção paralela à estrutura de placas alinhadas, do que na direção ortogonal. Os resultados relativos à deformabilidade da argila se referem apenas ao parâmetro Módulo de Elasticidade Secante determinado para as tensões totais.

Mitchell (1972) estudou experimentalmente os desvios de comportamento isotrópico do caulim. O procedimento envolveu duas etapas de trabalho: a primeira com o preparo de mistura caulim com água e o pré-adensamento unidirecional da lama obtida, e a segunda etapa com o readensamento em ensaios triaxiais nos corpos de prova talhados em direção de eixo horizontal e vertical. Nos ensaios drenados, independentemente das condições impostas, o material apresentou comportamento isotrópico. Nos ensaios não drenados, o comportamento ficou sujeito ao nível das tensões de confinamento (ou readensamento); isto é, o comportamento do material foi isotrópico para tensões de readensamento maiores que as de pré-adensamento, e anisotrópico para tensões de readensamento menores que as de pré-adensamento. Para os níveis de tensões apresentados, o material tornou-se isotrópico quando as diferenças de tensões de pré e readensamento atingiram o valor de 10 kPa e manteve-se anisotrópico, para diferenças de 40 kPa. As evidências de comportamento anisotrópico no material diminuíram com o decréscimo das tensões de pré-adensamento e desapareceram quando estas são inferiores a 60 kPa. Para argilas pouco adensadas, a magnitude da variação direcional da resistência não drenada pode ser função da tensão de pré-adensamento e da diferença de tensões iniciais aplicadas no material.

Sankaran e Bhaskaram (1973) estudaram o comportamento anisotrópico de lama caulínítica adensada unidirecionalmente, através de ensaios de Compressão Simples em corpos de prova talhados nas posições de eixo vertical, horizontal e inclinado a 45° . O material apresentou tendências distintas de deformabilidade, resultando em seções transversais de forma circular nos corpos de prova com eixo vertical e elípticas, nos corpos de prova com eixos horizontal e inclinado a 45° .

Atkinson (1973) apresentou uma análise teórica sobre os comportamentos elástico e plástico dos solos, sugerindo a distinção entre estes para ensaios de compressão triaxial, tendo em vista que na prática, em geral, ocorrem somente trajetórias de carregamento que crescem ou decrescem monotonicamente. Assim, o comportamento elástico do solo seria reconhecido, sem necessidade da reversibilidade ou linearidade do comportamento tensão-deformação, sendo suficiente identifica-lo na linearidade das trajetórias das deformações (deformações volumétricas versus axiais) nos ensaios drenados; e na linearidade da trajetória de tensões (tensões efetivas verticais x tensões efetivas horizontais) nos ensaios não drenados. A plasticidade seria identificada na não linearidade de tais trajetórias.

Gibson (1974) analisou teoricamente as variações dos parâmetros do solo, Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade Transversal, para um meio elástico, anisotrópico e incompressível. Correlacionou através de equação empírica os Módulos de Elasticidade e Elasticidade Transversal, em função das duas inclinações de eixos (vertical e horizontal) dos elementos tridimensionais de solo, com a vertical (ou a direção dos carregamentos de superfície). Citou a medida do "Módulo de Young" (E_0) em ensaios de compressão com amostras talhadas com seu eixo inclinado de um ângulo θ com a horizontal. Apresentou o equacionamento empírico então, entre os Módulos de Elasticidade das três direções de eixo, vertical, horizontal e θ , com o Módulo de Elasticidade Transversal para os planos verticais. A correlação gráfica entre os parâmetros resultante da correlação empírica, para $\theta = 45^{\circ}$ demonstrou que é possível um material possuir os mesmos Módulos de Elasticidade Horizontal e Vertical e não ser isotrópico. A variação do Módulo de Elasticidade com o ângulo de inclinação com a horizontal, é o que se pode chamar "pseudo-isotropia". Nestes materiais, para planos com $\theta = 45^{\circ}$, ocorreriam os Módulos de Elasticidade máximos ou mínimos, relativos a qualquer outra direção.

Bhaskaram (1974) estudou experimentalmente uma argila caulinitica industrializada preparada através de misturas em forma de lama e adensada unidirecionalmente a partir de umidades superiores a 1,5 vezes o Limite de Líquidez. Os ensaios de compressão triaxial não drenados foram realizados em amostras com eixos nas direções vertical, horizontal e inclinado a 45° . Todos os ensaios com amostras inclinadas apresentaram menor resistência e "...na literatura tendências conflitantes tem sido relatadas para amostras com eixo inclinado de 45° , em relação às amostras com eixo vertical e horizontal; e isto parece estar relacionado à composição mineral das argilas..."

Atkinson (1975) com o objetivo de analisar a argila de Londres, adotou um modelo matemático para pequenas deformações obtidas nos ensaios de compressão triaxial e de deformação plana, em amostras indeformadas. O modelo, baseado na Teoria Clássica de Elasticidade Linear foi equacionado para comportamento anisotrópico. No trabalho foram comparados resultados de aplicação do modelo e os obtidos no laboratório, com aplicação de conceitos do autor (1973). Assim, o modelo foi utilizado nos ensaios para trechos onde a envoltória das tensões fosse linear nos ensaios não drenados; e onde a envoltória de deformações fosse linear para ensaios drenados, usando apenas sistema de carregamentos. Na discussão dos resultados obtidos, e comparados a outros, o comportamento "sui generis" da argila de Londres foi apresentado através de uma correlação entre o Módulo de Elasticidade Vertical e Módulo de Elasticidade Horizontal de 1/2.

Saada e Bianchini (1975) dando continuidade a "...um intensivo programa de estudo do comportamento de argilas anisotrópicas nos últimos 9 anos..." apresentaram um trabalho experimental em que relacionam os resultados de mais de 150 ensaios executados em amostras de argilas cauliniticas obtidas de adensamento unidirecional de lamas e amostras de argilas indeformadas. Devido à variedade dos tipos de argilas ensaiadas, suas umidades, graus de anisotropia, e do número de envoltórias de tensões e inclinações das tensões principais no eixo de simetria, os autores destacam "...cautelosamente..." algumas conclusões das quais destacamos: 1) Para uma argila adensada unidirecionalmente, a resistência não drenada e a trajetória de tensões efetivas não drenadas dependem não somente das condições iniciais existentes antes do cisalhamento, mas também da maneira como este se desenvolve. Não se pode ignorar a estrutura, ou seja, o grau de anisotropia induzido pelo adensamento unidirecional. Qualquer inclinação das tensões principais resultam, em envoltória de tensões

efetivas diferentes. As argilas com mesma umidade e diferentes graus de anisotropia comportam-se distintamente ao mesmo estado de tensões; 2) Se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, na sua forma clássica é válido para argilas isotrópicas, então uma argila que adquiriu anisotropia através de adensamento unidirecional não pode ser anisotrópica com relação à resistência não drenada e ser definida por uma única envoltória efetiva (c' e ϕ'); "... para a mesma trajetória de tensões na câmara triaxial, a magnitude das tensões principais na ruptura e consequentemente as pressões neutras, dependem da orientação da amostra. Estes valores estão relacionados com o arranjo de partículas, que dão à argila a propriedade de anisotropia. Não é possível ter a variação direcional de um, sem que ocorra a dos outros...".

Amerasinghe e Parry (1975) fizeram um estudo experimental em caulinita preparada através de mistura com água em forma de lama, inicialmente levemente adensada, para se auto suportar e, posteriormente, readensada iso e anisotropicamente nas câmaras triaxiais. O adensamento anisotrópico foi executado com controle de deformação axial zero. As correlações entre índices de vazios e logaritmo das tensões efetivas médias, não apresentaram variações para adensamento iso ou anisotrópico tanto nos carregamentos como nos descarregamentos. Foram calculadas, durante a compressão triaxial, as deformações radiais, em função das deformações volumétricas medidas e, as relações entre deformações axiais e radiais não foram afetadas pelo tipo de adensamento. Há evidências, em ensaios executados em caulinita reconstituída que, se as tensões efetivas isotrópicas são triplicadas, a anisotropia inicial tende a desaparecer. Os autores constatarem que a diferença das tensões cisalhantes são ligeiramente maiores nas amostras iso que nas anisotrópicas e seus valores não são influenciados pelo índice de pré-adensamento, de forma marcante. O Módulo de Elasticidade Secante determinado em amostras isotrópicas foi maior que nas anisotrópicas, tanto em ensaios drenados como não drenados.

Bonaz (1976), em continuidade aos estudos experimentais e teóricos desenvolvidos no L'Institut National Polytechnique de Grenoble, sobre anisotropia estrutural e mecânica das argilas, apresenta um estudo em lamas de argila caulim (industrializada) e de argila natural, adensadas unidirecionalmente e em grandes quantidades. As medidas de anisotropia mecânica foram feitas através de resistência à compressão simples em diferentes orientações das amostras; a

anisotropia de estrutura foi medida através do Método de Difractometria de Raio X. Os resultados experimentais obtidos sobre o caulim constituído tão somente de caulinita foram diferentes dos obtidos da argila natural constituído de grãos de natureza variada (2/3 clorita mais 1/3 ilita). A caulinita, contituida de partículas de maior porte que outros minerais argilosos, adquiriu orientação preferencial mais marcante que a clorita. Além disso, para a argila natural, a orientação das partículas da clorita foi atenuada pela presença de siltes.

Lo, Leonards, Yuen (1977) associados a Palmer (1978), estenderam a Teoria Clássica de Elasticidade Anisotrópica para descrever a deformabilidade de argilas moles e sensíveis, levando em conta o comportamento nos carregamentos e descarregamentos para tensões efetivas. A necessidade de medir pequenas deformações levou ao desenvolvimento de equipamento para medidas de deformações, laterais com precisão adequada e o mínimo de interferência na amostra, mas de uso técnico extremamente complexo. O grau de anisotropia (n), para os parâmetros determinados (Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade Transversal) apresentaram coerência para os ensaios não drenados; para os ensaios drenados, o grau de anisotropia obtido das relações entre os parâmetros Módulo de Elasticidade e Coeficientes de Poisson foram variáveis entre si e também em relação aos obtidos nos ensaios drenados.

Bishop e Hight (1977) estudaram teoricamente o Coeficiente de Poisson para solos e rochas saturados, ensaiados sob condições não drenadas, comparando os limites com valores experimentais obtidos por outros autores. Enfatizam que no estudo do comportamento de solos ideais (ou reais) para condições não drenadas, existe o envolvimento de duas fases que tem compressibilidades diferentes, mas finitas. Porisso, é tão incorreto esperar que o Coeficiente de Poisson não drenado em solos isotrópicos seja igual a 0,5, como que o parâmetro B de Skempton seja igual a 1. E mais, à medida que o material passa de solo com baixas pressões de pré-adensamento, para solos altamente pré-adensados e rochas, estas hipóteses vão se invalidando embora as pressões neutras sejam importantes no meio. Observam, também, que a medida do Coeficiente de Poisson, na prática, deve ser cuidadosa porque pode acusar sinais de comportamento anisotrópico. Em solos indeformados esta possibilidade passa a ser certeza, eventualmente mascarada por valores do Coeficiente de Poisson, que nas condições saturadas ($B = 1$) poderão resultar em valores iguais a 0,5, para

corpos de prova com eixo vertical. Para valores de B menores que 1, o Coeficiente de Poisson poderá dar valores semelhantes ao isotrópico. Os ensaios em corpos de prova com eixo horizontal devem ser sempre executados, em condições drenadas e não drenadas para corrigir conclusões simplistas.

Chowdhury (1978) no estudo teórico sobre parâmetros elásticos do solo, observou que há relações definidas entre "parâmetros de tensões efetivas", e entre "parâmetros de tensões totais". Estas relações permitem a determinação de parâmetros de "tensões totais" a partir de valores dados dos parâmetros de "tensões efetivas". Contudo, o inverso não é verdadeiro. Conhecendo-se os parâmetros de "tensões totais" não é possível determinar os parâmetros de "tensões efetivas". Estes últimos podem ser considerados como representativos das propriedades do esqueleto do solo e distintos daqueles que representam o meio contínuo solo + água. Por outro lado, é correto dizer que não há diferença entre parâmetros de tensões totais e efetivos para um solo seco; o mesmo pode ser dito para solos saturados onde não há acréscimo da pressão neutra durante o carregamento (ensaio drenado). As incertezas estão relacionadas aos parâmetros dos dois conjuntos e nas tendências a interpretar resultados entre condições de solo seco e de solo saturado não drenado. Neste, os limites dos parâmetros elásticos de um solo incompressível são marcadamente diferentes do material seco ou saturado com drenagem (onde as pressões neutras são sempre zero durante os carregamentos). Vale a pena lembrar o caso geral da Mecânica dos Solos quando o material não pode ser considerado incompressível e ao mesmo tempo a pressão neutra é diferente de zero durante os acréscimos de carregamento. Evidentemente, é difícil derivar expressões para a pressão neutra em termos de parâmetros elásticos para tais casos, particularmente quando são consideradas condições não saturadas. Consequentemente, seria difícil pesquisar os limites gerais dos parâmetros elásticos para tais materiais em termos de tensões efetivas. Os limites para tensões totais podem ser teoricamente obtidos, mas seu significado fundamental é, a esta altura, duvidoso.

Saada, Bianchini e Shook (1978) estudaram o comportamento dinâmico de argilas cauliniticas preparadas a partir de lamelas adensadas. Duas técnicas foram usadas no preparo das amostras, objetivando comportamento iso e anisotrópico. Na primeira, os volumes de água utilizados foram menores e suficientes para permitir, após amassamento, o corte das amostras a serem submetidas a pressões

hidrostáticas. No segundo, os volumes de água na lama e as tensões utilizadas no adensamento unidirecional, foram maiores. Dessa forma, foram obtidos para o primeiro processo estruturas randômicas e para o segundo processo, estruturas orientadas.

Saada e Shook (1979) resumem seus trabalhos realizados em corpos de prova cilíndricos, vazados e concluem que o conhecimento do comportamento de argilas sob carregamentos estáticos, embora extenso, não permitiram até então encontrar equações constitutivas gerais que possam ser usadas na solução de problemas comuns em engenharia de fundações. Muitas pesquisas de laboratório, envolvendo estados de tensões combinados, são necessárias antes que qualquer das teorias apresentadas possam ser aceitas visto que, em geral, estas teorias tem sido baseadas em ensaios de simetria axial, em camaras triaxiais padronizadas.

Murthy, Nagaraj e Sridharam (1980), apresentam resultados de um estudo experimental, com ensaios de compressão e expansão triaxial, para análise de resistência drenada e de parâmetros de tensões efetivas, em solo artificialmente preparado em camadas alternadas (caulin e areia fina). Observaram que, tanto nos ensaios de compressão como nos de expansão, as tensões de ruptura medidas para corpo de prova verticais e horizontais foram iguais, para quaisquer valores das tensões octaédricas normais usadas (mínima 300 máxima 600 kPa). Os parâmetros de resistência efetivos foram idênticos para corpos de prova verticais e horizontais, mas variaram para corpos de prova cortados em outras direções. Os resultados mostraram que a variação de resistência não é somente função do grau de orientação das tensões principais, isto é, orientação dos planos das camadas em relação à direção das tensões principais, mas também do desenvolvimento das deformações (compressão/expansão). Para uma interpretação realística de resistência, em problemas práticos de solos extratificados, é imperativo simular não só o material como o desenvolvimento das deformações.

Lefevre (1980) em continuidade à linha de pesquisa do L'Institut National Polytechnique de Grenoble, através de programa experimental, analisou o comportamento de um caulin puro, adensado unidirecionalmente após mistura com água em forma de lama. Estudou a anisotropia de estrutura pelo método de Difractometria de Raio X e Bifringencia Óptica; e a anisotropia mecânica com a de Compressão Simples. Os resultados mostraram que a anisotropia mecânica é menos pronunciada que a anisotropia de estrutura.

Gazetas (1982) fez um estudo analítico dos parâmetros de elasticidade anisotrópicos e seus efeitos nos deslocamentos de superfície e na distribuição das tensões num solo homogêneo. Observou que recalques realísticos são suficientemente pequenos, que permitem seu tratamento dentro das considerações da Teoria da Elasticidade. Após sumarizar dados experimentais existentes relativos a argilas e areias anisotrópicas, o trabalho esboçou brevemente a formulação e a solução do comportamento um semi-espaço elástico anisotrópico com carregamento parabólico na superfície. Os deslocamentos de superfície e distribuições de tensões resultantes destes carregamentos dependem muito das constantes elásticas anisotrópicas assumidas, tais como o grau de anisotropia n ; relação Módulo de Elasticidade Transversal com Módulo de Elasticidade Vertical; e o Coeficiente de Poisson anisotrópico. As tensões normais verticais sob o centro do carregamento são também afetadas por tais parâmetros, ao contrário da elasticidade isotrópica clássica, cujo prognóstico é de que são independentes do Coeficiente de Poisson.

Graham e Houlsby (1983) estudaram a anisotropia elástica de uma argila natural, justificando ser muito razoável caracterizar argilas pouco pré-adensadas como linearmente elásticas no espaço de tensões interno à superfície de escoamento. "...Mesmo se não há reversibilidade total é comum a identificação de parâmetros pseudo-elásticos para variações monotônicas de tensões..." Citam a família de modelos do estado crítico (Schofield e Wroth, 1968; Roscoe e Burland, 1968), que incluem a elasticidade isotrópica com um Módulo de Elasticidade Volumétrica não linear, e um Módulo de Elasticidade Transversal constante (Wroth e Houlsby, 1980). Para pequenas variações de tensões, não linearidade no comportamento volumétrico não é significativo e o comportamento esperado aproxima-se do linear elástico-isotrópico. A proposta do trabalho foi uma simplificação no processo analítico na Equação Clássica da Teoria Elástica, para obtenção dos parâmetros de uma argila natural com comportamento anisotrópico. Demonstram que, adaptando o comportamento elástico de uma argila natural com o uso de parâmetros anisotrópicos, ao invés de isotrópicos, a qualidade de ajuste do modelo teórico pode aumentar consideravelmente, e reduz em 30% a 40% erros típicos na previsão de deformação.

3. MODELO TEÓRICO ADOTADO

A idéia de se tratar e estudar o comportamento físico do solo, equacionando-o através de Modelos Clássicos como a Teoria de Elasticidade Linear, pode ter seus aspectos atrativos e positivos tendo em vista os recursos atuais disponíveis de ensaios e processos de cálculo.

A criatividade usada em pesquisas, anteriores à introdução de equipamentos eletrônicos em ensaios geotécnicos, tanto na parte prática como teórica, pode fornecer ainda subsídios para que, usando-se princípios básicos, obtenha-se maior aproveitamento das análises em solos e melhores resultados para aplicação em projetos.

Sob esse ponto de vista, estudando algumas das pesquisas teóricas (Souto Silveira E.B. e outros, 1970 e 1973; Barreiro, J.C., 1971; Schiel, 1973) sobre Anisotropia Elástica nos solos, visualizou-se a possibilidade de ampliar e discutir propostas já feitas.

Na teoria clássica da Elasticidade Linear, um solo homogêneo, semi-infinito e elástico apresenta Anisotropia Transversal ou Cruzada quando possui um eixo (z = vertical) de simetria total e um plano (xy = horizontal) perpendicular ao eixo z , denominado plano de simetria elástica, onde as propriedades elásticas do material são isotrópicas.

Esse comportamento mecânico é observado principalmente nas argilas e pode ser justificado sob o ponto de vista macroscópico, devido à orientação preferencial das partículas ou grupos de partículas, causadas por fatores morfológicos diversos, estruturais e/ou ambientais.

O modelo elástico linear expressa o comportamento tensão-deformação do solo, através da formulação matricial:

$$\{\epsilon_{ij}\} = D_{ijkl} \{\sigma_{kl}\}$$

$\{\epsilon_{ij}\}$ - matriz de deformações

$\{\sigma_{kl}\}$ - matriz de tensões

D_{ijkl} - matriz inversa dos parâmetros elásticos

Para solos anisotrópicos essa formulação se expressa pelas equações (Poulos e Davis, 1974):

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_h} - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \sigma_y - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \sigma_z \dots\dots\dots (01)$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu_{hh}}{E_h} \sigma_x + \frac{\sigma_y}{E_h} - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \sigma_z \dots\dots\dots (02)$$

$$\epsilon_z = -\frac{\nu_{hv}}{E_h} \sigma_x - \frac{\nu_{hv}}{E_h} \sigma_y + \frac{\sigma_z}{E_v} \dots\dots\dots (03)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G_{hv}} \quad \tau_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{1}{G_{vh}} \quad \tau_{zy} \dots\dots\dots (04)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G_{hv}} \quad \tau_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{1}{G_{vh}} \quad \tau_{zx} \dots\dots\dots (05)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G_{hh}} \quad \tau_{xy} = \frac{2(1 + \nu_{hh})}{E_h} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} \dots\dots\dots (06)$$

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ - definem as deformações específicas nas direções x, y, z, num sistema de eixos de Coordenadas Cartezianas.

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - definem as tensões correspondentes às direções x, y, z.

$\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$ - definem as deformações específicas cisalhantes nos planos yz, xz, xy.

$\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ - definem as tensões cisalhantes nos mesmos planos.

Ou seja, se considerarmos que um solo apresenta Anisotropia Transversal, no plano xy (horizontal) perpendicular ao eixo z (representando neste estudo a direção vertical) os parâmetros elásticos que definem as relações tensão-deformação nas equações 1 a 6, podem ser definidos (Poulos e Davis, 1974) como:

E_h - Módulo de Elasticidade na direção horizontal

E_v - Módulo de Elasticidade na direção vertical

ν_{hh} - Coeficiente de Poisson, para efeito das tensões horizontais nas deformações horizontais, representado por ν_h .

- ν_{hv} - Coeficiente de Poisson, para efeito das tensões horizontais nas deformações verticais.
- ν_{vh} - Coeficiente de Poisson, para efeito das tensões verticais nas deformações horizontais.
- $G_{vh} = G_{hv}$ - Módulo de Elasticidade Transversal no plano vertical, representado por G_v .
- G_{hh} - Módulo de Elasticidade Transversal no plano horizontal, representado por G_h .

Pode ser demonstrado que:

$$\frac{E_h}{E_v} = \frac{\nu_{hv}}{\nu_{vh}} = n \quad ; \quad G_h = \frac{E_h}{2(1 + \nu_h)}$$

onde:

n - é definido como Grau de Anisotropia

Se aplicarmos esse modelo para condições bem definidas, como por exemplo em Ensaios de Compressão Triaxial, com corpos de prova cilíndricos ensaiados em três diferentes direções com relação ao eixo z de simetria total, com medidas de deformações verticais e radiais, será possível estabelecer algumas correlações importantes entre os parâmetros elásticos.

Para isso, a tensão confinante de ensaio σ_3 (constante) equivale às tensões σ_h do plano horizontal do modelo; a deformação axial medida a velocidade controlada é representada pela deformação vertical ϵ_v do modelo; a tensão axial σ_1 corresponde à medida da tensão σ_v vertical do modelo; e as deformações radiais correspondem às deformações horizontais ϵ_h do modelo.

As três diferentes direções dos corpos de prova, ensaiados em relação ao eixo de anisotropia (z), serão identificados por:

V - quando o eixo vertical coincide com o eixo de anisotropia (z).

H - quando o eixo de anisotropia (z) está na posição horizontal.

I - quando o eixo de anisotropia (z) está inclinado 45° em relação à vertical.

O desenvolvimento algébrico para as condições descritas será exposto de forma sucinta à seguir:

- Para Corpo de Prova Vertical (V)

Para um corpo de prova vertical, as relações de tensões e deformações do modelo aplicadas ao Ensaio de Compressão Triaxial serão descritas em relação às equações (1) a (6) como:

- $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_{hV}$ - deformações horizontais específicas medidas no corpo de prova vertical
 $\epsilon_z = \epsilon_{vV}$ - deformações verticais (ou axiais) específicas medidas no corpo de prova vertical
 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{hV}$ - tensões confinantes (ou horizontais) aplicadas no corpo de prova vertical
 $\sigma_z = \sigma_{vV}$ - tensões verticais (ou axiais) medidas no corpo de prova vertical

$$\epsilon_{vV} = \frac{1}{E_V} \sigma_{vV} - 2 \frac{\nu_{vh}}{E_V} \sigma_{hV} \dots\dots\dots (07)$$

$$\epsilon_{hV} = - \frac{1}{E_V} \nu_{vh} \sigma_{vV} + \frac{1}{E_V} \left(\frac{1}{n} - \frac{\nu_{hV}}{n} \right) \sigma_{hV} \dots\dots\dots (08)$$

- Corpo de Prova Horizontal (H)

- $\epsilon_x = \epsilon_{hH}^A$ - deformações horizontais medidas no corpo de prova horizontal na direção x do plano de simetria.
 $\epsilon_y = \epsilon_{vH}$ - deformações verticais medidas no corpo de prova horizontal.
 $\epsilon_z = \epsilon_{hH}^B$ - deformações horizontais medidas no corpo de prova horizontal na direção z (eixo de simetria total).
 $\sigma_x = \sigma_z = \sigma_{hH}$ - tensões confinantes (ou horizontais) aplicadas no corpo de prova horizontal.
 $\sigma_y = \sigma_{vH}$ - tensões verticais (ou axiais) medidas no corpo de prova horizontal.

As deformações horizontais medidas e identificadas como A e B, serão ortogonais entre si e serão naturalmente perpendiculares ao eixo agora vertical (y) do plano de simetria (xy).

O corpo de prova ensaiado terá o eixo de anisotropia total z na posição horizontal submetido à tensão confinante idêntica à aplicada ao eixo x do plano de simetria xy. Ou seja, para resultados é importante que no corpo de prova, se diferencie e identifique os eixos x, y, z, uma vez que para deformações radiais, as equações são diferentes e a determinação dos parâmetros elásticos vão depender desta distinção.

$$\epsilon_{vH} = \frac{1}{nE_v} \sigma_{vH} - \frac{1}{E_v} \left(\frac{\nu_h}{n} + \nu_{vh} \right) \sigma_{hH} \dots\dots\dots (09)$$

$$\epsilon_{hH}^A = - \frac{\nu_h}{nE_v} \sigma_{vH} + \frac{1}{E_v} \left(\frac{1}{n} - \nu_{vh} \right) \sigma_{hH} \dots\dots\dots (10)$$

$$\epsilon_{hh}^B = -\frac{\nu_{vh}}{E_v} \sigma_{vh} + \frac{1}{E_v} (1 - \nu_{vh}) \sigma_{hh} \dots\dots\dots (11)$$

- Corpo de Prova Inclinado a 45° (I)

A condição imposta pela geometria do problema requer o uso da Transformação de Eixos, tanto para a Matriz de Tensões como para Matriz de Deformações (Poulos e Davis, 1974; Harr, 1966).

Se um novo sistema de eixos ortogonais x', y', z' é utilizado, as componentes das tensões neste sistema de coordenadas estão relacionados com as componentes de tensões do sistema original x, y, z , da seguinte forma:

$$S = A^T S' A$$

S' - matriz das tensões para os eixos $x' y' z'$ ou $x y' z'$ (no caso)

S - matriz das tensões para os eixos $x y z$

A - matriz dos cossenos diretores, e A^T , sua transposta.

Para as deformações a relação seria:

$$D' = A D A^T$$

D' - matriz das deformações para os eixos $x' y' z'$ ou $x y' z'$ (no caso)

D - matriz das deformações para os eixos $x y z$

No sistema proposto: $x = x'$; $\hat{z}z' = \hat{y}y' = 45^\circ$

$$A = \begin{vmatrix} \cos(\hat{x} \hat{x}') & \cos(\hat{x} \hat{y}') & \cos(\hat{x} \hat{z}') \\ \cos(\hat{y} \hat{x}') & \cos(\hat{y} \hat{y}') & \cos(\hat{y} \hat{z}') \\ \cos(\hat{z} \hat{x}') & \cos(\hat{z} \hat{y}') & \cos(\hat{z} \hat{z}') \end{vmatrix}$$

Ou seja:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{vmatrix} \quad e \quad A^T = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 \\ 0 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{vmatrix}$$

Para as tensões:

$$S' = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{y'x} & \tau_{z'x} \\ \tau_{xy'} & \sigma_{y'} & \tau_{z'y'} \\ \tau_{xz'} & \tau_{y'z'} & \sigma_{z'} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{vmatrix}$$

$$S = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

Para $S = A^T S' A$

$$S = \begin{vmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} & \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \\ 0 & \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} & \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \end{vmatrix}$$

Para as deformações específicas:

$$D = \begin{vmatrix} \epsilon_x & 1/2 \gamma_{xy} & 1/2 \gamma_{xz} \\ 1/2 \gamma_{yx} & \epsilon_y & 1/2 \gamma_{yz} \\ 1/2 \gamma_{zx} & 1/2 \gamma_{zy} & \epsilon_z \end{vmatrix}$$

Para $D' = ADA^T$

$$D' = \begin{vmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & (\epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{yz})/2 & (\epsilon_z - \epsilon_y)/2 \\ 0 & (\epsilon_z - \epsilon_y)/2 & (\epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{yz})/2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \epsilon_{hI}^A & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{hI}^B & 1/2 \gamma_{hv} \\ 0 & 1/2 \gamma_{vh} & \epsilon_{vI} \end{vmatrix}$$

Ou seja, nas equações (1) a (6), as variáveis serão respectivamente:

$\epsilon_x = \epsilon_{x'} = \epsilon_{hI}^A$ - deformações horizontais específicas, medidas no corpo de prova inclinado na direção x do plano (xy) de simetria.

ϵ_{hI}^B - deformações horizontais específicas, medidas no corpo de prova inclinado na direção $y' = (y + 45^\circ)$ em relação ao plano (x, y) de simetria.

$$\epsilon_{hI}^B = (\epsilon_y + \epsilon_z + \gamma_{yz})/2$$

ϵ_{vI} - deformações verticais, medidas no corpo de prova inclinado, na direção $z' = (z + 45^\circ)$ em relação ao eixo de simetria.

$$\epsilon_{vI} = (\epsilon_y + \epsilon_z - \gamma_{yz})/2$$

$$\sigma_x = \sigma_{hI} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{vz}}{G_v} = \gamma_{zy} = \frac{\tau_{zy}}{G_v}$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{vI} + \sigma_{hI}}{2} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{\sigma_{hI} - \sigma_{vI}}{2}$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_{vI} - \sigma_{hI}}{2}$$

σ_{hI} - tensão confinante (ou horizontal) aplicada no corpo de prova inclinado 45° .

σ_{vI} - tensão vertical (ou axial) medida no corpo de prova 45° .

γ_{hv} - deformações específicas cisalhantes nos planos $y'z'$.

γ_{vh} - deformações específicas cisalhantes nos planos $z'y'$.

Das equações (1) a (6) do modelo, com a mudança de eixos teremos:

$$\epsilon_{vI} = \left(\frac{1}{E_v} + \frac{1}{E_h} - \frac{2\nu_{vh}}{E_v} + \frac{1}{G_v} \right) \frac{\sigma_{vI}}{4} + \left(\frac{1}{E_v} + \frac{1}{E_h} - \frac{4\nu_{vh}}{E_v} - \frac{2\nu_h}{E_h} - \frac{1}{G_v} \right) \frac{\sigma_{hI}}{4} \dots\dots\dots (12)$$

$$\epsilon_{hI}^A = \left(-\frac{\nu_h}{2E_h} - \frac{\nu_{vh}}{2E_v} \right) \sigma_{vI} + \left(\frac{1}{E_h} - \frac{\nu_h}{2E_h} - \frac{\nu_{vh}}{2E_v} \right) \sigma_{hI} \dots\dots\dots (13)$$

$$\epsilon_{hI}^B = \left(\frac{1}{E_v} + \frac{1}{E_h} - \frac{2\nu_{vh}}{E_v} - \frac{1}{G_v} \right) \frac{\sigma_{vI}}{4} + \left(\frac{1}{E_v} + \frac{1}{E_h} - \frac{4\nu_{vh}}{E_v} - \frac{2\nu_h}{E_h} + \frac{1}{G_v} \right) \frac{\sigma_{hI}}{4} \dots\dots\dots (14)$$

Uma nova etapa surge após este equacionamento, com a finalidade de determinação dos parâmetros elásticos.

O procedimento de execução dos ensaios de Compressão Triaxial sob tensão confinante σ_3 (constante), velocidade controlada para medidas da deformação axial ϵ_v , medidas de tensão axial σ_1 e medidas cuidadosas de deformação radial (ϵ_h^A e/ou ϵ_h^B), em posições pré-fixadas por ocasião do preparo do corpo de prova, leva a um tratamento específico dos dados experimentais obtidos.

A execução de mais de dois ensaios triaxiais para cada posição de eixo (V, H, I) permite que se faça a correlação entre estas Equações Elásticas Lineares e Regressões Polinomiais Lineares. Ou seja, no polinômio:

$$Y = a + bX_1 + cX_2, \quad \text{temos}$$

Y - variável dependente

X_1 e X_2 - variáveis independentes

a, b, c - coeficientes dos Polinômios Lineares.

A introdução da Análise Estatística permite que esses dados sejam analisados, em função dos ensaios realizados, de maneira mais apropriada.

Assim, procurando obter uma melhor correlação entre as variáveis físicas controláveis no ensaio triaxial e a formulação matemática a ser utilizada na análise de dados, propõe-se as seguintes correlações:

- Y - como variável dependente, representando as tensões e deformações obtidas, a partir de tensões e deformações controladas no Ensaio Triaxial.
- X₁ e X₂ - como variáveis independentes, representando as tensões e deformações controladas no Ensaio Triaxial.

Portanto:

Y - representará as tensões verticais (ou axiais), σ_v e deformações horizontais, ϵ_h .

X₁ - representará as deformações verticais (ou axiais), ϵ_v controladas pela velocidade.

X₂ - representará as tensões horizontais (ou confinantes) constantes no Ensaio Triaxial σ_h .

As equações Elástico-Lineares para as condições propostas se apresentarão da seguinte forma:

$$\sigma_{vV} = E_v \epsilon_{vV} + 2 \nu_{vh} \sigma_{hV} \dots\dots\dots (15)$$

$$\epsilon_{hV} = - \nu_{vh} \epsilon_{vV} + (1 - \nu_h - 2n\nu_{vh}^2) \sigma_{hV}/E_h \dots\dots\dots (16)$$

$$\sigma_{vH} = n E_v \epsilon_{vH} + (\nu_h + n\nu_{vh}) \sigma_{hH} \dots\dots\dots (17)$$

$$\epsilon_{hH}^A = - \nu_h \epsilon_{vH} + (1 - n\nu_h \nu_{vh} - n\nu_{vh} - \nu_h^2) \sigma_{hH}/E_h \dots\dots\dots (18)$$

$$\epsilon_{hH}^B = - n\nu_{vh} \epsilon_{vH} + (1 - \nu_{vh} - \nu_{vh} \nu_h - n\nu_{vh}^2) \sigma_{hH}/E_v \dots\dots\dots (19)$$

$$\sigma_{vI} = \frac{1}{A_3} \epsilon_{vI} + \frac{B_3}{A_3} \sigma_{hI} \dots\dots\dots (20)$$

$$\epsilon_{hI}^A = - \frac{B_2}{2A_3} \epsilon_{vI} + (A_2 - \frac{B_2}{2} - \frac{B_2 B_3}{2A_3}) \sigma_{hI} \dots\dots\dots (21)$$

$$\epsilon_{hI}^B = (1 - \frac{1}{2A_3 G_v}) \epsilon_{vI} - (\frac{B_3}{2A_3 G_v} - \frac{1}{2G_v}) \sigma_{hI} \dots\dots\dots (22)$$

Onde:

$$A_1 = \frac{1}{E_v} ; \quad A_2 = \frac{1}{E_h} ; \quad A_3 = (A_1 + A_2 - B_1 + \frac{1}{G_v}) \frac{1}{4}$$

$$B_1 = \frac{2 \nu_{vh}}{E_v} ; \quad B_2 = (\frac{\nu_h}{E_h} + \frac{\nu_{vh}}{E_v}) ;$$

$$- B_3 = (A_1 + A_2 - B_1 - 2 B_2 - \frac{1}{G_v}) \frac{1}{4}$$

Embora as relações tensões-deformações das Equações Elásticas Lineares sejam interdependentes, o tratamento estatístico de variáveis permite um melhor ajuste entre elas e melhores correlações na determinação dos coeficientes a , b , c , das Regressões Polinomiais Lineares.

Quando os coeficientes a , b , c das Regressões Polinomiais são estimados através do Método dos Mínimos Quadrados, deve-se medir o grau de relacionamento entre as variáveis. Se o relacionamento existe, pode-se medir a excelência do ajuste através dos Coeficientes de Correlação (R).

A metodologia proposta enfoca este aspecto matemático, ou seja, a correlação entre as variáveis tensão-deformação pode ser refinada em função do ensaio executado, discriminando-se variáveis controladas ou controláveis como independentes, e variáveis obtidas como dependentes.

Nos Ensaio Triaxiais à deformação controlada e tensão confinante constante, com medidas de deformações radiais (ou horizontais) e tensões axiais (ou verticais) os coeficientes b e c , das Regressões Polinomiais representam nas equações (15) a (22) os Parâmetros Elásticos do Solo, E_h , E_v , ν_{vh} , ν_h e G_v .

A disponibilidade de programas de computação específicos, para Análise Estatística dos dados, permite que com variáveis Y (σ_v ou ϵ_h), X_1 (ϵ_v) e X_2 (σ_h), sejam calculados os Coeficientes de Polinômios Lineares (a , b e c), Coeficientes de Correlações Totais (R) e/ou Parciais (r), para controle de resultados com melhor refinamento.

A manipulação algébrica do coeficiente c pode levar a uma precisão matemática maior em termos teóricos, principalmente de limites e igualdades dos parâmetros elásticos obtidos. Porém, em termos práticos, o coeficiente b é suficiente para a determinação dos

parâmetros, e o rigor matemático ficaria prejudicado pela ordem de grandeza dos coeficientes, cujos cálculos tornam-se imprecisos pelas sucessivas operações de divisão, multiplicação e arredondamentos.

Além disso, o que é importante no Método dos Mínimos Quadrados das Regressões Polinomiais Estatísticas, a variável X_2 (σ_h) que exerce efeito fundamental nas demais (Y e X_1), está devidamente considerada na determinação do coeficiente b .

Sendo assim os parâmetros elásticos serão obtidos através das seguintes Regressões Polinomiais Lineares:

$$\sigma_{VV} = a_1 + b_1 \epsilon_{VV} + c_1 \sigma_{hV} \dots\dots\dots (23)$$

$$\epsilon_{hV} = a_2 + b_2 \epsilon_{VV} + c_2 \sigma_{hV} \dots\dots\dots (24)$$

$$\sigma_{vH} = a_3 + b_3 \epsilon_{vH} + c_3 \sigma_{hH} \dots\dots\dots (25)$$

$$\epsilon_{hH}^A = a_4 + b_4 \epsilon_{vH} + c_4 \sigma_{hH} \dots\dots\dots (26)$$

$$\epsilon_{hH}^B = a_5 + b_5 \epsilon_{vH} + c_5 \sigma_{hH} \dots\dots\dots (27)$$

$$\sigma_{vI} = a_6 + b_6 \epsilon_{vI} + c_6 \sigma_{hI} \dots\dots\dots (28)$$

$$\epsilon_{hI}^A = a_7 + b_7 \epsilon_{vI} + c_7 \sigma_{hI} \dots\dots\dots (29)$$

$$\epsilon_{hI}^B = a_8 + b_8 \sigma_{vI} + c_8 \sigma_{hI} \dots\dots\dots (30)$$

As variáveis Y , X_1 , X_2 deverão estar contidas nos trechos lineares das curvas Tensão x Deformação Axial, e Deformação Axial x Deformação Radial.

Das equações (15) a (22) e (23) a (30), os parâmetros b_1 a b_8 representarão respectivamente:

$$b_1 = E_v \dots\dots\dots (31)$$

$$b_2 = -\nu_{vh} \dots\dots\dots (32)$$

$$b_3 = E_h \dots\dots\dots (33)$$

$$b_4 = -\nu_h \dots\dots\dots (34)$$

$$b_5 = -n\nu_{vh} \dots\dots\dots (35)$$

$$b_6 = \frac{4G_v}{(A_1 + A_2 - B_1) G_v + 1} \dots\dots\dots (36)$$

$$b_7 = \frac{-2 G_v B_2}{(A_1 + A_2 - B_1) G_v + 1} \dots\dots\dots (37)$$

$$b_8 = \frac{(A_1 + A_2 - B_1) G_v - 1}{(A_1 + A_2 - B_1) G_v + 1} \dots\dots\dots (38)$$

Ou ainda:

$$G_v = \frac{b_6}{4 - b_6 (A_1 + A_2 - B_1)} \dots\dots\dots (39)$$

$$G_v = \frac{-b_7}{b_7 (A_1 + A_2 - B_1) + 2B_2} \dots\dots\dots (40)$$

$$G_v = \frac{(b_8 + 1)}{(A_1 + A_2 - B_1) (1 - b_8)} \dots\dots\dots (41)$$

A determinação do Módulo de Elasticidade Transversal, G_v , ficará condicionado à: disponibilidade dos equipamentos, precisão dos ensaios, facilidade das operações algébricas, decisão estatística ou mesmo coerência de resultados, uma vez que, como justificado anteriormente, o excesso de operações para valores algébricos de pequena grandeza, levam a diferenças numéricas não verdadeiras.

4. EQUIPAMENTOS

A idéia de se conhecer o comportamento físico de um material e em particular o solo, é conseguir o maior número de correlações possíveis entre um modelo teórico e as medidas reais. Os modelos teóricos expressam comportamentos físicos de forma coerente onde variáveis como tensões e deformações se relacionam através de parâmetros. Os parâmetros são elementos de controle e devem ser conhecidos como banco de dados do material estudado.

A instrumentação ideal é aquela que registra variações tais como as tensões e as deformações num elemento tridimensional, de forma mais completa possível, sem interferir no comportamento do mesmo. Estender esse comportamento a dimensões reais completa o ciclo.

Entre o Modelo e a Aplicação, existem diversas condicionantes e a instrumentação, sendo um dos elos sensíveis, seu controle e adequação são fundamentais às interpretações finais dos resultados.

Os procedimentos para análise do solo, a partir do Modelo Elástico Linear são de grande amplitude, como visto na revisão bibliográfica, porém algumas ideias já estabelecidas devem ser mantidas, em favor da possibilidade de comparação de resultados e da natureza mutável dos elementos estudados.

O recurso de misturar solo com água para obtenção de uma Lama, e provocar o seu adensamento unidirecional, de uma certa maneira procura representar o processo natural de formação sedimentar das argilas, resultando em uma orientação preferencial, de sua estrutura macroscópica. Completando estas condições de indução, o confinamento gerado no ensaio de Compressão Triaxial, representaria situações de carregamentos mais específicos, de peso próprio e/ou de sobrecargas adivindas de obras em geral.

A criatividade, a partir destes procedimentos básicos, aproxima de forma conveniente o modelo teórico do comportamento real, e estão diretamente relacionados ao tipo e construção de equipamentos utilizados.

O objeto deste capítulo é a descrição detalhada e ilustrada da instrumentação empregada no trabalho.

Os auxílios à pesquisa solicitados à FAPESP e CNPq forneceram o suporte financeiro à aquisição de material e equipamentos. Os equipamentos mecânicos foram executados na Oficina Mecânica da EESC-USP, sob nossa supervisão e responsabilidade. Os

equipamentos eletrônicos foram adquiridos na Transdutec Ind. e Com. de Transdutores Ltda., empresa nacional, que trabalhando em instrumentação para engenharia civil em geral, iniciou uma linha singular no fornecimento de aparelhos por nós especificados.

