

AUTOMATIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO TRIAXIAL  
VISANDO O ESTUDO DE SOLOS  
TROPICAIS CIMENTADOS

FLAVIA BURMEISTER MARTINS

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre

ABRIL, 1994

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-graduação.



Prof. Adriano Bica  
(Orientador)



Prof. Jorge Riera  
(Coordenador do CEGEC/UFRGS)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adriano Bica, Ph.D. - SURREY UNIVERSITY/UK  
Prof. Fernando Schnaid, Ph.D. - OXFORD UNIVERSITY/UK  
Prof. Luiz A. Bressani, Ph.D. - IMPERIAL COLLEGE/UK  
Prof. Marciano MacCarini, Ph.D. - IMPERIAL COLLEGE/UK

a Paula.

## AGRADECIMENTOS

- aos professores Adriano V. D. Bica e Luiz A. Bressani pelo apoio, orientação e, especialmente, pela amizade;
- a Marcelo C. Macedo, pelo incentivo e carinho;
- aos professores Fernando Schnaid e Marco A. Azambuja pela contribuição na orientação;
- aos funcionários Jair Floriano e João Diniz, pelo apoio técnico;
- aos professores Ademar Groehs, José Gerbase Filho, e Renato M. de Brito, pelas sugestões e esclarecimentos no desenvolvimento do equipamento;
- a Jacques D. Brancher, pela colaboração no desenvolvimento do programa de controle;
- à Eng<sup>a</sup> Maria Beatriz da Costa, como auxiliar de pesquisa;
- aos amigos Graciela Doz e Ignácio Iturrioz, pela grande amizade "naqueles" momentos;
- a meus pais, Basildes e Myriam, pela "baita" força;
- a Marlene Nunes, pela constante presença, amizade e cuidados dedicados a Paula;
- aos colegas Gilnei Pestano e Eduardo Azambuja, pelo estímulo e amizade;
- a Alexandre e Clódia Turra e Graciliana Berao, pelo apoio e compreensão;
- à bibliotecária Juliana Bonilha, pela correção das referências bibliográficas;
- aos funcionários do CPGEC.

## S U M Á R I O

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	4
2.1 Solos Cimentados .....	4
2.2 Solo Residual de Arenito Botucatu .....	11
2.3 Equipamentos de Ensaio .....	12
2.3.1 Medição Local de Deformação .....	14
2.3.2 Sistema Automático de Controle de Ensaio Triaxial .....	15
2.3.3 Programa de Controle .....	18
3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO .....	36
3.1 Sistema Geotécnico .....	36
3.1.1 Câmara Triaxial .....	36
3.1.2 Sistema de Aplicação de Pressão .....	37
3.1.3 Instrumentação .....	40
3.1.3.1 Medição de Deformações .....	40
3.1.3.2 Medição de Pressão Confinante e Poro-pressão .....	41
3.1.3.3 Medição da Força Axial .....	41
3.1.3.4 Medição de Variação Volumétrica .....	42
3.2. Conversor Analógico-Digital .....	43
4. PROGRAMA DE CONTROLE .....	54
4.1 Entrada de Dados .....	55
4.2 Leitura zero dos transdutores de pressão .....	56
4.3 Leitura do arquivo de constantes de calibração .....	57
4.4 Ajuste das Condições Iniciais .....	57
4.5 Controle da Trajetória de Tensões .....	58
4.5.1 Procedimento de Aplicação de Carga .....	58
4.5.2 Interdependência entre $\sigma_v$ x $\sigma_h$ .....	59
4.5.3 Resolução da Trajetória de Tensões .....	61
4.5.4 Velocidade de Ensaio .....	62
4.6 Comunicação com o <i>Data-Logger</i> .....	63
4.7 Sub-rotina do ensaio $K_0$ .....	64

5. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .	74
5.1 Amostras .....	74
5.2 Técnica de Amostragem e Preparação dos Corpos de Prova .....	75
5.3 Procedimento de ensaio .....	78
5.4 Apresentação dos Resultados dos Ensaios .....	80
5.4.1 Ensaios Triaxiais .....	81
5.4.2 Ensaios de Cisalhamento Direto .....	86
5.4.3 Ensaios de Compressão Confinada .....	87
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	108
6.1 Adequação do Equipamento ao Estudo de Solos Tropicais Cimentados .....	108
6.1.1 Controle da Trajetória de Tensões .....	110
6.1.2 Medição Externa x Medição Local de Deformações ..	111
6.2 Comportamento do Solo Residual de Arenito Botucatu ..	112
6.2.1 Fluência .....	112
6.2.2 Parâmetros de Deformabilidade .....	115
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS .....	125
7.1 Equipamento .....	125
7.2 Comportamento do solo residual de arenito Botucatu ..	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	129

## LISTA DE FIGURAS

### FIGURA

2.1	- Resultados de ensaios uni-dimensionais sobre solos residuais (Vargas, 1953) .....	20
2.2	- Resultados de ensaios de compressão triaxial em solo cimentado artificialmente (Maccarini, 1987) .....	21
2.3	- Rigidez inicial medida em ensaios triaxiais drenados sobre solo artificial (Maccarini, 1987) .....	22
2.4	- Ensaios triaxiais drenados sobre dois materiais estruturados (Leroueil & Vaughan, 1990) .....	23
2.5	- Resultados de ensaios unidimensionais sobre quatro diferentes materiais estruturados (Leroueil e Vaughan, 1990) .....	24
2.6	- Zonas esquemáticas de fluência de solos estruturados (Leroueil e Vaughan, 1990) .....	25
2.7	- Ensaios de compressão uni-dimensional sobre calcáreo (Ledra, 1990) .....	26
2.8	- Variação da tensão de fluência com a porosidade em calcáreo (Jones & Preston, 1987) .....	27
2.9	- Fluência observada em um solo cimentado artificialmente para dois índices de vazios diferentes (Maccarini, 1987) .....	28
2.10	- Perda da resistência a tração com a deformação volumétrica em solo artificial (Maccarini, 1987) .....	29
2.11	- Comparação entre compressão estruturada e compressão desestruturada no ensaio oedométrico (Vaughan, 1988) ..	30
2.12	- Influência da velocidade de cisalhamento em ensaios de compressão drenados sobre solo artificial (Bressani, 1990) .....	31
2.13	- Influência do ciclo de cargas sofrido durante a saturação - solo artificial (Bressani, 1990) .....	32
2.14	- Câmara Triaxial Bishop-Wesley (1975) .....	33
2.15	- Top-cap proposto por Bressani (1990) .....	33
2.16	- Sensor de efeito Hall - configuração proposto por Clayton & Khatrush (1986) .....	34

2.17	- Fluxograma do programa de controle de trajetória de tensões (Khatrush, 1987) .....	35
3.1	- Sistema automático de controle do equipamento triaxial proposto .....	46
3.2	- Câmara triaxial utilizada .....	47
3.3	- Servo-mecanismo de controle de pressão implementado .	48
3.4	- Medidor de deformação axial a base de sensores de efeito Hall (Soares, 1992) .....	49
3.5	- Medidor de deformação radial a base de sensores de efeito Hall (Bressani, 1990) .....	50
3.6	- Célula de carga tipo "cruzeta" (Bica et al, 1986) ...	51
3.7	- Medidor de variação volumétrica tipo <i>Imperial College</i> desenvolvido .....	52
3.8	- Sistema de duplas Buretas Desenvolvido .....	53
4.1	- Fluxograma do programa de controle de trajetórias de tensões .....	67
4.2	- Procedimento iterativo de condução da trajetória de tensões .....	68
4.3	- Fluxograma da sub-rotina de ajuste das condições iniciais .....	69,70
4.4	- Fluxograma da sub-rotina de controle de trajetórias lineares de tensões .....	71
4.5	- Procedimentos de condução de trajetórias de tensões .	72
4.6	- Fluxograma da sub-rotina de controle da trajetória de deformação radial nula .....	73
5.1	- Curvas granulométricas do horizonte C do solo residual de arenito Botucatu (Nuñez, 1990) .....	89
5.2	- Posição dos medidores de deformação axial sobre o corpo de prova .....	90
5.3	- Trajetórias de tensões programadas .....	91
5.4 a 5.9	- Resultados dos ensaios triaxiais.....	92 a 103
5.10	- Resultados dos ensaios de cisalhamento direto..	104 a 105
5.11	- Envoltórias de resistência de pico e de grandes deformações obtidas dos ensaios de cisalhamento direto x ensaios triaxiais .....	106