4.1 - Galga

Para a desagregação do material em grandes quantidades foi adquirida a Galga de Moagem, das Construções Mecânicas Gardelim Ltda., facilitando e acelerando assim, o processo de preparo inicial do solo amostrado.

O equipamento consta de uma caçamba e duas mós de aço com rolamentos, estrutura em vigas, varredeira regulável, acionamento por motor redutor, e saída de fundo do material.

A Foto 4.1, mostra o equipamento (sem a caçamba). As dimensões aproximadas do equipamento completo são 650 x 650 x 1000mm, com massa aproximada de 300 kg. Rotação do eixo central 30 r.p.m. e potência do motor 1 HP.

Foto 4.1 - Vista geral da Galga de Moagem

O solo é colocado na caçamba e destorroado pela mós (com 80mm de largura) que giram em movimento de rotação em relação ao eixo central e que por serem livres, giram sobre seus próprios eixos. Estes eixos podem ter suas alturas reguláveis, para quando houver um grande acúmulo de material ou quando houver torrões muito grandes. A varredeira também gira em relação ao eixo central e tem a função de recolher o material acumulado, direcionando o para a área de contacto com as mós. A Foto 4.2 ilustra o funcionamento do equipamento, com a caçamba. Após completar o ciclo de destorroamento abre-se a porta de fundo da caçamba e com a galga em movimento procede-se a descarga.

Foto 4.2 - Destorroamento de solo na galga

A vantagem do equipamento é trabalhar o material sem destruir as partículas e facilitar o peneiramento e manipulação nas etapas seguintes.

4.2 - Misturador

Para a mistura de solo seco com água em grandes quantidades e posterior adensamento unidirecional da Lama resultante, sem transferência ou transporte do material, foi projetado um equipamento robusto e de grandes dimensões para atender às duas etapas do trabalho. O equipamento foi executado na Oficina Mecânica da EESC-USP,

sob nossa orientação e responsabilidade.

A Foto 4.3 mostra o equipamento em vista geral, na montagem para a primeira fase de funcionamento, isto é, execução da Lama, e a Figura 4.1, ilustra esquematicamente suas dimensões.

Foto 4.3 - Equipamento para execução da Lama

O corpo principal do equipamento é constituído de um cilindro vasado, um disco de base e um disco-tampa removíveis, em aço inoxidável, com capacidade útil aproximada de 34,5 litros.

Na montagem dessa primeira fase, o disco de base é preso a um pórtico de ferro, o cilindro preso à sua base e dentro dele se ajusta o batedor ilustrado na Foto 4.4. O batedor é acionado pelo conjunto motor/redutor que imprime às pás, a velocidade de 120 r.p.m. A Foto 4.5 ilustra o batedor misturando solo com água.

As folhas de flandres arredondadas, soldadas na parte superior das pás do batedor, bem como a cobertura do cilindro também em folha de flandres, foram usadas para evitar extravasamento do material.

Figura 4.1 - Esquema do equipamento para execução da Lama

Foto 4.4 - Batedor para execução da Lama

Foto 4.5 - Mistura solo-água

Uma barra de ferro presa nas bordas do topo do cilindro, serve de guia à haste do batedor.

4.3 - Conjunto de Adensamento

Para adensar a Lama, o mesmo cilindro foi usado em montagem diferente. A Figura 4.2, ilustra o esquema da montagem na fase de Adensamento.

O disco da base e o cilindro continuam presos ao pórtico, o batedor é retirado, bem como a barra de ferro guia da haste. Um pistão em forma de disco, de aço inoxidável, é introduzido no cilindro, como ilustram as Fotos 4.6 e 4.7. Sobre o cilindro é ajustado o disco-tampa, também em aço inoxidável, que está ilustrado na Foto 4.8.

O disco-tampa é preso ao disco de base por 12 parafusos, roscas e arruelas, equiespaçados. A Foto 4.9 ilustra o equipamento completo, para funcionamento nesta fase.

Foto 4.6 - Conjunto do equipamento de adensamento

Figura 4.2 - Esquema do equipamento para adensamento da Lama

Foto 4.7 - Pistão de adensamento

Foto 4.8 - Disco-tampa do cilindro de
adensamento

Foto 4.9 - Equipamento de adensamento completo

O adensamento se processa pela pressão de ar comprimido na câmara formada entre o pistão e o disco-tampa. O disco do pistão é provido de dupla vedação, por "o rings", que impedem a passagem de ar da câmara de ar para a Lama. O disco-tampa é provido de "o rings" nas laterais bem como orifício central por onde passa a haste do cilindro, que impedem a fuga de ar. É no disco-tampa, como pode ser visto na Foto 4.8, que está localizado o orifício de entrada do ar comprimido que fornecerá a pressão desejada para movimentar o pistão, e provocar o adensamento do material.

O adensamento ocorre com a drenagem pelo disco de base do cilindro, em detalhe na Foto 4.10, e pelo pistão, com saída na parte interna de sua haste vasada, em destaque na Foto 4.11. Sendo necessário evitar fuga de ar através da haste do pistão, devem ser utilizadas fitas vedantes na rosca e cola a base de silicone nas juntas.

A aplicação de ar comprimido é controlada através de válvulas reguladoras de pressão e manômetros de precisão.

O equipamento foi projetado para suportar pressões bastante altas (aproximadamente 2 MPa) mas a limitação de utilização foi imposta neste trabalho pelo compressor disponível, cuja capacidade máxima para pressão estável foi de 0,8 MPa.

Foto 4.10 - Drenagem no disco da base

Foto 4.11 - Drenagem no pistão

O monitoramento das pressões laterais no solo em adensamento resultantes das pressões axiais aplicadas no pistão, foi realizado utilizando uma célula de carga construída especialmente para esse fim, pela Transdutech, modelos TLT-0,5 e TLT-1,0, com capacidades respectivamente de 0,5 MPa e 1,0 MPa e sensibilidade 0,5%.

Esta célula de carga é um transdutor eletrônico, que utiliza basicamente a deformação de um diafragma, para medir as pressões aplicadas. A Figura 4.3 e a Foto 4.12 ilustram a célula de carga.

Figura 4.3 - Esquema de disposição dos "strain gages" no interior do Medidor de Pressões Laterais para adensamento, Modelo TLT-Transdutech

Na parede do interior do diafragma são colocados quatro extensômetros elétricos de resistência (strain gages). Dois são posicionados no centro da circunferência com direções ortogonais e os outros dois, nas bordas, em posições diametralmente opostas. Quando esse diafragma se deforma, por exemplo sob pressão externa, ocorre encurtamento (-) dos strain-gages de borda e alongamento (+) dos strain gages de centro (Figura 3). Tais movimentos são transformados em sinais detectados no indicador digital modular.

A célula de carga é fixada na lateral do cilindro, Fotos 4.13 e 4.14, de forma a registrar as pressões laterais desenvolvidas durante todo o adensamento do solo.

Foto 4.12 - Célula de carga TLT, para medida de pressões laterais no adensamento

Foto 4.13 - Célula de carga TLT, no cilindro de adensamento

Foto 4.14 - Célula de carga TLT, no conjunto de adensamento

As calibrações da célula de carga TLT, foram executadas no próprio cilindro de adensamento. Para isto o cilindro foi vedado em todas as possíveis saídas de ar e água (normais e eventuais) com borracha de silicone, cheio com água e acionado o pistão através de injeção de ar comprimido. Com isso além da calibração do transdutor, foi possível medir a pressão externa aplicada sobre o pistão (controlada pelo manômetro) e a pressão interna no cilindro, recebida pelo material a ser adensado (controlada pelo TLT) e sob o pistão, verificando-se assim as eventuais perdas por atrito entre o disco do pistão e as paredes do cilindro. As diferenças entre pressões externa e interna no sistema atingiram no máximo 2%, e o tempo de estabilização ficou em média, inferior a 1 minuto indicando a eficiência do sistema desenvolvido.

4.4 - Pedras Porosas

Para permitir a drenagem no equipamento de adensamento, foram colocadas pedras porosas no disco de base do cilindro, Foto 4.15 e no pistão, Foto 4.16.

Foto 4.15 - Pedra Porosa no disco de base

Foto 4.16 - Pedra Porosa no pistão

Tendo em vista as dimensões especiais destas peças, o que envolveria dificuldade de fornecimento e altos custos, optou-se pela execução das pedras no Laboratório de Geotecnia. Isto envolveu uma pesquisa, para alcançar as condições apropriadas de moldagem, drenagem e resistência.

Para a execução de pedras porosas são usados materiais granulares (areia) e adesivos. Para a mistura, foram testados diversos tipos de adesivo, diferentes faixas granulométricas de areias e várias técnicas de preparo, com o objetivo de atingir o elemento de drenagem mais apropriado ao caso.

A técnica de preparação e composição de meios porosos (Massarani e Thirriol, 1972), com areia fina a média ($0,1\text{mm} < \phi < 2\text{mm}$) misturada a 5% de seu peso em araldite foram os elementos básicos, a partir da qual diversos testes foram realizados.

As tentativas de mudança do tipo de adesivo, para Resina Epoxi 8001, Resina Epoxi 324 - Reforplás, Resina Cristal T-208 Resapoe pré-acelerada, não surtiram o resultado desejado, porque diminuíram a permeabilidade da peça, ocasionaram aderência nas laterais e base dos moldes e esfarelamento das bordas das pedras.

A redução do peso de araldite para 3% do peso de areia, melhorou as condições de permeabilidade da pedra, mas observou-se diferenças de porosidade nas duas faces, indicando escoamento irregular do adesivo.

A uniformidade granulométrica da areia foi um dos fatores adotado que permitiu melhora das condições finais da pedra, em termos de resistência, sem prejuízo da permeabilidade. Foram testadas areias lavadas, secas e peneiradas, com diâmetro de grãos compreendidos em dois intervalos de malha de peneiras $\# 70 < \phi < \# 30$ e $\# 50 < \phi < \# 30$.

A segunda opção resultou em melhor acabamento da peça final.

O escoamento de araldite em direção a uma das faces da pedra, foi solucionado com o uso de lâmpadas de raios infravermelhos. A intensidade do calor emanado pelas lâmpadas permitiu a aceleração moderada do endurecimento do araldite permitindo a movimentação das pedras com revesamento das faces em exposição aos raios de luz, e melhor distribuição do adesivo nos vazios.

A aderência das pedras nas bordas dos moldes e nas bases de apoio, também foi um problema a ser resolvido. Além de folhas de PVC na base e fitas de PVC na borda, foi necessário o uso de vaselina, para evitar que a pedra ao ser retirada do molde não fosse danificada.

Como resultado dos testes chegou-se a um procedimento

técnico aceitável para as necessidades de utilização, em função do equipamento e material empregados.

A sequência de operações que permitiu a execução de pedras porosas para drenagem de grandes volumes de Lama submetidas a adensamento unidirecional foi:

- execução de molde em madeira aglomerada (Foto 4.17), com as medidas das pedras porosas a serem executadas.
- revestimento das bordas do molde com fita PVC.
- revestimento da base de apoio do molde com folha de PVC.
- lubrificação das folhas e fitas de PVC, com vaselina.
- areia lavada, seca e peneirada entre as malhas das peneiras $\# 50 < \phi < \# 30$, em volume suficiente que preencha o molde, a ser usado para a execução da peça. Esta quantidade de areia deve ser pesada.

Foto 4.17 - Molde para pedra porosa

- 3% do peso da areia medida, em araldite lento.
- para melhor homogeneização da mistura areia e adesivo, estes dois materiais devem ser fracionados em partes iguais (Foto 4.18) e misturados simultaneamente (Foto 4.19).
- a mistura, Foto 4.20, lançada no molde é regularizada com régua de madeira dentro do mesmo e deve preencher todo o espaço vazio, Foto 4.21.

Foto 4.18 - Areia e Araldite para a pedra porosa

Foto 4.19 - Mistura da Areia e Araldite

Foto 4.20 - Areia e Araldite misturadas

Foto 4.21 - Modelagem da pedra porosa

- a mistura deve ser exposta aos raios infra-vermelhos (Foto 4.22) e em intervalos de aproximadamente 1 hora, a face de exposição à luz deve ser invertida; operação esta, controlada por um tempo mínimo de 8 horas.

Foto 4.22 - Secagem da pedra porosa

- a exposição à luz não é mais necessária após 12 horas, e a pedra já pode ser retirada do molde, estando pronta para utilização em 24 horas (Foto 4.23).

Foto 4.23 - Pedra porosa pronta

A pedra do pistão, com 36 cm de diâmetro e 1 cm de altura, deve ser colada (com qualquer adesivo eficiente) ao disco de aço inoxidável em alguns pontos para que, quando o conjunto for movimentado a mesma se mantenha estável. A pedra do disco de base, com 36cm de diâmetro e 2cm de altura, deve ser simplesmente apoiada no disco, uma vez que a mesma não é submetida a muitos movimentos.

Eventuais irregularidades ocorridas na moldagem ou ajuste de borda nos discos de base e no pistão, foram corrigidas com manta Bidim.

A eficiência de drenagem mostrou-se bastante satisfatória, sem problemas de perda do material adensado, ou colmatação do sistema.

Uma das vantagens da execução das pedras porosas foi poder renová-las a cada ensaio sem grandes dificuldades e a baixo custo.

4.5 - Conjunto para Compressão Triaxial

O projeto inicial de trabalho previa o controle eletrônico total do Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Rápido. Na ocasião, o Laboratório de Mecânica dos Solos não dispunha de nenhum equipamento eletrônico de medidas e com isto iniciou-se a implantação dos mesmos, cujo uso, hoje, tornou-se quase rotineiro. Mediante a impossibilidade de importação, os equipamentos eletrônicos foram adquiridos da Transdutech, em caráter especial e esta condição de pioneirismo trouxe complicações, causadas pela necessidade de ajustes, modificações, aferições, calibrações e uma demanda de tempo além da programada. Os imprevistos e a premência do tempo, induziram a simplificações e em alguns casos até a supressão de equipamentos inicialmente programados no conjunto.

A sequência de procedimentos, a partir do conjunto de equipamentos idealizado até o conjunto final utilizado, em função dos problemas surgidos e soluções dadas, passa a ser descrita.

4.5.1 - Câmara Triaxial

Na ocasião da pesquisa, a Câmara Triaxial disponível no Laboratório de Geotecnia, com espaço interno suficiente para colocação de novos equipamentos, como medidor de deformação radial e célula de carga, era a Câmara Triaxial Wykeham Farrance, modelo WF 11.000. Esta

câmara era fabricada pela empresa, originalmente para execução de ensaios com corpo de prova de 100mm de diâmetro, com o seu corpo principal cilíndrico em acrílico de pequena espessura; sem cintamento para o uso em altas pressões; e sistema de aplicação de tensões axiais através de pistão.

Várias adaptações foram necessárias na Câmara WF 11.000 original, para que a mesma servisse aos propositos deste trabalho, e que são relacionadas a seguir:

1) cintamento do corpo de acrílico, porque este se apresentava extremamente fissurado, não oferecendo segurança ao uso de pressões médias a altas (Foto 4.24). Para isso usou-se fita de algodão com fios em trama, embebida em resina epoxi, enrolada diversas vezes no tubo, de acrílico, que depois de seca permitiu segurança de operações com a câmara.

Foto 4.24 - Câmara Triaxial WF 11.000 adaptada para altas pressões

2) redução da base de apoio do corpo de prova, de 100mm para 50mm de diâmetro, feita em latão (Foto 4.25).

Foto 4.25 - Base adaptada na Câmara WF 11.000

3) execução de bucha de ajuste, em latão, no orifício originalmente ocupado pelo pistão, para a aplicação das tensões axiais, com células de carga.

4) instalação de soquete na base da câmara, para conexão entre o transdutor de medida de deformação radial e o seu indicador digital que pode ser visto também na Foto 4.25.

4.5.2 - Células de Carga

Células de carga Transdutec, modelo TCT-10, TCT-25, TCT-50, TCT-100, respectivamente, com capacidade de 1,0; 2,5; 5,0 e 10,0 kN, (sensibilidade 0,25%), foram adquiridas para medidas das tensões axiais.

As células de cargas TCT, da mesma forma que as de medidas de tensões laterais no adensamento, utilizam a deformação de uma parede diafragma para detectar as pressões aplicadas. Na Figura 4.4 está apresentado o esquema da Célula de Carga modelo TCT.

A deformação do diafragma deve se dar em função da carga pontual aplicada no eixo central da célula de carga.

As Fotos 4.26 e 4.27, ilustram a calibração das células de

carga TCT, fora da Câmara Triaxial com aplicação das tensões axiais no eixo central.

Figura 4.4 - Esquema de distribuição dos "strain gages" no interior das células de carga TCT

Quando a célula de carga é submetida a tensões confinantes dentro da Câmara Triaxial, estas devem ser equilibradas externa e internamente ao diafragma. Por isso, a célula de carga dispõe de orifícios que permitem que a água sob pressão penetre na face interna ao diafragma, onde se encontram os transdutores de resistência colados e isolados com capas de resina.

Este esquema construtivo, no entanto, trouxe problemas na utilização das células de cargas TCT.

Primeiro, por ocasião da entrada da água na Câmara Triaxial, o rebaixo existente na face externa da célula de carga (Foto 4.28), permanecia preenchido com ar, sem meios para sua drenagem. Com a aplicação das tensões confinantes, a mistura água/ar existente nesse espaço, passou a interferir no equilíbrio de tensões externas e internas do diafragma, provocando instabilidade de leituras nos indicadores digitais. A solução encontrada foi preencher o espaço do rebaixo da base das células de carga, com borracha de silicone, material de grande elasticidade, que pode transmitir as tensões confinantes da câmara às paredes externas do diafragma, igualando às das paredes internas.

Foto 4.26 - Calibração da célula de carga modelo
TCT - Transduteec

Foto 4.27 - Calibração da célula de carga modelo
TCT - Transduteec

Foto 4.28 - Detalhe da superfície inferior da célula de carga modelo TCT-Transdutech

Outra falha no funcionamento das células TPT foi ocasionado pela exposição dos "strain-gages" do diafragma à água infiltrada, provocando a baixa de isolamento e, conseqüentemente, incoerência e descontrole nas leituras dos indicadores digitais. Para corrigir este problema havia necessidade de desmontar a célula de carga e renovar a aplicação de resina nos "strain-gages".

Outra deficiência no uso deste transdutor foi ocasionada pelo desajuste das suas hastes à bucha de latão instalada no orifício originalmente ocupado pelo pistão da câmara triaxial; isto é, atrito e vazamento de água impediam a utilização das células de carga. Para corrigir este defeito foi necessário mudar as hastes das células de carga por diâmetros perfeitamente idênticos ao do pistão original da Câmara Triaxial. As condições de retificação e ajuste precisavam ser executados por especialistas e as células de carga foram totalmente reconstruídas pela Transdutech. A demanda de tempo para estes procedimentos era impossível de ser absorvida pelo trabalho, tendo em vista que após esta reconstrução seria necessário todo o processo de aferição das mesmas no conjunto de equipamentos.

As células de carga foram substituídas pelos tradicionais Aneis Dinamométricos, usados externamente à Câmara Triaxial e nos ensaios foram utilizados o Modelo Wykeham Farrance WF 14.100,

capacidade 1,0 kN, e o modelo EESC-USP, capacidade 2,5 kN. (Foto 4.29).

Foto 4.29 - Câmara Triaxial WF 11.000, com Anel Dinamométrico WF 14.100

4.5.3 - Medidores de Pressão Neutra

Para medidas das pressões neutras, desenvolvidas nos ensaios de Compressão Triaxial, foram adquiridos transdutores eletrônicos Transdutech, modelos TPT-02 e TPT-05, respectivamente, com capacidade de 200 kPa e 500 kPa, sensibilidade 0,5%. A Foto 4.30 mostra o equipamento, que também utiliza a deformação de um diafragma para detectar as pressões. A Figura 4.5 ilustra esquematicamente o funcionamento interno do transdutor TPT.

Os extensômetros elétricos de resistência ("strain gages") são colados na circunferência que constitui a parede do diafragma.

Foto 4.30 - Transdutor para medida de pressão neutra,
modelo TPT - Transdutec

Figura 4.5 - Esquema do Transdutor para medida de pressão
neutra modelo TPT - Transdutec

O esquema de fixação dos "strain gages" é idêntico ao usado nas células de cargas TLT (usadas para medida das pressões laterais no cilindro de adensamento da mistura solo/água). Ou seja, dois posicionados no centro em direções ortogonais e dois nas bordas, diametralmente opostos. Os encurtamentos (-) e alongamentos (+) são transformados em sinais eletrônicos e detectados pelo indicador digital modular.

Para a conexão dos transdutores de pressão neutra à Câmara Triaxial, WF 11.000, foi utilizado bloco deaerador, da Wykeham Farrance, mostrado na Foto 4.31.

As calibrações desses transdutores, feitas nos painéis de controle de ensaios triaxiais, com a utilização de manômetros de alta precisão e das canecas de mercúrio para a aplicação das tensões controláveis, no início, exigiram reparos de balanceamento feitos pelos fabricantes, o que depois permitiu seu uso com confiabilidade.

Foto 4.31 - Transdutor para medidas de pressões neutras modelo TPT-Transdutec, com bloco deaerador

4.5.4 - Medidor de Deslocamento Vertical

Para as medidas de deslocamentos axiais foi adquirido o transdutor de deslocamento linear Transdutech, modelo TDT-10, com campo de medida ± 10 mm, tipo LVDT, sensibilidade 0,25%.

A Figura 4.6, ilustra esquematicamente o transdutor, que transforma o movimento de um núcleo ferro magnético em variação da indutância, convertidas em leituras pelo Indicador Digital Modular, de 3 1/2 dígitos.

Figura 4.6 - Esquema do medidor de deslocamentos axiais, modelo TDT-10 - Transdutech

A Foto 4.32 mostra o transdutor mod. TDT-10 e a Foto 4.33 detalhes da calibração do mesmo feita com defletômetro mecânico de 100 divisões, precisão 0,01mm e deslocamento máximo de 25mm.

O medidor de deslocamento axial TDT-10, para execução dos ensaios, foi posicionado no disco de base da câmara triaxial WF 11.000, como mostra a Foto 4.34.

O desempenho deste equipamento mostrou-se satisfatório e preciso.

Foto 4.32 - Transdutor LVDT para medida de deslocamentos axiais,
modelo TDT-10, Transdutech

Foto 4.33 - Calibração do transdutor de medidas deslocamento axial,
modelo TDT-10, Transdutech

Foto 4.34 - Transdutec LVDT, modelo TDT-10 Transdutec, posicionado na base da câmara WF 11.000

4.5.5 - Medidores de Variação de Volume

O Laboratório de Geotecnia, por ocasião do início deste trabalho, dispunha apenas de um equipamento mecânico para medida de variação de volume, que era o sistema de dois tubos concêntricos, preenchidos com parafina colorida, parte integrante do painel de controle de ensaios triaxiais, da Wykeham Farrance.

Foi adquirido então um novo medidor de variação de volume da Transdutec, modelo TVT-100, capacidade de medida até 100 cm^3 , resolução $0,05 \text{ cm}^3$ e leitura por transdutor de deslocamento LVDT.

A Figura 4.7 ilustra esquematicamente o Medidor de Variação de Volume Transdutec TVT-100. O equipamento se compõe de um cilindro de aço inoxidável, vedado e subdividido em duas câmaras por um pistão em disco, cujo movimento é acompanhado por um transdutor de deslocamento LVDT.

Figura 4.7 - Esquema do Medidor de Variação de Volume, modelo TVT-10, Transdutech

As duas câmaras, superior e inferior ao pistão, tem conexões diretas e independentes com o painel de controle de ensaios triaxiais. No painel, cada uma das câmaras do cilindro está respectivamente associada, à câmara triaxial e ao sistema de aplicação de tensões (canecas de mercúrio).

Uma válvula de controle liga a câmara superior a inferior do cilindro. Com esta válvula fechada, o fluxo de água para dentro da câmara triaxial (contração do corpo de prova) ou para fora da câmara triaxial (expansão do corpo de prova) será acompanhado pelo movimento do pistão do medidor de variação de volume. O transdutor LVDT, conectado ao pistão, vai registrar através do Indicador Digital, o volume e o sentido de deslocamento da água dentro do cilindro.

A Foto 4.35 mostra o equipamento em detalhe e a Foto 4.36 mostra o mesmo incorporado ao painel de controle de ensaios triaxiais. A conexão do Medidor de Variação de volume ao conjunto de válvulas de reversão do painel de controle de ensaios triaxiais, permite que sua capacidade de volume seja ampliada.

Foto 4.35 - Medidor de Variação de Volume, modelo TCT-10, Transdutec

Foto 4.36 - Medidor de Variação de Volume, modelo TVT-10, Transdutec, adaptado ao painel Wykeham Farrance

A calibração do equipamento é feita com o movimento do pistão para baixo e para cima, provocado por volumes de água medidos com precisão, entrando e saindo do painel de controle de ensaios triaxiais.

Durante a execução dos ensaios deste trabalho, o Laboratório de Geotecnia adquiriu diversos equipamentos eletrônicos, inclusive um Medidor Automático de Variação de Volume da Wykeham Farrance, modelo WF 17038.

O sistema, ilustrado na Foto 4.37, tem capacidade nominal de 85 cm^3 , que pode ser aumentada pelas válvulas de reversão já incorporadas. É constituído basicamente de um pistão cujo movimento é acompanhado por um transdutor de resistência elétrica. O pistão é isolado das câmaras superior e inferior do sistema, pelo diafragma sanfonado Bellofram.

Foto 4.37 - Medidor de Variação de Volume, Wykeham Farrance, WF 17.038

O medidor de variação de volume Transdutech modelo TVT-100 foi utilizado na primeira metade dos ensaios executados. Como foram

necessários revisão e reparo no mesmo e o Medidor Wykeham Farrance WF 17.038, que se encontrava em operação no Laboratório de Geotecnia, foi utilizado na segunda metade dos ensaios executados.

As variações de volume da câmara triaxial WF 11.000, foram determinadas nos dois equipamentos, nas tensões confinantes e períodos de tempo dos ensaios executados. Este procedimento singular resultou do trabalho cujo objetivo foi detectar os fatores que influem na variação volumétrica da câmara triaxial. Concluiu-se que os fatores de influência podem ser classificados em ordem decrescente de importância e a variação de volume gerada por eles não pode nunca ser sub estimada no cálculo da variação de volume do corpo de prova de solo.

Estes fatores são: o valor da tensão confinante; as dimensões da câmara triaxial; o tempo de aplicação da tensão confinante; o desgaste por utilizações sucessivas da câmara triaxial; a sequência de aplicação das tensões confinantes na calibração; o equipamento de medida (colunas de parafina, câmaras de fluxo com transdutores LVDT , com pistão rígido ou Bellofram); e o número e dimensões das conexões associadas à câmara (por exemplo: tubos de nylon e válvulas).

Assim, torna-se necessário determinar, sempre, qual a variação de volume da câmara triaxial para as condições de ensaio programadas, procurando cobrir o maior número de certezas dos fatores que influem nesta variação, procedimento este que se omitido pode circunstancialmente conduzir a erros grosseiros de cálculo.

Com esta preocupação, a calibração da variação de volume da câmara triaxial WF 11.000 foi feita cobrindo o programa de ensaios e os equipamentos utilizados neste trabalho, procurando-se com isso eliminar fatores externos ao comportamento do solo propriamente dito.

4.5.6 - Medidor de Deformação Radial

Medir a deformação radial de um corpo de prova de solo no ensaio triaxial requer o desenvolvimento de equipamentos complexos porque além da acuidade usual e necessária, a não interferência do instrumento no conjunto é requisito básico e difícil de ser satisfeito.

Deve-se considerar que ao fazer medidas de deformações radiais num ensaio triaxial alguns elementos da montagem e do próprio corpo de prova vão inevitavelmente intervir nos resultados. Assim,

quando as amostras se deformam lateral e axialmente, os pontos de superfície não se movimentam num plano perfeitamente radial. Uma amostra de solo não se deforma necessariamente de maneira uniforme, e por isso uma única medida lateral pode não ser completamente representativa.

Além disso, a membrana circundando a amostra pode contribuir ao movimento. Assim, ao se fazer medidas de deformação radial, alguns problemas devem ser resolvidos ou contornados durante o ensaio ou então considerados na análise dos resultados.

Com o advento da instrumentação eletrônica, diversas técnicas tem sido usadas (Mazanti e Holland, 1970; Ehrigott, 1971; El Ruwayih, 1976; Loo, Leonards, Yen, 1977, e Palmer, 1978; Daramola, 1978; Chaddock, 1982; Schnaid, Costa Filho, Medeiros, 1983), todas elas com a sofisticação necessária para garantir precisão nas medidas nos ensaios propostos.

O equipamento para medidas de deformações radiais, desenvolvido para este trabalho, em conjunto com a Transdutech, embora menos complexo que alguns modelos conhecidos, é de montagem delicada e exigiu destreza no seu manuseio. O modelo permite a opção de medida em qualquer plano horizontal do corpo de prova e seu contacto com este é mínimo.

A primeira versão do equipamento é ilustrada nas Figura 4.8 e nas Fotos 4.38 a 4.41.

Figura 4.8 - Esquema da versão inicial do Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2, Transdutech.

Foto 4.38 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2,
Transdutech, primeira versão

Foto 4.39 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2,
Transdutech, primeira versão

Foto 4.40 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2,
Transdutech, primeira versão

Foto 4.41 - Medidor de Deformação Radial, modelo TDR-05/2,
Transdutech, primeira versão

O equipamento consta basicamente de dois transdutores LVDT , diametralmente opostos em relação ao corpo de prova, presos a um arco de sustentação em alumínio, que por sua vez é suspenso por molas presas ao cabeçote do topo e à base de apoio do corpo de prova na câmara.

Os dois transdutores LVDT, com núcleos ferro-magnéticos estão ligados eletronicamente entre si por pequenos cabos ao conector na base da câmara (Foto 4.38).

Os núcleos se movimentam acompanhando a deformação do corpo de prova. O movimento de um dos núcleos é somado ao do outro e a resultante é registrada no indicador digital.

Os dois transdutores são presos por braçadeiras ao arco de sustentação, em alumínio, vazado por círculos (Fotos 4.39 e 4.40) para redução de sua massa 12,4 g.

A massa dos dois transdutores com os núcleos totaliza 21,5g.

Este conjunto fica suspenso no espaço circundante ao corpo de prova por dois pares de molas rosqueadas ao arco de alumínio e presas à base da câmara e ao cabeçote de topo do corpo de prova por parafusos horizontais (Fotos 4.39 e 4.40).

Hastes de diâmetro e comprimento menores que as molas e concêntrica a elas, garantem os alinhamentos verticais (Foto 4.40).

Este tipo de equipamento precisa ter o ajuste zero de escala do núcleo, no indicador de leituras, a partir de um diâmetro padrão, a cada ensaio, quando então é posicionado junto ao corpo de prova, no qual os deslocamentos serão registrados. Esta foi uma das causas que levaram à modificação desta primeira versão, porque a operação de "ajuste do zero", executado anteriormente ao ensaio (Foto 4.42), era alterado na montagem do ensaio. Outra razão foi a dificuldade de alinhamento vertical entre os parafusos de suspensão das molas dos cabeçotes de topo e de base após o revestimento do corpo de prova; isto é, para colocação da membrana de latex e dos "o rings" para vedação do corpo de prova era necessário retirar os dois parafusos de suspensão das molas do cabeçote de topo. Após esta operação o alinhamento vertical dos dois parafusos do cabeçote de topo com os dois da base (e conseqüentemente das molas) tornou-se tarefa demorada e fortuita, com excessiva manipulação do corpo de prova, prejudicando o ensaio.

Foto 4.42 - Calibração do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, Transdutech, primeira versão

Na segunda versão do medidor de deformação radial, foi conservada a estrutura básica de montagem para a fase de medidas, e modificou-se o procedimento para "ajuste do zero" e calibração do equipamento na fase preliminar de cada ensaio.

A Figura 4.9 mostra o esquema do equipamento montado para calibração e as Fotos 4.43 a 4.53, a sequência de operações executadas desde o "ajuste do zero" no indicador até o início de cada ensaio propriamente dito.

As Fotos 4.43 e 4.44 mostram o início das operações, onde o arco de alumínio é preso em base de acrílico e um corpo de prova de latão com medidas padrão ($\phi = 50\text{mm}$) isto é, um calibre de latão é centralizado em relação a ele. Os dois transdutores, ligados ao indicador digital, com os núcleos diametralmente opostos a este calibre de latão, são posicionados livres nas braçadeiras do arco, e movimentados até que seja alcançado o zero no indicador digital.

Obtido o "ajuste do zero" do núcleo no indicador digital, as braçadeiras são fechadas para prenderem os transdutores nesta posição.

Figura 4.9 - Esquema do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, em montagem de calibração, versão 2

Foto 4.43 - Calibração do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, Transdutech, versão 2

Foto 4.44 - Calibração do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, Transdutech, versão 2

Uma pequena peça (paralelepípedo de aço inoxidável) de medidas exatas padronizadas isto é, um calibre de aço inoxidável é colocado entre o calibre de latão e os transdutores para que seja feito o ajuste de escala no "trimpot" de ganho do indicador digital, segundo o deslocamento conhecido, Foto 4.45. A seguir os núcleos retomam a posição inicial de "ajuste zero" (Foto 4.46).

O arco de alumínio com os dois transdutores fixados corretamente é liberado da base de acrílico, os dois pares de molas são rosqueados a ele e o conjunto passa a fazer parte da montagem ilustrada na Figura 4.9 e nas Fotos 4.47 e 4.48.

Esta operação é necessária para o ajuste e alinhamento vertical das molas, e para se obter um posicionamento conveniente dos transdutores, na altura onde há interesse em se medir a deformação radial, para isto basta diminuir o comprimento do par de molas superior (ou inferior) e aumentar o comprimento par de molas inferior (ou superior).

A estrutura de alumínio, ilustrada isoladamente na Foto 4.49, e o calibre de latão permitem essa operação de ajuste e de alinhamento das molas, sem afetar a posição dos transdutores e sem perturbar o corpo de prova de solo.

Foto 4.45 - Operação de ajuste com calibre, para aferição do TDR-05/2

Foto 4.46 - Final do "ajuste zero" no Medidor de Deformação Radial TDR-05/2

Foto 4.47 - Montagem do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2
para utilização no ensaio triaxial

Foto 4.48 - Montagem do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2
para utilização no ensaio triaxial

Foto 4.49 - Estrutura/Suporte de alumínio, usado na montagem do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2

Parafusos de travamento existentes nas ferraduras inferior e superior da estrutura prendem o conjunto ao calibre de latão (Figura 4.9).

Na altura do calibre (187,7 mm) foram consideradas: a altura da base de latão ($h = 34,5$ mm) existente na câmara triaxial WF 11.000 (Foto 4.25); a altura útil do cabeçote superior de acrílico, a ser colocada sobre o corpo de prova ($h = 20$ mm); a espessura de duas pedras porosas (6,3 mm) e a altura média do corpo de prova de solo (125 mm). Com este recurso, o posicionamento vertical dos transdutores pode ser antecipado com relativa precisão.

Após o ajuste, o conjunto é liberado do calibre e instalado no corpo de prova de solo, posicionado na base da câmara e já revestido com a membrana de latex (Foto 4.50).

Foto 4.50 - Corpo de Prova de solo montado na base da Câmara Triaxial com as hastes verticais de alinhamento

Os parafusos de travamento das ferraduras inferior e superior da estrutura de alumínio, prendem então o conjunto respectivamente, na base da câmara e no cabeçote de acrílico instalado sobre o corpo de prova de solo. Após esta montagem, as duas hastes verticais de alumínio que conectam entre si as ferraduras inferior e superior, são liberadas (Foto 4.51). Os transdutores passam a operar suspensos pelas molas.

Foto 4.51 - Corpo de Prova de solo montado na base da Cam.Triaxial sem as hastes verticais de travamento da estrutura de alumínio

A última fase de montagem deste equipamento é a conexão dos núcleos ferro-magnéticos à membrana de revestimento do corpo prova de solo, para medir as deformações radiais. Esta conexão é feita com adesivo e a escolha apropriada do mesmo envolveu diversos testes, tendo em vista alguns requisitos fundamentais ao bom desempenho do conjunto tais como: o adesivo não pode ser solúvel em água; deve ter elasticidade suficiente para acompanhar os movimentos dos núcleo ferro-magnético; não pode conter componentes químicos que provoquem oxidação do núcleo ferro-magnético; e deve ter secagem rápida.

Com isso foram testados e eliminados adesivos do tipo Araldite e Super Bonder (por seu enrijecimento após secagem); e borracha de silicone por conter ácido acético em sua composição).

Foi adotado o selante de cura neutra, não corrosivo, não acético do Dow Corning 780 que mostrou-se eficiente aos requisitos propostos acima.

A aplicação do adesivo é feita após o posicionamento definitivo do transdutor e das demais conexões na Prensa Triaxial. A partir desta etapa, os movimentos nos conjuntos devem ser evitados e, quando necessários, realizados de forma cuidadosa. A Foto 4.52 ilustra a aplicação do adesivo com uma espátula introduzida no espaço existente entre o corpo de prova e o transdutor; e a Foto 4.53 situação final do medidor de deformação radial modelo TDR-05/2, Transdutech no corpo de prova de solo.

Foto 4.52 - Aplicação do adesivo para fixação do núcleo ferro magnético ao corpo de prova de solo

Foto 4.53 - Transdutor TDR-05/2, para medidas de deformação radial, em posição de operação

Para amenizar problemas de oxidação do núcleo ferro magnético quanto à sua exposição por longos períodos de tempo à água da câmara triaxial, o mesmo foi jateado em cada ensaio, com verniz plástico protetor, produto este que não interfere no funcionamento do transdutor.

Como citado anteriormente, a operação com o Medidor de Deformação Radial, não atingiu a simplicidade desejada, no entanto o seu grau de sensibilidade ($0,25\%$) e precisão são bastante satisfatórios. Alguns cuidados devem ser tomados para manter esta precisão, como por exemplo o ajuste da membrana de latex ao corpo de prova de solo, para que a mesma não mascare a deformação radial do corpo de prova. A interferência dos elementos do equipamento, sobre corpo de prova de solo, é mínima, desde que sejam tomados os cuidados apontados na montagem.

A deficiência do equipamento está no seu limite de operação (5mm) que é insuficiente para solos bastante deformáveis. Esta limitação não permitiu, neste trabalho, que todos os corpos de prova nos ensaios fossem levados até a ruptura, uma vez que o limite de curso do transdutor foi quase sempre atingido antes ou praticamente no ponto de ruptura. Para os objetivos específicos de análise do comportamento elasto-linear, essa falha é superável, mas não foi

possível esgotar toda a fonte de informações proporcionada pelos ensaios executados.

Para eliminar esta deficiência seriam necessárias modificações de medidas geradas principalmente pelas necessárias alterações eletrônicas, e cuidadosamente projetadas, de modo a permitirem o uso do equipamento nas mesmas condições. Ou seja, para o aumento de curso de um transdutor desta linha LVDT seria necessário alongar a bobina e o núcleo ferro magnético. Isto implicaria na ocupação de maior espaço de operação no interior da câmara triaxial e balanceamento de massas dos componentes do equipamento. O projeto é viável, mas implica em disponibilidade financeira, tempo, e desenvolvimento de uma pesquisa exclusivamente voltada para este objetivo.

4.5.7 - Indicadores Digitais

Para as leituras de deformações axiais (TDT-10), variações de volume (TVT-100) e deformações radiais (TDR-05/2) foram utilizados transdutores tipo LVDT e Indicadores Digitais de deslocamento linear do modelo TMDL, da Transdutech.

Estes indicadores tem como características principais: ajuste de sensibilidades de 10, 20, 50 e 100%; ajuste fino do ganho de 0,4 a 1,1; "display" de 3 1/2 dígitos; tensão de excitação 10V e saída para registrador.

Para as leituras de pressões neutras e tensões confinantes (TPT), para tensões laterais no adensamento (TDL), foram utilizados transdutores à base de extensômetro elétrico de resistência ("strain gage"), conectados a Indicadores Digitais de deformações modelo TMDE, também da Transdutech.

Estes Indicadores tem como características principais:

- tensão de excitação da ponte ajustável no painel frontal 1; 2,5; 5V.
- "display" de 3 1/2 dígitos.
- balanceamento grosso da ponte $\pm 1\text{mV/V}$ em 10 passos.
- balanceamento fino por potenciômetro de 10 voltas.
- ajuste de sensibilidade de 11 posições (para tensão de excitação de 5V) = 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50.
- ajuste fino de ganho de 0,2 a 2,1.
- saída para registrador.

A Foto 4.54 mostra os Indicadores Digitais TMDL e TMDE da

Transdutec. E as Fotos 4.55 e 4.56 ilustram montagens, completas de duas fases do trabalho de pesquisa para execução do ensaio de compressão triaxial.

Foto 4.54 - Indicadores Digitais modelos TMDE e TMDL, da Transdutec

Foto 4.55 - Conjunto de equipamentos para execução do ensaio triaxial

Foto 4.56 - Conjunto de equipamentos para execução do ensaio triaxial

5. SOLO

No levantamento bibliográfico, observou-se que geralmente os estudos de adensamento unidirecional com Lamas são feitos em caulim; e as pesquisas de ajuste de modelos teóricos do comportamento σ_x e ϵ a dados experimentais são desenvolvidos em caulim ou em amostras indeformadas de solo.

Tendo em vista a extensa bibliografia sobre caulim industrializado e as sugestões levantadas dos trabalhos teóricos sobre a quais se baseou este projeto (Silveira e Souto Silveira, 1970 e 1973; Schiel, 1973; Barreiro, 1971), pareceu-nos que analisar uma argila não industrializada extraída de depósito natural, seria elemento de novos horizontes na interpretação de modelos, dados e resultados obtidos.

O levantamento do solo existente na região norte do Estado de São Paulo foi feito em busca de material argiloso disponível.

A Tabela 5.1 relaciona, a nível de caracterização geotécnica, as diversas amostras recolhidas e pesquisadas.

O solo de Estiva (Mogi Guaçu) foi escolhido neste trabalho, tendo em vista que suas características atendiam os principais objetivos do estudo: argila siltosa inorgânica; valor elevado do Limite de Liquidez; e a disponibilidade de grandes quantidades.

A curva granulométrica média do solo Estiva está apresentada na Figura 5.1, resultante de ensaios realizados em quatro amostragens feitas em ocasiões diferentes no depósito, e a curva de compactação Proctor Normal obtida está apresentada na Figura 5.2.

O depósito do material utilizado está localizado nas vizinhanças do povoado de Estiva, a aproximadamente 8 km ao norte de Mogi-Guaçu, Estado de São Paulo. As coordenadas em UTM na Folha IBGE escala 1:50.000 de Mogi Guaçu, são 298 e 300 (sentido Leste-Oeste) e 7536 e 7538 (sentido Norte Sul), o que identifica o mesmo como originário do Grupo Tubarão da Formação Itararé.

O solo utilizado na pesquisa também foi analisado através de ensaios de Difretometria de Raio X e Análise Química. O objetivo foi uma melhor caracterização, e posterior comparação, com resultados obtidos para os mesmos ensaios, realizados na Lama adensada. Estes ensaios foram realizados no Departamento de Geologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP de Ribeirão Preto.

Tabela 5.1- Solos amostrados na região norte do Estado de São Paulo

Ensaaios de Caracterização

AMOSTRA	LL (%)	IP (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{dmx} (g/cm ³)	w_{ot} (%)
Charqueada	117	59	5	20	75	2,789	1,255	37,0
Marginal (São Carlos)	61	22	20	24	56	2,950	1,534	29,0
Estiva (Mogi Guaçu)	90	58	2	38	60	2,725	1,475	26,5
Tambaú	68	45	16	32	52	2,662	1,569	23,0
Porto Ferreira	47	27	44	42	14	2,654	1,728	18,0
Mineração Chiarelli (Mogi Guaçu)	77	46	1	55	44	2,680		
Fazenda Urutuba (Mogi Guaçu)	76	49	1	39	60	2,660		
Mineração Montans - Rod. SP 333 - (Sertãozinho)	44	21	40	39	21	3,099		
Rod. S. Carlos/Ribeirão Preto (km 42)			70	13	17	3,080		
Rod. S. Carlos/Ribeirão Preto (km 54)	47	22	16	48	36			
Rod. S. Carlos/Pradópolis (km 96)	52	17	26	28	46	2,969

Figura 5.1 - Curva Granulométrica do Solo Estiva

Figura 5.2 - Curva Proctor Normal do Solo Estiva

A Figura 5.3 mostra os resultados da Difração de Raio X, em lâminas preparadas com solo natural, em temperatura ambiente e pré aquecidas a 550°C.

Figura 5.3 - Difractometria de Raio X em amostras do solo argiloso de Estiva, à temperatura ambiente e após aquecimento a 550°C

Tubo Co - Fe 36 x 20 - 3×10^2 $\sigma = 1,0$ - Velocidade 2° / minuto

Os resultados destes difratogramas mostram a presença de argilo minerais típicos das caulinitas e ilítas de forma marcante, e de outros grupos de identificação menos claras, tais como esmectitas, flogopitas, hallositas, etc.

A Tabela 5.2 é o resultado da Análise Química realizada no solo argiloso, o que resultou uma Capacidade de Troca Cationica (CTC) da ordem de 16 miliequivalentes/100 g. (TFSA), significando a presença de argilo minerais de pouca a média expansibilidade.

Tabela 5.2 - Análise Química dos argilo-minerais do Solo de Estiva

Análise	Miliequivalência/100g T.F.S.A
Na	0,087
K	0,474
Ca	0,554
Mg	2,658
(H ⁺ + AL ⁺⁺⁺)	12,780
AL ⁺⁺⁺	9,180
S	3,773
C.T.C.	16,553
Análise	(%)
m	70,87
V	22,79
pH	4,5

S = soma das bases = Ca + Mg + Na + K

C.T.C. = Capacidade de troca de cations = S + (AL⁺⁺⁺ + H⁺)

m = caráter álico = $100 \times (AL^{+3}) / (AL^{+3} + S)$

V = saturação em bases = $100 \times (S/C.T.C.)$

O exame de lupa em lâminas do solo argiloso de Estiva revelou condições de estrutura de partículas homogêneas e distribuídas ao acaso.

6. TÉCNICA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental utilizada na pesquisa foi subdividida em duas etapas descritas neste capítulo com o objetivo de expor os procedimentos em cada uma delas, justificando opções e alterações ocorridas por limitações técnicas e/ou prazos de execução.

6.1 - Homogeneização e Pré Adensamento

Da amostragem ao ensaio de compressão triaxial, para determinação dos parâmetros elásticos, o solo utilizado no trabalho, identificado como Estiva, passou por diversas etapas de preparação, a seguir descritas.

O solo, amostrado em grandes quantidades, foi inicialmente seco ao ar e depois destorroado na Galga mostrada na Foto 4.2, do capítulo 4. O solo destorroado apesar de muito uniforme e homogêneo, foi, por segurança, peneirado na malha # 4 (4,8mm), evitando-se assim a presença de corpos estranhos e acidentais não visíveis, que, devido a grande quantidade de material processado, poderia ocorrer.

Do solo peneirado foi determinado o teor de umidade. As misturas solo e água foram executadas tendo-se como objetivo preparar lamas onde, a relação de material utilizado fosse volume de sólidos para volume de água igual a 1/2, ocupando um volume útil total de aproximadamente 30 l. Para a massa específica de sólidos $\rho_s = 2,725 \text{ g/cm}^3$, as misturas foram processadas com massa de sólidos em torno de 26 kg e o volume de água em torno de 20 litros. Estes valores foram controlados com cuidado, em cada uma das várias lamas executadas, e fazem parte dos dados obtidos e analisados no capítulo 7.

Antes de iniciar a execução da Lama, o transdutor de pressões laterais Transdutech, modelo TLT, foi posicionado no cilindro, ligado ao indicador digital e zerado. A Foto 4.13, do capítulo 4, mostra o equipamento eletrônico em posição de utilização.

Para a preparação da Lama, tomou-se o cuidado de ir adicionando solo e água em doze partes iguais, enquanto o batedor processava a homogeneização, que pode ser observada na Foto 6.1.

Foto 6.1 - Mistura solo com água

As operações de preparação das Lamas homogêneas consumiram em média 3 horas. Após o processamento de cada Lama, o batedor era retirado de dentro do cilindro e uma ou mais amostras das Lamas eram retiradas para determinação de índices físicos e início de execução imediata de ensaios oedométricos, com anéis de diâmetro médio de 6cm e altura média de 2,50cm. Estes ensaios forneceram retas de compressão das Lamas.

As Lamas eram então regularizadas dentro do cilindro, como mostra a Foto 6.2.

Com a finalidade de reduzir o atrito entre a parede do cilindro e o pistão de adensamento introduzido (ilustrado nas Fotos 4.6 e 4.7), foi utilizada uma graxa de lubrificação, nas faces de contacto destas peças.

O cilindro era então fechado com o disco de topo, que por sua vez era preso ao de base com as 12 hastes de travamento, como ilustrado na Foto 4.14, do capítulo 4.

Um defletômetro era posicionado no topo da haste do pistão de adensamento; os tubos de drenagem do disco de base e do pistão eram conectados a um recipiente para medida do volume de água drenado durante o adensamento; o tubo de ar comprimido, com controle por manômetro de precisão, era conectado ao disco de topo do cilindro. A Foto 4.9, do capítulo 4, ilustra o conjunto pronto para o adensamento

unidirecional da Lama, que se processa com o pistão sendo pressionado para baixo pela injeção de ar comprimido no topo do cilindro. A drenagem da Lama se processa através do topo e da base do sistema, conforme já descrito anteriormente.

Foto 6.2 - Regularização da lama após a mistura homogênea do solo com água

Iniciando o processo de carregamento vertical para o adensamento unidirecional da Lama, as seguintes variáveis foram controladas:

- as pressões verticais aplicadas,
- as pressões laterais resultantes, medidas pelo Transdutor TLT,
- as deformações verticais com o tempo decorrido,
- o volume de água drenado.

Foram preparadas nove Lamas em todo o trabalho, das quais seis foram consideradas em sua totalidade nos ensaios para levantamento de dados. Para cada uma das seis Lamas, identificadas por ordem de execução, 1, 2, 3, 4, 5, 6, houve o planejamento do limite final da pressão vertical aplicada, respectivamente 400 kPa; 400 kPa; 500 kPa; 800 kPa; 700 kPa; 600 kPa. A metodologia de aplicação das pressões verticais não obedeceu um critério rígido de controle, sendo que em algumas Lamas a aplicação foi em um único estágio e em outras em mais de um.

A fase de carregamento do adensamento das Lamas foi

considerada finalizada quando as deformações verticais se estabilizaram em centésimos de milímetro por um prazo no mínimo de 48 horas, o que sempre ocorreu longo tempo após o término da drenagem.

Terminada a fase de carregamento da Lama, a etapa seguinte foi a de descarregamento. Nesta fase, foram controladas as pressões verticais, as pressões laterais resultantes no TLT, e as deformações verticais com o tempo.

O critério de alívio de cargas não foi uniforme tendo-se processado nas Lamas em um ou mais estágios. O controle foi rigoroso, no último estágio, de carregamento zero, considerado encerrado quando as deformações verticais se estabilizaram também em centésimos de milímetros, por no mínimo 48 horas.

O encerramento das fases de carregamento e descarregamento das Lamas foram acompanhadas pela estabilização das pressões laterais medidas nos transdutores TLT.

Durante o adensamento de algumas Lamas a ocorrência de acidentes técnicos (vazamento de ar comprimido por esmagamento de "o rings" de vedação; desbalanceamento dos transdutores de pressões laterais TLT; e ruptura do tubo de ar comprimido) forçaram a interrupção temporária dos carregamentos, para os ajustes necessários. Observou-se, tanto na retomada das condições anteriores à interrupção quanto nos dados finais obtidos, que a amostra e os resultados não foram prejudicados.

Após o adensamento as Lamas, que passaram a ser designadas na mesma sequência de execução como "Bolos" (respectivamente 1, 2, 3, 4, 5 e 6), foram retiradas do cilindro. Para tornar isto possível com o mínimo de movimento e perturbações, o recurso foi de inversão de efeitos, no ar comprimido aplicado.

Os detalhes construtivos que tornaram possíveis as operações descritas a seguir, foram previstos no projeto do conjunto utilizado.

Ou seja: 1) as doze hastes de travamento dos discos de topo e base são liberadas; 2) o disco de base é mantido preso somente à base do pórtico; 3) o cilindro é preso ao seu disco de topo agora por dois parafusos; 4) o pistão é travado pela sua haste, a um cabo de aço preso ao topo do pórtico; 5) a seguir, então, o ar comprimido volta a ser aplicado ao conjunto. Nas operações de desmoldagem dos Bolos sempre foi aplicado no máximo 100 kPa. O ar comprimido, ao ser aplicado, empurra o pistão para baixo, que está impedido de descer pelo travamento de sua haste ao topo do pórtico, e empurra o cilindro para cima que está livre da base para deslizar pela haste do pistão,

deixando o Bolo liberado sobre o disco da base. As Fotos 6.3 e 6.4 mostram elevação do cilindro para liberação de um Bolo e a Foto 6.5, este já liberado.

Foto 6.3 - Retirada do cilindro de adensamento para liberação do Bolo

Foto 6.4 - Retirada do cilindro de adensamento para liberação do Bolo

Foto 6.5 - Bolo de solo após adensamento da Lama

Para a conservação dos Bolos, os mesmos foram cuidadosamente parafinados, identificados e mantidos em câmara úmida até a época de talhagem dos corpos de prova.

Para a utilização em ensaios, os Bolos foram fatiados e subdivididos, de forma a ter o maior aproveitamento em número de corpos de prova.

Devido às grandes proporções do Bolo (diâmetro 38cm e altura média 16cm) foram construídos equipamentos para a subdivisão em fatias, mostrado na Foto 6.6.

Foto 6.6 - Fatiamento do Bolo de solo

O conjunto consta de uma base plana em madeira com duas de suas laterais revestidas por perfis U com furos e um arco com arame. Os furos na base são equidistantes 5,5cm e neles são parafusados duas guias com fendas verticais, por onde passa o arame de corte. As guias são deslocadas de acordo com a conveniência de fatiamento dos Bolos.

À medida que os Bolos eram fatiados e divididos suas partes eram identificadas e conservadas envolvidas em parafina, até o momento de talhagem dos corpos de prova e a execução dos ensaios triaxiais e de adensamento oedométrico.

A Figura 6.1, mostra o esquema de fatiamento e subdivisão utilizados nos Bolos que permitiu a execução de ensaios de compressão triaxial e adensamento oedométrico, em corpos de prova talhados em três posições de eixo em relação às pressões verticais de pré-adensamento aplicadas às Lamas. Isto é, os Bolos puderam ser subdivididos em paralelepípedos de dimensões convenientes permitindo a talhagem de corpos de prova cilíndricos, com 5cm de diâmetro e 12,5cm de altura, em número de 5 para cada posição de eixo (horizontal, vertical e inclinada 45°), e corpos de prova cilíndricos, com 6cm de diâmetro e 2,5cm de altura, também em número de 5, para as mesmas variações posição de eixo.

LEGENDA

H - Horizontal
V - Vertical
I - Inclinado 45°
Ad.- Adensamento
* - 2 corpos de prova

Altura média do bolo = 16 cm

Diâmetro = 38 cm

Escala 1:5

Figura 6.1 - Esquema de Fatiamento e Divisão dos Bolos de solo

Os ensaios de Adensamento foram executados em prensas de adensamento oedométrico, seguindo rotinas normalizadas.

6.2 - Compressão Triaxial

O projeto desenvolvido teve como objetivo principal estudar os parâmetros elásticos de um solo argiloso através do comportamento tensão x deformação, após sua homogeneização e adensamento unidirecional. Em continuidade à descrição dos equipamentos para medidas de tensões e deformações no capítulo 4, as descrições se referem à utilização dos mesmos e os procedimentos técnicos dos ensaios.

Os ensaios de Compressão Triaxial realizados em corpos de prova talhados dos Bolos, foram do tipo Adensado Rápido.

Foi necessário, durante o decorrer do trabalho, proceder alterações na metodologia dos ensaios, em função dos equipamentos, e melhoria da qualidade de resultados.

A rotina geral de todos os ensaios realizados foi:

- 1) saturação geral de todas as conexões de drenagem, pressão neutra, pedras porosas e papéis-filtro.
- 2) ligação no transdutor de pressão neutra TPT.
- 3) montagem do corpo de prova no prato de base da câmara triaxial, com membrana de latex ajustada.
- 4) instalação do equipamento de medida de deformação radial, conforme descrição e ilustração nas Fotos 4.50 a 4.53, no capítulo 4.
- 5) instalação cuidadosa da câmara triaxial na prensa WF 10051, de capacidade de 50 kN e conexão dos demais equipamentos para medidas e controles (anel dinamométrico, tensão confinante, drenagem, etc.)
- 6) preenchimento da câmara triaxial com água deareada, com os cuidados usuais para retirada de ar de seu interior.
- 7) ajuste do pistão sobre o corpo de prova.
- 8) aplicação da tensão confinante, mantida constante durante todo o ensaio. Nos corpos de prova dos Bolos 1 e 2, a drenagem para o adensamento iniciou-se imediatamente após a aplicação da tensão confinante; nos corpos de prova dos Bolos 3, 4, 5, 6, após a aplicação do σ_3 , a drenagem foi iniciada após a estabilização da pressão neutra sob o confinamento, medida no transdutor TPT. As tensões confinantes aplicadas nos ensaios foram de 50, 100, 150 e 200 kPa.

9) foram controlados os tempos decorridos nos ensaios, antes do início da drenagem dos corpos de prova dos Bolos 3, 4, 5, 6 e durante a drenagem, de todos os corpos de prova.

10) a drenagem nos ensaios dos Bolos 1 e 2, foram efetuadas com pedras porosas e papéis filtros instalados nas extremidades dos corpos de prova; nos corpos de prova dos Bolos 3, 4, 5, 6 foi acrescentado o papel filtro para drenagem lateral, como ilustrado na Foto 6.7.

Foto 6.7 - Drenagem lateral do corpo de prova

11) a drenagem nos corpos de prova foi feita pelo cabeçote de topo e a medida das pressões neutras pelo cabeçote de base; estas posições foram invertidas em alguns ensaios, o que não afetou os resultados obtidos.

12) o monitoramento do volume de água drenado durante a fase de adensamento dos ensaios triaxiais, foi feito através de bureta instalada no painel de controle de ensaios triaxiais.

13) a fase de adensamento nos ensaios de compressão triaxial foram consideradas encerradas quando da estabilização em zero (ou próximo disto por longos períodos de tempo) da pressão neutra, o que ocorreu sempre após a finalização da drenagem.

14) as variações volumétricas do conjunto, feitas através dos Medidores de Variação de Volume foram monitoradas em todas as fases do ensaio.

15) a variação de volume do corpo de prova, na fase de adensamento sob tensão confinante σ_3 foi calculada em função das medidas das variações de altura e de diâmetro do corpo de prova. O

critério de cálculo foi admitindo deformação regular cilíndrica, em altura e diâmetro

Sendo H_0 - altura inicial do corpo de prova antes do confinamento

H_i - altura final do corpo de prova após o adensamento.

D_0 - diâmetro inicial do corpo de prova antes do confinamento

D_i - diâmetro final do corpo de prova após o adensamento.

Então

$$(H_0 - H_i) = \Delta H \quad \text{e} \quad (D_0 - D_i) = \Delta D$$

Os valores ΔH e ΔD foram medidos pelos equipamentos durante a fase de adensamento.

ΔD - foi medido pelo Medidor de Deformação Radial

ΔH - foi determinado em função dos deslocamentos de prato e pistão de carga axial. Isto é, encerrada a fase de adensamento sob a tensão confinante, o prato da Prensa Triaxial era acionado manualmente até que o transdutor de pressões neutras TPT acusasse variação de leitura, simultaneamente com o movimento do defletômetro do anel dinamométrico ambos indicando o ajuste do pistão no topo do corpo de prova. As leituras de subida do prato da prensa (lp) e a leitura de deslocamento do anel dinamométrico (lm), foram consideradas para o cálculo de $\Delta H = lp - lm$, observando-se coerência de sentido e de unidades.

As variações de volume assim calculadas foram sempre de menor grandeza que a água drenada na bureta e que a Variação Volumétrica corrigida, registrada pelos Medidores. O que levou a conclusão que mesmo se superestimada, a medida direta estaria mais correta, enquanto que nos demais sistemas, a Bureta de Drenagem e os Medidores de Variação de Volume, sofreram interferências externas que prejudicaram a confiabilidade dos valores obtidos.

16) encerrada a fase de adensamento no Ensaio de Compressão Triaxial; iniciou-se a fase de Compressão, com registro das tensões axiais σ_1 ou σ_v , aplicadas. As velocidades da prensa foram: 1,14 mm/min nos corpos de prova dos Bolos 1 e 2 e 0,15 mm/min nos corpos de prova dos Bolos 3, 4, 5, 6. Esta redução foi necessária, porque o trecho linear elástico da curva tensão x deformação, estava sendo mal definido nos ensaios com velocidade maior; e também, porque o monitoramento do medidor de deformação radial, não só no início, mas no decorrer do ensaio, era prejudicado. Nesta fase, as leituras foram de acompanhamento das tensões axiais, deformações axiais e radiais,

pressões neutras e variações volumétricas. Os ensaios foram conduzidos até o limite de curso do Medidor de Deformação Radial TDR-05/2 (5 mm).

17) foram determinados a massa e o teor de umidade de cada corpo de prova após o ensaio.

7. OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios, seleção dos dados e as metodologias de cálculo.

As características das Lamas e dos Bolos, expressas em números, serão aplicados os processos numéricos propostos no modelo teórico, para determinação e análise dos Parâmetros Elásticos do solo argiloso.

A sequência desta apresentação seguirá basicamente a do trabalho, com os resultados das fases de Adensamento, da Compressão Triaxial e da Aplicação do Modelo Teórico.

7.1 - Adensamentos

Como citado anteriormente, seis Lamas preparadas com o solo argiloso de Estiva (Mogi-Guaçu), resultaram em Bolos após o adensamento.

Na Tabela 7.1, estão apresentadas as principais características das Lamas:

- M(kg) - massa do solo usado para a mistura.
- W_i (%) - teor de umidade inicial do solo usado.
- V_w (l) - volume de água, usado na mistura.
- W_f (%) - teor de umidade final das Lamas, obtida das amostras usadas nos ensaios de adensamento oedométricos.
- e - índice de vazios das Lamas após a mistura também obtidas das amostras dos ensaios de adensamento oedométricos.
- TEMPO DE ENSAIO - tempo decorrido, em horas, do início do ensaio até a estabilização, após o último descarregamento.

A relação de volume de solo seco para volume de água na execução das misturas foi $V_s/V_w = 1/2$, mantida em todas as Lamas com razoável precisão.

A Tabela 7.2, apresenta as principais características dos Bolos, resultantes do adensamento das Lamas:

- ÁGUA DRENADA (cm^3) - volume de água drenada durante o adensamento da Lama.
- MASSA(g) - massa do Bolo, depois de retirado do cilindro.
- W (%) - teor de umidade do Bolo, valor médio determinado em função dos ensaios executados em cada corpo de prova.

- ALTURA (cm) - altura medida no Bolo, após sua retirada do cilindro.
- e_o - índice de vazios dos Bolos, valor médio determinado também em função dos ensaios executados.
- S (%) - grau de saturação, valor médio determinado em função dos ensaios executados.
- $\sigma_N(mx)$ (kPa) - Tensão normal máxima aplicada durante os adensamentos das Lamas.
- $\sigma_L(mx)$ (kPa) - Tensão lateral máxima após estabilização, lida no transdutor TLT, durante os adensamentos das Lamas.
- EXPANSÃO - expansão vertical dos Bolos no descarregamento, medida na haste do pistão.

Tabela 7.1 - Características das Lamas

LAMA	M (kg)	Wi (%)	Vw (%)	Wf (%)	e	TEMPO DE EN- SAIO (Horas)
1	30,25	5,7	21,45	80,2	2,185	622
2	27,60	5,5	21,45	79,2	2,158	1036
3	27,60	5,8	21,45	78,4	2,135	677
4	27,60	5,5	21,45	77,8	2,225	2152
5	27,60	6,4	19,30	79,6	2,169	1836
6	27,60	6,2	20,70	85,3	2,325	1986

Tabela 7.2 - Características dos Bolos

BOLO	ÁGUA DRENADA (cm ³)	MASSA (g)	W (%)	ALTURA cm	e_o	S (%)	σ_N máx (kPa)	σ_L máx (kPa)	EXPANSÃO (cm)
1	11.654	37.265	36,8	17,4	0,991	100	400	200	0,260
2	10.295	34.630	36,8	16,2	0,993	100	400	210	0,542
3	10.809	34.240	36,8	15,8	1,002	100	500	280	0,277
4	11.521	33.770	33,3	15,1	0,901	100	800	470	0,878
5	12.099	32.935	33,6	14,5	0,906	100	700	419	0,731
6	12.818	33.610	35,8	15,7	0,966	100	600	310	0,850

Nas Figuras 7.1 e 7.2 estão as representações gráficas das tensões normais aplicadas e tensões laterais correspondentes, ambas em função do tempo, para as Lamas que resultaram nos Bolos 1 a 6.

Figura 7.1 - Tensões Aplicadas x Tempo Decorrido para as Lamas 1, 2, 3

Figura 7.2 - Tensões Aplicadas x Tempo Decorrido nas Lamas 4, 5, 6.

Nestas figuras, pode-se observar que o critério para aplicação das tensões normais não foi único. As reduções bruscas destas tensões ocorridas, por exemplo no Bolo 2, foram devidas a acidentes técnicos durante o adensamento tais como vazamento de ar comprimido ou desbalanceamento do transdutor de pressões laterais, TLT o que exigiu descarregamento, ajuste e recarregamento. As tensões laterais nos carregamentos e descarregamentos, regulares ou acidentais, não tem ajuste instantâneo, e dependem do estado de consistência da Lama (ou Bolo). Assim, no início do adensamento na Lama, para a tensão normal aplicada corresponde a mesma tensão lateral instantaneamente; iniciado o adensamento, as tensões laterais vão se reduzindo e atingem valores correspondentes a aproximadamente a metade dos valores das tensões normais. Nos descarregamentos em estágios, as tensões laterais não se reduzem instantaneamente com as tensões normais, isto é, há uma defasagem entre as tensões no processo de redução das mesmas.

Para as tensões normais zero, no final do processo, os transdutores registraram a ocorrência de tensões laterais, que se justificam devido às massas dos Bolos, às tensões residuais do confinamento, às massas do pistão e pedra porosa (21,5kg) e em alguns poucos casos devido a inércia também dos Transdutores e/ou Indicadores que após a liberação total, acusavam leituras residuais de pequena grandeza ($\sigma_L < 30$ kPa).

Nos descarregamentos por acidentes técnicos, observou-se a mesma defasagem na redução das tensões laterais em relação às normais; a retomada das tensões laterais nestes recarregamentos, ficou condicionada ao estado de consistência do Bolo, isto é, para estados fluído ou semi fluído, tensões normais e laterais da mesma ordem de grandeza; para estados semi-sólidos, reação inercial à tensão reaplicada, até a estabilização.

O acompanhamento dos deslocamentos verticais das Lamas com o tempo decorrido, durante o período de adensamento, foi feito pelo defletômetro mecânico instalado sobre a haste do pistão. Este acompanhamento teve como objetivo principal monitorar a estabilização do adensamento nos carregamentos e descarregamentos finais. Durante o processo ocorreram algumas pequenas descontinuidades devido às interrupções acidentais ou ao ajuste necessário do defletômetro, cujo curso máximo era de 30mm (precisão 0,01mm).

As Figuras 7.3 e 7.4 ilustram os deslocamentos verticais (em cm) x tempo decorrido (em horas) durante o adensamento das Lamas 1 a 6.

Figura 7.3 - Deslocamentos das Lamas x Tempo, durante o adensamento

Figura 7.4 - Deslocamentos das Lamas x Tempo Inicial, de adensamento

A Figura 7.3, ilustra o adensamento completo até a retirada do Bolo do cilindro. Pode-se observar pelas figuras que a estabilização dos deslocamentos verticais, em geral, se iniciou nas primeiras 250 horas de carregamento e a expansibilidade no final dos descarregamentos foi no máximo de 9mm. Nos Bolos 1, 2, 3 os tempos de carregamentos e descarregamentos foram menores, que nos Bolos 4, 5, 6. Pelos níveis de carregamentos esta redução de tempo não parece ter prejudicado a estabilização. Ou seja, mesmo sob carregamentos maiores (Bolos 4 e 5) ou do mesmo nível (Bolo 6), o deslocamento vertical iniciou o patamar de estabilização em tempos médios iguais aos dos Bolos 1, 2 e 3.

Na Figura 7.4, os deslocamentos (em cm) x tempo (em horas) estão destacados no trecho inicial. As irregularidades nas curvas decorrem da não uniformidade de aplicação das pressões verticais.

A Tabela 7.3 mostra os tempos acumulados decorridos do início do processo de adensamento até serem aplicadas e mantidas as pressões verticais máximas.

Tabela 7.3 - Tempo decorrido para a Aplicação das Pressões Verticais Máximas no Adensamento das Lamas

LAMA/BOLO	TEMPO ACUMULADO (HORAS)	PRESSÃO VERTICAL APLICADA (kPa)
1	198,0	400
2	191,0	400
3	150,0	500
4	42,0	800
5	(Instantaneo)	700
6	161,0	600

Pode-se observar na, Figura 7.4, que a estabilização dos deslocamentos ocorreu em menor tempo nos Bolos 4 e 5, para as maiores pressões verticais, e em maior tempo nos Bolos 1 e 2 para as menores pressões verticais. Também pela Tabela 7.3, pode-se observar que o tempo decorrido para aplicação das pressões verticais máximas foram maiores nos Bolos 1 e 2 e menores nos Bolos 4 e 5. Nos ensaios de

adensamento oedométricos, em geral, quanto maior a pressão vertical, maior o tempo necessário à estabilização.

Apesar das Lamas terem sido regularizadas na sua superfície e terem sido medidas as alturas livres do cilindro, observou-se, na fase inicial dos adensamentos, drenagem de água e ar, o que leva a supor a existência de vazios na Lama (deixados pela retirada do batedor por exemplo) que não permitiram determinar o volume inicial exato da mistura. Isto, além das descontinuidades citadas, impediram que a ordem de grandeza das deformações ocorridas fossem relacionadas às pressões verticais aplicadas a cada Lama.

A compressão das seis Lamas, variou de 10 cm (mínimo) a 12 cm (máximo) indicada nas pequenas diferenças entre as alturas finais dos Bolos.

Como já citado anteriormente foram retiradas amostras das Lamas para adensamento oedométrico, com carregamentos em estágios.

Estes adensamentos foram executados para todas as Lamas, porém, tendo em vista a similaridade dos índices físicos das misturas, bem como a execução do ensaio, os resultados foram reunidos em um único gráfico de Índice de Vazios $\times$ log de Tensões, representado na Figura 7.5.

Figura 7.5 - Adensamentos Oedométricos, amostras de Lamas 1 a 6. Retas resultantes das Regressões Lineares para Carregamentos e Descarregamentos.

Regressões Lineares sobre os pontos resultaram nas equações das retas:

$$\text{Carregamento: } e = 1,306 - 0,518 \log^{\circ} \dots\dots\dots (42)$$

$$\text{Descarregamento: } e = 0,828 - 0,085 \log^{\circ} \dots\dots\dots (43)$$

A existência de uma nuvem de pontos alinhados e não de uma linha de pontos pode ser atribuída às condições de ensaios (prensas de adensamento, anéis, carregamentos não idênticos) e das Lamas (amostragens e índices físicos não idênticos).

Nos Bolos resultantes das Lamas adensadas, foram talhados corpos de prova para execução de ensaios diversos, como ilustrado na Figura 6.1, do capítulo 6.

Ensaio de Adensamento oedométricos foram executados em corpos de prova talhados dos Bolos, em três posições de eixo, relativas à pressão vertical aplicada para o adensamento das Lamas; estes corpos de prova foram talhados nas posições: 1) vertical (coincidente com o eixo vertical do Bolo); 2) horizontal (eixo do corpo de prova perpendicular ao eixo vertical do Bolo); 3) inclinado 45° (eixo do corpo de prova a 45° do eixo vertical do Bolo).

No Anexo 1, estão apresentados na forma de Tabela, os ensaios de adensamento oedométricos executados e suas principais características.

Os corpos de prova foram identificados, pelos números dos Bolos, B1, B2, B3, B4, B5, B6; pela posição dos eixos V (vertical), I (inclinado) e H (horizontal) e pelo número do ensaio; assim, por exemplo, B3H1 é o ensaio do primeiro adensamento com corpo de prova horizontal do Bolo 3; e B4V2 é o segundo ensaio de adensamento com corpo de prova vertical do Bolo 4.

As principais características relacionadas no Anexo 1 são:

$w_i(\%)$ - teor de umidade inicial dos corpos de prova

e_i - índice de vazios inicial de cada corpo de prova

ρ_i (g/cm^3) - massa específica inicial de cada corpo de prova

S_i (%) - grau de saturação inicial de cada corpo de prova.

w_f (%) - teor de umidade final de cada corpo de prova, após o descarregamento

e_f - índice de vazios final de cada corpo de prova, após o descarregamento

$\Delta\sigma_{mx}$ - último estágio de carregamento aplicado ao corpo de prova

TEMPO DE ENSAIO (dias) - tempo decorrido do início do adensamento até a retirada do corpo de prova da Prensa de Adensamento.

O Grau de Saturação final em todos os corpos de prova foi de 100%.

As curvas dos ensaios de adensamento relacionados no Anexo 1, foram analisadas individualmente, por corpo de prova e, em conjunto, por Bolo. As Figuras 7.6 e 7.7, mostram as curvas resultantes dos adensamentos agrupadas por Bolos (1 a 6) em função dos ensaios realizados.

Observa-se que a mudança de posição dos corpos de prova não se refletiu nos resultados obtidos de forma ordenada. Ou seja, tendo-se em vista a ordem de grandeza das diferenças ocorridas entre as curvas de adensamento pode-se atribuí-las mais a fatores externos, do que devido à mudança de orientação do corpo de prova.

Para detectar eventuais ocorrências de diferenças de comportamento nos níveis de variação dos índices de vazios (0,2), estes ensaios precisariam ser conduzidos com técnica de alta precisão e ambientação adequada, fugindo dos padrões normais. Resta a dúvida se estes detalhes representariam a lei de comportamento esperada, tratando-se de solo argiloso; observe-se, por exemplo, a não repetitividade de valores nos ensaios em amostras talhadas na mesma posição.

Outra observação importante a ser feita nestes ensaios de adensamento é o alto grau de recuperação no índice de vazios.

Na Figura 7.5, os ensaios de adensamento oedométricos foram executados em amostras das Lamas e nas Figuras 7.6 e 7.7 em corpos de prova talhados dos Bolos, com tensões de carregamento e descarregamento da mesma ordem de grandeza. As variações dos índices de vazios ocorridas na reta média de descarregamentos das Lamas (Figura 7.5) e nas curvas de carregamentos e descarregamentos dos Bolos (Figuras 7.6 e 7.7), são muito semelhantes e pequenas (índice de vazios máximos = 1,0 e índices de vazios mínimos = 0,7); os corpos de prova talhados de Bolos, então sob condição de recarregamento, também apresentaram pequena variação de índice de vazios; isto é, como citado anteriormente as variações entre o índice de vazios inicial e final dos corpos de prova de todos os adensamentos dos Bolos foram menor que 0,2.

Mediante a variação não ordenada das curvas de adensamento oedométricos nos corpos verticais, horizontais e inclinados 45°, a representatividade de cada Bolo passou a ser feita por uma curva obtida da Regressão Polinomial dos pontos de ensaios.

Figura 7.6-Curvas de Adensamento Oedométricos executadas nos corpos de prova para três posições de eixo (V,H,I) dos Bolos 1,2 e 3

Figura 7.7-Curvas de Adensamento Oedométricos executadas nos corpos de prova para três posições de eixo (V,H,I) dos Bolos 4,5 e 6

Na Tabela 7.4 estão apresentadas as equações obtidas por Regressão Polinomial Múltipla dos pontos das curvas de adensamento de ensaios realizados sobre corpos de prova verticais, horizontais e inclinados, de cada Bolo, para carregamento e descarregamento, bem como os Coeficientes de Correlação (R).

As Figuras 7.8 e 7.9 ilustram as curvas de adensamento resultantes das regressões, os índices de vazios iniciais de cada Bolo (dados na Tabela 7.2) e a reta de adensamento para tensões de carregamento, dada na equação 42 das Lamas 1 a 6.

Tabela 7.4 - Equações das Curvas de Adensamento Oedométricos para carregamentos e descarregamentos dos Bolos, calculadas por Regressão Polinomial Múltipla

BOLO	EQUAÇÕES DAS CURVAS DE ADENSAMENTO	*	R
1	$e = 0,982 - 5,068 \times 10^{-2} \sigma + 3,189 \times 10^{-3} \sigma^2 - 1,053 \times 10^{-4} \sigma^3$	C	0,981
1	$e = 0,762 - 2,113 \times 10^{-2} \sigma + 7,533 \times 10^{-4} \sigma^2$	D	0,701
2	$e = 0,962 - 3,900 \times 10^{-2} \sigma + 1,067 \times 10^{-3} \sigma^2 - 3,019 \times 10^{-6} \sigma^3$	C	0,972
2	$e = 0,763 - 2,504 \times 10^{-2} \sigma + 1,003 \times 10^{-3} \sigma^2$	D	0,828
3	$e = 0,992 - 3,505 \times 10^{-2} \sigma + 1,662 \times 10^{-4} \sigma^2 + 3,734 \times 10^{-5} \sigma^3$	C	0,989
3	$e = 0,791 - 3,032 \times 10^{-2} \sigma + 1,279 \times 10^{-3} \sigma^2$	D	0,876
4	$e = 0,875 - 2,177 \times 10^{-2} \sigma - 1,978 \times 10^{-4} \sigma^2 + 2,891 \times 10^{-5} \sigma^3$	C	0,984
4	$e = 0,750 - 2,778 \times 10^{-2} \sigma + 1,152 \times 10^{-3} \sigma^2$	D	0,902
5	$e = 0,900 - 1,6 \times 10^{-2} \sigma - 9,532 \times 10^{-4} \sigma^2 + 5,623 \times 10^{-5} \sigma^3$	C	0,984
5	$e = 0,793 - 3,030 \times 10^{-2} \sigma + 1,272 \times 10^{-3} \sigma^2$	D	0,922
6	$e = 0,976 - 4,657 \times 10^{-2} \sigma + 2,039 \times 10^{-3} \sigma^2 - 3,459 \times 10^{-5} \sigma^3$	C	0,981
6	$e = 0,763 - 2,929 \times 10^{-2} \sigma + 1,239 \times 10^{-3} \sigma^2$	D	0,913

* C - CARREGAMENTOS ; D - DESCARREGAMENTOS

As pressões de pré-adensamento das curvas foram determinadas graficamente pelos Processos de Casagrande e Pacheco Silva, e estão relacionados na Tabela 7.5.

Os valores indicados nas Figuras 7.8 e 7.9, correspondem às médias obtidas pelos dois processos.

Figura 7.8- Curvas Médias dos Ensaios de Adensamento dos Bolos 1, 2 e 3

Figura 7.9- Curvas Médias dos Ensaio de Adensamento dos Bolos 4, 5 e 6

Na Tabela 7.5 estão apresentadas:

p_a (Casagrande) - pressão de pré-adensamento determinada graficamente pelo Processo de Casagrande.

p_a (Pacheco Silva) - pressões de pré-adensamento determinadas graficamente pelo Processo Pacheco Silva, utilizando os índices de vazios iniciais e_o , dados na Tabela 7.2 e representados nas Figuras 7.8 e 7.9.

$\sigma_{oct\ max}$ - as tensões octaédricas calculadas em função das tensões normais máximas ($\bar{\sigma}_{N\ max}$) e tensões laterais máximas, ($\sigma_{L\ max}$), obtidas no processo de adensamento dos Bolos, fornecidas também na Tabela 7.2.

Reta de Compressão-trecho linear das curvas de adensamento de cada Bolo, obtido graficamente, da curva resultante.

Tabela 7.5 - Determinação das Pressões de Pré-Adensamento e Retas de Compressão dos Bolos

BOLO	p_a (Casagrande) (kPa)	p_a (Pacheco Silva) (kPa)	$\sigma_{oct\ max}$ (kPa)	Reta de Compressão
1	360	350	270	$e = 1,145 - 0,467 \log \sigma$
2	330	350	270	$e = 1,119 - 0,433 \log \sigma$
3	350	360	350	$e = 1,166 - 0,448 \log \sigma$
4	500	500	580	$e = 1,100 - 0,426 \log \sigma$
5	570	580	510	$e = 1,176 - 0,454 \log \sigma$
6	320	360	410	$e = 1,129 - 0,426 \log \sigma$

As diferenças entre as pressões de pré-adensamento e as tensões octaédricas, na Tabela 7.5, não obedecem uma lei de variação, o que é normal e real uma vez que se deve levar em conta:

a) a não uniformidade da aplicação entre os estágios de carregamento na compressão das Lamas que geraram os respectivos Bolos (Figuras 7.1 e 7.2).

b) a obtenção de uma curva de adensamento para cada Bolo, usando o processo matemático por regressão dos vários pontos de ensaios executados.

c) a subjetividade envolvida nos processos gráficos de Casagrande e Pacheco Silva, para determinação da pressão de pré-adensamento.

As retas do trecho de compressão dos ensaios de adensamento

dos Bolos, cujas equações são apresentadas na Tabela 7.5, foram determinadas graficamente, acompanhando os carregamentos finais dos adensamentos, buscando assintoticamente a curva média das Lamas. Da mesma forma que as curvas de adensamento, onde houve pouca variação no índice de vazios, estas retas de compressão não apresentaram grandes variações para o Índice de Compressão C_c .

Os resultados desta etapa de ensaios, parece mostrar que apesar das diferenças de tensões de carregamentos terem sido de 400 kPa para 800 kPa nas Lamas, não foram suficientes para provocar grandes alterações nos Bolos. Ou seja, no intervalo médio de tensões de pré-adensamento, aplicadas (600 kPa) nas Lamas, o solo argiloso não teve redução significativa nos seus índices de vazios, mesmo em recarregamentos, ocorridos nos ensaios oedométricos, com tensões de até 1.600 kPa.

A uniformidade das condições iniciais das Lamas ($V_s/V_w = 1/2$) parece ser fator de influência nos resultados finais, segundo os trabalhos pesquisados em caulim (Bonaz, 1976).

7.2 - Compressão Triaxial

Os ensaios de Compressão Triaxial Adensados Rápidos realizados, conforme descrição no capítulo 6, tiveram duas etapas nos corpos de prova dos Bolos 1 e 2: adensamento e compressão; e três etapas nos corpos de prova dos Bolos 3, 4, 5 e 6, ou seja, confinamento, adensamento e compressão.

No Anexo 2 estão relacionados os ensaios de Compressão Triaxial realizados e os principais índices físicos dos corpos de prova, os quais também foram identificados pelos números dos Bolos (B1, B2, B3, B4, B5 e B6) pela posição de eixo (V, vertical; H, horizontal; I, inclinado 45°) e pelo número do ensaio realizado (1, 2, 3, etc.). A massa específica (ρ_i), o teor de umidade (w_i), o índice de vazios (e_i) e o grau de saturação (S_i) se referem às condições iniciais dos corpos de prova. A tensão confinante (σ_3) ou tensão horizontal (σ_h) no Modelo Teórico, foi mantida constante em todas as etapas dos ensaios. O teor de umidade final (w_f) se refere às condições após a retirada no corpo de prova dos ensaios.

Como já observado, as variações dos índices físicos entre os corpos de prova que representam as dos Bolos, foram pequenas, tendo-se em vistas as tensões de adensamento das Lamas.

No Anexo 3 estão relacionados os principais parâmetros controlados nas fases de confinamento e adensamento dos Ensaio Triaxiais. Na fase de confinamento, sob tensão confinante constante σ_3 , ou tensão horizontal, σ_h , foram observadas as pressões neutras máximas (u_{max} , CON). Nos ensaios realizados nos corpos de prova dos Bolos 1 e 2, estes valores correspondem aos atingidos imediatamente após a aplicação da tensão confinante, quando já em seguida iniciava-se a drenagem, isto é, o adensamento. Nos corpos de prova dos bolos 3, 4, 5 e 6, aplicada a tensão confinante σ_3 , os valores de pressão neutra máxima (u_{max} , CON), correspondem aos observados até ser atingido um valor estável, e o tempo necessário para que fosse atingida esta estabilidade (Tempo, CON). Isto é, nestes ensaios processou-se um confinamento sem a drenagem. Esta se iniciava, após a estabilização de u_{max} , CON.

Na fase de adensamento foram controladas a redução e a estabilização das pressões neutras, até atingirem um mínimo (u_{min} , DR); o tempo necessário para que isto ocorresse, (Tempo, DR); o volume de água drenada na bureta (Água, DREN); e a variação de volume calculado (ΔV calc. ADENS.), pelas deformações de altura ΔH , e de diâmetro ΔD , segundo a descrição no capítulo 6.

Nos ensaios dos corpos de prova dos Bolos 1 e 2, não foram usados papéis filtros para drenagem lateral. Efetuar o confinamento inicial sem drenagem, e adotar o papel filtro para drenagem lateral, nos corpos de prova dos Bolos 3, 4, 5 e 6, alteraram favoravelmente os resultados, em termos de redução e estabilização das pressões neutras, na fase de adensamento dos Ensaio Triaxiais.

Os corpos de prova estavam em condições de saturação 100% ou muito próximo disto, mas as pressões neutras máximas atingidas no confinamento sem drenagem não se igualaram às tensões confinantes aplicadas; ou seja, o parâmetro B de Skempton manteve-se menor que 1; as técnicas de saturação foram cuidadosas e padronizadas nos procedimentos de ensaios, mas estas ocorrências poderiam ser atribuídas a fatores inerentes também ao próprio solo. Ou seja, a condição de baixa permeabilidade, e o baixo nível das tensões confinantes aplicadas, também poderiam justificar a não igualdade das pressões externas (σ_3) e internas (u_{max}), na fase de confinamento.

Como citado anteriormente as variações de volume dos corpos de prova durante as fases de confinamento e adensamento foram calculadas pelas deformações de altura e diâmetro dos corpos de prova.

Observou-se que o volume de água drenada estando em contacto com vários elementos externos, (pedra porosa, tubo de náilon, bureta, etc.) poderia, neste nível de variações, estar sujeito a maiores erros.