5.12	- Resultados dos ensaios de compressão confinada: (a) solo no estado natural, (b) solo remoldado .....	107
6.1	- Resultados dos testes sobre corpos de prova de aço .	118
6.2	- Medição externa x medição local (a) ensaio TT45, (b) ensaio TT1.2 .....	119
6.3	- Superfície de fluência definida para o solo residual de arenito Botucatu .....	120
6.4	- Definição do ponto de fluência para o ensaio TT1.2 (a) escala normal, (b) escala logarítmica .....	121
6.5	- Trajetória descrita pelos ensaios de deformação radial nula .....	122
6.6	- Curvas tensão x deformação dos ensaios triaxiais feitos sobre o solo residual de arenito Botucatu .....	123
6.7	- Módulo de Young x deformação axial .....	124

## LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - Classificação do solo .....	88
TABELA 5.2 - Identificação dos ensaios triaxiais .....	88
TABELA 6.1 - Tensões de fluência .....	117

## LISTA DE SIMBOLOS

- A/D - analógico/digital  
CD - cisalhamento direto  
 $c'$  - intercepto coesivo  
 $e$  - índice de vazios  
 $e_0$  - índice de vazios inicial  
 $\epsilon_a$  - deformação axial  
 $\epsilon_r$  - deformação radial  
 $\epsilon_v$  - deformação volumétrica  
 $k = \sigma_h / \sigma_v$   
 $k_0 =$  relação  $\sigma_h / \sigma_v$  para a qual  $\epsilon_r$  é nula  
 $\phi$  - ângulo de atrito interno  
LL - limite de liquidez  
LP - limite de plasticidade  
LC - limite de contração  
 $p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$   
 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$   
TT - trajetória de tensões  
TD - trajetória de deformações  
 $\sigma'_h$  - tensão efetiva horizontal  
 $\sigma'_v$  - tensão efetiva vertical  
 $\sigma_h$  - tensão horizontal  
 $\sigma_v$  - tensão vertical  
 $\sigma_a$  - tensão axial  
 $\sigma_r$  - tensão radial  
 $\sigma_d$  - tensão desvio  
 $\sigma_c$  - tensão confinante  
 $\sigma_1$  - tensão principal maior  
 $\sigma_3$  - tensão principal menor  
 $\sigma_{fluência}$  - tensão de fluência

## RESUMO

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um equipamento de ensaios triaxiais, com aquisição automática de dados e controle automático de trajetórias de tensões, e resultados de ensaios utilizando este equipamento. Medidores locais de deformações axial e radial foram utilizados viabilizando a análise do comportamento de solos a baixos níveis de deformações. O equipamento foi construído com componentes já existentes e elementos de baixo custo. Um programa de controle foi desenvolvido para controlar tanto trajetórias lineares de tensões como a trajetória de deformação radial nula. O sistema foi desenvolvido visando o estudo de solos tropicais cimentados, tendo sido utilizado na execução de ensaios triaxiais em um solo residual regional de arenito - arenito Botucatu. Os resultados evidenciam a adequabilidade do sistema construído ao estudo proposto tornando possível a determinação de importantes características de comportamento deste solo.