Não foram consideradas as variações de volume medidas durante os confinamento e adensamentos pelos equipamentos dos Painéis (TVT-100 e WF 17.038) porque observou-se nas calibrações que, nestas fases, as medidas registradas se referiam à expansibilidade da câmara triaxial e dos acessórios, e são muito maiores que as do corpo de prova e de difícil controle. Para a fase de compressão a velocidade controlada, com estas variações externas já estabilizadas ou insignificantes, o acompanhamento da variação de volume dos corpos de prova foi feito então pelos equipamentos de painel (TVT-100 e WF 17.038).

Finalizadas as fases de confinamento e/ou adensamento, iniciava-se a etapa de Compressão, à velocidade controlada, com acompanhamento das medidas de deslocamento do prato, (lp) da Prensa Triaxial WF 10.051; das deformações do defletômetro do anel dinamométrico (ou mola), (l mol) medindo a força vertical aplicada sobre o corpo de prova; das pressões neutras (lu) pelo topo ou base do corpo de prova; das variações volumétricas (l vol) do interior da câmara e das deformações radiais (l rad).

Esta foi a nomenclatura de medidas, usada no programa de computador para cálculos e gráficos, que resultaram nas variáveis:

ϵ_v - deformação axial específica, ou deformação vertical específica, calculada em função das leituras de deslocamento do prato da prensa e da deformação dos anéis dinamométricos (mola).

$(\sigma_v - \sigma_h)$ - diferença entre tensões verticais e horizontais, ou diferença de tensões principais, $(\sigma_1 - \sigma_3)$.

u - pressões neutras.

ϵ_{vol} - deformação volumétrica específica, calculada em função das leituras de variação de volume.

ϵ_h - deformação horizontal específica ou deformação radial específica, obtida em função das leituras do medidor de deformação radial

$\epsilon_{r vol}$ - deformação horizontal específica, ou deformação radial específica, calculada em função das leituras de variação de volume e deformações axiais (ou verticais), isto é, $\epsilon_{r vol} = \frac{\epsilon_{vol} - \epsilon_v}{2}$

No Anexo 4 estão a listagem do Programa Triaxial e seis exemplos (um de cada Bolo) de cálculos e gráficos de Ensaio de Compressão Triaxial Adensados Rápidos executados.

Para os cálculos e gráficos dos ensaios, o programa utilizado originalmente, elaborado por Giachetti (1987) e adaptado para este trabalho, é na linguagem BASIC, sistema operacional DOS - versão 1.3 do Micro-Engenho 2, para microcomputadores de 8 bytes, linha APLE, com 64 kbytes de memória.

Nos ensaios calculados pelo programa foram fornecidas as características principais dos corpos de prova, antes da fase de confinamento e/ou adensamento e as variações de medidas ocorridas então, e as leituras de:

- lp - deslocamento do prato da prensa
- l mol - deformação do anel dinamométrico (mola)
- lu - pressões neutras
- l vol - variação de volume
- l rad - deformação radial

Foram calculadas e listadas numericamente as variáveis:

- diferença de tensões totais, $(\sigma_v - \sigma_h) \times 100$ kPa, identificada como T.TOT.

- pressão neutra, $(u) \times 100$ kPa, identificada como P.N.

- deformação vertical (ou axial) específica, ϵ_v (%), identificada como DAXIAL.

- tensão vertical efetiva (σ'_v) ou tensão principal maior $(\sigma'_1) \times 100$ kPa, identificada como SG1EFT.

- tensão horizontal efetiva (σ'_h) ou tensão principal menor $(\sigma'_3) \times 100$ kPa, identificada como SG3EFT.

- deformação volumétrica específica, ϵ_{vol} (%), identificada como DVOL.

- deformação horizontal (ou radial) específica, ϵ_h (%), identificada como DRAD.

- deformação radial específica, volumétrica, ϵ_r vol (%), identificada como DRA-V.

- a relação entre a deformação horizontal específica, ϵ_h , e a deformação vertical específica, ϵ_v , identificada como DRA/DAX.

- o Coeficiente de Poisson, calculado pela formulação clássica, em função das deformações volumétricas (ϵ_{vol}) e das deformações verticais ϵ_v , identificado como NI VOL, isto é, $NI VOL = - \frac{\epsilon_{vol}}{2 \epsilon_v} + 0,5$

O mesmo programa, apresenta as variáveis obtidas em gráficos, relacionadas respectivamente para eixo vertical versus eixo horizontal:

- a diferença de tensões, $(\sigma_v - \sigma_h)$ versus as deformações verticais (ou axiais), específicas, ϵ_v .

- a diferença de tensões, $(\sigma_v - \sigma_h)$ versus as deformações horizontais (ou radiais) específicas ϵ_h .

- as pressões neutras, u , versus as deformações verticais (ou axiais), específicas ϵ_v .

- as tensões efetivas principais maiores (ou verticais) σ'_v versus as tensões efetivas principais menores (ou horizontais), σ'_h .

- as deformações volumétricas específicas, ϵ_{vol} : 1) versus as deformações verticais (ou axiais) específicas, ϵ_v ; e 2) versus as deformações horizontais (ou radiais) específicas, ϵ_h , no mesmo sistema de eixos.

- as deformações horizontais (ou radiais) específicas, ϵ_h , versus as deformações verticais (ou axiais) específicas, ϵ_v ; e as deformações radiais (ou horizontais) específicas, ϵ_r vol, calculadas pela variação volumétrica medida, versus as deformações verticais (ou axiais) específicas, ϵ_v , no mesmo sistema de eixos.

Os resultados das variáveis assim obtidas foram ordenados e estudados de forma a se obter os parâmetros do modelo, bem como noções de comportamento do material.

No Anexo 5 foram tabeladas as principais variáveis obtidas, resultantes dos ensaios de Compressão Triaxial.

Na parte 1 do Anexo 5, estão relacionadas para os ensaios executados, a diferença de tensões principais máximas, $(\sigma_v - \sigma_h)_{max.}$, atingidas e de ruptura $(\sigma_v - \sigma_h)_{rup}$, quando estas coincidem, pois os ensaios tiveram seu desenvolvimento limitado pelo curso do Medidor de Deformação Radial (TDR-05/2); as tensões confinantes σ_h , mantidas constantes durante todas as fases dos ensaios. Para os pontos de tensões máximas dos ensaios, foram relacionadas a pressão neutra u ; a deformação vertical (ou axial) ϵ_v ; e a deformação horizontal (ou radial) ϵ_h .

Na parte 2 do Anexo 5, estão relacionados por corpo de prova, a pressão neutra máxima, $(u_{max.})$ atingida no ensaio; a pressão neutra relativa a última leitura medida no ensaio $(u_{ult.})$; a variação volumétrica máxima de contração do corpo de prova, medida durante o ensaio $(\epsilon_{vol} max.)$ e a variação volumétrica do corpo de prova na última leitura medida, $(\epsilon_{vol. ult.})$

Analisando os valores das variáveis no Anexo 5 observa-se que (exceto em dois ensaios) os corpos de prova cujas diferenças de tensões máximas $(\sigma_v - \sigma_h)_{max.}$ não atingiram a tensão de ruptura $(\sigma_v - \sigma_h)_{rup}$, se referem a corpos de prova talhados na posição de eixo horizontal, o que parece indicar maior deformabilidade nessa direção.

A ordem de grandeza das pressões neutras, tanto durante os ensaios como nos pontos máximos, variou em função da tensão confinante aplicada. Isto é, nos ensaios dos corpos de prova dos Bolos 1, 2 e 3, onde as tensões confinantes foram de 150 e 200 kPa, as pressões neutras atingiram valores maiores do que nos ensaios dos corpos de prova dos Bolos 4, 5, 6, onde as tensões confinantes aplicadas foram de 50 e 100 kPa.

O período de armazenamento dos Bolos contribuiu para a estabilização e provável dissipação das pressões neutras desenvolvidas durante o adensamento dos mesmos; e, assim, as pressões neutras nos ensaios triaxiais surgiram em função das tensões confinantes aplicadas.

A ordem de grandeza das pressões neutras máximas ficaram no intervalo $5 \text{ kPa} < u_{\text{max.}} < 90 \text{ kPa}$. A diferença entre as pressões neutras máximas e últimas medidas, foi pequena ou não existiu, para os ensaios realizados com tensões confinantes de 150 e 200 kPa. Graficamente a representação u versus ϵ_v , nestes ensaios (corpos de prova dos Bolos 1, 2 e 3), foi similar a uma hipérbole, tendendo assintoticamente para um valor estável.

Nos ensaios onde as tensões confinantes foram de 50 e 100 kPa (Bolos 4, 5 e 6), os valores máximos das pressões neutras, em ordem de grandeza foram bem menores que as dos corpos de prova dos Bolos 1, 2 e 3; e, à medida que as diferenças de tensões máximas ($\sigma_v - \sigma_h$) max. era alcançada, as pressões neutras correspondentes se reduziram ou se dissiparam.

As deformações verticais, ϵ_v e as horizontais ϵ_h , medidas nos pontos de diferença de tensões máximas ($\sigma_v - \sigma_h$) máx. não apresentam variação ordenada com as outras variáveis dos ensaios, e o intervalo de variação de valores é $3\% < \epsilon_v < 12\%$ e $1\% < \epsilon_h < 9\%$.

Os valores máximos das deformações verticais ocorreram em corpos de prova talhados com seus eixos na posição horizontal e os mínimos em corpos de prova verticais.

As variações volumétricas foram coerentes com o comportamento observado nas pressões neutras: para os ensaios com tensões confinantes de 150 e 200 kPa, a redução de volume (ou a compressão) atingiu um valor máximo que se manteve ou diminuiu muito pouco até serem atingidas a diferença de tensões máximas ou tensões de ruptura. Para confinamentos menores (50 e 100 kPa) as variações volumétricas dos corpos de prova na fase final passaram de contração para expansão (o que reduziu a pressão neutra interna).

Os valores máximos atingidos na variação volumétrica dos corpos de prova, em compressão ou expansão, com poucas exceções foram menores que 0,5%.

Na Tabela 7.6, as tensões de ruptura principal maior (ou vertical), totais e efetivas, σ_v e σ'_v e as tensões de ruptura principal menor (ou horizontal) totais e efetivas, σ_h e σ'_h , dos ensaios triaxiais, foram tabeladas por grupos de ensaios realizados em cada posição de eixo do corpo de prova (vertical, V, horizontal, H; e inclinado 45°, I) e em ordem decrescente de grandeza.

Tabela 7.6 - Tensões Máximas Médias dos Corpos de Prova Verticais, Horizontais e Inclinados, de cada Bolo, obtidas nos Ensaio de Compressão Triaxial

CORPO DE PROVA	σ_v rup (kPa)	σ_h rup (kPa)	σ'_v rup (kPa)	σ'_h rup (kPa)	no.de ensaio
B2V	386	200	347	161	3
B3V	329	150	282	103	3
B1V	321	150	270	98	3
B5V4	307	100	289	82	1
B4V2	294	100	271	77	1
B6V6	282	100	255	73	1
B5V3	230	50	226	46	1
B4V1	200	50	197	47	1
B6V	195	50	186	41	2
B2H1	366	200	284	118	1
B1H	291	150	241	100	3
B5H	309	100	305	87	2
B2I	375	200	304	128	3
B3I2	316	150	256	89	1
B5I3	329	100	320	90	1
B1I	298	150	260	114	4
B6I3	292	100	265	73	1
B5I2	229	50	228	49	1
B4I1	210	50	210	50	1
B6I2	202	50	201	49	1

As tensões de ruptura relacionados na Tabela 7.6, estão nas Figuras 7.10 e 7.11. Isto é, as tensões totais, verticais versus horizontais, ($\sigma_v \times \sigma_h$), estão na Figura 7.10; e as tensões efetivas, verticais versus horizontais, ($\sigma'_v \times \sigma'_h$) estão na Figura 7.11.

Figura 7.10 - Tensões Verticais Totais Médias versus Horizontais Totais Médias, de Ruptura, ($\sigma_v \text{ rup} \times \sigma_h \text{ rup}$)

A variação das tensões totais ou efetivas não obedecem uma lei matemática, mas apresentam tendências de comportamento apesar da maioria dos dados terem sido obtidos com apenas um ensaio.

Ou seja, as tensões verticais totais e efetivas são crescentes com as tensões horizontais totais e efetivas para os corpos de prova verticais. Para os corpos de prova inclinados o acréscimo das tensões verticais com as tensões horizontais totais sofre descontinuidades que aumentam nas respectivas variações das tensões efetivas.

Para os corpos de prova horizontais, a representatividade das tensões de ruptura é pequena e a dispersão de resultados é maior.

Figura 7.11 - Tensões Verticais Efetivas Médias versus Tensões Horizontais Efetivas Médias, de Ruptura, ($\sigma'_v \text{ rup} \times \sigma'_h \text{ rup}$)

Objetivamente, os corpos de prova verticais responderam de forma mais acentuada às tensões verticais e horizontais atuantes nos ensaios triaxiais, enquanto os ensaios em corpos de prova horizontais ficariam sujeitos a uma maior deformabilidade, mesmo para níveis de tensões máximas ou de ruptura similares aos corpos de prova verticais.

As variações das deformações horizontais (ou radiais) ϵ_h , obtidas através de leituras feitas no medidor de deformação radial TDR-05/2, foram comparadas graficamente com as deformações radiais (ou horizontais) volumétricas, ϵ_{rvol} , obtidas através de cálculos de leituras de deformações volumétricas e verticais $\epsilon_{rvol} = \frac{\epsilon_{vol} - \epsilon_v}{2}$, em cada um dos ensaios executados como apresentado no Anexo 4.

Sendo os corpos de prova saturados e o ensaio não drenado, as deformações volumétricas teoricamente seriam nulas. Entretanto, nas condições reais de ensaio, elas ocorreram, embora em pequena grandeza. (no Anexo 5 estão relacionados os valores máximos registrados por corpo de prova). Por isso, as variáveis deformação horizontal volumétrica ϵ_{rvol} e deformação vertical ϵ_v , apresentaram uma correlação aproximadamente linear.

As medidas das deformações horizontais ϵ_h , no Medidor de Deformação Radial TDR-05/2, foram diretas e sua correlação com a deformação vertical ϵ_v é linear nos trechos iniciais dos ensaios.

No Anexo 6 estão relacionadas as diferenças das deformações horizontais ($\epsilon_h - \epsilon_{r \text{ vol}}$) obtidas nos ensaios em função das deformações verticais ϵ_v , para valores de 0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 5,0% e das últimas deformações lidas em cada ensaio, em %.

A Figura 7.12, apresenta graficamente as diferenças de deformações horizontais, ($\epsilon_h - \epsilon_{r \text{ vol}}$) em %, em função das deformações verticais ϵ_v , nos valores de 0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 4,0 e 5,0%.

Com os valores fornecidos no Anexo 6 a Figura 7.12, pode-se observar que as diferenças entre as deformações horizontais medidas diretamente pelo TDR-05/2, ϵ_h , e as calculadas a partir das deformações volumétricas, $\epsilon_{r \text{ vol}}$, são pequenas e crescem com as deformações axiais. Para $\epsilon_v \leq 5\%$, ($\epsilon_h - \epsilon_{r \text{ vol}}$) $< 2\%$, com poucas exceções (5 ensaios), o que parece indicar coerência e desempenho satisfatório do medidor de deformações radiais.

Figura 7.12 - Diferença entre deformações horizontais medidas no TDR-05/2, ϵ_h , e deformações horizontais calculadas pela variação volumétrica, $\epsilon_{r \text{ vol}}$, em função das deformações verticais, ϵ_v

O comportamento linear das deformações horizontais ϵ_h e $\epsilon_{r \text{ vol}}$ em função das deformações verticais ϵ_v foi analisado por Regressão Linear entre os valores obtidos.

O processo para determinação da equação de correlação entre as variáveis, já foi utilizado em outros trabalhos nossos de pesquisa

e busca a linearidade entre os pontos por captação seletiva dos pares de valores.

Inicialmente toma-se visualmente n pares de valores $\epsilon_h \times \epsilon_v$ alinhados. Com estes n pares de valores é calculada a Regressão Linear $\epsilon_h = a + b \epsilon_v$. Também é calculado o desvio padrão da Regressão, d , e o Coeficiente de Correlação R .

A seguir é feita a seguinte comparação: para a deformação vertical $\epsilon_v(n+1)$ calcula-se o valor da deformação horizontal $\epsilon_h(n+1)$ calc., pela equação $\epsilon_h = a + b \epsilon_v$.

O valor calculado $\epsilon_h(n+1)$ calc. é comparado com o valor medido $\epsilon_h(n+1)$.

Se $\epsilon_h(n+1) > \epsilon_h(n+1)$ calc. - 1,96 d e

$\epsilon_h(n+1) < \epsilon_h(n+1)$ calc. + 1,96 d , a regressão linear é recalculada para $(n+1)$ pares de valores.

O processo se repete acumulando pares de valores até que uma das desigualdades ocorra, ou todos os pares de valores medidos no ensaio sejam incluídos no cálculo.

O valor 1,96 d se refere a um desvio da regressão com 95% de confiança, onde d é o desvio padrão da regressão.

O mesmo processo de cálculo foi utilizado para os pares de valores ϵ_r vol. e ϵ_v .

Com isto foram obtidas Regressões Lineares que identificam o trecho linear dos ensaios, eliminando as últimas leituras de deformações.

No Anexo 7, Parte 1, estão relacionados para os ensaios executados: os parâmetros a e b da Correlação Linear $\epsilon_h = a + b \epsilon_v$; o coeficiente de correlação R da mesma; os valores das deformações horizontais ϵ_h medidos, ϵ_h med, calculados, ϵ_h calc.; e a deformação vertical, ϵ_v , para o último par de valores incluído no processo de cálculo da Regressão Linear; e o valor das deformações horizontais medidos, ϵ_h ult med., e calculados, ϵ_h ult. calc., para o último par de valores obtidos das leituras no ensaio.

Também nesta Parte 1 do Anexo 7 estão seis exemplos em gráficos dos ensaios (1 de cada Bolo), B6I2, B5V4, B4H2, B3H2, B2H5, B1V3, das Regressões Lineares obtidas entre as variáveis $\epsilon_h \times \epsilon_v$ e seus valores reais.

No Anexo 7, Parte 2, estão relacionados os mesmos elementos para as variáveis ϵ_r vol., isto é, a Correlação Linear ϵ_r vol. = $a + b \epsilon_v$; ϵ_r vol. medido, ϵ_r vol calculado, e a deformação vertical, ϵ_v , para o último par de valores incluídos na Regressão Linear; e ϵ_r vol.últ.,

para o último par de valores medidos e calculados no ensaio; bem como os gráficos dos ensaios B6I2, B5V4, B4H2, B3H2, B2H5, B1V3 com as Regressões Lineares obtidas entre as variáveis $\epsilon_r \text{ vol.}$ x ϵ_v e seus valores reais.

O processo de determinação da correlação linear entre as variáveis (ϵ_h x ϵ_v) e ($\epsilon_r \text{ vol.}$ x ϵ_v), apesar da escolha subjetiva do trecho inicial reto, apresentou resultados satisfatórios comprovados graficamente e que podem ser constatados no Anexo 7. Pode-se observar que a ordem de grandeza das diferenças, entre valores calculados e medidos, para o último par de pontos incluídos no processo, não é significativa; isto é válido principalmente para as deformações horizontais calculadas pela variação volumétrica $\epsilon_r \text{ vol.}$

A correlação linear entre as variáveis ϵ_h e ϵ_v tem limites e quando os corpos de prova passam para as fases de escoamento, as deformações horizontais sendo medidas diretamente parecem indicar de forma mais verdadeira os ajustes do material. Daí surgirem as diferenças entre as deformações horizontais reais e as calculadas por correlação linear nos trechos finais do ensaio.

Nas deformações horizontais calculadas por variação volumétrica o comportamento entre as variáveis $\epsilon_r \text{ vol.}$ e ϵ_v é praticamente linear em todo o decorrer do ensaio; isto pode ser constatado nos exemplos gráficos e nas diferenças entre os valores calculados e medidos, tanto para o último par de valores incluídos no cálculo da Regressão Linear como no último par de valores obtidos em cada ensaio.

Na maioria dos ensaios, foi o rigor do processo de Regressão Linear na captação seletiva dos pares de valores, que impediu que fosse atingido o último par de valores lidos, $\epsilon_r \text{ vol.}$ x ϵ_v .

É possível admitir-se um Coeficiente Angular (b) médio para as Regressões Lineares entre as variáveis $\epsilon_r \text{ vol.}$ e ϵ_v , que vale - 0,475.

Para as variáveis ϵ_h e ϵ_v , determinar o Coeficiente Angular Médio seria pouco representativo uma vez que existe maior amplitude de variação entre estes, nos ensaios realizados.

Entre as deformações horizontais lidas pelo medidor de deformação radial TDR-05/2, ϵ_h , e as deformações horizontais calculadas pela variação volumétrica, $\epsilon_r \text{ vol.}$, há comportamento linear nas primeiras deformações dos corpos de prova. Nas fases de escoamento ou de plasticidade do solo, as deformações ϵ_h e $\epsilon_r \text{ vol.}$ passam a ter comportamentos distintos.

Deve-se destacar: 1) as deformações $\epsilon_r \text{ vol.}$ são calculadas a

partir das variações volumétricas, ϵ_{vol} , (que foram de pequena grandeza em todo o decorrer dos ensaios) e das deformações verticais (que por sua ordem de grandeza passam a ter maior influência no cálculo); 2) as deformações ϵ_h são medidas no mesmo plano horizontal e a deformabilidade deste, pode ter maior ou menor representatividade no todo; daí, portanto, a pouca regularidade nos valores numéricos obtidos nos ensaios, nas diferenças entre os valores de ϵ_h e $\epsilon_{r vol.}$; e nas diferenças entre as medidas reais ϵ_h e ϵ_h calculado por regressão linear, se se admitisse que esta última representa as deformações horizontais dos corpos de prova.

Observou-se que nos ensaios executados com velocidades maiores (1,14 mm/min), nos corpos de prova dos Bolos 1 e 2, as últimas medidas de deformação horizontal foram prejudicadas. Isto é, nestes ensaios o tempo decorrido ($\pm$ 20 min) para atingir as tensões e deformações de ruptura foram relativamente pequenos, com isso a capacidade do solo de se ajustar às tensões através de rearranjos estruturais foi limitado; as deformações verticais e horizontais atingidas foram maiores e mais localizadas. Como já visto, nestes ensaios também as pressões neutras e variações volumétricas atingiram seus valores máximos.

No caso das deformações horizontais, ϵ_h , obtidas em um mesmo plano horizontal, as diferenças com o todo foram maiores; e, no caso das deformações horizontais, volumétricas $\epsilon_{r vol.}$, as deformações verticais maiores cobriram as diferenças atingidas pelas variações volumétricas.

Nos trechos iniciais dos ensaios as deformações horizontais ϵ_h e $\epsilon_{r vol.}$ pouco diferenciam e se alternam em ordem de grandeza. Nos trechos finais, com poucas excessões, as deformações horizontais medidas ϵ_h são maiores que as deformações horizontais calculadas pela variação de volume $\epsilon_{r vol.}$

7.3 - Aplicação do Modelo Teórico

A aplicação do modelo teórico adotado seguiu as referências relacionadas nas equações 15 a 30, do capítulo 3, onde as variáveis obtidas nos ensaios de compressão triaxial, foram utilizadas como variáveis das regressões polinomiais lineares.

Para isso, o comportamento elasto-linear do solo, nas curvas tensão x deformação foi condicionado à aplicação de alguns princípios

conhecidos. Assim foi considerada a linearidade entre tensões efetivas principais, e a linearidade entre, diferença de tensões e deformações axiais.

A observação das tensões efetivas principais maiores $\sigma'_1(\sigma'_v)$ versus as tensões principais menores $\sigma'_3(\sigma'_h)$, nos gráficos obtidos nos ensaios, constatou seu comportamento linear em trecho relativamente pequeno. Segundo Atkinson (1973), em ensaios triaxiais quando não há descarregamento, este é um reconhecimento do comportamento elástico tensão x deformação. Além desta constatação, os pontos iniciais de leituras tensão x deformação dos ensaios, foram correlacionados linearmente e foram considerados válidos para análise de dados, aqueles que apresentaram Coeficiente de Correlação (R) mínimo de 0,99. O trecho linear, visual e matematicamente, revelou-se de curta extensão, com aproveitamento de poucos pontos (no máximo 4), com deformação vertical em torno de 0,3%. Este foi o valor limite adotado para a aplicação do modelo teórico.

As variáveis obtidas nos ensaios, no trecho linear, para tensões verticais, σ_v ; tensões horizontais, σ_h ; deformações verticais, ϵ_v ; e deformações horizontais, ϵ_h ; para cada posição de corpo de prova (Vertical, V; Horizontal, H e Inclinado 45°, I), foram correlacionadas através das equações 23 a 30.

O cálculo das Regressões Polinomiais Lineares foi aplicado para os valores de tensões totais (σ_v e σ_h) e tensões efetivas (σ'_v e σ'_h) e respectivas deformações verticais e radiais (ϵ_v , ϵ_h).

O Anexo 8 fornece a relação dos resultados do processo de cálculo. Os coeficientes a, b e c foram obtidos em função das posições dos corpos de prova, segundo as referências no Modelo Teórico, para as equações 23 a 30.

As variáveis envolvidas no processo matemático foram selecionados em função das características de adensamento dos Bolos e dos ensaios realizados.

Com isso, os ensaios realizados nos corpos de prova dos Bolos 4, 5 e 6 foram analisados individualmente, uma vez que o grupo de ensaios neles realizados, envolveu não só diferentes posições dos corpos de prova, mas também dois níveis de tensões horizontais σ_h (50 e 100 kPa).

Os ensaios realizados nos corpos de prova dos Bolos 1, 2 e 3, foram executados em diferentes posições de eixo, porém com tensões confinantes, σ_h , respectivamente nos valores de 150, 200 e 150 kPa.

As combinações para os cálculos das regressões com as

variáveis obtidas foram efetuadas em função de características físicas marcantes dos corpos de prova, obtidos no processo de adensamento.

Assim, as características de adensamento em termos de pressões aplicada na Lama e as pressões de pré-adensamento, obtidas nos Bolos induziram à seleção de ensaios em dois grupos principais: os Bolos 1, 2, 3 e 6 e Bolos 4 e 5.

Estes agrupamentos permitiram a análise das regressões polinomiais dos Bolos 1, 2 e 3, de forma mais ampla.

No Anexo 8 são fornecidos os valores dos parâmetros a , b e c , obtidos utilizando-se nos cálculos para as tensões totais (σ_v, σ_h) identificadas na coluna (σ) por T , e efetivas (σ'_v, σ'_h), identificadas na coluna (σ) por E . Tendo em vista a pequena ordem de grandeza das pressões neutras que se desenvolveram nos ensaios e, principalmente no trecho inicial, os resultados adotados na aplicação do modelo, se referem aos estados de tensões totais. Além disso, as condições mais corretas de se obter parâmetros correspondentes a tensões efetivas, segundo os pesquisadores, seria medi-los diretamente em condições de drenagem.

No Anexo 8, estão relacionados também os Coeficientes de Correlação, R , das Regressões Polinomiais e o número de pontos envolvidos no processo de cálculo de cada uma delas, N .

Como colocado no capítulo 3, sobre o modelo teórico, os parâmetros b e c das Regressões Polinomiais, podem ser selecionadas em função dos coeficientes de correlações parciais, obtido nos cálculos estatísticos; entretanto, o algebrismo nos parâmetros c , para a ordem de grandeza das variáveis envolvidas, cria mais erros que confiabilidade nos resultados obtidos. Por isso, os parâmetros b , como representados nas equações 31; 32; 33; 34 e 36, deram origem aos parâmetros elásticos-lineares relacionados na Tabela 7.7.

Na Tabela 7.7 estão relacionados:

- Módulo de Elasticidade Vertical, E_v (kPa)
- Módulo de Elasticidade Horizontal, E_h (kPa)
- Coeficiente de Poisson ν_{vh}
- Coeficiente de Poisson ν_h
- Módulo de Elasticidade Transversal, G_v (kPa)
- Módulo de Elasticidade Transversal, G_h (kPa), obtidos da relação $G_h = E_h/2(1 + \nu_h)$
- Graú de anisotropia, n
- Índice de Pré-Adensamento, OCR, obtido da relação $OCR = \frac{\sigma_{oct} \text{ (BOLO i)}}{\sigma_{oct} \text{ (BOLO 1)}}$

σ_{oct} (BOLO i) - tensão octaédrica, obtida pela média aritmética das tensões octaédricas máximas, $\sigma_{oct \max.}$, fornecidas na Tabela 7.5, para cada Bolo ou grupo de Bolos envolvidos na regressão polinomial linear.

σ_{oct} (BOLO 1) - é o menor valor das tensões octaédricas máximas, fornecidas na Tabela 7.5.

- $\bar{\sigma}_{hV}$ (kPa) - tensões confinantes horizontais, obtidas pela média ponderada das tensões horizontais, aplicadas em corpos de prova com eixo vertical (V), na regressão polinomial linear calculada.

- $\bar{\sigma}_{hH}$ (kPa) - tensões confinantes horizontais, obtidas pela média ponderada das tensões horizontais, aplicadas em corpos de provas com eixo horizontal (H), na regressão polinomial linear calculada.

- $\bar{\sigma}_{hI}$ (kPa) - tensões confinantes horizontais, obtidas pela média ponderada das tensões horizontais aplicadas em corpos de prova com eixo inclinado (I), na regressão polinomial linear calculada.

Os graus de anisotropia obtidos (n) mostram algumas tendências, embora seja difícil atribuir um comportamento anisotrópico ordenado ao material ensaiado.

Quando analisados os valores obtidos para os parâmetros dos Bolos 5 e 6 individualmente, apresentam sinais de anisotropia, mas a tendência não se confirma no Bolo 4 e a representatividade dos ensaios fica prejudicada pelo limite das tensões confinantes (50 e 100 kPa).

Já para os demais grupos, onde a variação das tensões confinantes passa a ser maior, o grau de anisotropia tende a diminuir.

A Figura 7.13, mostra a variação dos parâmetros elásticos Módulos de Elasticidade Vertical E_v com o Horizontal E_h ; a Figura 7.14 o Coeficiente de Poisson ν_{vh} com o Coeficiente de Poisson ν_h ; e a Figura 7.15 o Módulo de Elasticidade Transversal G_v , com o Módulo de Elasticidade Transversal G_h .

Na Figura 7.15, pode ser observado que os Módulos de Elasticidade E_v e E_h , apresentam tendência a crescimento simultâneo; na Figura 7.14, os Coeficientes de Poisson não apresentam correlações entre si, mantendo-se apenas dentro de limites conhecidos e na Figura 7.16, os Módulos de Elasticidade Transversal G_v e G_h , apresentam crescimento simultâneo difuso, na nuvem de pontos.

Tabela 7.7 - Parâmetros Elásticos-Lineares Anisotrópicos

BOLOS	E_v (kPa)	E_h (kPa)	ν_{vh}	ν_h	G_v (kPa)	G_h (kPa)	n	OCR	$\bar{\sigma}_{hv}$ (kPa)	$\bar{\sigma}_{hH}$ (kPa)	$\bar{\sigma}_{hI}$ (kPa)
B4	128,7	119,9	0,491	0,503	57,8	39,9	0,93	2,15	75	95	75
B5	137,3	188,9	0,538	0,586	57,9	59,6	1,37	1,89	75	80	71
B6	123,8	151,4	0,444	0,624	66,8	46,6	1,22	1,52	67	83	75
B1B2	190,5	187,7	0,243	0,653	73,6	56,8	0,98	1,00	178	165	167
B1B6	141,2	150,3	0,371	0,616	74,7	46,5	1,06	1,26	102	112	121
B3B6	132,8	135,1	0,422	0,549	65,3	43,6	1,02	1,41	102	112	107
B2B6	184,0	152,0	0,388	0,603	65,8	47,4	0,83	1,26	133	127	133
B4B5	131,1	136,6	0,512	0,530	60,4	44,6	1,04	2,02	75	87	73
B1B2B6	159,6	157,8	0,316	0,591	74,9	49,6	0,99	1,17	132	121	141
B2B3B6	156,5	147,7	0,348	0,550	75,8	47,6	0,94	1,28	137	121	138

Figura 7.13 - Módulo de Elasticidade Vertical, E_v , versus Módulo de Elasticidade Horizontal, E_h

Figura 7.14 - Coeficiente de Poisson ν_{vh} versus Coeficiente de Poisson ν_h

Figura 7.15 - Módulo de Elasticidade Transversal G_v versus Módulo de Elasticidade Transversal G_h

O que parece claro é a variação dos parâmetros elásticos, E , ν e G , com as tensões confinantes. As Figuras 7.16, 7.17 e 7.18, mostram estas variações. Foi possível observar este comportamento nos cálculos estatísticos onde, a inclusão da variável independente σ_h , nos polinômios:

$$\sigma_v = a + b \epsilon_v + c \sigma_h$$

$$\epsilon_h = a + b \epsilon_v + c \sigma_h$$

alterou favoravelmente os valores do Coeficiente de Correlação R .

Na Figura 7.16, observa-se tendência a acréscimos dos Módulos de Elasticidade Vertical e Horizontal, com a tensões confinantes, tendência esta que ocorre também em relação ao Módulo de Elasticidade Transversal G_v e G_h , mostrados na Figura 7.18.

Na Figura 7.17, as variações dos Coeficientes de Poisson ν_{vh} e ν_h obtidos em função das deformações horizontais a partir das equações (16) e (18) e as correspondentes (24) e (26) do capítulo 3, no Modelo Teórico Adotado mostram algumas tendências. O Coeficiente de Poisson ν_{vh} , obtido das deformações horizontais medidas em corpos de

prova com eixo na direção vertical, representando os efeitos das tensões verticais nas deformações horizontais, decrescem com as tensões confinantes. Isto é, a deformabilidade no plano horizontal do solo adensado parece reduzir-se sob efeitos de tensões verticais e confinantes crescentes. O Coeficiente de Poisson ν_h , obtido das deformações horizontais medidas em corpos de prova com eixo na direção horizontal, representando os efeitos das tensões horizontais nas deformações horizontais, aumentam (embora de maneira pouco acentuada) com as tensões confinantes. Ou seja, a deformabilidade nas superfícies verticais do solo adensado (corpo de prova com eixo na direção horizontal) sofre pequenos acréscimos com o acréscimo dos confinamentos.

Figura 7.16 - Módulos de Elasticidade E_v e E_h , em função das tensões horizontais, $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova verticais e horizontais respectivamente

Figura 7.17 - Coeficientes de Poisson, ν_{vh} e ν_h , em função das tensões horizontais, $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova verticais e horizontais, respectivamente.

Figura 7.18 - Módulos de Elasticidade Transversal G_v e G_h , em função das tensões horizontais, $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova inclinados e horizontais, respectivamente.

As variações dos parâmetros elásticos, Modulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson e Modulo de Elasticidade Transversal, com o Índice de Pré-Adensamentos, OCR, foram também analisadas em forma de gráficos nas Figuras 7.19, 7.20 e 7.21.

Na Figura 7.19, os Modulos de Elasticidade E_v e E_h , decrescem com OCR assim como os Módulos de Elasticidade Transversal G_v e G_h , na Figura 7.21. Os Coeficientes de Poisson ν_{vh} crescem com OCR e ν_h decrescem com OCR, na Figura 7.20.

As tendencias de comportamento são coerentes se forem analisadas as variações de OCR com as tensões confinantes $\bar{\sigma}_h$, mostradas na Figura 7.22. Ou seja, os Índices de Pré-Adensamento, OCR são decrescentes com as tensões de Confinamento. Os Bolos obtidos por adensamento, com as pressões verticais maiores, foram ensaiadas na Compressão Triaxial com tensões confinantes de menor ordem de grandeza, enquanto que nos Bolos adensados com pressões de adensamento menores, as tensões de confinamento foram as de maior ordem de grandeza. As condições intermediárias de pré adensamento (Bolos 3 e 6) contribuíram em condições intermediárias de confinamento ($\sigma_h = 150, 100$ e 50 kPa) e não mudaram as tendências.

Assim, as variações dos parâmetros elásticos com OCR são inversas às variações dos mesmos parâmetros com as tensões de confinamento.

Figura 7.19 - Módulos de Elasticidade E_v e E_h versus Índice de Pré-Adensamento OCR

Figura 7.20 - Coeficientes de Poisson ν_{vh} e ν_h versus Índice de Pré-Adensamento OCR

Figura 7.21 - Módulos de Elasticidade Transversal G_v e G_h versus Índice de Pré-Adensamento OCR

Figura 7.22 - Variação do Índice de Pré-Adensamento OCR com Tensões Confinantes $\bar{\sigma}_h$, para corpos de prova verticais, horizontais e inclinados.

Considerando-se, nos resultados gerais, o efeito pouco acentuado do adensamento unidirecional, uma última análise dos dados foi executada, tendo-se em vista os parâmetros elásticos isotrópicos.

Para tanto, as Equações Clássicas da Teoria Elasto-Linear:

$$\sigma_v = E \epsilon_v + 2 \nu \sigma_h \quad \dots\dots\dots (44)$$

$$\epsilon_h = - \nu \epsilon_v + (1 - \nu - 2 \nu^2) \frac{\sigma_h}{E} \quad \dots\dots\dots (45)$$

foram utilizadas, para correlações entre as variáveis, na determinação dos parâmetros elásticos, Modulo de Elasticidade, E , Coeficiente de Poisson, ν , e Modulo de Elasticidade Transversal, G .

As Regressões Polinomiais Lineares $Y = a + b X_1 + c X_2$, foram obtidas para os mesmos grupos de ensaios relacionados por Bolos na Tabela 7.7, apenas considerando agora como variáveis:

Y - as medidas de tensões verticais, σ_v , ou deformações horizontais ϵ_h , dos corpos de prova, incluindo as três posições de eixo, V, H, I.

X_1 - as medidas de deformações verticais, ϵ_v dos corpos de prova, incluindo as três posições de eixo, V, H, I.

X_2 - as medidas das tensões horizontais, σ_h , dos corpos de prova, incluindo as três posições de eixo, V, H, I.

No Anexo 9 estão relacionados os parâmetros a, b e c, das Correlações Polinomiais calculadas; o Coeficiente de Correlação R, resultante; o número de variáveis dos ensaios utilizadas no cálculo, agora incluindo as três posições de eixo dos corpos de prova e a referência às equações isotrópicas utilizadas no cálculo da regressão.

A Tabela 7.8, relaciona o Módulo de Elasticidade E, obtido como a melhor estimativa do parâmetro b da Regressão Polinomial entre as variáveis da equação 44; e o Coeficiente de Poisson ν , como a melhor estimativa do parâmetro b, da Regressão entre as variáveis da equação 45; e o Módulo de Elasticidade Transversal G, calculado em função da correlação conhecida $G = E / 2(1 + \nu)$.

Tabela 7.8 - Parâmetros Elástico-Lineares Isotrópicos

BOLOS	E (kPa)	ν	G (kPa)	$\bar{\sigma}_h$ (kPa)	OCR
B4	135,0	0,484	45,0	87	2,15
B5	152,0	0,491	65,8	76	1,89
B6	137,6	0,523	45,2	75	1,52
B1B2	164,5	0,329	61,9	173	1,00
B1B6	143,9	0,451	49,6	112	1,26
B2B6	152,0	0,409	53,9	135	1,26
B3B6	140,9	0,487	47,4	107	1,41
B4B5	139,4	0,489	46,8	79	2,02
B1B2B6	153,9	0,399	64,9	140	1,17
B2B3B6	141,9	0,401	64,6	139	1,28

Entre os parâmetros ν , determinados como a melhor estimativa do parâmetro b da equação 45 e os parâmetros ν , determinados como a melhor estimativa do parâmetro c/2 da equação 44, ocorrem diferenças. Estas diferenças atingem, no máximo 20%, o que para a ordem de grandeza dos valores dos parâmetros significa, 0,1.

Na Tabela 7.8 estão relacionados também os valores ponderados das tensões horizontais, $\bar{\sigma}_h$, envolvidas nas correlações, e o índice de pré-adensamento, OCR.

As Figuras 7.23, 7.24 e 7.25 mostram os parâmetros elásticos E , ν , G isotrópicos em função das tensões confinantes, como estudado para os parâmetros anisotrópicos.

Também para os parâmetros elásticos isotrópicos, foram analisadas as tendências de comportamento com o Índice de Pré Adensamento dos Bolos, OCR, através das Figuras 7.26, 7.27 e 7.28.

Deste reagrupamento das variáveis nas Regressões Polinomiais Lineares, pode-se observar, que as tendências de comportamento observadas dos parâmetros anisotrópicos, se manifestam em alguns casos mais acentuadas, e em outros mais dispersas.

Assim as variações dos parâmetros elásticos isotrópicos E , ν , G , com as tensões confinantes, mostradas nas Figuras 7.23, 7.24 e 7.25, quando comparadas com as Figuras 7.16, 7.17 e 7.18, dos parâmetros elásticos anisotrópicos mostram: acréscimo de E com $\bar{\sigma}_h$; decréscimo de ν com $\bar{\sigma}_h$; e acréscimo de G com $\bar{\sigma}_h$. As variações dos parâmetros elásticos isotrópicos E , ν , G com o índice de pré-adensamento mostradas nas Figuras 7.26, 7.27 e 7.28, quando comparadas com as Figuras 7.19, 7.20 e 7.21, dos parâmetros elásticos anisotrópicos mostram: decréscimo de E com OCR; acréscimo difuso de ν com OCR; e decréscimo difuso de G com OCR.

Figura 7.23 - Variação do Módulo de Elasticidade Isotrópico, E , com a Tensão Confinantes, $\bar{\sigma}_h$

Figura 7.24 - Coeficiente de Poisson Isotropico, ν , versus tensões confinantes, $\bar{\sigma}_h$

Figura 7.25 - Módulo de Elasticidade Transversal Isotrópico, G , versus das tensões confinantes $\bar{\sigma}_h$

Figura 7.26 - Módulo de Elasticidade Isotrópico, E, versus Índice de Pré-Adensamento OCR

Figura 7.27 - Coeficiente de Poisson Isotrópico ν versus Índice de Pré-Adensamento OCR

Figura 7.28 - Módulo de Elasticidade Transversal Isotrópico G versus Índice de Pré-Adensamento OCR

O estudo do modelo teórico de comportamento tensão deformação para anisotropia e isotropia mostraram pouca possibilidade de se definir leis de variação entre as tensões de pré-adensamento aplicadas nas Lamas e os valores dos parâmetros elásticos, obtidos nos ensaios triaxiais dos Bolos. Os efeitos das tensões de confinamento nos corpos de prova dos Bolos, embora menores que as pressões de adensamento nas Lamas, produziram efeitos mais evidentes.

No Anexo 10, estão relacionados, os valores dos Coeficientes de Poisson máximos e mínimos obtidos nos ensaios através de medidas de variação volumétrica e deformação vertical, $\nu = -\epsilon_{r \text{ vol}}/\epsilon_v$. Os valores mínimos ocorreram nas primeiras deformações; e para deformações verticais maiores que 1%, os valores obtidos foram, crescentes até o máximo, registrado na última leitura. As variações das deformações verticais maiores que as deformações horizontais calculadas, influenciaram de forma decisiva os valores obtidos para o parâmetro. Embora, segundo os pesquisadores, o cálculo do Coeficiente de Poisson desta forma direta, seja válido somente para ensaios drenados, foi aqui relacionado, para efeito de comparação da ordem de

grandeza de valores, com os já calculados através das Correlações Polinomiais das Equações Lineares.

Os valores obtidos e relacionados no Anexo 10 apresentam amplitude de valores que somente o estudo de leis de variação daria representatividade ao parâmetro. Isto incorreria em ajustes e projetaria o mesmo para trechos de comportamento não elástico que a nosso ver, prejudica a representatividade.

Finalizando o estudo experimental, foram efetuadas Análises Químicas dos argilo minerais e Difractometria de Raio X, em amostras de Bolo, (como as executadas na amostra natural apresentada no capítulo 5). A Tabela 7.9 e a Figura 7.29 mostram os resultados obtidos nestes ensaios.

Os resultados obtidos indicam que não ocorreram mudanças na estrutura básica dos argilo-minerais, antes e após o adensamento das Lamas. O rearranjo entre as duas condições deve se referir à estrutura macroscópica.

Tabela 7.9 - Análise Química dos Argilo Minerais de Amostra do Bolo

Análise	Miliequivalência/100g T.F.S.A.
Na	0,087
K	0,538
Ca	0,370
Mg	2,078
(H ⁺ + Al ⁺⁺⁺)	12,110
Al ⁺⁺⁺	8,360
S	3,073
C.T.C.	15,183
%	
m	73,12
V	20,24
pH	4,6

S = Soma das Bases = Ca + Mg + Na + K

C.T.C. = Capacidade de Troca de Cations = S + (Al⁺⁺⁺ + H⁺)

m = Carater Álico = $100 \times (Al^{+3}) / (Al^{+3} + S)$

V = Saturação em bases = $100 \times (S/C.T.C.)$

Figura 7.29 - Difractometria de Raio X em amostras de Bolo, à temperatura ambiente e após aquecimento a 550°C

Tubo Co - Fe $36 \times 20 - 3 \times 10^2$ $\sigma = 1,0$ - Velocidade $2^\circ / \text{minuto}$

8. DISCUSSÃO FINAL

Na apresentação do Capítulo 7, foram levantadas algumas justificativas de resultados que serão aqui ordenadas e ampliadas para as conclusões deste trabalho.

A idéia inicial de que o adensamento unidirecional provoca nas argilas um comportamento anisotrópico de tensões e deformações deve ser discutida em função dos elementos que envolvem o processo.

Observou-se que para o procedimento desenvolvido, embora a relação entre pressões horizontais medidas e pressões verticais aplicadas, (K_0), fosse de aproximadamente 1:2 este não foi o grau de anisotropia obtido nos ensaios triaxiais.

Também, a ordem de grandeza das pressões de adensamento nas lamas de argila mostrou pequeno efeito nos valores dos parâmetros elásticos obtidos.

No entanto, tensões máximas atingidas nos ensaios triaxiais não representaram tensões de ruptura nos corpos de prova talhados com eixo na direção horizontal. Isto é, a deformabilidade foi maior nessa direção.

Dos trabalhos consultados, desenvolvidos em argila caulinita, poder-se-ia também admitir que, nas argilas, maiores volumes de água utilizados na fase de mistura e adensamento da Lama, poderiam induzir a comportamento anisotrópico mais acentuado do material resultante.

Os tempos de carregamento no adensamento, nesse tipo de argila, não causaram diferenças no comportamento anisotrópico. Isto é, as mesmas condições de estabilização foram atingidas em tempos diferentes nos diferentes carregamentos aplicados.

Entretanto, o nível das pressões verticais aplicadas durante o adensamento das Lamas, associado aos efeitos de maior volume de água poderia simular melhor as condições impostas pela natureza, orientando as partículas das argilas em direções preferenciais e criando um comportamento bem diferenciado para planos verticais e horizontais do solo.

Os parâmetros elásticos de uma maneira geral mostraram seus valores sensíveis e crescentes com o aumento das tensões confinantes, que por sua vez atuam em maior área dos corpos de prova ensaiados. Ou seja, a deformabilidade do solo mostrou-se variável mesmo sob condições de baixas tensões após um pré-adensamento, o que parece reforçar a idéia de que maiores pressões no adensamento unidirecional,

provocariam uma anisotropia mais acentuada no material. Ou que adensamentos tridimensionais são de maior efeito que o pré-adensado unidirecional, mesmo que este seja de maior ordem de grandeza.

O desempenho da instrumentação na determinação de parâmetros elásticos do solo, mostrou-se de fundamental importância neste trabalho.

Para pequenas deformações ($\epsilon_h < 5\%$), o medidor de Deformação Radial apresentou melhor desempenho resultando em valores mais reais do que as medidas indiretas feitas através do Medidor de Variação de Volume. A sensibilidade das medidas caracterizou a determinação do parâmetro de deformabilidade, Coeficiente de Poisson, obtido. Ou seja, a argila ensaiada apresentou tendências a comportamento anisotrópico através dos Coeficientes de Poisson, ν_{vh} e ν_h , de forma mais evidente que através dos Módulos de Elasticidade E_v e E_h . Para os cálculos destes últimos as medidas de deformações foram indiretas (ϵ_v).

A resposta do equipamento de medição da deformação radial, para deformações maiores ($\epsilon_h > 5\%$) parece razoável tendo em vista que o mesmo registrou deformações referentes a um único plano horizontal que diferem das deformações de todo o corpo de prova. De qualquer maneira, estas deformações radiais parecem mais realísticas que as calculadas pela variação volumétrica, que são influenciadas pela deformação vertical envolvida.

Admitir o Coeficiente de Poisson $\nu = 0,5$, para condições de ensaio não drenado, pode-se estar incorrendo a erros, apontados na literatura específica, e constatados também nos valores obtidos no trabalho. Calcular o parâmetro ν , pela variação volumétrica também pode estar levando a aproximações criadas pela mesma sistemática de cálculo das deformações radiais obtidas por estas medidas.

A metodologia estatística aplicada contribuiu para a eficiência dos resultados obtidos. O processo de distinção entre variáveis controladas e obtidas também foi importante nos valores alcançados. Além das melhores correlações obtidas através do Coeficiente de Correlação R , em função da manipulação algébrica das equações, os parâmetros elásticos determinados manifestaram, mesmo em sua pequena ordem de grandeza, as variações ocorridas. Assim, para os Módulos de Elasticidade onde as variáveis dependentes são as tensões verticais, e as independentes são as tensões horizontais e deformações verticais, as tendências a comportamento anisotrópico (ou diferenças entre E_v e E_h) são menores que nos Coeficientes de Poisson (ν_{vh} e ν_h),

os quais foram obtidos da variável dependente, deformação horizontal, e das variáveis independentes tensões horizontais e deformações verticais.

Em função do processo de cálculo também foi possível identificar a diferença de valores obtidos em corpos de prova com eixo inclinado 45° , apresentando embora em pequena ordem de grandeza, variação entre os valores dos Módulos de Elasticidade Transversal G_v e G_h .

Parece válido identificar os trechos elásticos sem a necessidade de descarregamentos; o uso de trajetórias de tensões efetivas lineares nos ensaios triaxiais não drenados e a correlação linear entre tensões e deformações obtidas no trecho inicial se completam.

Finalizando, embora não fosse possível determinar leis de variação dos parâmetros elásticos anisotrópicos, admitir isotropia de comportamento seria uma conclusão simplista, cujo comprometimento depende do interesse envolvido no projeto. Pode-se observar diferenças de comportamento em todos os parâmetros, mesmo nos Coeficientes de Poisson, cujas variações, geralmente, são mais difíceis de serem detectadas.

Ao se comparar as variações de comportamento dos parâmetros, iso e anisotrópicos determinados, com as tensões confinantes e índices de pré-adensamento, observou-se diferenças nas linhas de conduta. Se a tendência de variação analisada é comum aos dois parâmetros anisotrópicos (como por exemplo, os acréscimos de E_v e E_h com $\bar{\sigma}_h$), esta se repete na isotropia (acrécimo de E com $\bar{\sigma}_h$). Porém, se existem divergências na anisotropia (os decréscimos de v_{vh} com $\bar{\sigma}_h$ e de v_h com OCR; e os acréscimos de v_h com $\bar{\sigma}_h$ e de v_{vh} com OCR) elas serão substituídas, na isotropia, por tendências difusas (o comportamento de v com OCR), ou pela predominância da variação anisotrópica mais acentuada (o decréscimo de v com $\bar{\sigma}_h$). A variação defazada no comportamento dos parâmetros anisotrópicos (G_v e G_h crescentes com $\bar{\sigma}_h$ e decrescentes com OCR) também podem levar às condições distintas na isotropia (acrécimos de G com $\bar{\sigma}_h$ e dispersão de G com OCR).

Substituir estes parâmetros anisotrópicos por seus equivalentes isotrópicos, é possível, se o erro no projeto de interesse for, com segurança, não significativo.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

9.1 - Conclusões

1) Argilas amostradas em depósito de solo natural quando manipuladas e adensadas unidirecionalmente tem seu comportamento tensão-deformação diferenciado das argilas industrializadas.

2) Em solos argilosos não industrializados, adensados unidirecionalmente, após transformação em Lama, a indução a anisotropia é pouco acentuada, quando os índices de pré adensamento (OCR) são da ordem de 2.

3) Os parâmetros elasto-lineares iso ou anisotrópicos nos solos argilosos adensados unidirecionalmente podem ter seus valores crescentes com as tensões de confinamento de forma independente das pressões de adensamento.

4) A metodologia de ensaio e cálculos de parâmetros de deformabilidade em argilas adensadas unidirecionalmente pode, evidenciar diferenças de comportamento iso ou anisotrópico, e fornecer maior precisão, nos valores obtidos.

5) Os medidores de deformação radial são instrumentos necessários à análise de pequenas deformações para determinação dos parâmetros de deformabilidade elasto-lineares.

6) Embora valores médios de parâmetros anisotrópicos possam ser usados como parâmetros isotrópicos, em função da precisão almejada, os comportamentos daqueles, podem ser diferentes destes.

9.2 - Recomendações

1) O acompanhamento das mudanças de estruturas microscópicas das argilas, através de microscopia óptica, e eletrônica de varredura, com acompanhamento fotográfico, embora não fizesse parte deste trabalho, complementaria as conclusões sobre os resultados obtidos. Principalmente no que se refere ao adensamento unidirecional e seus efeitos pouco identificados nos parâmetros elásticos.

2) A característica de comportamento mais plástico nas curvas tensão x deformação da argila estudada, bem como seu elevado índice de plasticidade, provavelmente dariam melhores indicadores paramétricos se estudada em modelos elasto-plástico. Evidentemente a metodologia de ensaio deveria também ser reestruturada.

3) O mesmo material adensado com maiores volumes de água e sobretudo sob pressões mais elevadas, forneceria melhores indicadores para a tendência de comportamento elástico-linear anisotrópico nas pequenas deformações.

4) Outros solos finos, naturais, de menor plasticidade que a do solo utilizado neste trabalho, ensaiados com a mesma metodologia poderiam esclarecer pontos obscuros nas hipóteses e conclusões formuladas.

10. BIBLIOGRAFIA

- AL-TABBAA, A. e WOOD, D.M. (1987) "Some measurements of permeability of kaolin" *Geotechnique*, vol. 37, no. 4, pp. 499-503.
- AMERASINGHE SRINATH, F. e PARRY RICHARD, H.G. (1975) "Anisotropy in heavily overconsolidated kaolin" *ASCE-JGED*, Vol. 101, GT 12, pp. 1277-1293.
- ATKINSON, J.H. (1973) "Elasticity and plasticity in soils" *Geotechnique* 23, no. 4, Technical Notes, pp. 565-571.
- ATKINSON, J.H. (1975) "Anisotropic elastic deformation in laboratory tests on undisturbed London clay" *Geotechnique* 25, no. 2, pp. 357-374.
- BAJPAI, A.C.; MUSTOE, L.R.; WALKER, D. (1980) "Matemática Avançada para Engenharia" - Hemus Livr. Edit. Ltda., Brasil.
- BAKER, W.H.; KRIZEK, R.J. (1970) "Mohr Coulomb strength theory for anisotropic soils" *ASCE, JSMFD*, vol. 96, SM1, pp. 269-292.
- BALADI, G.Y. e ROHANI, B. (1979) "Elastic Plastic Model for saturated sand" *ASCE-JGED*, vol. 105 - GT 4, pp. 465 a 480.
- BALLESTER, F. e SAGASETA, C. (1979) "Anisotropic elasto-plastic undrained analysis of soft clays" - *Geotechnique*, vol. 29, no. 3, pp. 323-340.
- BANERJEE, P.K. e YOUSIF, N.B. (1986) "A plasticity model for the mechanical behaviour of anisotropically consolidated clay" *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 10, pp. 521-541.
- BANERJEE, P.K. et al (1988) "Finite Element Analysis of the stability of a vertical cut using an anisotropic soil model" - *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 119-127.

- BANERJEE, P.K. KUMBHOJKAR, A., YOUSIF, N.B. (1987) "A generalized elasto-plastic model for anisotropically consolidated clays" Proceedings of II Intern. Conf. on Constitutive Laws for Engineering Materials Theory and Applications. Tucson Arizona USA, pp. 495-504.
- BANERJEE, S.; PAN, Y.W. (1986) "Transitional yielding model for clay" ASCE, JGED, vol. 112, no. 2, pp. 170-186.
- BARDEN, L. (1963) "Stresses and displacements in a cross anisotropic soil" Geotechnique, vol. 13, no. 3, pp. 198-210.
- BARDEN, L. (1964) "Stress and displacements in a cross anisotropic soil" Geotechnique, vol. 14, pp. 278-279.
- BARDEN, L. (1965) "Stress and displacements in a cross anisotropic soil" Geotechnique, vol. 13, 1965, pp. 198-210.
- BARDEN, L. (1972) "The influence of structure on deformation and failure in clay soil" Geotechnique, vol. 22, no. 1, pp. 159-163.
- BARREIRO, J.C. (1971) "Aplicação da teoria da elasticidade ao estudo dos maciços de terra" Publicações EESC-USP, 7 pp.
- BHASKAHAN, R. (1974) "Strength anisotropy in kaolinite clay" Geotechnique 24, no. 4, Technical Notes, pp. 674-678.
- BISHOP, A.W. and HIGHT, D.W. (1977) "The value of Poisson's ratio in saturated soils and rocks stressed under undrained conditions" Geotechnique 27, no. 3, pp. 369-384.
- BLALOCK, Jr., H.M. (1966) "Estadística Social" - Fondo de Cultura Economica, México.
- BOEHLER, J. P. (1975) "Contributions theoriques et expérimentales à l'étude des milieux plastiques anisotropes" Tese de Doutorado apresentada na L'Université Scientifique et Medicale de Grenoble - Grenoble.

- BOEHLER, J.P. (1978) "Lois de comportement anisotrope des milieux continus" Journal de Mécanique vol. 17, no. 2, pp. 153-190.
- BOEHLER, J.P. and GIROUD, J.P. (1971) "Measurement of Soil Anisotropy" Proc. IX th. Eng. Geology and Soils Eng. Symp. - Boise, Idaho, pp. 175-187.
- BOEHLER, J.P.; LEFREVRE, F.; BONAZ, R. "Relations quantitatives entre l'anisotropie mecanique dans une argile: evolutions au cours d'une deformation irreversible" Relatório Científico Université Scientifique et Medicale de Grenoble.
- BONAZ, RENÉ (1976) "Quantification des corrélations entre l'anisotropie de structure et l'anisotropie mecanique des argiles" Tese de Doutoramento apresentada na L'Université Scientifique et Medicale et L'Institut National Polytechnique de Grenoble - Grenoble.
- BOUVARD, D.; STUTZ, P. (1986) "Experimental study of rheological properties of a sand using a special triaxial apparatus" - Geotech. Test Jour., Vol. 9, no. 1, pp. 10-18.
- BRINCH HANSEN J. e GIBSON, R.E. (1949) "Undrained shear strengths of anisotropically consolidated clays" Geotechnique 1, no. 3, pp. 189-204.
- BROMS, B.B.; RATNAM, M.V. (1963) "Shear strength of an anisotropically consolidated clay" ASCE, JSMFD, vol. 89, SM 6, pp 1-26.
- BURLAND, J.B. (1965) "The yielding and dilation of clay" - Geotechnique, Vol. 15, no. 2, pp. 211-214.
- CAIRNCROSS, A.M. e JAMES, R.G. (1977) "Anisotropy in overconsolidated clays" Geotechnique 27, no. 1, pp. 31-36.
- CASE, J. e CHILVER, A.H. (1971) "Strength of materials and structures" cap. 5, 2nd. ed., Arnould, London.

- CHADDOCK, B.C.J. (1982) "Repeated triaxial loading of soil: apparatus and preliminary results". Supplementary Report 711 - Transport and Road Research Laboratory - England, 19 pp.
- CHEN, W.F. (1968) "Applications of limit plasticity in soil mechanics" ASCE, JSMFD, vol. 94, SM2, pp. 608-613.
- CHEN, Y.C. et al (1988) "Dynamic shear modulus and fabric - Part I - Depositional an induced anisotropy" - Geotechnique, vol. 38, no. 1, pp. 25-32.
- CHEN, Y.C. et al (1988) "Dynamic shear modulus and fabric - Part II - Stress Reversal" Geotechnique vol. 38, no. 1, pp. 33-37.
- CHOWDHURY, R.N. (1978) "Effective-stress parameters of anisotropic soil" ASCE, JGED, vol. 104, GT 1, pp. 124-128.
- CHRISTIAN, J.T. (1980) "The application of generalized stress-strain relations" - State of the Art Report - Proc. of Symposium on Limit Equilibrium, Plasticity and Generalized stress strain Application in Geotechnical Engineering - ASCE - 1980, pp. 182-204.
- CLOUGH, G.H.; HANSEN, L.A. (1981) "Clay anisotropy and braced wall behavior" ASCE, JGED, vol. 107, GT 7, pp. 893-913.
- COROTIS, R.B., FARZIN, M.H., KRIZEK, R.J. (1974) "Nonlinear stress strain formulation for soils", ASCE, JGED, Vol. 100, GT 9, pp. 993-1008.
- COSTA FILHO, LEANDRO DE MOURA (1980) "A laboratory investigation of the small strain behavior of London clay" - Tese de Doutorado apresentada na University of London - Imperial College of Science and Technology.
- CRAWFORD, C.B. (1964) "Interpretation of the Consolidation Test" - ASCE, JSMFD, vol. 90, SM 5, pp. 87-102.
- CRAWFORD, C.B. (1988) "On the importance of rate of strain in consolidation test" Geotechnical Testing Journal - vol.11, no. 1, pp. 60-62.

- D'APPOLONIA, D.J.; LAMBE, T.W. (1970) "Method for predicting initial settlement" ASCE, JSMFD, vol. 96, SM2, pp. 523-544.
- DAFALIAS YANNIS, F. (1982) "An elastoplastic-viscoplastic constitutive modeling" International Symposium on Numerical Models in Geomechanics/Zurich, pp. 126-138.
- DAFALIAS YANNIS, F. (1987) "An anisotropic critical state clay plasticity model" - Proceedings of II Intern. Conf. on Constitutive Laws for Engineering Materials Theory and Applications. Tucson Arizona USA, pp. 513-521.
- DESAI, C.S. (1971) "Nonlinear analysis using spline function" ASCE, JSMFD, vol. 97, SM 10, pp. 1461-1479.
- DESAI, C.S. (1974) "Numerical design analysis for piles and sands" ASCE, JGED, vol. 100, GT6, pp. 613-635.
- DESAI, C.S.; WU, T.S. (1976) "A general function for stress strain curves" 2o. Intern. Conf. on Num. Meth in Geomechanics. Virginia, vol. I, pp. 307-328.
- DORN, J.E. (1949) "Stress strain rate relations for anisotropic plastic flow" - Journal of Applied Physics, New York, vol. 20, pp. 15-20.
- DRNEVICH, V.P. (1975) "Constrained and shear moduli for Finite Elements" ASCE-JGED - Vol. 101, GT5, pp. 459-473.
- DRNEVICH, V.P. e MASSARSCH, K.R. (1979) "Sample disturbance and stress strain behavior" ASCE, JGED, vol. 105 - GT 9, pp. 1001 a 1016.
- DUNCAN, J.M. e WONG, K.S. (1974) "Hyperbolic stress-strain parameters for nonlinear finite element analyses of stresses and movements in soil masses" Report no. TE-74-3 University of California, Berkeley, California.
- DUNCAN, J.M.; CHANG, C.Y. (1970) "Nonlinear analysis of stress and strain in soils" ASCE, JSMFD, vol. 96, SM5, pp. 1629-1653.

- DUNCAN, J.M.; SEED, H.B. (1966) "Anisotropy and stress reorientation in clay". ASCE, JSMFD, vol. 92, SM 5, pp. 21-50.
- DUNCAN, J.M.; SEED, H.B. (1966) "Strength variation along failure surfaces in clay" ASCE, JSMFD, vol. 92, SM 6, pp. 81-101.
- DUNLOP, P., DUNCAN, J.M. (1970) "Development of failure around excavated slopes" ASCE, JSMFD, vol. 96, SM 2, pp. 471-493.
- EHRGOTT, J.Q. (1971) "Calculation of stress and strain from triaxial test data on undrained soil specimens" - Miscellaneous Paper 5-71-9 - U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, 86 pp.
- EL RUWAYIH, A.A. (1976) "Design manufacture and performance of a lateral strain device" Geotechnique 26, Technical Notes, pp. 215-216.
- ESCARIO, V.; URIEL, S. (1961) "Determining the coefficient of consolidation and horizontal permeability by radial drainage", 5o. ICSMFE, Paris, vol. I, pp. 83-89.
- GAZETAS GEORGE (1981) "Variational estimation of the settlement of a circular raft on anisotropic soil" Soil and Foundations, Japanese Society of S.M.F.E., vol. 21, no. 4, pp. 109-116.
- GAZETAS GEORGE (1982) "Axisymmetric parabolic loading of anisotropic halfspace" ASCE-J.G.E.D., vol. 108, GT 4, pp. 654-661.
- GAZETAS, G. (1982) "Stresses and displacements in cross anisotropic soils" ASCE, JGED, vol. 108, GT 4, pp. 532-553.
- GERRARD, C.M. (1977) "Background to mathematical modelling in Geomechanics: The roles of fabric and stress history" Finite Element in Geomechanics, Cap. 2 - Gudehus Ed., pp. 33-120. John Wiley e Sons.

- GIACHETTI, H.L. (1987) "Aplicabilidade de Modelos Elásticos para previsão do comportamento x de um solo compactado" -Dissertação de Mestrado EESC-USP.
- GIBSON, R.E. (1974) "The analytical method in soil mechanics" Geotechnique 24, no. 2, pp. 115-140.
- GIRIJAVALLABHAN,C.V.; REESE, L.C. (1968) "Finite element method for problems in soil mechanics" ASCE, JSMFD, vol. 94, SM2, pp. 473-496.
- GRAHAM, J.; HOULSBY, G.T. (1983) "Anisotropic elasticity of a natural clay" Geotechnique 33, no. 2, pp. 165-180.
- HARDIN, B.O. (1983) "Plane strain constitutive equations for soils" ASCE, JGED, vol. 109, no. 3, pp.388-407.
- HARDIN,B.O. e DRNEVICH, V.P. (1972) "Shear Modulus and Damping in Soils - Design Equations and Curves" ASCE-JSMFD, vol. 98, SM 7, pp. 667-692. ASCE-JSMFD, vol. 98 - SM 6, pp. 603-624.
- HARR, M.E. (1966) "Foundations of Theoretical Soil Mechanics" - McGraw Hill - Kogokusha Ltd., Ind. ed.
- HILL, R. (1948) "A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals" - Proceedings of Royal Society, London, vol. 193, pp. 281-297.
- HOEG, K. (1972) "Finite Element Analysis of strain softening clay" - ASCE, JSMFD, vol. 98, SM 1, pp. 43-58.
- HOEG, K.; CHRISTIAN, J.T.; WHITMAN, R.V. (1968) "Settlement of strip load on elastic plastic soil" ASCE, JSMFD, vol. 94, SM2, pp. 431-445.
- HUANG, A.B. et al (1988) "A calibration chamber for cohesive soils" Geotechnical Testing Journal, vol. 11, no. 1, pp. 30-35.
- KABBAJ, M. et al (1988) "In situ and laboratory stress-strain relationship" Geotechnique, vol. 38, no. 1, pp. 83-100.

- KAMEI, T. OGAWA, S. e TANAKA, M. (1987) "The variation in undrained shear characteristics during consolidation process". Soil and Foundation. The Japan. Society of S.M.F.E., vol. 27, no. 3, pp. 91-98.
- KIRKPATRICK, W.M. (1972) "Directional properties of consolidated kaolin" Geotechnique, vol. 22, no. 1, pp. 166-169.
- KRISHNA, M.M.; NAGARAY, T.S.; SRIDHARAN, A. (1980) "Strength anisotropy of layered soil system" ASCE, JGED, vol. 106, GT 10, pp. 1143-1147.
- KULHAWY, F.H.; DUNCAN, J.M. e SEED, H.B. (1969) "Finite Element Analyses of Stresses and movements in Embankments During Construction" - Report no. TE-69-4 to U.S. Army Engin., Waterways Station - University of California, Berkeley - U.S.A.
- LADD, C.C. (1964) "Stress strain modulus of clay in undrained shear" ASCE, JSMFD, vol. 90, SM 5, pp. 103-132.
- LADD, C.C. e FOOT, R. (1974) "New design procedure for stability of soft clays" - ASCE-JGED, vol. 100, GT 5, pp. 763-786.
- LAIER, J.E. e BARREIRO, J.C. (1983) "Complementos de Resistência dos Materiais" - Publicações EESC-USP.
- LEE, K.L.; HALEY, S.C. (1968) "Strength of compacted clay at high pressure" ASCE, JSMFD, vol. 94, SM 6, pp. 1303-1332.
- LEFREVRE FRANCIS (1980) "Corrélations quantitatives entre l'anisotropie de structure et l'anisotropie mécanique d'un kaolin. Evolutions au cours d'une déformation irréversible" Tese de Doutorado - Université Scientifique et Médicale et Institut National Polytechnique de Grenoble - Grenoble.
- LEKHNITSKII, S.G. (1981) "Theory of Elasticity of Anisotropic Body" - Mir Publishers, Moscou.
- LEMPRIERE, B.M. (1968) "Poisson's Ratio in Orthotropic Materials" AIAA Journal, Vol. 6, no. 11, pp. 2226-2227.

- LEONARDS, G.A. e ALTSCHAEFFI, G. (1964) "Compressibility of clay" ASCE, JSMFD, vol. 90, SM 5, pp. 133-155.
- LIAM FINN, W.D. e MARTIN, G.R. (1980) "Soil as an anisotropic kinematic hardening solid" Proc. of Symposium on Limit Equilibrium Plasticity and Generalized Stress Strain Application in Geotech. Eng. ASCE, 1980, pp. 96-114.
- LO, K.Y. (1965) "Stability of slopes in anisotropic soils" ASCE, JSMFD, vol. 91, SM4, pp. 85-106.
- LO, K.Y.; LEONARDS, C.A.; YEN, C. (1977) "Interpretation and significance of anisotropic deformation behavior of soft clays" Norwegian Geotechnical Institute, no. 117, pp. 1-16.
- LO, R.C.Y. (1971) "Steady seepage through dams of trapezoidal cross section" Geotechnique, vol. 21, no. 3, pp. 233-244.
- LUNDGREN, R.; MITCHELL, J.K.; WILSON, J.H. (1968) "Effects of loading methods on triaxial tests results" ASCE, JSMFD, vol. 94, SM2, pp. 407-419.
- MACKY, T.A.; SAADA, A.S. (1984) "Dynamics of anisotropic clays under large strains" ASCE, JGED, vol. 110, no. 4, pp. 487-504.
- MASSARANI, G. THIRRIOT, C. (1972) "Tecnica de preparação de meios porosos artificialmente consolidados" - Revista Brasileira de Tecnologia, vol. 3, pp 19-23.
- MATSUOKA, H. e SAKAKIBARA, K. (1987) "A constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation". Soil and Foundation. The Japan Society of S.M.F.E., vol. 27, no. 4, pp. 73-88.
- MAZANTI, B.B. e HOLLAND, C.N. (1970) - "Study of soil behavior under high pressure" - Contract Report S-70-2 - U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, 73 pp.

- MITACHI, T. e FUJIWARA, Y. (1987) "Undrained shear behavior of clays undergoing long term anisotropic consolidation" Soil and Foundation - The Japan Society of S.M.F.E., vol. 27, no. 4, pp. 45-61.
- MITCHELL, R.J. (1972) "Some deviation from isotropy in a lightly overconsolidated clay" Geotechnique, vol. 22, no. 3, pp. 459-467.
- MORGAN, J.R.; GERRARD, B.E. (1973) "Anisotropy an monlinearity in sand properties" - 8o. ICSMFE, Moscou, vol. 1, pp. 287-292.
- MOURA COSTA, F. L., LEANDRO (1980) "A laboratory investigation of small strain behavior of Landon clay" Tese de Doutorado Imperial College - Univ. of London.
- MOURA COSTA, F.L.; KUPPER, A.M.A.G. (1983) "Estudo da deformabilidade de células de carga em ensaios triaxiais" - Solos e Rochas, vol. 6, no. 1, pp. 29-37.
- MURTHY, K.; NAGARAY, T.S.; SRINDHRAN, A. (1980) "Strength Anisotropy of Layered Soil System" ASCE, GED, vol. 106, GT 10, pp.1143-1147.
- NOBARI, E.S., DUNCAN, J.M. (1972) "Movements in dams due to reservoir filling". Proc. Specialty Conf. on the Perform of Earth and Earth Sup. Struc - ASCE Purdue Un, pp. 94-96.
- NOGUEIRA, J.B. (1978) "A caracterização de uma argila cerâmica por parâmetros geotécnicos". Cerâmica 24(99).
- OIKWA, H. (1987) "Compression curve of soft soils" Soil and Foundation. The Japan. Society of S.M.F.E., vol. 27, no. 3, pp. 99-104.
- OZAWA, Y.; DUNCAN, J.M. (1976) "Elasto-plastic finite element analysis of sand deformations" 2o. IC on Num. Meth. in Geo., Virginia.
- PICKERING, D.J. (1970; 1971; 1972) "Anisotropic elastic parameters for soil" Geotechnique, vol. 20, no. 3, pp. 271-276; vol. 21, no. 2, pp. 181-183; vol. 22, no. 3, pp. 533-534.

- POULOSH.G.,; DAVIS, E.H. (1974) "Elastic Soulutions for Soil and Rock Mechanics" - John Wiley e Sons Inc.
- PRÉVOST, J.H. (1978) "Anisotropic undrained stress strain behavior of clays" ASCE, JGED, vol. 104, GT8, pp. 1075-1090.
- RAMBERG, W.; OSGOOD, W.R. "Description of stress strain curves by three parameters" NACA Techn. Note no. 902, 22 pp.
- RICHARD, R.M.; ABOTT,B.J. (1975) "Versatile elastic-plastic stress strain formula" ASCE, JEMD, vol. 101, EM 4, pp. 511-515.
- ROCHA, P.F., SOUTO SILVEIRA, E.B.; GAIOTO, N. (1970) "Aspectos geotécnicos do projeto do trecho 3 do metrô de São Paulo", 4o. CBMSEF,separata 20 pp.
- SAADA, A. S. (1967) "Stress controlled apparatus for triaxial testing" - ASCE-JSMFD, vol.93, SM 6, pp. 61-78.
- SAADA, A.S. (1970) "Testing of anisotropic clay soils" - ASCE, JSMFD,vol.96, SM5, pp. 1847-1852.
- SAADA, A.S. e BAAH, A.K. (1967) "Deformation and failure of a cross anisotropic clay under combined stresses" - III Pan Conf. Soil Mech. Found. Ing., Vol. I, Venezuela, pp. 67-88.
- SAADA, A.S. e SHOOK, L.P. (1979) "The experimental behavior of anisotropic clay" Colloque International du CNRS no. 295, Villard de Lans, June, pp. 833-851.
- SAADA, A.S. e ZAMANI, K.K. (1969) "The mechanical behavior of cross anisotropic clays" - 7o. ICSMFE - Vol. I - México, pp. 351-359.
- SAADA, A.S.; BIANCHINI,G.F. (1975) "Strength of one dimensionaly consolidated clay" ASCE, JGED, GT 11, Vol. 101, pp. 1151-1164.
- SAADA, A.S.; OU, C.D. (1973) "Strain stress relations and failure of anisotropic clays" ASCE, JSMFD, vol. 99, SM 12, 1091-1111.

- SAADA, ADEL S.; BIANCHINI, GARY, F.; SHOOK LUIZE PALMER (1978) "The dynamic response of anisotropic clay" Proceedings of Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics - vol. 2 - Pasadena, pp. 777-801.
- SANKARAN, K.S. e BHASKARAN, R. (1973) "Deformation and failure pattern in an anysotropic kaolinite clay" Geotechnique 23, no. 1, Technical Notes, pp. 113-117.
- SCHIEL, F. (1970) "Introdução à Resistência dos Materiais". Publicações EESC-USP - Volume II.
- SCHIEL, F. (1973) "Material monotropo como modelo de solo" - Publicações EESC-USP, 12 pp.
- SEED, H.B.; CHAN, C.K. (1959) "Structure and Strength Characteristics of compacted clay" ASCE, JSMFD, vol. 85, pp 87-128.
- SILVEIRA, A.; SOUTO SILVEIRA, E.B. (1970) "Considerações sobre anisotropia transversal em solos compactados" 4o. CBMSEF, Rio de Janeiro, vol.I, pp 101-111.
- SILVEIRA, A.; SOUTO SILVEIRA, E.B. (1973) "Elastic parameters for soils with cross anisotropy" 8o. ICSMFE, Moscou, vol. 12, pp. 261-365.
- SIMPSON, B., O'RIORDAN, N.J., CROFT, D.D. (1979) "A computer model for the analysis of ground movements in London clay" - Geotechnique, vol. 29, no. 2, pp. 149-175.
- SOUTO SILVEIRA, E.B. (1965) "Statistical research on stress strain characteristics of a typical compacted soil under different moulding parameters" 6o. ICSMFE, Canadá, pp 364-368.
- SOUTO SILVEIRA, E.B. (1967) "Thoughts concerning the applicability of the theory of elasticity to soils" 3o. CPAMSIF, Caracas, vol. I, pp. 3-27.
- SOUTO SILVEIRA, E.B. (1974) "Aplicações do MEF em barragens" 1o. Sem. Br. de MEF Apl. à Mec. Solos - Coppe, UFRJ, pp.389-434.

- STIPHO, A.S. (1982) "Extended critical state model for anisotropically consolidated clays" International Symposium on Numerical Models in Geomechanics - Zurich, pp. 183-188.
- TAVENAS, F.; DES ROSIERS, J.P.; LEROUÉIL, S. LA ROCHELLE, P.A.; ROY, M. (1979) "The use of strain energy as a yield and creep criterion for lightly overconsolidated clays" Geotechnique 29, no. 3, pp. 285-303.
- TING, C.S. (1982) "Elastic and plastic strain properties of sands" ASCE, JGED, vol. 108, GT5, pp. 787-793.
- URIEL, A.O.; CANIZO, L. (1971) "On the elastic anisotropy of soil" Geotechnique, vol. 21, no. 3, pp. 262-267.
- WAYNE, P.W. (1988) "Determining OCR in clays from laboratory strength" ASCE - J.G.E., vol. 114, no. 1, pp. 76-92.
- WELLER, Jr.W.A.; KULHAWY, F.H. (1982) "Factors affecting stress cell measurements in soil" ASCE, JGED, vol. 108, GT 12, pp. 1529-1548.
- WILSON, E.L.; DUNCAN, J.M.; HARTMAN, J.P. (1972) "Finite element computer program for solution of axisymmetric and plane strain stress deformation problems in cross anisotropic soils" - Univ. of Florida Dept. Civil Eng, Soilstrn.
- WITHIAM, J.L.; KULHAWY, F.H. (1976) "Undrained volume changes in compacted cohesive soil" ASCE, JGED, vol. 102, GT 10, pp. 1029-1074.
- WOOD, D.M. (1976) "Explorations of principal stress space with kaolin in a true triaxial apparatus" Geotechnique 25, no. 4, pp. 783-797.
- YAMADA, Y. e YOSHIMURA, N., SAKURAI, T. (1968) "Plastic stress strain matrix and its application for the solution of elastic plastic problems by the F.E.M." International Journal of Mechanical Sciences - Vol. 10, 1968, pp. 343-354.

YEN, C.M.K. et al (1978)-."A new apparatus for measuring the principal strains in anisotropic clay". Geotech. Test. Journal, vol.1, no.1, pp. 24-33.

YONG, R.N. e SILVESTRI, V. (1979) "Anisotropic behavior of a sensitive clay" Canadian Geotechnical Journal, vol. 16, pp. 335-350.

ZAGOTTIS, D. (1974) "O modelo de Roscoe", 1o. Sem. Br. Apl. MEF à Mec. dos Solos". Coppe UFRJ, pp.143-191.

ANEXO 1

ENSAIOS OEDOMÉTRICOS

Ensaio Oedométrico e suas principais características realizados em Pressas de Adensamento convencionais, em todos os Bolos (1 a 6) de solo.

BO- LO	CP	Wi (%)	ei	ρ_i (g/cm ³)	Si (%)	Wf (%)	ef	$\Delta\sigma_{mx}$ (x100kPa)	TEMPO DE EN- SAIO (DIAS)
6	B6V2	37,8	1,023	1,856	100	32,4	0,782	15,7	98
	B6V1	35,5	0,966	1,878	100	32,9	0,787	15,7	69
	B6H2	38,4	1,054	1,836	99	32,4	0,795	15,1	147
	B6H1	35,9	0,965	1,884	100	33,8	0,870	16,0	52
	B6I2	36,2	0,978	1,876	100	34,2	0,883	16,1	56
	B6I1	35,8	0,959	1,889	100	33,5	0,872	16,1	79
5	B5V2	33,5	0,926	1,888	99	32,9	0,830	15,1	86
	B5V1	33,5	0,903	1,911	100	33,8	0,883	16,9	62
	B5H2	34,2	0,916	1,908	100	35,9	0,899	16,1	94
	B5H1	33,5	0,906	1,909	100	32,2	0,798	15,1	71
	B5I2	33,4	0,903	1,910	100	34,2	0,881	16,2	61
	B5I1	34,9	0,931	1,905	100	34,5	0,895	16,0	59
4	B4V2	32,7	0,878	1,924	100	33,2	0,778	15,7	86
	B4V1	32,8	0,904	1,901	99	33,8	0,827	15,1	72
	B4H1	32,8	0,898	1,907	100	31,5	0,770	15,7	92
	B4I1	33,9	0,910	1,910	100	34,7	0,877	16,2	68
3	B3V2	37,1	0,998	1,870	100	36,3	0,926	14,6	55
	B3V1	36,9	0,998	1,868	100	33,1	0,783	15,7	54
	B3H2	37,4	1,013	1,860	100	33,1	0,832	15,1	61
	B3H1	37,4	1,019	1,866	100	35,2	0,915	16,0	56
	B3I2	36,8	1,001	1,864	100	34,9	0,894	16,2	56
	B3I1	36,9	1,008	1,857	100	34,7	0,910	16,0	48
2	B2V2	36,8	0,945	1,917	100	34,4	0,837	16,0	35
	B2V1	36,8	0,962	1,900	100	33,8	0,825	16,0	30
	B2H2	37,1	1,016	1,854	99	32,5	0,800	15,7	52
	B2H1	37,5	0,960	1,911	100	35,1	0,844	12,0	38

BO-	Wi	ei	ρ_i	Si	Wf	ef	$\Delta\sigma$ mx	TEMPO DE EN-	
LO CP	(%)		(g/cm³)	(%)	(%)		(x100kPa)	SAIO (DIAS)	
	B2I2	36,8	0,952	1,910	100	35,3	0,856	16,0	49
	B2I1	36,9	0,991	1,875	100	35,3	0,909	12,0	26
1	B1V2	37,3	0,969	1,900	100	35,5	0,873	12,0	17
	B1V1	36,7	0,996	1,866	100	30,9	0,763	15,1	15
	B1H2	36,5	0,963	1,896	100	34,8	0,849	12,0	26
	B1H1	37,6	1,025	1,853	100	30,1	0,709	15,7	13
	B1I2	36,6	0,970	1,889	100	35,8	0,897	12,0	27
	B1I1	37,0	0,998	1,869	100	34,9	0,915	10,0	15

ANEXO 2

Índices Físicos dos Corpos de Prova na
Compressão Triaxial

CORPO DE PROVA	ρ_i (g/cm ³)	W_i (%)	e_i	S_i (%)	σ_3 (100 kPa)	W_f (%)
B6V6	1,882	35,4	0,960	100	1,0	35,6
B6V5	1,871	35,6	0,975	100	0,5	36,1
B6V4	1,895	35,1	0,942	100	0,5	35,9
B6H4	1,886	36,2	0,968	100	1,0	35,9
B6H3	1,889	34,7	0,944	100	1,0	35,6
B6H2	1,894	34,5	0,935	100	0,5	35,7
B6I3	1,894	35,4	0,949	100	1,0	35,9
B6I2	1,889	35,0	0,948	100	0,5	36,3
B5V4	1,912	34,1	0,911	100	1,0	34,7
B5V3	1,921	32,6	0,811	100	0,5	34,1
B5H4	1,915	32,9	0,891	100	1,0	34,3
B5H3	1,905	33,4	0,908	100	1,0	34,6
B5H2	1,899	34,3	0,926	100	0,5	35,1
B5I3	1,908	33,2	0,902	100	1,0	33,9
B5I2	1,918	32,9	0,888	100	0,5	34,2
B4V2	1,925	33,5	0,890	100	1,0	34,8
B4V1	1,888	33,7	0,931	100	0,5	35,5
B4H3	1,890	34,0	0,933	100	1,0	34,8
B4H2	1,904	33,2	0,906	100	0,5	35,5
B4H1	1,925	33,0	0,883	100	1,5	34,1
B4I2	1,914	33,6	0,902	100	1,0	34,6
B4I1	1,917	34,0	0,906	100	0,5	35,3
B3V3	1,847	36,9	1,010	100	1,5	37,3
B3V2	1,855	37,1	1,014	100	1,5	37,0
B3V1	1,858	36,3	0,998	100	1,5	36,6
B3H3	1,869	36,5	0,991	100	1,5	36,4
B3H2	1,845	37,1	1,025	100	1,5	36,5
B3H1	1,846	36,4	1,013	99	1,5	33,2

CORPO DE PROVA	ρ_i (g/cm ³)	W_i (%)	e_i	S_i (%)	σ_3 (100 kPa)	W_f (%)
B3I3	1,875	37,3	0,995	100	1,5	36,7
B3I2	1,847	36,7	1,017	100	1,5	36,8
B3I1	1,878	36,6	0,982	100	1,5	37,6
B2V5	1,854	36,6	1,008	100	2,0	34,9
B2V4	1,852	36,7	1,011	100	2,0	36,1
B2V3	1,874	36,2	0,980	100	2,0	35,2
B2V2	1,858	36,9	1,008	100	2,0	36,0
B2H5	1,842	36,3	1,016	98	1,5	36,7
B2H4	1,858	37,6	1,019	100	2,0	36,0
B2H3	1,863	36,5	0,996	100	2,0	35,3
B2H2	1,870	36,6	0,991	100	2,0	36,1
B2H1	1,851	36,6	1,011	100	2,0	35,1
B2I4	1,841	37,7	0,979	100	2,0	35,8
B2I3	1,869	36,7	0,993	100	2,0	35,7
B2I2	1,872	36,3	0,976	100	2,0	35,7
B2I1	1,867	37,1	0,999	100	2,0	35,8
B1V3	1,886	37,2	0,982	100	1,5	36,0
B1V2	1,875	35,8	0,973	100	1,5	36,1
B1V1	1,866	37,2	1,002	100	1,5	37,0
B1H4	1,887	35,7	0,960	100	1,5	36,6
B1H3	1,861	35,9	0,989	100	1,5	36,2
B1H2	1,846	36,2	1,011	98	1,5	35,9
B1H1	1,849	36,9	1,017	100	1,5	36,4
B1I4	1,874	37,1	0,993	100	1,5	36,6
B1I3	1,886	37,0	0,979	100	1,5	35,8
B1I2	1,865	37,1	1,002	100	1,5	37,2
B1I1	1,862	35,9	0,991	100	1,5	36,7

ANEXO 3

Fases de Confinamento e Adensamento na
Compressão Triaxial

CORPO DE PROVA	σ_3 (x100kPa)	u_{max} (CON) (x100kPa)	TEMPO (CON) (h)	u_{min} (DR) (x100kPa)	TEMPO (DR) (h)	ÁGUA DREN. (cm ³)	ΔV CALC. (ADENS.) (cm ³)
B6V6	1,0	0,62	2,0	0,02	15,0	4,1	2,86
B6V5	0,5	0,28	0,5	0,05	5,0	1,9	0,94
B6V4	0,5	0,24	0,25	0,01	4,0	1,8	0,85
B6V3	0,5	0,25	0,5	0,01	4,0	2,2	0,52
B6H4	1,0	0,73	18,0	0,07	8,0	6,4	4,43
B6H3	0,5	0,52	1,0	0,02	15,0	3,8	1,25
B6H2	0,5	0,47	0,1	0,02	4,0	3,0	2,13
B6I3	1,0	0,48	1,0	0,01	16,0	3,3	2,75
B6I2	0,5	0,25	0,5	0,00	4,0	2,4	0,36
B5V4	1,0	0,46	0,5	0,05	4,0	2,4	0,71
B5V3	0,5	0,19	1,0	0,01	3,0	0,6	0,0
B5H4	1,0	0,50	1,2	0,02	14,5	2,7	2,0
B5H3	1,0	0,45	1,0	0,02	17,0	2,2	0,75
B5H2	0,5	0,12	20,0	-0,03	3,0	-0,8	-1,21
B5I3	1,0	0,45	0,5	0,02	4,0	2,3	0,86
B5I2	0,5	0,28	1,0	0,01	3,5	1,5	0
B4V2	1,0	0,44	22,0	0,04	17,0	3,3	4,37
B4V1	0,5	0,15	23,0	0,0	3,5	2,5	-0,24
B4H3	1,0	0,41	21,5	0,02	24,0	1,3	1,64
B4H2	0,5	0,65	21,0	0,0	9,5	0,5	0,26
B4H1	1,5	0,78	17,0	0,03	24,0	5,2	3,03
B4I2	1,0	0,44	17,0	0,04	30,0	1,6	1,03
B4I1	0,5	0,65	22,0	-0,03	6,5	-1,0	-0,31
B3V3	1,5	0,91	23,0	0,03	19,0	5,04	7,13
B3V2	1,5	0,99	23,5	0,06	48,5	6,90	7,89
B3V1	1,5	0,93	24,0	0,01	45,5	4,78	7,82
B3H3	1,5	0,90	21,0	0,02	24,0	6,0	4,81
B3H2	1,5	0,71	23,5	0,01	18,0	6,15	5,98
B3H1	1,5	0,86	26,0	0,03	24,0	6,4	4,85
B3I3	1,5	0,92	22,5	0,06	24,0	7,35	5,02

CORPO DE PROVA	σ_3 (x100kPa)	u_{max} (CON) (x100kPa)	TEMPO (CON) (h)	u_{min} (DR) (x100kPa)	TEMPO (DR) (h)	ÁGUA DREN. (cm ³)	$\Delta V_{CALC.}$ (ADENS.) (cm ³)
B3I2	1,5	0,61	24,0	0,03	6,0	6,1	5,16
B3I1	1,5	0,92	46	0,08	48	6,90	-
B2V5	2,0	0,62	-	0,38	26,5	4,6	-
B2V4	2,0	0,30	-	0,15	23,0	3,0	2,33
B2V3	2,0	0,53	-	0,12	47,0	5,1	2,79
B2V2	2,0	1,01	-	0,57	28,5	6,7	-
B2V1	2,0	0,33	-	0,27	23,5	3,55	3,61
B2H5	1,5	0,94	42,0	0,01	46,0	8,9	6,46
B2H4	2,0	0,70	-	0,15	41,0	5,7	1,84
B2H3	2,0	0,53	-	0,36	23,5	4,01	1,95
B2H2	2,0	0,95	-	0,46	24,0	3,75	-
B2H1	2,0	0,83	-	0,37	24,5	4,1	3,20
B2I4	2,0	0,63	-	0,38	24,5	5,15	3,82
B2I3	2,0	0,79	-	0,25	27,5	4,1	2,71
B2I2	2,0	0,85	-	0,18	46,5	4,55	2,33
B2I1	2,0	1,07	-	0,38	25,0	5,65	-
B1V3	1,5	0,59	-	0,14	24	2,45	1,51
B1V2	1,5	0,56	-	0,24	24	2,13	2,53
B1V1	1,5	0,59	-	0,31	24	2,30	2,03
B1H4	1,5	0,29	-	0,01	26,5	1,10	-
B1H3	1,5	0,80	-	0,18	23,5	2,34	1,83
B1H2	1,5	0,52	-	0,15	23	2,38	3,20
B1H1	1,5	0,45	-	0,23	23	2,90	3,20
B1I4	1,5	0,47	-	0,07	26	2,70	2,94
B1I3	1,5	0,56	-	0,18	24	4,20	1,10
B1I2	1,5	-	-	0,12	24	3,15	3,42
B1I1	1,5	0,49	-	0,29	23	2,00	1,3

ANEXO 4 - LISTAGEM DO PROGRAMA
"ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL"

-168-

```

10 REM #####
20 REM
30 REM ENSAIO DE COMPRESSAO TRIAXIAL
40 REM
50 REM #####
60 MORE
70 PRINT TAB( 5)"ENSAIO DE COMPRESSAO TRIAXIAL"
80 PRINT : PRINT "INTRODUZA O DISQUETE DE DADOS NO DRIVE B"
85 FOR I = 3 TO 11
90 FOR S = 1 TO 200: NEXT S
100 PRINT : INPUT "ENSAIO NUMERO = ";EN#:E# = (EN#)
110 REM #####
120 REM
130 REM LEITURA DOS DADOS EM DISKETTES
140 REM
150 REM #####
160 D# = CHR# (4)
165 N = N1
170 PRINT D#;"OPEN ENSAIO N= "E#",D2"
180 PRINT D#;"READ ENSAIO N= "E#
190 INPUT N1,D,H,SGI,W,GC,SR,VF,RZ,OZ,TT,VO,DC,HC,VC
200 DIM AL(N1): DIM LU(N1): DIM LV(N1): DIM LR(N1)
210 FOR I = 1 TO N1
220 INPUT AL(I),LU(I),LV(I),LR(I)
230 NEXT I
240 PRINT D#;"CLOSE ENSAIO N= "E#; MORE
250 FOR I = 1 TO N1
260 PRINT "TECLE QUALQUER TECLA P/ PROSEGUIR "
270 GET Y$: MORE
275 INPUT "CONSTANTE DO ANEL DINAMOMETRICO = ";K
280 N = N1
282 PRINT "TIPO DE TRANSDUTOR (AED. VAR. VOLUME) : "
283 PRINT : PRINT
284 PRINT "1. TRANSDUTEC (BOLOS 1 E 2)"
285 PRINT : PRINT
286 PRINT "2. WYKEMAR FARRANCE (B. 3,4,5,6)"
287 PRINT : PRINT
288 INPUT "DIGITE O N. DO TRANSD. UTILIZADO = ";S
290 IF S = 1 GOTO 543
300 IF S = 2 GOTO 305
302 IF S > 2 GOTO 282
305 H = H + 10:D = D + 10
310 MORE : NTAB 12: VTAB 14: PRINT "A G U A R D E . . ."
320 REM #####
330 REM
340 REM CALCULO DO ENSAIO
350 REM
360 REM #####
365 SGI = SGI / 100
370 A0 = 3.1416 * ((D / 10) ^ 2) / 4
380 V0 = A0 * (H / 10)
390 H1 = H - HC
400 D1 = D - DC
410 A1 = 3.1416 * ((D1 / 10) ^ 2) / 4
420 V1 = A1 * (H1 / 10)
425 DEF FN CC(JE) = INT ((JE + .05) * 10) / 10
430 DEF FN UC(JE) = INT ((JE + .0005) * 1000) / 1000
440 DEF FN C(E) = INT ((E + .00005) * 10000) / 10000
450 DIM DEAX(N): DIM DRAD(N): DIM RVD(N)
460 DIM S(N): DIM DVOL(N)
470 DIM NV(N): DIM RA(N): DIM U(N)
472 DIM OV(N): DIM WK(N)
475 DIM LH(N)
480 LH(2) = .1
485 FOR I = 3 TO N

```


ANEXO 4 - LISTAGEM

```

490 LN(I) = LN(I - 1) + .1
495 NEXT
500 FOR I = 1 TO N
505 KK = .1 * ((LN(I) - (AL(I) * .002)))
510 U(I) = LU(I) * .001
515 DEAX(I) = ((LN(I) - (AL(I) * .002)) / H1) * 100
520 DVOL(I) = (((2.8425 * KK) + (LV(I) - LV(1))) / V1) * 100
525 RVD(I) = ((DVOL(I) - DEAX(I)) / 2)
528 DRAD(I) = (((LR(I) - LR(1)) / 300) / D1) * 100
530 HP = H1 - (KK * 10)
535 S(I) = (K * AL(I)) / ((V1 - ((2.8425 * KK) + (LV(I) - LV(1)))) / (HP / 10))
540 GOTO 700
543 SG1 = SG1 / 100
546 A0 = 3.1416 * ((D / 10) ^ 2) / 4
549 V0 = A0 * (H / 10)
551 H1 = H - HC
553 D1 = D - DC
556 A1 = 3.1416 * ((D1 / 10) ^ 2) / 4
559 V1 = A1 * (H1 / 10)
561 DEF FN CC(JE) = INT ((JE + .05) * 10) / 10
563 DEF FN WC(JE) = INT ((JE + .0005) * 1000) / 1000
566 DEF FN C(E) = INT ((E + .00005) * 10000) / 10000
568 DIA DEAX(N): DIA DRAD(N)
570 DIA S(N): DIA DVOL(N)
572 DIA NV(N): DIA RA(N): DIA U(N)
573 DIA OV(N): DIA VI(N): DIA RVD(N)
575 DIA LH(50)
580 LN(2) = .1
585 FOR I = 3 TO 11
590 LN(I) = LN(I - 1) + .1
595 NEXT
597 FOR I = 12 TO 23
599 LN(I) = LN(I - 1) + .25: NEXT
600 FOR I = 24 TO 39
605 LN(I) = LN(I - 1) + .5: NEXT
607 FOR I = 40 TO 50
609 LN(I) = LN(I - 1) + 1
620 NEXT
625 FOR I = 1 TO N
630 KK = .1 * ((LN(I) - (AL(I) * .002)))
640 U(I) = LU(I) * .01
650 DEAX(I) = ((LN(I) - (AL(I) * .002)) / H1) * 100
660 DVOL(I) = (((2.8425 * KK) + (.1 * LV(I) - .1 * LV(1))) / V1) * 100
663 RVD(I) = ((DVOL(I) - DEAX(I)) / 2)
665 DRAD(I) = (((LR(I) - LR(1)) / 300) / D1) * 100
680 HP = H1 - (KK * 10)
690 S(I) = (K * AL(I)) / ((V1 - ((2.8425 * KK) + (.1 * LV(I) - .1 * LV(1)))) / (HP / 10))
700 IF DEAX(I) = 0 THEN GOTO 720
710 NV(I) = - ((DVOL(I) / (2 * DEAX(I))) - .5)
720 IF DEAX(I) = 0 THEN GOTO 732
730 RA(I) = - (DRAD(I) / DEAX(I))
732 OV(I) = S(I) + SG1 - U(I)
735 WK(I) = SG1 - U(I)
740 NEXT
750 PRINT
760 REA *****
770 REA
780 REA IMPRESSAO DOS DADOS FORNECIDOS
790 REA
800 REA *****
810 PRD 5
820 PRINT CHR$(9); "K"
830 PRINT TAB( 23) "ENSAIO DE COMPRESSAO TRIAXIAL "; EN1
840 PRINT TAB( 23) "ENSAIO DE COMPRESSAO TRIAXIAL "; EN1
850 PRINT CHR$(9); "A"
860 PRINT TAB( 34) "SIGMA 3 = "; SG1; " Kpa": PRINT

```

ANEXO 4 - LISTAGEM

```

870 PRINT TAB( 32)"DADOS DO C.P."
880 PRINT
890 PRINT TAB( 15)"d=";D;"RA"; TAB( 30)"h=";H;"RA";"      V0="; FM UC(V0);"CA3"
900 PRINT TAB( 15)"W=";W;"X"; TAB( 28)"Cte mol=";X;"      MASSA ESP.";BC;" B/CA3"
910 PRINT TAB( 15)"Wf=";Wf;"X"; TAB( 28)"TEMPO CONF=";Tt;"M      SR =";SR;"X"
920 PRINT TAB( 15)"TENSÃO VERT.ADS.";"I2;" KPA      TENSÃO LAT.ADS. = "I0;" KPA"
930 PRINT TAB( 15)"VARIACAO D CONF.";"DC;" RA      VARIACAO N CONF.";"NC;" RA"
940 PRINT TAB( 15)"VOLUME DRENADO =" ;V0;" CA3      VARIACAO VOL.CONF.";"VC;" CA3"
950 PRINT : PRINT TAB( 32)"DADOS DO ENSAIO"
960 PRINT
970 PRINT TAB( 16)"LM"; TAB( 26)"LAX"; TAB( 40)"LAOL"; TAB( 13)"LU"; TAB( 24)"LVOL"; TAB( 35)"LRAD"
975 PRINT
980 J = 1
990 PRINT TAB( 16);J; TAB( 26); FM CC(LM(J)); TAB( 40);RL(J); TAB( 13)LU(J); TAB( 24)LV(J); TAB( 35)LR(J)
1000 J = J + 1
1010 IF J < = N THEN GOTO 990
1020 PRINT CHR$(140);
1030 REM #####
1040 REM
1050 REM IMPRESSAO DOS VALORES CALCULADOS
1060 REM
1070 REM #####
1080 PRINT : PRINT TAB( 32)"RESULTADOS - ";EN6; PRINT
1090 PRINT TAB( 16)"LM"; TAB( 26)"T.TOT."; TAB( 40)"P.N."; TAB( 13)"DAXIAL "; TAB( 24)"SGLEFT"; TAB( 35)"SGJEF
T"
1100 PRINT
1110 FOR I = 1 TO N
1120 PRINT TAB( 16)I; TAB( 26) FM UC(S(I)); TAB( 40) FM UC(U(I)); TAB( 13) FM UC(DEAX(I)); TAB( 24) FM UC(S(I)
+ SGJ - U(I)); TAB( 35) FM UC(SGJ - U(I))
1130 NEXT
1140 PRINT : PRINT
1150 PRINT CHR$(140);
1152 PRINT
1154 PRINT TAB( 10)"LM"; TAB( 20)"DAXIAL"; TAB( 30)"DVOL"; TAB( 40)"DRAD"; TAB( 15)"DRA-V"; TAB( 25)"DRA/DAX";
TAB( 35)"MI VOL"
1156 PRINT
1158 FOR I = 1 TO N
1160 PRINT TAB( 10)I; TAB( 20) FM UC(DEAX(I)); TAB( 30) FM UC(DVOL(I)); TAB( 40) FM UC(DRAD(I)); TAB( 15) FM UC
C(RVD(I)); TAB( 25) FM UC(RA(I)); TAB( 35) FM UC(MV(I))
1162 NEXT
1164 PRINT : PRINT
1166 PRINT CHR$(140)
1168 REM #####
1170 REM
1180 REM IMPRESSAO DOS GRAFICOS
1190 REM
1200 REM #####
1210 MORE
1220 MAXS = 3;RDEAX = 10;RRAD = RDEAX;RVOL = 3;VP = 2
1230 PRINT TAB( 20)"GRAFICO TENSÃO TOTAL X DEF.AXIAL"; PRINT TAB( 28)"cp ";EN6; PRINT TAB( 13)"Esc.TEN.TOT. =
";MAXS * 100;"KPA"; TAB( 39)"Esc. def.axial = ";RDEAX;"X"
1240 PRG 0
1250 HGR2 : HCOLOR= 3;AUX = MAXS; GOSUB 2160
1260 FOR I = 1 TO N
1270 PLOT (S(I) * 279 / MAXS),(DEAX(I) * 191 / RDEAX)
1280 NEXT
1290 PRG 5
1300 PRINT CHR$( 9);"G2"
1310 PRG 0
1320 TEXT
1330 PRG 5
1340 PRINT : PRINT TAB( 20)"GRAFICO TENSÃO TOTAL X DEF.RADIAL"; PRINT TAB( 13)"Esc.TEN.TOT. = ";MAXS * 100;"K
PA"; TAB( 39)"Esc. def.RADIAL= "; - RRAD;"X"
1350 PRG 0
1360 HGR2
1370 HCOLOR= 3; GOSUB 2160

```


ANEXO 4 - LISTAGEM

```

1380 FOR I = 1 TO N
1390 HPLOT (S(I) * 279 / MAXS), (- DRAD(I) * 191 / RAD)
1400 NEXT
1410 PRN 5
1420 PRINT CHR$(9); "62"
1430 PRN 0
1440 TEXT
1450 PRN 5
1460 PRINT : PRINT TAB( 20) "GRAFICO PRESSAO NEUTRA X DEF.AXIAL": PRINT TAB( 13) "Esc.P.NEUTRA = "; MAXS * 100; "
    KPA"; TAB( 39) "Esc. def.AXIAL = "; RDEAX; "Z"
1470 PRN 0
1480 NGR2
1485 LET NH = (1 * 279 / MAXS)
1490 HCOLOR= 3
1499 HPLOT 0,0 TO 279,0: HPLOT NH,0 TO NH,191
1500 FOR I = 1 TO RDEAX
1510 HPLOT (NH - 1), (I * 191 / RDEAX): HPLOT (NH - 2), (I * 191 / RDEAX): NEXT
1522 FOR I = 0 TO MAXS
1524 HPLOT (I * 279 / MAXS), 1: HPLOT (I * 279 / MAXS), 2: NEXT
1526 FOR I = 1 TO N
1528 HPLOT (NH + (U(I) * 279) / MAXS), ((DEAX(I) * 191) / RDEAX): NEXT
1530 PRN 5
1540 PRINT CHR$(9); "62"
1550 PRN 0
1560 TEXT
1570 PRN 5
1580 PRINT CHR$(140);
1590 PRINT : PRINT TAB( 20) "GRAFICO TENSAO EFETIVA X DEF.RADIAL": PRINT TAB( 13) "Esc.T. EFETIVA = "; MAXS * 10
    0; "KPA"; TAB( 39) "Esc. def.RADIAL = "; - RAD; "Z"
1595 AUX = MAXS:RDEAX = RAD
1600 PRN 0: NGR2 : HCOLOR= 3: GOSUB 2160
1605 FOR I = 4 TO N
1610 HPLOT ((S(I) - U(I)) * 279 / AUX), ((- DRAD(I) * 191) / RAD)
1615 NEXT
1620 PRN 5: PRINT CHR$(9); "62": PRN 0
1625 TEXT : PRN 5
1630 PRINT : PRINT TAB( 20) "GRAFICO TENSAO EFETIVA X DEF.AXIAL": PRINT TAB( 13) "Esc.T. EFETIVA = "; MAXS * 100
    ; "KPA"; TAB( 39) "Esc. def.AXIAL = "; RDEAX; "Z"
1632 AUX = MAXS
1635 PRN 0: NGR2 : HCOLOR= 3: GOSUB 2160
1640 FOR I = 4 TO N
1645 HPLOT ((S(I) - U(I)) * 279 / MAXS), (DEAX(I) * 191 / RDEAX)
1650 NEXT
1655 PRN 5: PRINT CHR$(9); "62": PRN 0: TEXT : PRN 5
1660 PRINT : PRINT TAB( 20) "GRAFICO S61 EFETIVO X S63 EFETIVO": PRINT TAB( 13) "Esc.TENSOES = "; RVOL * 100; "KP
    A"
1670 PRN 0: LET AUX = 3: NGR2 : HCOLOR= 3: GOSUB 2290
1680 FOR I = 1 TO N
1690 HPLOT ((S(I) + S61 - U(I)) * 159 / AUX), ((S61 - U(I)) * 191 / AUX)
1700 NEXT
1710 PRN 5: PRINT CHR$(9); "62": PRN 0
1720 TEXT : PRN 5: PRINT CHR$(140);
1770 PRINT TAB( 20) "GRAFICO D. VOL X D. AXIAL"
1771 PRINT TAB( 20) "GRAFICO D. VOL X D. RADIAL ": PRINT TAB( 13) "ESCALA D. VOL = "; RVOL; "Z"; TAB( 39) "ESCALA
    D.RAD/D.AX = "; RDEAX; "Z"
1772 AUX = 3
1773 LET NH = (VP * 279 / RVOL)
1775 PRN 0: NGR2 : HCOLOR= 3
1777 HPLOT 0,0 TO 279,0: HPLOT NH,0 TO NH,191
1779 FOR I = 0 TO RDEAX
1781 HPLOT (NH - 1), (I * 191 / RDEAX): HPLOT (NH - 2), (I * 191 / RDEAX): NEXT
1783 FOR I = 0 TO RVOL STEP .5
1785 HPLOT (I * 279 / RVOL), 1: HPLOT (I * 279 / RVOL), 2: NEXT
1787 FOR I = 1 TO N - 1
1789 HPLOT (NH - (DVOL(I) * 279) / AUX), (- DRAD(I) * 191 / RDEAX)
1790 HPLOT (NH - (DVOL(I) * 279) / AUX), (DEAX(I) * 191 / RDEAX) TO (NH - (DVOL(I + 1) * 279) / AUX), (DEAX(I + 1

```

```

) = 191 / RDELAX)
1791 NEXT
1793 PR# 5: PRINT CHR# (9);"62"
1795 TEXT : PR# 5
1800 TEXT
1805 GOTO 1847
1810 PRINT : PRINT TAB( 20)"GRAFICO MI VOL. X DEF.AXIAL": PRINT TAB( 13)"Esc.MI VOL. = ";1;"ADA "; TAB( 39)"Es
c. def.AXIAL = ";RDELAX;"Z"
1815 PR# 0: LET AUX = 1: NGR2 : NCOLOR= 3:AUX = MAXS: GOSUB 2160
1820 FOR I = 1 TO N
1825 HPL#T (RV(I) # 279),(DEAX(I) # 191 / RDELAX)
1830 NEXT
1835 PR# 5: PRINT CHR# (9);"62": PR# 0
1840 TEXT : PR# 5
1845 PRINT CHR# (140);
1846 PRINT TAB( 32)"C P - ";EN#
1847 PRINT TAB( 20)"GRAFICO DEF.RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL"
1850 PRINT TAB( 20)"GRAFICO DEF.RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL": PRINT TAB( 13)"ESC. DEF. RAD. = "; - RRAD;"Z": TAB(
39)"ESC. DEF. AXIAL = ";RDELAX;"Z"
1855 PR# 0:AUX = RRAD: NGR2 : NCOLOR= 3: GOSUB 2350
1860 FOR I = 1 TO N - 1
1865 HPL#T ( - DRAD(I) # 159 / AUX),(DEAX(I) # 191 / RDELAX)
1870 HPL#T ( - RVD(I) # 159 / AUX),(DEAX(I) # 191 / RDELAX) TO ( - RVD(I + 1) # 159 / AUX),(DEAX(I + 1) # 191 /
RDELAX)
1875 NEXT
1877 PR# 5: PRINT CHR# (9);"62": PR# 0
1878 GOTO 1955
1879 TEXT : PR# 5
1880 PRINT TAB( 20)"GRAFICO DEF RAD / DEF AXIAL X DEF AXIAL ": PRINT TAB( 13)"ESC.D.RAD/D.AX= ";1;"ADA"; TAB(
39)"ESC. DEF. AXIAL = ";RDELAX;"Z"
1885 PR# 0:: NGR2 : NCOLOR= 3:AUX = MAXS: GOSUB 2220
1890 FOR I = 1 TO N
1895 HPL#T (RA(I) # 279),(DEAX(I) # 191 / RDELAX)
1900 NEXT
1905 PR# 5: PRINT CHR# (9);"62"
1910 PR# 0
1915 TEXT : PR# 5
1920 PRINT TAB( 20)"GRAFICO DEF RAD / DEF AXIAL E DEF RADIAL": PRINT TAB( 13)"ESC.DRAD E DAX= ";1;"ADA"; TAB(
39)"ESC. DEF.RADIAL= ";RDELAX;"Z"
1925 PR# 0:: NGR2 : NCOLOR= 3:AUX = MAXS: GOSUB 2220
1930 FOR I = 1 TO N
1935 HPL#T (RA(I) # 279),( - DRAD(I) # 191 / RDELAX)
1940 NEXT
1945 PR# 5: PRINT CHR# (9);"62"
1950 PR# 0
1955 TEXT : PR# 5
1960 PRINT CHR# (140);
2100 PR# 0: TEXT : HOME : NTAB 12: VTA# 14: PRINT "FIM DO PROGRAMA": END
2110 REN *****
2120 REN
2130 REN SUBROTINA PARA DEFINICAO DOS EIXOS
2140 REN
2150 REN *****
2160 HPL#T 0,0 TO 279,0: HPL#T 0,0 TO 0,191
2170 FOR I = 0 TO RDELAX
2180 HPL#T 1,(I # 191 / RDELAX): HPL#T 2,(I # 191 / RDELAX): NEXT
2190 FOR I = 0 TO AUX
2200 HPL#T (I # 279 / AUX),1: HPL#T (I # 279 / AUX),2: NEXT
2210 RETURN
2220 HPL#T 0,0 TO 279,0: HPL#T 0,0 TO 0,191
2230 FOR I = 0 TO RDELAX
2240 HPL#T 1,(I # 191 / RDELAX): HPL#T 2,(I # 191 / RDELAX): NEXT
2250 FOR I = 0 TO AUX STEP .3
2260 HPL#T (I # 279 / AUX),1: HPL#T (I # 279 / AUX),2: NEXT
2270 RETURN
2290 HPL#T 0,0 TO 159,0: HPL#T 0,0 TO 0,191

```


ANEXO 4 - LISTAGEM

```
2300 FOR I = 0 TO AUX
2310 NPLOT 1,(I * 191 / AUX): NPLOT 2,(I * 191 / AUX): NEXT
2320 FOR I = 0 TO AUX
2330 NPLOT (I * 159 / AUX),1: NPLOT (I * 159 / AUX),2: NEXT
2340 RETURN
2350 NPLOT 0,0 TO 159,0: NPLOT 0,0 TO 0,191
2360 FOR I = 0 TO NDEAX
2370 NPLOT 1,(I * 191 / NDEAX): NPLOT 2,(I * 191 / NDEAX): NEXT
2380 FOR I = 0 TO AUX
2390 NPLOT (I * 159 / AUX),1: NPLOT (I * 159 / AUX),2: NEXT
2400 RETURN
```

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL B6V5

SIGMA 3 = 50 Kpa

DADOS DO C.P.

D= 48.4MM h=124.4MM VO= 228.877 CM3
 WI=35.6 % Cte mola=.2941 MASSA ESP.=1.895 G/CM3
 WF=36.11 % TEMPO CONF=5.3H BR= 100 %
 TENSÃO VERT.ADS.= 600 KPA TENSÃO LAT.ADS. = 310 KPA
 VARIACAO D CONF.= .0567 MM VARIACAO H CONF.=.2206 MM
 VOLUME DRENADO = 1.9 CM3 VARIACAO VOL. CONF.= .9452 CM3

DADOS DO ENSAIO

LN	LP	LMOL	LU	LVOL	LRAD
1	0	0	53	-35.31	335
2	.1	12	63	-35.29	332
3	.2	17.5	74	-35.25	329
4	.3	21.5	84	-35.23	325
5	.4	25.5	94	-35.2	320
6	.5	28.5	103	-35.19	313
7	.6	31	111	-35.19	309
8	.7	33.5	118	-35.18	305
9	.8	35.5	126	-35.17	298
10	.9	38	132	-35.18	291
11	1	40	139	-35.17	285
12	1.1	42	145	-35.18	276
13	1.2	43	150	-35.18	269
14	1.3	46.2	154	-35.2	263
15	1.4	48.5	158	-35.22	255
16	1.5	50	162	-35.23	248
17	1.6	52	165	-35.24	241
18	1.7	53.5	168	-35.23	234
19	1.8	55.5	171	-35.29	226
20	1.9	56.5	173	-35.3	219
21	2	58.1	175	-35.33	210
22	2.1	59.9	176	-35.35	206
23	2.2	61.2	177	-35.39	196
24	2.3	63	178	-35.41	190
25	2.4	64.8	179	-35.44	183
26	2.5	66.1	179	-35.48	173
27	2.6	67.8	180	-35.51	166
28	2.7	68.8	180	-35.55	158
29	2.8	70	180	-35.56	150
30	2.9	71.1	180	-35.6	142
31	3	72.3	179	-35.64	135
32	3.1	73.8	179	-35.68	126
33	3.2	75	179	-35.71	118
34	3.3	76	178	-35.75	110
35	3.4	77.2	178	-35.79	104
36	3.5	77.8	177	-35.83	98
37	3.6	78.8	176	-35.87	90
38	3.7	79.8	175	-35.91	82
39	3.8	80.8	174	-35.95	73
40	3.9	81.5	174	-35.98	67
41	4	82.2	172	-36.02	58
42	4.1	82.8	170	-36.06	50
43	4.2	83.8	166	-36.11	41
44	4.3	84.1	164	-36.16	34
45	4.4	85	163	-36.21	28
46	4.5	85.5	161	-36.24	20
47	4.6	86	159	-36.29	12
48	4.7	86.5	156	-36.34	6
49	4.8	87	154	-36.38	0

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

50	4.9	87.2	152	-36.41	-9
51	5	87.8	149	-36.47	-18
52	5.1	88	146	-36.5	-23
53	5.2	88.5	144	-36.54	-29
54	5.3	89	142	-36.58	-36
55	5.4	89	133	-36.65	-42
56	5.5	89.2	131	-36.69	-48
57	5.6	89.5	129	-36.74	-54
58	5.7	89.8	127	-36.78	-58
59	5.8	89.8	124	-36.84	-65
60	5.9	90	122	-36.87	-68
61	6	90	120	-36.92	-75
62	6.1	90	118	-36.98	-78
63	6.2	90	115	-37.02	-83
64	6.3	90	113	-37.07	-86
65	6.4	90	110	-37.12	-91
66	6.5	89.5	108	-37.18	-95
67	6.6	89	105	-37.22	-98

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B6V5

LN	T.TOT.	P.N.	DAXIAL	SG1EFF	SG3EFF
1	0	.053	0	.447	.447
2	.192	.063	.061	.629	.437
3	.28	.074	.133	.706	.426
4	.344	.084	.207	.76	.416
5	.408	.094	.281	.814	.406
6	.456	.103	.357	.853	.397
7	.495	.111	.433	.884	.389
8	.535	.118	.51	.917	.382
9	.566	.126	.587	.94	.374
10	.606	.132	.664	.974	.368
11	.637	.139	.741	.998	.361
12	.669	.145	.818	1.024	.355
13	.684	.15	.897	1.034	.35
14	.735	.154	.972	1.081	.346
15	.77	.158	1.049	1.112	.342
16	.794	.162	1.127	1.132	.338
17	.825	.165	1.205	1.16	.335
18	.848	.168	1.283	1.18	.332
19	.879	.171	1.36	1.208	.329
20	.894	.173	1.439	1.221	.327
21	.919	.175	1.517	1.244	.325
22	.947	.176	1.595	1.271	.324
23	.966	.177	1.673	1.289	.323
24	.994	.178	1.751	1.316	.322
25	1.022	.179	1.828	1.343	.321
26	1.041	.179	1.907	1.362	.321
27	1.067	.18	1.985	1.387	.32
28	1.082	.18	2.063	1.402	.32
29	1.1	.18	2.142	1.42	.32
30	1.116	.18	2.221	1.436	.32
31	1.134	.179	2.299	1.455	.321
32	1.157	.179	2.378	1.478	.321
33	1.175	.179	2.456	1.496	.321
34	1.189	.178	2.535	1.511	.322
35	1.207	.178	2.614	1.529	.322
36	1.215	.177	2.693	1.538	.323
37	1.23	.176	2.772	1.554	.324
38	1.244	.175	2.851	1.569	.325
39	1.259	.174	2.93	1.585	.326
40	1.269	.174	3.009	1.595	.326
41	1.279	.172	3.089	1.607	.328
42	1.287	.17	3.168	1.617	.33
43	1.301	.166	3.247	1.635	.334
44	1.305	.164	3.327	1.641	.336
45	1.317	.163	3.406	1.654	.337
46	1.324	.161	3.486	1.663	.339
47	1.33	.159	3.566	1.671	.341
48	1.337	.156	3.646	1.681	.344
49	1.343	.154	3.725	1.689	.346
50	1.345	.152	3.805	1.693	.348
51	1.353	.149	3.885	1.704	.351
52	1.355	.146	3.965	1.709	.354
53	1.362	.144	4.045	1.718	.356
54	1.368	.142	4.125	1.726	.358
55	1.367	.133	4.205	1.734	.367
56	1.369	.131	4.285	1.738	.369
57	1.372	.129	4.365	1.743	.371
58	1.375	.127	4.446	1.748	.373
59	1.374	.124	4.526	1.75	.376
60	1.376	.122	4.606	1.754	.378

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

61	1.375	.12	4.687	1.755	.38
62	1.373	.118	4.767	1.755	.382
63	1.372	.115	4.848	1.757	.385
64	1.371	.113	4.928	1.758	.387
65	1.37	.11	5.009	1.76	.39
66	1.361	.108	5.09	1.753	.392
67	1.352	.105	5.172	1.747	.395

RESULTADOS - B6V5

LN	DAXIAL	DVOL	DRAD	DRA-V	DRA/DAX	NI VOL
1	0	0	0	0	0	0
2	.061	.018	-.021	-.021	.338	.351
3	.133	.047	-.041	-.043	.311	.324
4	.207	.067	-.069	-.07	.333	.338
5	.281	.092	-.103	-.095	.368	.337
6	.357	.108	-.152	-.124	.425	.349
7	.433	.12	-.179	-.157	.414	.362
8	.51	.136	-.207	-.187	.406	.367
9	.587	.152	-.255	-.217	.435	.37
10	.664	.16	-.303	-.252	.457	.38
11	.741	.176	-.345	-.282	.465	.381
12	.818	.184	-.407	-.317	.497	.388
13	.897	.196	-.455	-.351	.507	.391
14	.972	.199	-.496	-.387	.511	.398
15	1.049	.202	-.552	-.424	.526	.404
16	1.127	.21	-.6	-.459	.532	.407
17	1.205	.217	-.648	-.494	.538	.41
18	1.283	.234	-.696	-.525	.543	.409
19	1.36	.219	-.752	-.57	.553	.419
20	1.439	.227	-.8	-.606	.556	.421
21	1.517	.226	-.862	-.645	.568	.425
22	1.595	.229	-.889	-.683	.558	.428
23	1.673	.224	-.958	-.725	.573	.433
24	1.751	.227	-1	-.762	.571	.435
25	1.828	.226	-1.048	-.801	.573	.438
26	1.907	.221	-1.117	-.843	.586	.442
27	1.985	.22	-1.165	-.882	.587	.445
28	2.063	.214	-1.22	-.925	.591	.448
29	2.142	.222	-1.276	-.96	.596	.448
30	2.221	.217	-1.331	-1.002	.599	.451
31	2.299	.211	-1.379	-1.044	.6	.454
32	2.378	.206	-1.441	-1.086	.606	.457
33	2.456	.205	-1.496	-1.126	.609	.458
34	2.535	.2	-1.551	-1.168	.612	.461
35	2.614	.194	-1.593	-1.21	.609	.463
36	2.693	.189	-1.634	-1.252	.607	.465
37	2.772	.184	-1.689	-1.294	.609	.467
38	2.851	.178	-1.744	-1.336	.612	.469
39	2.93	.173	-1.807	-1.379	.617	.47
40	3.009	.172	-1.848	-1.419	.614	.471
41	3.089	.167	-1.91	-1.461	.618	.473
42	3.168	.162	-1.965	-1.503	.62	.474
43	3.247	.152	-2.027	-1.548	.624	.477
44	3.327	.142	-2.075	-1.592	.624	.479
45	3.406	.133	-2.117	-1.637	.621	.481
46	3.486	.132	-2.172	-1.677	.623	.481
47	3.566	.122	-2.227	-1.722	.625	.483
48	3.646	.113	-2.268	-1.766	.622	.485
49	3.725	.107	-2.31	-1.809	.62	.486
50	3.805	.107	-2.372	-1.849	.623	.486
51	3.885	.093	-2.434	-1.896	.627	.488
52	3.965	.092	-2.468	-1.937	.623	.488
53	4.045	.087	-2.51	-1.979	.62	.489
54	4.125	.082	-2.558	-2.022	.62	.49
55	4.205	.063	-2.599	-2.071	.618	.492
56	4.285	.058	-2.641	-2.114	.616	.493
57	4.365	.049	-2.682	-2.158	.614	.494
58	4.446	.044	-2.71	-2.201	.61	.495
59	4.526	.03	-2.758	-2.248	.609	.497

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

60	4.606	.029	-2.779	-2.289	.603	.497
61	4.687	.019	-2.827	-2.334	.603	.498
62	4.767	6E-03	-2.848	-2.381	.597	.499
63	4.848	1E-03	-2.882	-2.424	.595	.5
64	4.928	-9E-03	-2.903	-2.469	.589	.501
65	5.009	-.018	-2.937	-2.514	.586	.502
66	5.09	-.032	-2.965	-2.561	.582	.503
67	5.172	-.037	-2.986	-2.604	.577	.504

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

C P - B6V5

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF. AXIAL

Esc. DIF. TEN. = 300 KPA

Esc. def. axial = 10%

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF. RADIAL

Esc. DIF. TENS. = 300 KPA

Esc. def. RADIAL = -10%

GRAFICO PRESSAO NEUTRA X DEF. AXIAL

Esc. P. NEUTRA = 300 KPA

Esc. def. AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

C F - B6V5

GRAFICO BG1 EFETIVO X BG3 EFETIVO
Esc. TENSOES = 300KPA

GRAFICO D. VOL X D. AXIAL
GRAFICO D. VOL X D. RADIAL
ESCALA D. VOL = 3% ESCALA D. RAD, D. AX = 10%

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
GRAFICO DEF. RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL B512

SIGMA 3 = 50 Kpa

DADOS DO C.P.

D= 48.1MM h=124MM VO= 225.322 CM3
 WI=32.96 % Cte mola=.2941 MASSA ESP.=1.918 G/CM3
 WF=34.23 % TEMPO CONF=2.5H SR= 100 %
 TENSÃO VERT.ADS.= 700 KPA TENSÃO LAT.ADS. = 419 KPA
 VARIACAO D CONF.= 0 MM VARIACAO H CONF.=.01 MM
 VOLUME DRENADO = 1.5 CM3 VARIACAO VOL. CONF.= 0 CM3

DADOS DO ENSAIO

LN	LP	LMOL	LU	LVOL	LRAD
1	0	0	13	-33.49	469
2	.1	15.8	20	-33.46	463
3	.2	24.5	28	-33.43	458
4	.3	31	33	-33.41	453
5	.4	36.2	39	-33.41	448
6	.5	41.5	44	-33.4	442
7	.6	45.8	48	-33.42	438
8	.7	50	52	-33.42	430
9	.8	53.5	55	-33.43	424
10	.9	56.8	58	-33.44	417
11	1	60.2	61	-33.46	409
12	1.1	63.5	63	-33.5	403
13	1.2	66.5	65	-33.51	396
14	1.3	68	66	-33.54	389
15	1.4	71.2	67	-33.56	378
16	1.5	73.8	68	-33.59	370
17	1.6	76	69	-33.63	365
18	1.7	78	70	-33.69	357
19	1.8	80.2	70	-33.73	350
20	1.9	82	70	-33.76	341
21	2	84	70	-33.8	335
22	2.1	85.5	70	-33.85	328
23	2.2	87	70	-33.89	319
24	2.3	88.8	69	-33.92	310
25	2.4	90.2	69	-33.96	305
26	2.5	92	68	-34	296
27	2.6	93.2	67	-34.05	289
28	2.7	94.5	66	-34.09	282
29	2.8	96	65	-34.1	270
30	2.9	97.1	64	-34.16	265
31	3	98	63	-34.2	256
32	3.1	99.1	61	-34.24	247
33	3.2	100.5	60	-34.34	239
34	3.3	101.5	59	-34.38	233
35	3.4	102.5	57	-34.42	226
36	3.5	103.5	56	-34.48	219
37	3.6	104.2	54	-34.53	209
38	3.7	105.2	52	-34.58	203
39	3.8	106	51	-34.64	194
40	3.9	106.8	49	-34.69	188
41	4	107.5	47	-34.74	180
42	4.1	108.5	45	-34.79	170
43	4.2	109.5	43	-34.86	165
44	4.3	110.1	42	-34.91	158
45	4.4	111	39	-34.96	149
46	4.5	111.7	37	-35.01	141
47	4.6	112.1	36	-35.07	135
48	4.7	112.8	33	-35.14	128
49	4.8	113.2	31	-35.2	118

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

50	4.7	113.8	27	-35.25	110
51	5	114	27	-35.3	107
52	5.1	114.2	25	-35.35	100
53	5.2	114.8	23	-35.43	95
54	5.3	115	21	-35.48	89
55	5.4	115.3	19	-35.53	85
56	5.5	115.8	16	-35.6	78
57	5.6	115.9	14	-35.66	70
58	5.7	115.9	12	-35.72	68
59	5.8	116.1	9	-35.78	61
60	5.9	116.1	7	-35.84	56
61	6	116.1	5	-35.89	52
62	6.1	116.1	3	-35.95	48
63	6.2	116.1	1	-36.01	43
64	6.3	115.9	-1	-36.08	40
65	6.4	115.2	-3	-36.13	39
66	6.5	115	-5	-36.19	38

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B512

LN	T.TOT.	P.N.	DAXIAL	SG1EFT	SG3EFT
1	0	.013	0	.487	.487
2	.256	.02	.055	.736	.48
3	.396	.028	.122	.868	.472
4	.501	.033	.192	.968	.467
5	.585	.039	.264	1.046	.461
6	.67	.044	.336	1.126	.456
7	.739	.048	.41	1.191	.452
8	.806	.052	.484	1.254	.448
9	.862	.055	.559	1.307	.445
10	.915	.058	.634	1.357	.442
11	.969	.061	.709	1.408	.439
12	1.021	.063	.785	1.458	.437
13	1.068	.065	.861	1.503	.435
14	1.092	.066	.939	1.526	.434
15	1.142	.067	1.014	1.575	.433
16	1.183	.068	1.091	1.615	.432
17	1.217	.069	1.168	1.648	.431
18	1.248	.07	1.245	1.678	.43
19	1.282	.07	1.322	1.712	.43
20	1.31	.07	1.4	1.74	.43
21	1.341	.07	1.478	1.771	.43
22	1.363	.07	1.556	1.793	.43
23	1.386	.07	1.634	1.816	.43
24	1.414	.069	1.712	1.845	.431
25	1.435	.069	1.79	1.866	.431
26	1.462	.068	1.868	1.894	.432
27	1.48	.067	1.947	1.913	.433
28	1.499	.066	2.025	1.933	.434
29	1.522	.065	2.103	1.957	.435
30	1.538	.064	2.182	1.974	.436
31	1.551	.063	2.261	1.988	.437
32	1.567	.061	2.34	2.006	.439
33	1.587	.06	2.419	2.027	.44
34	1.602	.059	2.498	2.043	.441
35	1.616	.057	2.577	2.059	.443
36	1.63	.056	2.656	2.074	.444
37	1.64	.054	2.735	2.086	.446
38	1.654	.052	2.814	2.102	.448
39	1.665	.051	2.894	2.114	.449
40	1.676	.049	2.973	2.127	.451
41	1.685	.047	3.053	2.138	.453
42	1.7	.045	3.132	2.155	.455
43	1.714	.043	3.211	2.171	.457
44	1.721	.042	3.29	2.179	.458
45	1.734	.039	3.37	2.195	.461
46	1.743	.037	3.449	2.206	.463
47	1.748	.036	3.529	2.212	.464
48	1.757	.033	3.609	2.224	.467
49	1.761	.031	3.689	2.23	.469
50	1.769	.029	3.768	2.24	.471
51	1.771	.027	3.849	2.244	.473
52	1.772	.025	3.929	2.247	.475
53	1.779	.023	4.009	2.256	.477
54	1.781	.021	4.089	2.26	.479
55	1.784	.019	4.169	2.265	.481
56	1.79	.016	4.249	2.274	.484
57	1.79	.014	4.33	2.276	.486
58	1.788	.012	4.41	2.276	.488
59	1.789	9E-03	4.491	2.28	.491
60	1.787	7E-03	4.571	2.28	.493

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

61	1.786	5E-03	4.652	2.281	.495
62	1.784	3E-03	4.732	2.281	.497
63	1.782	1E-03	4.813	2.281	.499
64	1.777	-1E-03	4.894	2.278	.501
65	1.765	-3E-03	4.976	2.268	.503
66	1.76	-5E-03	5.057	2.265	.505

RESULTADOS - B512

LN	DAXIAL	DVOL	DRAD	DRA-V	DRA/DAX	NI VOL
1	0	0	0	0	0	0
2	.055	.022	-.042	-.017	.754	.301
3	.122	.046	-.076	-.038	.626	.312
4	.192	.066	-.111	-.063	.578	.329
5	.264	.077	-.146	-.094	.551	.355
6	.336	.093	-.187	-.122	.556	.362
7	.41	.095	-.215	-.157	.524	.384
8	.484	.107	-.27	-.189	.559	.39
9	.559	.114	-.312	-.222	.558	.398
10	.634	.121	-.36	-.256	.568	.404
11	.709	.124	-.416	-.293	.586	.412
12	.785	.118	-.457	-.333	.583	.425
13	.861	.126	-.506	-.367	.588	.427
14	.939	.125	-.554	-.407	.591	.434
15	1.014	.128	-.631	-.443	.622	.437
16	1.091	.126	-.686	-.482	.629	.442
17	1.168	.121	-.721	-.524	.617	.448
18	1.245	.106	-.776	-.57	.623	.457
19	1.322	.1	-.825	-.611	.624	.462
20	1.4	.099	-.887	-.65	.634	.465
21	1.478	.094	-.929	-.692	.628	.468
22	1.556	.084	-.977	-.736	.628	.473
23	1.634	.078	-1.04	-.778	.636	.476
24	1.712	.077	-1.102	-.817	.644	.478
25	1.79	.071	-1.137	-.859	.635	.48
26	1.868	.066	-1.199	-.901	.642	.482
27	1.947	.056	-1.247	-.945	.641	.486
28	2.025	.05	-1.296	-.987	.64	.488
29	2.103	.058	-1.379	-1.023	.656	.486
30	2.182	.044	-1.414	-1.069	.648	.49
31	2.261	.039	-1.476	-1.111	.653	.491
32	2.34	.033	-1.538	-1.154	.657	.493
33	2.419	1E-03	-1.594	-1.209	.659	.5
34	2.498	-4E-03	-1.635	-1.251	.655	.501
35	2.577	-.01	-1.684	-1.293	.654	.502
36	2.656	-.024	-1.733	-1.34	.652	.505
37	2.735	-.034	-1.802	-1.385	.659	.506
38	2.814	-.044	-1.843	-1.429	.655	.508
39	2.894	-.058	-1.906	-1.476	.659	.51
40	2.973	-.068	-1.947	-1.52	.655	.511
41	3.053	-.077	-2.003	-1.565	.656	.513
42	3.132	-.087	-2.072	-1.609	.662	.514
43	3.211	-.106	-2.107	-1.658	.656	.516
44	3.29	-.116	-2.155	-1.703	.655	.518
45	3.37	-.125	-2.218	-1.747	.658	.519
46	3.449	-.135	-2.273	-1.792	.659	.52
47	3.529	-.149	-2.315	-1.839	.656	.521
48	3.609	-.168	-2.363	-1.888	.655	.523
49	3.689	-.182	-2.432	-1.935	.659	.525
50	3.768	-.192	-2.488	-1.98	.66	.525
51	3.849	-.201	-2.509	-2.025	.652	.526
52	3.929	-.211	-2.557	-2.07	.651	.527
53	4.009	-.234	-2.592	-2.121	.647	.529
54	4.089	-.244	-2.633	-2.166	.644	.53
55	4.169	-.253	-2.661	-2.211	.638	.53
56	4.249	-.272	-2.71	-2.26	.638	.532
57	4.33	-.286	-2.765	-2.308	.639	.533
58	4.41	-.3	-2.779	-2.355	.63	.534
59	4.491	-.314	-2.827	-2.402	.63	.535

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

60	4.571	-.328	-2.862	-2.45	.626	.536
61	4.652	-.338	-2.89	-2.495	.621	.536
62	4.732	-.352	-2.918	-2.542	.616	.537
63	4.813	-.366	-2.952	-2.589	.613	.538
64	4.894	-.384	-2.973	-2.639	.607	.539
65	4.976	-.393	-2.98	-2.685	.599	.54
66	5.057	-.407	-2.987	-2.732	.591	.54

C P - B512
 GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.AXIAL
 Esc.DIF.TEN.=300 KPA Esc. def.axial = 10%

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.RADIAL
 Esc.DIF.TENS.= 300 KPA Esc. def.RADIAL= -10%

GRAFICO PRESSAO NEUTRA X DEF.AXIAL
 Esc.P.NEUTRA = 300KPA Esc. def.AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

C P - B512

GRAFICO SG1 EFETIVO X SG3 EFETIVO
Esc. TENSÕES = 300KPA

GRAFICO D. VOL X D. AXIAL
GRAFICO D. VOL X D. RADIAL
ESCALA D. VOL = 3% ESCALA D. RAD, D. AX = 10%

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
GRAFICO DEF. RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL B4H3

SIGMA 3 = 100 KPa

DADOS DO C.P.

D= 48.6MM h=124.6MM VD= 231.143 CM3
 WI=34 % Cte mola=.2941 MASSA ESP.=1.89 G/CM3
 WF=34.76 % TEMPO CONF=22H SR= 100 %
 TENSÃO VERT.ADS.= 800 KPA TENSÃO LAT.ADS. = 470 KPA
 VARIACAO D CONF.= .07 MM VARIACAO H CONF.=.526 MM
 VOLUME DRENADO = 1.3 CM3 VARIACAO VOL. CONF.= 1.6354 CM3

DADOS DO ENSAIO

LN	LP	LMOL	LU	LVOL	LRAD
1	0	0	37	-24.64	248
2	.1	22.2	50	-24.64	240
3	.2	33.8	67	-24.56	236
4	.3	41.5	85	-24.54	232
5	.4	48	103	-24.52	228
6	.5	53	120	-24.51	216
7	.6	57.1	136	-24.5	210
8	.7	60.9	150	-24.5	206
9	.8	64	164	-24.52	200
10	.9	66.5	175	-24.51	192
11	1	69.8	187	-24.52	186
12	1.1	72.5	198	-24.55	178
13	1.2	74.8	207	-24.57	169
14	1.3	76.5	214	-24.59	163
15	1.4	78.8	221	-24.61	156
16	1.5	80.5	227	-24.64	148
17	1.6	82.1	232	-24.68	140
18	1.7	84	236	-24.71	132
19	1.8	85.9	241	-24.74	126
20	1.9	87	244	-24.77	120
21	2	89.2	247	-24.8	110
22	2.1	90	250	-24.83	102
23	2.2	91.8	253	-24.88	96
24	2.3	93.1	254	-24.9	89
25	2.4	94.2	256	-24.94	82
26	2.5	96	257	-24.98	72
27	2.6	97	259	-25.02	66
28	2.7	99	259	-25.07	56
29	2.8	100	260	-25.11	49
30	2.9	101.2	260	-25.15	40
31	3	102.8	261	-25.19	33
32	3.1	104	261	-25.23	24
33	3.2	105.2	261	-25.28	14
34	3.3	106.2	260	-25.32	8
35	3.4	107.2	260	-25.37	0
36	3.5	108.9	260	-25.41	-12
37	3.6	110	260	-25.45	-20
38	3.7	110.9	259	-25.5	-28
39	3.8	112	258	-25.55	-38
40	3.9	114.1	258	-25.58	-45
41	4	114.5	257	-25.64	-55
42	4.1	115.5	256	-25.68	-64
43	4.2	116.5	255	-25.74	-73
44	4.3	118.5	255	-25.78	-81
45	4.4	118.9	253	-25.83	-90
46	4.5	119.5	252	-25.88	-97
47	4.6	120.5	251	-25.93	-107
48	4.7	121	250	-25.96	-116
49	4.8	121.9	249	-26.03	-122

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

50	4.9	122.5	247	-26.07	-127
51	5	123	246	-26.12	-134
52	5.1	123.8	244	-26.17	-140
53	5.2	124.5	242	-26.22	-148
54	5.3	125	240	-26.27	-155
55	5.4	125.5	239	-26.33	-162
56	5.5	126.2	237	-26.38	-169
57	5.6	127.1	235	-26.42	-176
58	5.7	127.8	233	-26.48	-180
59	5.8	128	230	-26.53	-186
60	5.9	128.1	228	-26.58	-191
61	6	128.5	226	-26.62	-195
62	6.1	129	224	-26.68	-199
63	6.2	129	221	-26.75	-205
64	6.3	129.5	219	-26.78	-208
65	6.4	129.5	217	-26.84	-213
66	6.5	129.8	214	-26.9	-216
67	6.6	129.8	212	-26.95	-220
68	6.7	129.8	210	-27.01	-224
69	6.8	129.8	208	-27.07	-226

ANEXO 4 - EJEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B4H3

LN	T.TOT.	P.N.	DAXIAL	SGLEFT	SGRIGHT
1	0	.037	0	.963	.963
2	.353	.05	.045	1.303	.95
3	.537	.067	.107	1.47	.933
4	.659	.085	.175	1.574	.915
5	.762	.103	.245	1.659	.897
6	.841	.12	.318	1.721	.88
7	.905	.136	.392	1.769	.864
8	.965	.15	.466	1.815	.85
9	1.013	.164	.542	1.849	.836
10	1.052	.175	.618	1.877	.825
11	1.104	.187	.693	1.917	.813
12	1.146	.198	.77	1.948	.802
13	1.181	.207	.847	1.974	.793
14	1.207	.214	.924	1.993	.786
15	1.242	.221	1.001	2.021	.779
16	1.268	.227	1.079	2.041	.773
17	1.292	.232	1.157	2.06	.768
18	1.321	.236	1.235	2.085	.764
19	1.35	.241	1.312	2.109	.759
20	1.366	.244	1.391	2.122	.756
21	1.4	.247	1.468	2.153	.753
22	1.411	.25	1.547	2.161	.75
23	1.438	.253	1.625	2.185	.747
24	1.457	.254	1.704	2.203	.746
25	1.473	.256	1.782	2.217	.744
26	1.5	.257	1.86	2.243	.743
27	1.514	.259	1.939	2.255	.741
28	1.544	.259	2.017	2.285	.741
29	1.558	.26	2.096	2.298	.74
30	1.576	.26	2.174	2.316	.74
31	1.599	.261	2.252	2.338	.739
32	1.617	.261	2.331	2.356	.739
33	1.634	.261	2.41	2.373	.739
34	1.648	.26	2.489	2.388	.74
35	1.662	.26	2.568	2.402	.74
36	1.687	.26	2.645	2.427	.74
37	1.702	.26	2.724	2.442	.74
38	1.715	.259	2.803	2.456	.741
39	1.73	.258	2.882	2.472	.742
40	1.761	.258	2.959	2.503	.742
41	1.766	.257	3.039	2.509	.743
42	1.78	.256	3.118	2.524	.744
43	1.793	.255	3.197	2.538	.745
44	1.823	.255	3.275	2.568	.745
45	1.827	.253	3.355	2.574	.747
46	1.835	.252	3.434	2.583	.748
47	1.848	.251	3.513	2.597	.749
48	1.854	.25	3.593	2.604	.75
49	1.866	.249	3.672	2.617	.751
50	1.874	.247	3.752	2.627	.753
51	1.88	.246	3.832	2.634	.754
52	1.89	.244	3.911	2.646	.756
53	1.899	.242	3.99	2.657	.758
54	1.905	.24	4.07	2.665	.76
55	1.911	.239	4.15	2.672	.761
56	1.92	.237	4.229	2.683	.763
57	1.932	.235	4.309	2.697	.765
58	1.94	.233	4.388	2.707	.767
59	1.942	.23	4.468	2.712	.77
60	1.941	.228	4.549	2.713	.772

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

61	1.946	.226	4.629	2.72	.774
62	1.951	.224	4.708	2.727	.776
63	1.949	.221	4.789	2.728	.779
64	1.955	.219	4.869	2.736	.781
65	1.953	.217	4.949	2.736	.783
66	1.956	.214	5.03	2.742	.786
67	1.954	.212	5.11	2.742	.788
68	1.952	.21	5.191	2.742	.79
69	1.95	.208	5.271	2.742	.792

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B4H3

LN	DAXIAL	DVOL	DRAD	DRA-V	DRA/DAX	NI VOL
1	0	0	0	0	0	0
2	.045	7E-03	-.055	-.019	1.226	.423
3	.107	.051	-.082	-.028	.772	.26
4	.175	.07	-.11	-.052	.628	.299
5	.245	.09	-.137	-.078	.561	.316
6	.318	.105	-.22	-.106	.692	.334
7	.392	.121	-.261	-.135	.667	.345
8	.466	.133	-.288	-.167	.619	.358
9	.542	.136	-.33	-.203	.609	.375
10	.618	.152	-.385	-.233	.622	.377
11	.693	.159	-.426	-.267	.614	.385
12	.77	.157	-.481	-.306	.625	.398
13	.847	.161	-.543	-.343	.641	.405
14	.924	.164	-.584	-.38	.632	.411
15	1.001	.167	-.632	-.417	.631	.417
16	1.079	.166	-.687	-.457	.636	.423
17	1.157	.16	-.742	-.498	.641	.431
18	1.235	.159	-.797	-.538	.645	.436
19	1.312	.158	-.838	-.577	.639	.44
20	1.391	.157	-.879	-.617	.632	.444
21	1.468	.156	-.948	-.656	.646	.447
22	1.547	.155	-1.003	-.696	.648	.45
23	1.625	.145	-1.044	-.74	.642	.455
24	1.704	.149	-1.092	-.778	.641	.456
25	1.782	.143	-1.14	-.82	.64	.46
26	1.86	.138	-1.209	-.861	.65	.463
27	1.939	.132	-1.25	-.903	.645	.466
28	2.017	.123	-1.319	-.947	.654	.47
29	2.096	.117	-1.367	-.989	.652	.472
30	2.174	.112	-1.429	-1.031	.657	.474
31	2.252	.106	-1.477	-1.073	.656	.476
32	2.331	.101	-1.539	-1.115	.66	.478
33	2.41	.091	-1.607	-1.159	.667	.481
34	2.489	.086	-1.648	-1.201	.662	.483
35	2.568	.076	-1.703	-1.246	.663	.485
36	2.645	.071	-1.786	-1.287	.675	.487
37	2.724	.066	-1.841	-1.329	.676	.488
38	2.803	.056	-1.896	-1.374	.676	.49
39	2.882	.046	-1.964	-1.418	.682	.492
40	2.959	.045	-2.013	-1.457	.68	.492
41	3.039	.031	-2.081	-1.504	.685	.495
42	3.118	.026	-2.143	-1.546	.687	.496
43	3.197	.012	-2.205	-1.593	.69	.498
44	3.275	6E-03	-2.26	-1.634	.69	.499
45	3.355	-3E-03	-2.322	-1.679	.692	.5
46	3.434	-.013	-2.37	-1.723	.69	.502
47	3.513	-.022	-2.438	-1.768	.694	.503
48	3.593	-.023	-2.5	-1.808	.696	.503
49	3.672	-.041	-2.541	-1.857	.692	.506
50	3.752	-.047	-2.576	-1.899	.687	.506
51	3.832	-.056	-2.624	-1.944	.685	.507
52	3.911	-.066	-2.665	-1.988	.681	.508
53	3.99	-.075	-2.72	-2.033	.682	.509
54	4.07	-.085	-2.768	-2.077	.68	.51
55	4.15	-.099	-2.816	-2.124	.679	.512
56	4.229	-.108	-2.864	-2.169	.677	.513
57	4.309	-.113	-2.912	-2.211	.676	.513
58	4.388	-.127	-2.94	-2.258	.67	.515
59	4.468	-.137	-2.981	-2.303	.667	.515

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

60	4.549	-.146	-3.015	-2.348	.663	.516
61	4.629	-.151	-3.043	-2.39	.657	.516
62	4.708	-.165	-3.07	-2.437	.652	.518
63	4.789	-.183	-3.111	-2.486	.65	.519
64	4.869	-.184	-3.132	-2.527	.643	.519
65	4.949	-.198	-3.166	-2.574	.64	.52
66	5.03	-.212	-3.187	-2.621	.634	.521
67	5.11	-.221	-3.215	-2.666	.629	.522
68	5.191	-.235	-3.242	-2.713	.625	.523
69	5.271	-.249	-3.256	-2.76	.618	.524

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

C P - B4H3
 GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.AXIAL
 Esc.DIF.TEN.=300 KPA Esc. def.axial = 10%

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.RADIAL
 Esc.DIF.TENS.= 300 KPA Esc. def.RADIAL= -10%

GRAFICO PRESSAO NEUTRA X DEF.AXIAL
 Esc.P.NEUTRA = 300KPA Esc. def.AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

C P - B4H3

GRAFICO 801 EFETIVO X 803 EFETIVO
 Esc. TENSÕES = 300KPA

GRAFICO D. VOL X D. AXIAL
 GRAFICO D. VOL X D. RADIAL
 ESCALA D. VOL = 3% ESCALA D. RAD, D. AX = 10%

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEF. RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
 ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL B3H1

SIGMA 3 = 150 Kpa

DADOS DO C.P.

D= 48.8MM h=126MM VO= 235.668 CM3
 WI=36.38 % Cte mola=.2941 MASSA ESP.=1.846 G/CM3
 WF=33.19 % TEMPO CONF=26 H SR= 99%
 TENSÃO VERT.ADS.= 500KPA TENSÃO LAT.ADS.= 280 KPA
 VARIACAO D CONF.= .253 MM VARIACAO H CONF.=1.302 MM
 VOLUME DRENADO = 6.4 CM3 VARIACAO VOL. CONF.= 4.85 CM3

DADOS DO ENSAIO

LN	LP	LMOL	LU	LVOL	LRAD
1	0	0	50	-4.61	426
2	.1	12.5	58	-4.6	424
3	.2	19	67	-4.59	420
4	.3	23.2	77	-4.59	417
5	.4	27.2	89	-4.57	412
6	.5	30	102	-4.57	409
7	.6	33.1	113	-4.56	408
8	.7	35.5	126	-4.55	403
9	.8	38	139	-4.54	400
10	.9	40	151	-4.55	397
11	1	42.2	166	-4.54	392
12	1.1	44.2	178	-4.54	389
13	1.2	46.2	192	-4.54	383
14	1.3	47.8	205	-4.54	380
15	1.4	49.5	218	-4.54	373
16	1.5	51.5	231	-4.54	369
17	1.6	52.5	244	-4.54	366
18	1.7	53.5	257	-4.54	361
19	1.8	55.5	270	-4.54	357
20	1.9	56.8	281	-4.55	352
21	2	58	295	-4.55	346
22	2.1	59	306	-4.56	340
23	2.2	60.2	318	-4.56	338
24	2.3	61.2	330	-4.58	332
25	2.4	62.8	342	-4.59	328
26	2.5	63	352	-4.6	322
27	2.6	64.8	364	-4.6	315
28	2.7	66.12	374	-4.62	310
29	2.8	67	385	-4.63	306
30	2.9	68	397	-4.65	299
31	3	68.8	405	-4.66	295
32	3.1	69.5	415	-4.67	290
33	3.2	70.2	425	-4.69	284
34	3.3	71	434	-4.7	278
35	3.4	72	443	-4.73	271
36	3.5	72.8	452	-4.74	267
37	3.6	73.5	460	-4.76	260
38	3.7	74.2	469	-4.79	255
39	3.8	75	477	-4.81	247
40	3.9	76	484	-4.84	242
41	4	76.5	492	-4.86	237
42	4.1	77.2	500	-4.88	229
43	4.2	78	508	-4.91	222
44	4.3	78.8	514	-4.92	216
45	4.4	78.2	521	-4.95	210
46	4.5	80	527	-4.98	205
47	4.6	80.8	534	-5	198
48	4.7	81.2	540	-5.03	190
49	4.8	82	546	-5.05	184

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

50	4.9	82.8	551	-5.08	177
51	5	82.5	557	-5.1	170
52	5.1	84	562	-5.14	165
53	5.2	85	568	-5.17	156
54	5.3	85.5	572	-5.2	150
55	5.4	86	577	-5.23	142
56	5.5	86.8	582	-5.25	135
57	5.6	87.2	586	-5.29	129
58	5.7	88.2	591	-5.31	122
59	5.8	88.8	595	-5.35	113
60	5.9	89	598	-5.37	108
61	6	89.9	602	-5.4	101
62	6.1	90.2	606	-5.43	96
63	6.2	90.8	610	-5.47	88
64	6.3	91.2	613	-5.49	81
65	6.4	92	616	-5.53	72
66	6.5	92.8	619	-5.56	63
67	6.6	93.2	622	-5.59	55
68	6.7	93.5	625	-5.63	45
69	6.8	94.2	628	-5.66	37
70	6.9	94.8	631	-5.7	30
71	7	95.2	633	-5.72	22
72	7.1	96	636	-5.76	12
73	7.2	96.2	639	-5.79	5
74	7.3	96.8	641	-5.84	-3
75	7.4	98.2	643	-5.86	-15
76	7.5	98.2	645	-5.91	-22
77	7.6	98.5	647	-5.93	-29
78	7.7	99.2	649	-5.96	-38
79	7.8	99.5	650	-6	-47
80	7.9	100	652	-6.03	-54
81	8	100.2	653	-6.06	-63
82	8.1	101	655	-6.11	-75
83	8.2	101.2	656	-6.14	-80
84	8.3	101.8	657	-6.17	-88
85	8.4	102	659	-6.21	-96
86	8.5	102.5	660	-6.25	-108
87	8.6	103	661	-6.29	-118
88	8.7	103.2	662	-6.33	-126
89	8.8	103.8	663	-6.37	-136
90	8.9	104.2	664	-6.4	-145
91	9	104.8	665	-6.43	-154
92	9.1	105.1	666	-6.47	-163
93	9.2	105.8	667	-6.52	-175
94	9.3	106	667	-6.56	-181
95	9.4	106.5	668	-6.6	-190
96	9.5	107	669	-6.63	-200
97	9.6	107.5	669	-6.67	-208
98	9.7	108	669	-6.71	-220
99	9.8	108.5	669	-6.76	-230
100	9.9	109	670	-6.79	-238

RESULTADOS - B3H1

LN	T.TOT.	P.N.	DAXIAL	801EFT	803EFT
1	0	.05	0	1.45	1.45
2	.199	.058	.06	1.641	1.442
3	.302	.067	.13	1.735	1.433
4	.368	.077	.203	1.791	1.423
5	.431	.089	.277	1.842	1.411
6	.475	.102	.353	1.873	1.398
7	.524	.113	.428	1.911	1.387
8	.562	.126	.504	1.936	1.374
9	.601	.139	.581	1.962	1.361
10	.632	.151	.658	1.981	1.349
11	.667	.166	.734	2.001	1.334
12	.698	.178	.811	2.02	1.322
13	.729	.192	.888	2.037	1.308
14	.753	.205	.966	2.048	1.295
15	.78	.218	1.043	2.062	1.282
16	.811	.231	1.12	2.08	1.269
17	.826	.244	1.199	2.082	1.256
18	.841	.257	1.277	2.084	1.243
19	.872	.27	1.354	2.102	1.23
20	.892	.281	1.433	2.111	1.219
21	.91	.295	1.511	2.115	1.205
22	.925	.306	1.589	2.119	1.194
23	.943	.318	1.668	2.125	1.182
24	.958	.33	1.746	2.128	1.17
25	.982	.342	1.824	2.14	1.158
26	.985	.352	1.904	2.133	1.148
27	1.012	.364	1.981	2.148	1.136
28	1.032	.374	2.059	2.158	1.126
29	1.045	.385	2.138	2.16	1.115
30	1.06	.397	2.217	2.163	1.103
31	1.072	.405	2.295	2.167	1.095
32	1.082	.415	2.375	2.167	1.085
33	1.092	.425	2.454	2.167	1.075
34	1.103	.434	2.533	2.169	1.066
35	1.118	.443	2.611	2.175	1.057
36	1.13	.452	2.69	2.178	1.048
37	1.14	.46	2.769	2.18	1.04
38	1.149	.469	2.848	2.18	1.031
39	1.161	.477	2.927	2.184	1.023
40	1.175	.484	3.006	2.191	1.016
41	1.182	.492	3.085	2.19	1.008
42	1.192	.5	3.164	2.192	1
43	1.204	.508	3.243	2.196	.992
44	1.215	.514	3.322	2.201	.986
45	1.205	.521	3.403	2.184	.979
46	1.231	.527	3.48	2.204	.973
47	1.243	.534	3.559	2.209	.966
48	1.248	.54	3.639	2.208	.96
49	1.259	.546	3.718	2.213	.954
50	1.27	.551	3.797	2.219	.949
51	1.265	.557	3.877	2.208	.943
52	1.287	.562	3.955	2.225	.938
53	1.301	.568	4.034	2.233	.932
54	1.307	.572	4.113	2.235	.928
55	1.314	.577	4.193	2.237	.923
56	1.325	.582	4.271	2.243	.918
57	1.33	.586	4.351	2.244	.914
58	1.344	.591	4.43	2.253	.909
59	1.352	.595	4.509	2.257	.905
60	1.354	.598	4.589	2.256	.902

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

61	1.367	.602	4.667	2.265	.898
62	1.37	.606	4.747	2.264	.894
63	1.378	.61	4.826	2.268	.89
64	1.383	.613	4.906	2.27	.887
65	1.394	.616	4.985	2.278	.884
66	1.405	.619	5.064	2.286	.881
67	1.41	.622	5.143	2.288	.878
68	1.413	.625	5.223	2.288	.875
69	1.422	.628	5.302	2.294	.872
70	1.43	.631	5.381	2.299	.869
71	1.435	.633	5.461	2.302	.867
72	1.446	.636	5.54	2.31	.864
73	1.448	.639	5.62	2.309	.861
74	1.455	.641	5.699	2.314	.859
75	1.475	.643	5.777	2.332	.857
76	1.474	.645	5.857	2.329	.855
77	1.477	.647	5.937	2.33	.853
78	1.486	.649	6.016	2.337	.851
79	1.49	.65	6.096	2.34	.85
80	1.496	.652	6.175	2.344	.848
81	1.497	.653	6.255	2.344	.847
82	1.508	.655	6.334	2.353	.845
83	1.51	.656	6.414	2.354	.844
84	1.517	.657	6.493	2.36	.843
85	1.519	.659	6.573	2.36	.841
86	1.525	.66	6.652	2.365	.84
87	1.531	.661	6.731	2.37	.839
88	1.533	.662	6.811	2.371	.838
89	1.54	.663	6.891	2.377	.837
90	1.545	.664	6.97	2.381	.836
91	1.552	.665	7.049	2.387	.835
92	1.555	.666	7.129	2.389	.834
93	1.564	.667	7.208	2.397	.833
94	1.566	.667	7.288	2.399	.833
95	1.572	.668	7.367	2.404	.832
96	1.578	.669	7.447	2.409	.831
97	1.584	.669	7.526	2.415	.831
98	1.59	.669	7.606	2.421	.831
99	1.595	.669	7.685	2.426	.831
100	1.601	.67	7.764	2.431	.83

RESULTADOS - B3H1

LN	DAXIAL	DVOL	DRAD	DRA-V	DRA/DAX	NI VOL
1	0	0	0	0	0	0
2	.06	.014	-.014	-.023	.228	.387
3	.13	.029	-.041	-.051	.317	.39
4	.203	.04	-.062	-.082	.304	.402
5	.277	.06	-.096	-.109	.347	.392
6	.353	.072	-.117	-.141	.331	.399
7	.428	.087	-.124	-.17	.289	.398
8	.504	.103	-.158	-.2	.313	.397
9	.581	.119	-.179	-.231	.307	.397
10	.658	.127	-.199	-.265	.303	.403
11	.734	.143	-.233	-.296	.318	.403
12	.811	.155	-.254	-.328	.313	.405
13	.888	.167	-.295	-.361	.332	.406
14	.966	.179	-.316	-.394	.327	.408
15	1.043	.191	-.364	-.426	.349	.409
16	1.12	.202	-.391	-.459	.349	.41
17	1.199	.214	-.412	-.492	.344	.411
18	1.277	.227	-.446	-.525	.349	.411
19	1.354	.238	-.474	-.558	.35	.412
20	1.433	.246	-.508	-.593	.355	.414
21	1.511	.258	-.549	-.626	.364	.415
22	1.589	.266	-.59	-.662	.372	.416
23	1.668	.278	-.604	-.695	.362	.417
24	1.746	.281	-.645	-.733	.37	.419
25	1.824	.289	-.673	-.768	.369	.421
26	1.904	.297	-.714	-.804	.375	.422
27	1.981	.309	-.762	-.836	.385	.422
28	2.059	.312	-.796	-.874	.387	.424
29	2.138	.32	-.824	-.909	.385	.425
30	2.217	.323	-.872	-.947	.393	.427
31	2.295	.331	-.899	-.982	.392	.428
32	2.375	.339	-.934	-1.018	.393	.429
33	2.454	.342	-.975	-1.056	.397	.43
34	2.533	.35	-1.016	-1.091	.401	.431
35	2.611	.349	-1.064	-1.131	.408	.433
36	2.69	.357	-1.092	-1.167	.406	.434
37	2.769	.36	-1.14	-1.204	.412	.435
38	2.848	.359	-1.174	-1.244	.412	.437
39	2.927	.363	-1.229	-1.282	.42	.438
40	3.006	.362	-1.263	-1.322	.42	.44
41	3.085	.365	-1.298	-1.36	.421	.441
42	3.164	.369	-1.353	-1.398	.427	.442
43	3.243	.368	-1.401	-1.437	.432	.443
44	3.322	.376	-1.442	-1.473	.434	.443
45	3.403	.375	-1.483	-1.514	.436	.445
46	3.48	.374	-1.517	-1.553	.436	.446
47	3.559	.378	-1.565	-1.591	.44	.447
48	3.639	.377	-1.62	-1.631	.445	.448
49	3.718	.38	-1.662	-1.669	.447	.449
50	3.797	.379	-1.71	-1.709	.45	.45
51	3.877	.383	-1.758	-1.747	.453	.451
52	3.955	.378	-1.792	-1.789	.453	.452
53	4.034	.377	-1.854	-1.828	.46	.453
54	4.113	.376	-1.895	-1.869	.461	.454
55	4.193	.375	-1.95	-1.909	.465	.455
56	4.271	.379	-1.998	-1.946	.468	.456
57	4.351	.374	-2.039	-1.989	.469	.457
58	4.43	.377	-2.087	-2.026	.471	.457
59	4.509	.372	-2.149	-2.048	.472	.458

ANEXO 4- EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

60	4.589	.375	-2.183	-2.107	.476	.459
61	4.667	.374	-2.232	-2.146	.478	.46
62	4.747	.374	-2.266	-2.187	.477	.461
63	4.826	.369	-2.321	-2.229	.481	.462
64	4.906	.372	-2.369	-2.267	.483	.462
65	4.985	.367	-2.431	-2.309	.488	.463
66	5.064	.366	-2.492	-2.349	.492	.464
67	5.143	.365	-2.547	-2.389	.495	.464
68	5.223	.36	-2.616	-2.431	.501	.466
69	5.302	.359	-2.671	-2.471	.504	.466
70	5.381	.354	-2.719	-2.514	.505	.467
71	5.461	.358	-2.774	-2.552	.508	.467
72	5.54	.352	-2.843	-2.594	.513	.468
73	5.62	.352	-2.891	-2.634	.514	.469
74	5.699	.342	-2.946	-2.678	.517	.47
75	5.777	.346	-3.028	-2.716	.524	.47
76	5.857	.336	-3.076	-2.76	.525	.471
77	5.937	.34	-3.124	-2.798	.526	.471
78	6.016	.339	-3.186	-2.838	.53	.472
79	6.096	.334	-3.248	-2.881	.533	.473
80	6.175	.333	-3.296	-2.921	.534	.473
81	6.255	.332	-3.358	-2.961	.537	.473
82	6.334	.323	-3.44	-3.005	.543	.475
83	6.414	.322	-3.474	-3.046	.542	.475
84	6.493	.321	-3.529	-3.086	.544	.475
85	6.573	.316	-3.584	-3.128	.545	.476
86	6.652	.311	-3.667	-3.171	.551	.477
87	6.731	.306	-3.735	-3.213	.555	.477
88	6.811	.301	-3.79	-3.255	.556	.478
89	6.891	.296	-3.859	-3.297	.56	.479
90	6.97	.295	-3.921	-3.338	.562	.479
91	7.049	.294	-3.982	-3.378	.565	.479
92	7.129	.289	-4.044	-3.42	.567	.48
93	7.208	.279	-4.127	-3.464	.572	.481
94	7.288	.274	-4.168	-3.507	.572	.481
95	7.367	.269	-4.23	-3.549	.574	.482
96	7.447	.268	-4.298	-3.589	.577	.482
97	7.526	.263	-4.353	-3.631	.578	.483
98	7.606	.258	-4.436	-3.674	.583	.483
99	7.685	.249	-4.504	-3.718	.586	.484
100	7.764	.248	-4.559	-3.758	.587	.484

CP - B3H1
 GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.AXIAL
 Esc.DIF.TEN.=300 KPA Esc. def.axial = 10%

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.RADIAL
 Esc.DIF.TENS.= 300 KPA Esc. def.RADIAL= -10%

GRAFICO PRESSAO NEUTRA X DEF.AXIAL
 Esc.P.NEUTRA = 300KPA Esc. def.AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

C P - B3H1

GRAFICO S61 EFETIVO X S63 EFETIVO
 Esc. TENSÕES = 300KPA

GRAFICO D. VOL X D. AXIAL
 GRAFICO D. VOL X D. RADIAL
 ESCALA D. VOL = 3% ESCALA D. RAD, D. AX = 10%

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEF. RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
 ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL B2I2

SIGMA 3 = 200 KPa

DADOS DO C.P.

D= 50MM h=125.4MM VD= 246.223 CM3
 WI=36.33 % Cte molh=.287 MASSA ESP.=1.872 G/CM3
 WF=35.69 % TEMPO CONF=46.5 H BR= 100%
 TENSÃO VERT.ADS.= 400 KPA TENSÃO LAT.ADS. = 210 KPA
 VARIACAO D CONF.= .063 MM VARIACAO H CONF.=.904 MM
 VOLUME DRENADO = 4.55 CM3 VARIACAO VOL. CONF.= 2.328 CM3

DADOS DO ENSAIO

LN	LP	LMOL	LU	LVOL	LRAD
1	0	0	18	252	-37
2	.1	9	18	251	-37
3	.2	26	19	251	-39
4	.3	38	20	251	-43
5	.4	47	21	251	-49
6	.5	54.5	21	251	-54
7	.6	60	22	251	-58
8	.7	65	23	251	-63
9	.8	69.5	24	251	-69
10	.9	73	25	251	-76
11	1	76.2	25	251	-81
12	1.3	84	27	251	-97
13	1.5	90.5	29	251	-115
14	1.8	94	30	251	-132
15	2	98.5	32	251	-149
16	2.3	100	33	251	-150
17	2.5	104.2	35	250	-185
18	2.8	107	36	250	-203
19	3	109.2	37	250	-222
20	3.3	112	38	250	-241
21	3.5	114	40	249	-261
22	3.8	115.2	41	249	-283
23	4	117	42	249	-302
24	4.5	119.5	44	248	-344
25	5	122	46	247	-386
26	5.5	124	48	246	-432
27	6	126	50	244	-482
28	6.5	127.5	51	243	-532
29	7	129.2	53	241	-584
30	7.5	131	55	240	-640
31	8	133	57	239	-697
32	8.5	134.2	58	238	-755
33	9	135	60	236	-819
34	9.5	136	61	234	-882
35	10	136.2	63	232	-935
36	10.5	136.2	64	230	-986
37	11	136	65	229	-1020
38	11.5	136	67	227	-1050
39	12	134	68	225	-1077
40	13	130.5	69	223	-1092

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B212

LN	T.TOT.	P.N.	DAXIAL	801EFT	803EFT
1	0	.18	0	1.82	1.82
2	.132	.18	.066	1.952	1.82
3	.38	.19	.119	2.19	1.81
4	.556	.2	.18	2.356	1.8
5	.687	.21	.246	2.477	1.79
6	.796	.21	.314	2.586	1.79
7	.876	.22	.386	2.656	1.78
8	.948	.23	.458	2.718	1.77
9	1.013	.24	.531	2.773	1.76
10	1.064	.25	.606	2.814	1.75
11	1.11	.25	.681	2.86	1.75
12	1.221	.27	.869	2.951	1.73
13	1.314	.29	1.059	3.024	1.71
14	1.362	.3	1.255	3.062	1.7
15	1.425	.32	1.448	3.105	1.68
16	1.444	.33	1.647	3.114	1.67
17	1.502	.35	1.841	3.152	1.65
18	1.539	.36	2.037	3.179	1.64
19	1.568	.37	2.234	3.198	1.63
20	1.606	.38	2.431	3.226	1.62
21	1.631	.4	2.628	3.231	1.6
22	1.645	.41	2.827	3.235	1.59
23	1.668	.42	3.025	3.248	1.58
24	1.697	.44	3.423	3.257	1.56
25	1.725	.46	3.82	3.265	1.54
26	1.747	.48	4.219	3.267	1.52
27	1.767	.5	4.617	3.267	1.5
28	1.781	.51	5.016	3.271	1.49
29	1.797	.53	5.415	3.267	1.47
30	1.814	.55	5.814	3.264	1.45
31	1.835	.57	6.212	3.265	1.43
32	1.844	.58	6.612	3.264	1.42
33	1.846	.6	7.012	3.246	1.4
34	1.851	.61	7.412	3.241	1.39
35	1.846	.63	7.814	3.216	1.37
36	1.837	.64	8.215	3.197	1.36
37	1.827	.65	8.617	3.177	1.35
38	1.818	.67	9.019	3.148	1.33
39	1.783	.68	9.424	3.103	1.32
40	1.722	.69	10.232	3.032	1.31

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B212

LN	DAXIAL	DVOL	DRAD	DRA-V	DRA/DAX	NI VOL
1	0	0	0	0	0	0
2	.066	-.031	0	-.049	0	.739
3	.119	-.024	-.013	-.071	.112	.6
4	.18	-.015	-.04	-.097	.223	.541
5	.246	-5E-03	-.08	-.126	.326	.511
6	.314	5E-03	-.113	-.155	.361	.493
7	.386	.015	-.14	-.185	.364	.481
8	.458	.025	-.174	-.216	.379	.472
9	.531	.036	-.214	-.247	.402	.466
10	.606	.047	-.26	-.279	.43	.461
11	.681	.058	-.294	-.312	.431	.458
12	.869	.085	-.401	-.392	.461	.451
13	1.059	.113	-.521	-.473	.491	.447
14	1.255	.141	-.634	-.557	.505	.444
15	1.448	.169	-.748	-.64	.516	.442
16	1.647	.198	-.754	-.724	.458	.44
17	1.841	.185	-.988	-.828	.537	.45
18	2.037	.214	-1.108	-.912	.544	.448
19	2.234	.242	-1.235	-.996	.553	.446
20	2.431	.271	-1.362	-1.08	.56	.444
21	2.628	.258	-1.495	-1.185	.569	.451
22	2.827	.287	-1.642	-1.27	.581	.449
23	3.025	.316	-1.769	-1.355	.585	.448
24	3.423	.333	-2.049	-1.545	.599	.451
25	3.82	.349	-2.33	-1.735	.61	.454
26	4.219	.366	-2.637	-1.926	.625	.457
27	4.617	.342	-2.97	-2.138	.643	.463
28	5.016	.359	-3.304	-2.329	.659	.464
29	5.415	.335	-3.651	-2.54	.674	.469
30	5.814	.352	-4.025	-2.731	.692	.47
31	6.212	.368	-4.406	-2.922	.709	.47
32	6.612	.385	-4.793	-3.113	.725	.471
33	7.012	.362	-5.22	-3.325	.744	.474
34	7.412	.338	-5.64	-3.537	.761	.477
35	7.814	.314	-5.994	-3.75	.767	.48
36	8.215	.29	-6.335	-3.963	.771	.482
37	8.617	.307	-6.562	-4.155	.761	.482
38	9.019	.284	-6.762	-4.368	.75	.484
39	9.424	.26	-6.942	-4.582	.737	.486
40	10.232	.296	-7.042	-4.968	.688	.486

C P - B212

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.AXIAL

Esc.DIF.TEN.=300 KPA

Esc. def.axial = 10%

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.RADIAL

Esc.DIF.TENS.= 300 KPA

Esc. def.RADIAL= -10%

GRAFICO PRESSAO NEUTRA X DEF.AXIAL

Esc.P.NEUTRA = 300KPA

Esc. def.AXIAL = 10%

C P - B212

GRAFICO S61 EFETIVO X S63 EFETIVO
Esc. TENSÕES = 300KPA

GRAFICO D. VOL X D. AXIAL
GRAFICO D. VOL X D. RADIAL
ESCALA D. VOL = 3% ESCALA D. RAD, D. AX = 10%

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
GRAFICO DEF. RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL B1V3
SIGMA 3 = 150 KPa

DADOS DO C.P.

D= 50.2MM h=124.4MM VD= 246.217 CM3
 WI=37.18 % Cte mola=.287 MASSA ESP.=1.886 G/CM3
 WF=35.95 % TEMPO CONF=24 H BR= 100%
 TENSÃO VERT.ADS.= 400 KPA TENSÃO LAT.ADS. = 200 KPA
 VARIACAO D CONF.= .057 MM VARIACAO H CONF.=.484 MM
 VOLUME DRENADO = 2.45 CM3 VARIACAO VOL. CONF.= 1.51 CM3

DADOS DO ENSAIO

LN	LP	LMOL	LU	LVOL	LRAD
1	0	0	14	256	25
2	.1	4	15	256	25
3	.2	8	16	256	24
4	.3	12	17	256	23
5	.4	16	18	256	22
6	.5	21	19	256	21
7	.6	25	20	256	20
8	.7	30	21	256	19
9	.8	34	22	256	16
10	.9	42	23	256	11
11	1	49	24	256	7
12	1.3	64	25	256	-9
13	1.5	74	28	256	-26
14	1.8	83	31	256	-44
15	2	89	34	255	-59
16	2.3	96	37	255	-79
17	2.5	101	39	255	-96
18	2.8	105.2	41	255	-114
19	3	109	43	255	-134
20	3.3	112	45	254	-156
21	3.5	114.5	47	253	-181
22	3.8	116.2	49	253	-201
23	4	118.2	50	252	-224
24	4.5	120.5	53	251	-269
25	5	122	55	250	-316
26	5.5	122.5	56	249	-370
27	6	123.5	59	247	-430
28	6.5	124	60	246	-490
29	7	124.5	61	244	-549
30	7.5	124.5	62	242	-607
31	8	124.5	63	241	-665
32	8.5	124.5	64	240	-718
33	9	124.2	64	238	-781
34	9.5	124	64	237	-846
35	10	123.5	65	235	-920
36	10.5	122.5	65	233	-992

ANEXO 4 - EXEMPLOS DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B1V3

LN	T.TOT.	P.N.	DAXIAL	SG1EFT	SG3EFT
1	0	.14	0	1.36	1.36
2	.058	.15	.074	1.408	1.35
3	.116	.16	.148	1.456	1.34
4	.174	.17	.223	1.504	1.33
5	.232	.18	.297	1.552	1.32
6	.304	.19	.37	1.614	1.31
7	.362	.2	.444	1.662	1.3
8	.434	.21	.516	1.724	1.29
9	.492	.22	.591	1.772	1.28
10	.607	.23	.659	1.877	1.27
11	.708	.24	.728	1.968	1.26
12	.923	.25	.905	2.173	1.25
13	1.065	.28	1.091	2.285	1.22
14	1.193	.31	1.278	2.383	1.19
15	1.277	.34	1.47	2.437	1.16
16	1.375	.37	1.661	2.505	1.13
17	1.444	.39	1.854	2.554	1.11
18	1.501	.41	2.049	2.591	1.09
19	1.553	.43	2.245	2.623	1.07
20	1.592	.45	2.442	2.642	1.05
21	1.624	.47	2.64	2.654	1.03
22	1.646	.49	2.839	2.656	1.01
23	1.67	.5	3.037	2.67	1
24	1.696	.53	3.437	2.666	.97
25	1.71	.55	3.838	2.66	.95
26	1.71	.56	4.241	2.65	.94
27	1.717	.59	4.643	2.627	.91
28	1.717	.6	5.045	2.617	.9
29	1.716	.61	5.448	2.606	.89
30	1.708	.62	5.852	2.588	.88
31	1.701	.63	6.255	2.571	.87
32	1.694	.64	6.659	2.554	.86
33	1.682	.64	7.063	2.542	.86
34	1.673	.64	7.466	2.533	.86
35	1.658	.65	7.871	2.508	.85
36	1.637	.65	8.276	2.487	.85

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

RESULTADOS - B1V3

LN	DAXIAL	DVOL	DRAD	DRA-V	DRA/DAX	NI VOL
1	0	0	0	0	0	0
2	.074	.011	0	-.032	0	.428
3	.148	.021	-7E-03	-.064	.045	.428
4	.223	.032	-.013	-.095	.06	.428
5	.297	.043	-.02	-.127	.067	.428
6	.37	.053	-.027	-.158	.072	.428
7	.444	.064	-.033	-.19	.075	.428
8	.516	.074	-.04	-.221	.077	.428
9	.591	.085	-.06	-.253	.101	.428
10	.659	.095	-.093	-.282	.141	.428
11	.728	.105	-.12	-.312	.164	.428
12	.905	.13	-.226	-.388	.25	.428
13	1.091	.157	-.339	-.467	.311	.428
14	1.278	.184	-.459	-.547	.359	.428
15	1.47	.171	-.558	-.65	.38	.442
16	1.661	.198	-.691	-.731	.416	.44
17	1.854	.226	-.804	-.814	.434	.439
18	2.049	.254	-.924	-.898	.451	.438
19	2.245	.282	-1.057	-.981	.471	.437
20	2.442	.27	-1.203	-1.086	.493	.445
21	2.64	.257	-1.369	-1.191	.519	.451
22	2.839	.286	-1.502	-1.276	.529	.45
23	3.037	.274	-1.655	-1.382	.545	.455
24	3.437	.29	-1.954	-1.573	.569	.458
25	3.838	.307	-2.267	-1.765	.591	.46
26	4.241	.324	-2.626	-1.958	.619	.462
27	4.643	.3	-3.025	-2.171	.651	.468
28	5.045	.318	-3.424	-2.364	.679	.469
29	5.448	.294	-3.816	-2.577	.7	.473
30	5.852	.27	-4.201	-2.791	.718	.477
31	6.255	.287	-4.587	-2.984	.733	.477
32	6.659	.305	-4.939	-3.177	.742	.477
33	7.063	.281	-5.358	-3.391	.759	.48
34	7.466	.298	-5.79	-3.584	.775	.48
35	7.871	.275	-6.282	-3.798	.798	.483
36	8.276	.251	-6.761	-4.012	.817	.485

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

CP - B1V3

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.AXIAL

Esc.DIF.TEN.=300 KPA

Esc. def.axial = 10%

GRAFICO DIF. TENSOES X DEF.RADIAL

Esc.DIF.TENS.= 300 KPA

Esc. def.RADIAL= -10%

GRAFICO PRESSAO NEUTRA X DEF.AXIAL

Esc.P.NEUTRA = 300KPA

Esc. def.AXIAL = 10%

ANEXO 4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE ENSAIO

C P - B1V3

GRAFICO BG1 EFETIVO X BG3 EFETIVO
Esc. TENSDES = 300KPA

GRAFICO D. VOL X D. AXIAL
GRAFICO D. VOL X D. RADIAL
ESCALA D. VOL = 3% ESCALA D. RAD, D. AX = 10%

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
GRAFICO DEF. RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 5

Principais Variáveis Medidas na Compressão Triaxial

Parte 1

CORPO DE PROVA	$(\sigma_v - \sigma_h)_{\max}$ (kPa)	$(\sigma_v - \sigma_h)_{\text{rup}}$ (kPa)	σ_h (kPa)	u (kPa)	ϵ_v (%)	ϵ_h (%)
B6V6	182,1	182,1	100	26,7	6,032	-5,607
B6V5	137,6	137,6	50	12,2	4,606	-2,779
B6V4	152,3	152,3	50	6,5	5,154	-3,329
B6H4	178,3	-	100	35,7	5,78	-7,103
B6H3	188,8	-	100	30,1	7,506	-5,16
B6H2	131,8	-	50	5,7	6,443	-3,951
B6I3	191,7	191,7	100	27,0	7,34	-3,624
B6I2	152,4	152,4	50	1,4	6,755	-5,832
B5V4	207,1	207,1	100	18,3	4,226	-3,197
B5V3	180,0	180,0	50	3,6	3,355	-2,209
B5H3	204,8	204,8	100	13,0	6,04	-4,702
B5H4	213,6	213,6	100	12,8	5,436	-3,626
B5H2	177,8	-	50	0,0	5,255	-4,308
B5I3	229,4	229,4	100	9,8	4,949	-4,465
B5I2	179,0	179,0	50	1,4	4,330	-2,765
B4V2	193,8	193,8	100	23,2	3,907	-3,036
B4V1	149,8	149,8	50	2,7	4,256	-3,345
B4H3	195,6	-	100	21,4	5,03	-3,187
B4H2	141,2	-	50	0,0	4,914	-5,086
B4H1	210,6	-	150	46,4	6,892	-2,957
B4I2	180,6	-	100	21,4	4,188	-2,743
B4I1	160,3	160,3	50	0,0	5,285	-4,876
B3V3	179,3	179,3	150	41,9	4,944	-3,676
B3V2	185,5	185,5	150	46,5	5,070	-3,597
B3V1	171,8	171,8	150	52,1	4,319	-1,855
B3H3	157,9	-	150	69,8	7,921	-4,558
B3H2	140,3	-	150	46,0	6,503	-1,636
B3H1	156,3	-	150	67,0	7,764	-4,559
B3I3	178,8	-	150	55,6	9,406	-5,819

CORPO DE PROVA	$(\sigma_v - \sigma_h)$ max (kPa)	$(\sigma_v - \sigma_h)$ rup (kPa)	σ_h (kPa)	u (kPa)	ϵ_v (%)	ϵ_h (%)
B3I2	166,5	166,5	150	60,9	7,443	-3,483
B2V4	186,0	186,0	200	32	3,429	-2,650
B2V3	189,3	189,3	200	38	4,976	-3,847
B2V1	183,8	183,8	200	47	4,246	-3,201
B2H5	168,8	-	150	68,8	5,832	-6,257
B2H4	108,9	-	200	62	7,452	-7,706
B2H3	156,3	-	200	90	5,543	-4,956
B2H1	166,1	166,1	200	82	8,879	-6,479
B2I4	176,8	176,8	200	86	9,532	-7,647
B2I3	163,8	163,8	200	68	6,691	-3,605
B2I2	185,1	185,1	200	61	7,412	-5,64
B1V3	171,7	171,7	150	59	4,643	-3,025
B1V2	166,9	166,9	150	43	4,487	-2,499
B1V1	181,5	181,5	150	53	6,169	-7,725
B1H3	130,4	130,4	150	45	5,843	-3,869
B1H2	161,1	161,1	150	61	11,217	-8,298
B1H1	141,30	141,30	150	45	8,162	-5,301
B1I4	137,20	137,20	150	34	5,362	-4,702
B1I3	158,5	158,5	150	46	6,979	-5,066
B1I2	150,9	150,9	150	23	7,894	-8,113
B1I1	146,5	146,5	150	51	6,188	-3,233

ANEXO 5

Principais Variáveis Medidas na Compressão Triaxial

Parte 2

CORPO DE PROVA	$u_{\max}$ (kPa)	u_{ult} (kPa)	ϵ_{vol} + max. (%)	ϵ_{vol} ult. (%)
B6V6	43,4	23,2	0,217	-0,092
B6V5	18,0	10,5	0,229	-0,037
B6V4	13,7	4,1	0,209	-0,179
B6H4	41,6	35,0	0,133	-0,393
B6H3	35,5	29,1	0,264	-0,022
B6H2	10,7	5,1	0,096	-0,405
B6I3	34,4	24,8	0,284	0,033
B6I2	11,5	0,0	0,125	-0,561
B5V4	27,2	14,0	0,250	-0,078
B5V3	9,3	1,8	0,135	-0,364
B5H4	21,5	11,3	0,178	-0,467
B5H3	19,8	11,4	0,160	-0,220
B5H2	5,5	0,0	0,104	-0,434
B5I3	18,5	8,2	0,235	-0,151
B5I2	7,0	0,0	0,128	-0,407
B4V2	30,0	21,0	0,235	-0,133
B4V1	14,8	1,1	0,190	-0,387
B4H3	26,1	20,8	0,167	-0,249
B4H2	9,7	0	0,119	-0,478
B4H1	46,9	46,4	0,372	0,354
B4I2	29,6	20,6	0,153	-0,209
B4I1	8,6	0	0,094	-0,689
B3V3	43,5	43,5	0,616	0,608
B3V2	46,8	46,6	0,373	0,264
B3V1	52,4	50,4	0,337	0,247
B3H3	69,9	69,7	0,345	0,269
B3H2	46,1	46,1	0,941	0,941
B3H1	67,0	67,0	0,379	0,248
B3I3	55,9	55,6	0,472	0,294

CORPO DE PROVA	$u_{\max}$ (kPa)	u_{ult} (kPa)	ϵ_{vol} + max. (%)	ϵ_{vol} ult. (%)
B3I2	61,1	60,4	0,446	0,279
B2V4	38	38	0,441	0,441
B2V3	43	43	0,361	0,214
B2V1	51	51	0,418	0,406
B2H5	68,8	68,8	0,495	0,470
B2H4	62	62	0,426	0,347
B2H3	90	90	0,354	0,354
B2H1	84	84	0,428	0,212
B2I4	88	88	0,451	0,451
B2I3	70	70	0,450	0,450
B2I2	69	69	0,385	0,296
B1V3	65	65	0,324	0,251
B1V2	46	46	0,475	0,372
B1V1	54	54	0,446	0,379
B1H3	45	45	0,426	0,426
B1H2	62	62	0,355	0,355
B1H1	48	48	0,830	0,830
B1I4	37	37	0,488	0,463
B1I3	50	50	0,506	0,506
B1I2	24	24	0,578	0,571
B1I1	55	55	0,459	0,432

ANEXO 6

Diferença entre deformação horizontal medida pelo TDR-05/2, ϵ_h (%) e deformação horizontal calculada pela variação volumétrica, $\epsilon_{r\ vol}$ (%), em função de deformações verticais ϵ_v (%)

CP \ ϵ_v (%)	$(\epsilon_h - \epsilon_{r\ vol})$ (%)						$\epsilon_{v\ ult}$	$(\epsilon_h - \epsilon_{r\ vol})_{ult}$
	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	(%)	(%)
B6V6	0,041	0,015	-0,017	-0,178	-0,970	-2,116	7,085	-3,216
B6V5	0,001	-0,012	-0,025	-0,108	-0,429	-0,424	5,172	-0,382
B6V4	-0,018	-0,054	-0,079	-0,207	-0,619	-0,740	5,88	-0,487
B6H4	-0,032	-0,118	-0,207	-0,444	-1,604	-3,164	5,941	-4,271
B6H3	0	-0,042	-0,084	-0,180	-0,484	-0,888	7,827	-1,474
B6H2	0,016	0,024	-0,032	-0,115	-0,373	-0,598	6,684	-0,476
B6I3	0,041	0,081	0,019	-0,133	-0,903	-1,852	8,07	-3,468
B6I2	-0,031	-0,087	-0,146	-0,327	-1,025	-1,757	7,239	-2,319
B5V4	-0,022	-0,066	-0,113	-0,261	-0,813	-1,090	5,035	-1,084
B5V3	-0,020	-0,058	-0,104	-0,214	-0,513	-	3,843	-0,277
B5H4	-0,020	-0,050	-0,085	-0,156	-0,456	-0,769	5,925	-0,575
B5H3	-0,030	-0,070	-0,109	-0,223	-0,757	-1,374	6,502	-1,588
B5H2	-0,029	-0,066	-0,106	-0,263	-0,917	-1,442	5,335	1,478
B5I3	0,029	-0,009	-0,025	-0,126	-0,565	-1,168	6,514	-1,591
B4V2	-0,015	-0,054	-0,110	-0,234	-0,811	-	4,323	-1,112
B4V1	-0,014	-0,046	-0,082	-0,226	-0,855	-	4,578	-1,018
B4H3	-0,052	-0,100	-0,124	-0,215	-0,567	-0,576	5,271	-0,496
B4H2	-0,050	-0,094	-0,159	-0,439	-1,560	-2,436	5,075	-2,453
B4H1	0,005	0,024	0,007	0,010	-0,002	0,042	6,892	-0,312
B4I2	0,004	-0,027	-0,057	-0,161	-0,460	-	4,269	-0,511
B4I1	-0,022	-0,049	-0,112	-0,261	-1,179	-1,939	6,089	-1,943
B3V3	-0,007	-0,022	-0,058	-0,146	-0,664	-1,548	6,087	-2,628
B3V2	-0,024	-0,034	-0,073	-0,134	-0,482	-1,209	7,501	-1,236
B3V1	0,005	0,0	-0,005	-0,014	0,084	0,145	6,089	0,471
B3H3	-0,007	0,001	0,0	-0,002	-0,670	-0,220	8,163	-0,750
B3H2	0,012	0,010	0,023	0,053	0,200	0,517	6,584	1,186
B3H1	0,010	0,016	0,040	0,071	0,076	-0,126	7,764	-0,801
B3I3	0,007	0,018	0,003	0,001	-0,119	-0,379	9,487	-1,277
B3I2	0,016	0,019	0,038	0,05	0,002	-0,284	7,93	-1,044

CP \ ϵ_v (%)	$(\epsilon_h - \epsilon_{r \text{ vol}}) (\%)$						$\epsilon_{v \text{ ult}}$	$(\epsilon_h - \epsilon_{r \text{ vol}})_{\text{ult}}$
	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	(%)	(%)
B2V4	0,036	0,031	-0,010	-0,093	-0,927	-1,401	6,272	-1,326
B2V3	0,041	0,056	0,043	0,002	-0,411	-1,495	7,427	-2,446
B2V1	0,033	0,041	0,013	-0,069	-0,656	-1,597	6,684	-2,961
B2H5	-0,003	-0,064	-0,140	-0,404	-2,003	-4,169	5,832	-5,787
B2H4	0,034	-0,045	-0,107	-0,463	-1,432	-2,543	7,528	-4,124
B2H3	0,014	-0,037	-0,083	-0,127	-0,982	-1,852	5,621	-2,305
B2H1	0,009	-0,002	-0,009	-0,019	-0,248	-0,635	9,693	-2,754
B2I4	-0,002	0,086	0,088	0,008	-0,360	-0,999	11,157	-3,023
B2I2	0,055	0,043	0,037	-0,098	-0,342	-0,969	10,232	-2,074
B1V3	0,041	0,108	0,176	0,145	-0,264	-1,037	8,276	-2,749
B1V2	0,052	0,049	0,066	-0,035	-0,320	-0,533	7,141	-0,267
B1V1	0,031	0,006	0,010	-0,087	-0,657	-1,818	7,774	4,075
B1H3	0,022	-0,041	-0,099	-0,269	-0,701	-0,961	5,843	-1,148
B1H2	0,036	0,023	-0,019	-0,138	-0,668	-1,525	12,020	-2,472
B1H1	0,037	0,040	0,038	-0,064	-0,604	-1,163	13,024	-1,677
B1I4	0,028	0,002	-0,017	-0,083	-0,760	-1,822	7,868	-3,049
B1I3	0,0	0,013	-0,008	-0,044	-0,407	-1,268	10,607	-1,165
B1I2	0,074	0,068	0,073	0,011	-0,187	-0,571	8,691	-4,402
B1I1	0,047	0,038	-0,071	-0,024	0,163	-0,166	9,005	-2,902

ANEXO 7

Parte 1 - Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v

CORPO DE PROVA	CORRELAÇÃO LINEAR		R	ϵ_h	ϵ_h	ϵ_v	ϵ_h ult	ϵ_h ult
	a	b		med (%)	calc (%)	(%)	med (%)	calc (%)
B6V6	0,191	-0,824	0,998	-2,222	-2,136	2,824	-6,804	-5,647
B6V5	0,108	-0,648	0,999	-2,682	-2,721	4,365	-2,986	-3,243
B6V4	0,079	-0,711	0,999	-3,031	-3,072	2,840	-3,516	-4,102
B6I3	0,199	-0,779	0,997	-1,902	-1,826	2,600	-7,486	-6,088
B6I2	0,110	-0,888	0,999	-6,081	-6,174	7,077	-6,219	-6,318
B6H4	0,145	-1,061	0,999	-3,402	-3,279	3,227	-7,438	-6,158
B6H3	0,040	-0,622	1,0	-1,727	-1,713	2,819	-5,399	-4,828
B6H2	0,068	-0,639	1,0	-3,118	-3,082	4,929	-4,021	-4,203
B5V4	0,072	-0,738	0,999	-1,844	-1,811	2,551	-3,641	-3,644
B5V3	0,058	-0,728	0,999	-1,947	-1,976	2,794	-2,326	-2,74
B5I3	0,098	-0,656	0,999	-1,445	-1,408	2,296	-4,923	-4,175
B5I2	0,047	-0,670	1,0	-2,557	-2,585	3,929	-2,987	-3,341
B5H4	0,087	-0,675	0,999	-2,337	-2,288	3,518	-3,771	-3,912
B5H3	0,163	-0,804	0,999	-4,908	-4,999	6,421	-4,949	-5,065
B5H2	0,115	-0,856	1,0	-4,308	-4,383	5,255	-4,363	-4,452
B4V2	0,056	-0,695	0,999	-1,238	-1,203	1,811	-3,340	-2,948
B4V1	0,156	-0,834	0,999	-3,392	-3,460	4,336	-3,501	-3,662
B4I2	0,084	-0,673	0,999	-1,895	-1,870	2,903	-2,750	-2,789
B4I1	-0,047	-0,753	0,997	-0,870	-0,844	0,998	-5,332	-4,538
B4H3	0,010	-0,654	0,999	-1,539	-1,514	2,331	-3,256	-3,437
B4H2	0,163	-1,089	0,997	-4,866	-4,928	4,675	-5,230	-5,364
B4H1	0,052	-0,462	1,0	-2,749	-2,799	6,17	-2,957	-3,132

Parte 1 - Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v (continuação)

CORPO DE PROVA	CORRELAÇÃO LINEAR		R	ϵ_h	ϵ_h	ϵ_v	ϵ_h ult	ϵ_h ult
	a	b		med (%)	calc (%)		med (%)	calc (%)
B3V3	0,02	-0,507	0,999	-0,707	-0,697	1,414	-5,368	-3,066
B3V2	0,017	-0,545	0,999	-0,986	-0,957	1,788	-4,854	-4,071
B3V1	0,036	-0,429	0,999	-1,629	-1,611	3,838	-2,450	-2,576
B3I3	0,039	-0,430	0,998	-0,959	-0,916	2,221	-5,874	-4,040
B3I2	0,037	-0,375	0,998	-0,664	-0,646	1,820	-4,869	-2,937
B3H3	0,016	-0,437	0,998	-0,849	-0,825	1,924	-4,697	-3,551
B3H2	0,03	-0,323	1,0	-1,518	-1,524	4,810	-1,636	-2,095
B3H1	0,032	-0,384	0,997	-0,714	-0,701	1,981	-4,559	-2,949
B2V4	0,371	-0,88	0,999	-2,992	-2,996	3,835	-4,241	-5,148
B2V3	0,087	-0,569	0,999	-1,417	-1,367	2,555	-4,139	-6,058
B2V1	0,088	-0,626	0,999	-1,191	-1,214	2,043	-6,129	-4,096
B2I4	0,17	-0,612	0,999	-1,756	-1,864	3,074	-8,376	-6,658
B2I2	0,071	-0,557	0,996	-1,108	-1,064	2,037	-7,042	-5,628
B2H5	0,107	-0,755	0,998	-1,313	-1,270	1,824	-6,257	-4,296
B2H4	0,035	-1,007	1,0	-4,971	-4,937	5,132	-7,706	-7,469
B2H3	0,004	-0,768	0,998	-2,049	-1,961	2,558	-4,253	-4,956
B2H1	0,025	-0,509	0,999	-1,161	-1,127	2,263	-7,520	-4,909
B1V3	0,136	-0,625	0,998	-1,496	-1,441	2,839	-6,754	-4,839
B1V2	0,072	-0,574	0,999	-1,125	-1,114	2,067	-3,625	-3,910
B1V1	0,086	-0,634	0,998	-1,576	-1,546	2,573	-7,785	-4,892
B1I4	0,108	-0,672	0,998	-1,716	-1,646	2,610	-8,782	-5,179
B1I3	0,083	-0,597	0,999	-1,489	-1,464	2,592	-6,447	-6,224
B1I2	0,114	-0,507	0,999	-0,861	-0,847	1,896	-4,439	-3,277
B1I1	0,060	-0,318	0,963	-0,910	-0,886	2,596	-4,170	-2,547

Parte 1 - Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v (continuação)

CORPO DE PROVA	CORRELAÇÃO LINEAR		R	ϵ_h	ϵ_h	ϵ_v	ϵ_h ult	ϵ_h ult
	a	b		med (%)	calc (%)	(%)	med (%)	calc (%)
B1H3	0,049	-0,727	0,999	-1,689	-1,723	2,437	-3,869	-4,199
B1H2	0,203	-0,826	1,0	-5,116	-5,104	6,425	-8,623	-9,726
B1H1	0,146	-0,716	0,999	-4,485	-4,546	6,554	-7,836	-9,179

ANEXO 7

Parte 2 - Correlação Linear das Variáveis ϵ_r vol e ϵ_v

CORPO DE PROVA	CORRELAÇÃO LINEAR		R	ϵ_r vol	ϵ_r vol	ϵ_v	ϵ_r vol ult	ϵ_r vol ult
	a	b		med (%)	calc (%)	(%)	med (%)	calc (%)
B6V4	0,074	-0,502	0,999	-1,951	-1,910	3,952	-3,029	-2,878
B6V5	0,088	-0,502	0,999	-2,023	-2,071	4,205	-2,604	-2,508
B6V6	0,065	-0,495	0,999	-2,041	-2,041	4,181	-3,588	-3,572
B6I2	0,073	-0,524	0,999	-2,125	-2,160	4,194	-3,9	-3,720
B6I3	0,048	-0,470	0,999	-1,934	-1,887	4,118	-4,018	-3,745
B6H2	0,053	-0,514	1,0	-2,139	-2,112	4,213	-3,545	-3,383
B6H3	0,072	-0,484	0,999	-2,166	-2,135	4,56	-3,925	-3,716
B6H4	0,071	-0,522	1,0	-2,111	-2,153	4,181	-3,167	-3,030
B5V3	0,073	-0,525	0,999	-1,563	-1,520	3,034	-2,049	-1,945
B5V4	0,07	-0,483	0,999	-1,479	-1,430	3,105	-2,557	-2,362
B5I2	0,069	-0,527	0,999	-1,658	-1,623	3,211	-2,732	-2,596
B5I3	0,07	-0,498	0,998	-1,977	-1,939	4,034	-3,332	-3,174
B5H2	0,062	-0,528	0,998	-1,612	-1,584	3,117	-2,885	-2,755
B5H3	0,056	-0,494	0,999	-1,502	-1,475	3,1	-3,361	-3,156
B5H4	0,08	-0,516	0,998	-1,559	-1,486	3,122	-3,196	-2,877
B4V1	0,035	-0,447	0,997	-1,565	-1,333	3,06	-2,483	-2,011
B4V2	0,084	-0,5	0,998	-1,557	-1,501	3,17	-2,228	-2,018
B4I1	0,061	-0,533	0,999	-1,601	-1,569	3,138	-3,389	-3,189
B4I2	0,075	-0,521	0,998	-1,642	-1,603	3,221	-2,239	-2,149
B4H1	0,035	-0,451	1,0	-1,404	-1,382	3,165	-3,269	-3,073
B4H2	0,072	-0,534	0,999	-1,65	-1,618	3,165	-2,777	-2,638
B4H3	0,07	-0,508	0,997	-1,546	-1,514	3,118	-2,76	-2,608

Parte 2 - Correlação Linear das Variáveis ϵ_r vol e ϵ_v (Continuação)

CORPO DE PROVA	CORRELAÇÃO LINEAR		R	ϵ_r vol	ϵ_r vol	ϵ_v	ϵ_r vol ult	ϵ_r vol ult
	a	b		med (%)	calc (%)	(%)	med (%)	calc (%)
B3V1	0,058	-0,453	0,999	-1,396	-1,355	3,12	-2,921	-2,700
B3V2	0,045	-0,444	0,999	-1,383	-1,349	3,139	-3,618	-3,285
B3V3	0,044	-0,406	0,998	-1,247	-1,206	3,08	-2,74	-2,427
B3I2	0,047	-0,436	0,999	-1,333	-1,303	3,096	-3,825	-3,41
B3I3	0,055	-0,444	0,999	-1,799	-1,750	4,066	-4,597	-4,157
B3H1	0,043	-0,455	0,999	-1,828	-1,792	4,034	-3,758	-3,490
B3H2	0,041	-0,386	0,999	-1,159	-1,134	3,045	-2,822	-2,500
B3H3	0,046	-0,466	1,0	-1,913	-1,890	4,155	-3,947	-3,758
B2V4	0,006	-0,448	1,0	-1,533	-1,530	3,429	-2,915	-2,810
B2V3	0,006	-0,451	1,0	-1,522	-1,509	3,360	-3,612	-3,801
B2V1	0,01	-0,447	1,0	-1,553	-1,528	3,440	-3,168	-2,978
B2I4	0,006	-0,454	1,0	-2,150	-2,121	4,684	-5,353	-5,059
B2I2	0,001	-0,455	1,0	-2,329	-2,281	5,016	-4,968	-4,655
B2H5	0,025	-0,423	0,999	-1,282	-1,252	3,019	-2,681	-2,442
B2H4	0,014	-0,456	1,0	-1,970	-1,963	4,335	-3,582	-3,49
B2H3	0,001	-0,454	1,0	-1,295	-1,286	2,834	-2,651	-2,551
B2H1	0,008	-0,456	1,0	-2,053	-2,025	4,458	-4,766	-4,412
B1V3	0,019	-0,457	0,999	-1,765	-1,735	3,838	-4,012	-3,763
B1V2	0,013	-0,448	1,0	-1,329	-1,364	2,870	-3,358	-3,186
B1V1	0,001	-0,446	1,0	-1,857	-1,857	4,165	-3,710	-3,666

Parte 2 - Correlação Linear das Variáveis ϵ_r vol e ϵ_v (continuação)

CORPO DE PROVA	CORRELAÇÃO LINEAR		R	ϵ_r vol	ϵ_r vol	ϵ_v	ϵ_r vol ult	ϵ_r vol ult
	a	b		med (%)	calc (%)	(%)	med (%)	calc (%)
B1I4	0,001	-0,444	1,0	-1,517	-1,506	3,415	-3,126	-3,483
B1I3	0,007	-0,451	1,0	-2,078	-2,059	4,581	-5,064	-4,777
B1I2	0,007	-0,447	1,0	-1,908	-1,928	4,329	-3,878	-4,104
B1I1	0,003	-0,443	1,0	-1,530	-1,498	3,389	-4,320	-3,986
B1H3	0,001	-0,448	1,0	-1,528	-1,540	3,437	-2,721	-2,617
B1H2	-0,023	-0,48	1,0	-2,142	-2,105	4,434	-5,858	-5,747
B1H1	-0,036	-0,461	1,0	-2,128	-2,062	4,550	-6,159	-5,968

ANEXO 7 - Parte 1 - Exemplos
Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v

*****- CF B612-*****
RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF RAD VOL X DEF AXIAL

$$A = -.11$$

$$B = .888$$

NUMEROS DE PONTOS = 90

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 91

NUM.INTERACOES =

DESVID PADRAO = .0401

COEF.CORREL. = .9998

COEF. SIGNIF. = 187062.2

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.11 + .888 \text{ DEAX}$

ENSAIO - B612

GRAFICO DEF RAD VOL MEDIDA X DEF. AXIAL
GRAFICO DEF RAD VOL CALCULADA X DEF AXIAL
ESC DEF RAD VOL = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 1 - Exemplos

Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v

*****- CP B5V4-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF. RAD X DEF. AXIAL

A = -.072

B = .738

NUMEROS DE PONTOS = 34

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 35

NUM.INTERACOES = 1

DESVIO PADRAD = .0244

COEF.CORREL. = .9991

COEF. SIGNIF. = 17436.0814

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = -.072 + .738 DEAX

 ENSAIO - B5V4

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEF. RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
 ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 1 - Exemplos

Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v

*****- CP B4H2-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF. RAD X DEF. AXIAL

$$A = -.163$$

$$B = 1.089$$

NUMEROS DE PONTOS = 60

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 61

NUM.INTERACOES = :

DESVIDO PADRAD = .0424

COEF.CORREL. = .9996

COEF. SIGNIF. = 73261.735

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.163 + 1.089$ DEAX

 ENSAIO - B4H2

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEF.RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL
 ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

Anexo 7 - Parte 1 - Exemplos
Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v

*****- CP B3H2-*****
RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF. RAD X DEF. AXIAL

A = -.03

B = .323

NUMEROS DE PONTOS = 61

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 62

NUM.INTERACOES = 1

DESVID PADRAO = .0108

COEF.CORREL. = .9997

COEF. SIGNIF. = 105347.715

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = -.03 + .323 DEAX

ENSAIO - B3H2

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL

GRAFICO DEF.RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL

ESC. DEF. RAD. = -10%

ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 1 - Exemplos
Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v

*****- CP B2H5-*****

RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF. RAD X DEF. AXIAL

$$A = -.107$$

$$B = .755$$

NUMEROS DE PONTOS = 24

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 25

NUM.INTERACOES = 0

DESVIDO PADRAO = .0259

COEF.CORREL. = .9981

COEF. SIGNIF. = 5764.2035

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.107 + .755$ DEAX

ENSAIO -- B2H5

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL

GRAFICO DEF.RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL

ESC. DEF. RAD. = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 1 - Exemplos

Correlação Linear das Variáveis ϵ_h e ϵ_v

*****- CP B1V3-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF. RAD X DEF. AXIAL

$$A = -.316$$

$$B = .621$$

NUMEROS DE PONTOS = 16

PRIM.PONTO = 7

ULT.PONTO = 22

NUM.INTERACOES = 0

DESVID PADRAO = .0359

COEF.CORREL. = .9976

COEF. SIGNIF. = 2911.2429

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.316 + .621$ DEAX

ENSAIO - B1V3

GRAFICO DEF. RAD. MEDIDA X DEF. AXIAL

GRAFICO DEF.RAD. CALCULADA X DEF. AXIAL

ESC. DEF. RAD. = -10%

ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 2 - Exemplos

Correlação Linear das Variáveis $\epsilon_r \text{ vol}$ e ϵ_v

*****- CP B612-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF RAD VOL X DEF AXIAL

$$A = -.073$$

$$B = .524$$

NUMEROS DE PONTOS = 53

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 55

NUM.INTERACOES = 1

DESVIO PADRAO = .0227

COEF.CORREL. = .9994

COEF. SIGNIF. = 21297.569

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.073 + .524 \text{ DEAX}$

 ENSAIO - B612

GRAFICO DEF RAD VOL MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEFRAD VOL CALCULADA X DEF AXIAL
 ESC DEF RAD VOL = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 2 - Exemplo:

Correlação Linear das Variáveis ϵ_r vol e ϵ_v

*****- CP B5V4-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF RAD VOL X DEF AXIAL

A = -.07

B = .483

NUMEROS DE PONTOS = 41

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 42

NUM.INTERACOES = 1

DESVIO PADRAD = .0257

COEF.CORREL. = .9995

COEF. SIGNIF. = 2024.7477

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = -.07 + .483 DEAX

 ENSAIO - B5V4

GRAFICO DEF RAD VOL MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEFRAD VOL CALCULADA X DEF AXIAL
 ESC DEF RAD VOL = -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 2 - Exemplos

Correlação Linear das Variáveis $\epsilon_r \text{ vol}$ e ϵ_v

*****- CP B4H2-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF RAD VOL X DEF AXIAL

$$A = -.072$$

$$B = .534$$

NUMEROS DE PONTOS = 40

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 42

NUM.INTERACOES = 2

DESVID PADRAO = .0204

COEF.CORREL. = .9988

COEF. SIGNIF. = 7246.999

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.072 + .534 \text{ DEAX}$

 ENSAIO - B4H2

GRAFICO DEF RAD VOL MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEFRAD VOL CALCULADA X DEF AXIAL
 ESC DEF RAD VOL= -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 2 - Exemplos

Correlação Linear das Variáveis: ϵ_r vol e ϵ_v

*****- CP B3H2-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF RAD VOL X DEF AXIAL

A = -.041

B = .386

NUMEROS DE PONTOS = 39

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 40

NUM.INTERACOES = 0

DESVIO PADRAO = .0141

COEF.CORREL. = .9992

COEF. SIGNIF. = 23057.952

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = -.041 + .386 DEAX

 ENSAIO - B3H2

GRAFICO DEF RAD VOL MEDIDA X DEF. AXIAL
 GRAFICO DEFRAD VOL CALCULADA X DEF AXIAL
 ESC DEF RAD VOL= -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 2 - Exemplos

Correlação Linear das Variáveis ϵ_r vol e ϵ_v

*****- CP B2H5-*****
 RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF RAD VOL X DEF AXIAL

$$A = -.025$$

$$B = .423$$

NUMEROS DE PONTOS = 39

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 40

NUM.INTERACOES = 1

DESVID PADRAO = .0143

COEF.CORREL. = .9993

COEF. SIGNIF. = 26619.673

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.025 + .423$ DEAX

ENSAIO - B2H5

GRAFICO DEF RAD VOL MEDIDA X DEF. AXIAL

GRAFICO DEFRAD VOL CALCULADA X DEF AXIAL

ESC DEF RAD VOL = -10%

ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 7 - Parte 2 - Exemplos
Correlação Linear das Variáveis ϵ_r vol e ϵ_v

*****- CP B1V3-*****
RESULTADOS CORRELACAO LINEAR : DEF RAD VOL X DEF AXIAL

$$A = -.019$$

$$B = .457$$

NUMEROS DE PONTOS = 24

PRIM.PONTO = 2

ULT.PONTO = 25

NUM.INTERACOES = 0

DESVID PADRAO = .0142

COEF.CORREL. = .9996

COEF. SIGNIF. = 30532.6194

EQUACAO DA REGRESSAO => DRAD = $-.019 + .457$ DEAX

ENSAIO - B1V3

GRAFICO DEF RAD VOL MEDIDA X DEF. AXIAL
GRAFICO DEFRAD VOL CALCULADA X DEF AXIAL
ESC DEF RAD VOL= -10% ESC. DEF. AXIAL = 10%

ANEXO 8

Coefficientes das Regressões Polinomiais Lineares
Parâmetros Anisotrópicos

C.P.									
INCL.	a6	b6	c6	R	a7	b7	c7	R	N o
B4	-0,013	1,551	1,233	0,99	-0,042	-0,504	0,064	0,996	8 T
B4	-0,040	1,607	1,277	0,985	-0,051	-0,488	0,078	0,996	8 E
B5	0,058	1,845	1,169	0,994	-0,065	-0,508	0,104	0,999	7 T
B5	0,036	1,984	1,182	0,995	-0,063	-0,507	0,106	0,999	7 E
B6	0,119	1,779	0,965	0,985	-0,057	-0,600	0,087	0,998	8 T
B6	0,120	1,773	0,964	0,984	-0,056	-0,584	0,087	0,997	8 E
B1B2	-0,016	1,798	1,001	0,908	0,031	-0,339	-	0,666	20 T
B1B2	-0,075	1,851	1,055	0,909	0,031	-0,339	-	0,666	20 E
B1B6	0,164	1,829	0,886	0,974	-0,066	-0,515	0,079	0,939	21 T
B1B6	0,121	1,899	0,919	0,980	-0,066	-0,499	0,087	0,915	21 E
B3B6	0,104	1,674	1,014	0,995	-0,052	-0,515	0,058	0,974	14 T
B3B6	0,109	1,674	1,007	0,995	-0,052	-0,505	0,059	0,976	14 E
B2B6	0,151	1,739	0,930	0,981	-0,072	-0,426	0,067	0,901	15 T
B2B6	0,142	1,677	0,937	0,971	-0,078	-0,394	0,076	0,869	15 E
B4B5	0,025	1,689	1,198	0,985	-0,054	-0,496	0,081	0,989	15 T
B4B5	0,014	1,723	1,219	0,982	-0,061	-0,482	0,093	0,993	15 E
B1B2B6	0,130	1,818	0,921	0,971	-0,067	-0,446	0,069	0,884	28 T
B1B2B6	0,110	1,826	0,937	0,966	-0,067	-0,420	0,075	0,844	28 E
B1B3B6	0,191	1,534	0,941	0,98	-0,077	-0,398	0,066	0,905	21 T
B1B3B6	0,170	1,492	0,955	0,971	-0,084	-0,356	0,073	0,873	21 E

ANEXO 9

Coeficientes das Regressões Polinomiais Lineares
Parâmetros Isotrópicos

BOLOS	a	b	c	R	No. DE PONTOS	EQUAÇÃO
B4	0,040	1,350	1,197	0,986	26	44
B4	-0,036	-0,484	0,037	0,917	26	45
B5	0,093	1,520	1,234	0,980	25	44
B5	-0,028	-0,491	0,034	0,934	25	45
B6	0,025	1,376	1,163	0,958	32	44
B6	0,01	-0,523	-	0,807	32	45
B1B2	-0,165	1,645	1,095	0,931	64	44
B1B2	0,018	-0,329	-	0,545	64	45
B1B6	0,199	1,439	0,887	0,961	63	44
B1B6	-0,037	-0,451	0,051	0,800	63	45
B3B6	0,102	1,409	1,039	0,980	56	44
B3B6	-0,009	-0,487	0,018	0,829	56	45
B2B6	0,146	1,520	0,954	0,981	65	44
B2B6	-0,029	-0,409	0,028	0,674	65	45
B4B5	0,091	1,394	1,189	0,973	51	44
B4B5	-0,031	-0,489	0,035	0,923	51	45
B1B2B6	0,129	1,539	0,944	0,973	96	44
B1B2B6	-0,027	-0,399	0,030	0,673	96	45
B2B3B6	-0,169	1,419	0,959	0,979	89	44
B2B3B6	-0,030	-0,401	0,027	0,696	89	45

ANEXO 10

Coeficiente de Poisson calculado pelas Variações Volumétricas

$$\nu = - \frac{\epsilon_r \text{ vol}}{\epsilon_v}$$

CORPO			CORPO		
DE	$\nu_{\min}$	$\nu_{\max}$	DE	$\nu_{\min}$	$\nu_{\max}$
PROVA			PROVA		
B6V6	0,397	0,506	B3H3	0,347	0,484
B6V5	0,324	0,504	B3H2	0,213	0,429
B6V4	0,306	0,515	B3H1	0,387	0,484
B6H4	0,395	0,533	B3I3	0,376	0,485
B6H3	0,295	0,501	B3I2	0,304	0,482
B6H2	0,35	0,530	B2V4	0,43	0,465
B6I3	0,402	0,498	B2V3	0,429	0,486
B6I2	0,343	0,539	B2V1	0,428	0,471
B5V4	0,226	0,508	B2H5	0,383	0,46
B5V3	0,301	0,533	B2H4	0,43	0,478
B5H4	0,226	0,539	B2H3	0,428	0,47
B5H3	0,279	0,517	B2H1	0,428	0,49
B5H2	0,299	0,54	B2I4	0,428	0,48
B5I3	0,369	0,512	B2I2	0,44	0,6
B5I2	0,301	0,54	B1V3	0,426	0,485
B4V2	0,259	0,515	B1V2	0,426	0,477
B4V1	0,29	0,542	B1V1	0,427	0,477
B4H3	0,26	0,524	B1H3	0,426	0,466
B4H2	0,28	0,547	B1H2	0,428	0,486
B4H1	0,338	0,474	B1H1	0,426	0,469
B4I2	0,311	0,524	B1I4	0,426	0,467
B4I1	0,346	0,557	B1I3	0,433	0,477
B3V3	0,329	0,45	B1I2	0,425	0,47
B3V2	0,346	0,482	B1I1	0,427	0,477
B3V1	0,265	0,48			