## ABSTRACT

The present work describes the development of an equipment for triaxial tests and some test results carried out on it. The equipment has automatic data acquisition and servo-control. Local axial and radial strain transducers were used allowing analysis of soil behaviour at low level of strains. The equipment was built with pre-existent triaxial elements and some other low cost components. A software was developed to control linear stress paths as well as the null radial strain stress path. The whole system was built to study structured residual soils and has been used to test a sandstone residual soil - Botucatu sandstone. The results have shown a good performance of the system making possible the determination of important mechanical characteristics of the soil.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo do efeito da cimentação em solos tropicais encontra-se em sua fase inicial. Embora há muito se tenha conhecimento da existência de cimentação entre partículas em muitos solos naturais, apenas recentemente este efeito passou a ser pesquisado como um parâmetro fundamental na determinação do comportamento mecânico dos solos tropicais.

Estudos referentes ao efeito da cimentação foram conduzidos por Maccarini (1987) em um solo cimentado artificialmente com características estruturais similares aos de ocorrência natural. Este solo possibilitou o desenvolvimento de um estudo que foi continuado por Bressani (1990) e que estabeleceu um padrão de comportamento para solos cimentados. A presente dissertação introduz a linha de pesquisa sobre o tema comportamento de solos tropicais estruturados nesta universidade (UFRGS), contribuindo com o desenvolvimento de um equipamento de ensaios triaxiais com características adequadas a este estudo. O equipamento é utilizado para verificar o comportamento de um solo regional estruturado. Uma revisão da bibliografia sobre o comportamento de solos estruturados é apresentada no capítulo 2.

A estrutura presente em solos cimentados é de caráter rígido e frágil. Esta estrutura se rompe a níveis de deformação bastante pequenos. É bem conhecida a dificuldade de se medir corretamente pequenas deformações com instrumentos de medição externos à câmara triaxial. Isto se deve, entre outros fatores, a problemas de alinhamento e/ou acomodamento dos componentes do sistema (Baldi et al, 1988). Devido a estes problemas, o equipamento triaxial desenvolvido foi implementado com medição local de deformações. Para permitir a análise de comportamento de

solos estruturados sob diferentes tipos de trajetórias de tensões este equipamento foi automatizado. O capítulo 3 apresenta uma descrição do equipamento.

No capítulo 4 é descrito o desenvolvimento do programa de controle do equipamento. Este programa inclui o controle de trajetórias lineares de tensões quaisquer e da trajetória de deformação radial nula. Neste capítulo são descritas também as principais dificuldades encontradas em relação ao controle do equipamento a nível de programação e como foram contornadas.

O solo pesquisado originou-se por intemperismo da formação Botucatu, que é composta por arenitos eólicos. A escolha deste solo residual se deve em parte à grande extensão territorial coberta pela formação Botucatu nas regiões sul e sudeste do País (Orlandini, 1991) e também a algumas características peculiares deste material, favoráveis à execução de ensaios de laboratório.

Este solo foi objeto de pesquisa em outras dissertações de mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS e, portanto, tem suas características básicas conhecidas. O comportamento mecânico deste solo foi estudado sob o aspecto de compressibilidade uni-dimensional e resistência ao cisalhamento por Orlandini (1991). A jazida escolhida para esta dissertação foi objeto de pesquisa de Nuñez (1991), num trabalho sobre estabilização do solo com cal para fins de pavimentação. Nesse trabalho Nuñez apresenta a caracterização do material. As propriedades físicas do solo residual de arenito Botucatu são apresentadas no capítulo 5. O capítulo 5 engloba também descrição da técnica de amostragem, preparação do corpo de prova, procedimento de ensaio adotado e apresentação de resultados.

Uma série de seis ensaios triaxiais foi realizada com o objetivo de verificar a adequabilidade do equipamento ao estudo proposto e identificar aspectos de comportamento associados a presença de estrutura. Também foram realizados ensaios de cisalhamento direto e unidimensionais. O capítulo 6 apresenta uma discussão dos resultados obtidos tendo em vista o equipamento

desenvolvido e o comportamento do solo ensaiado, dando ênfase ao efeito da cimentação.

O capítulo 7 apresenta conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Solos Cimentados

Em Mecânica das Rochas, a cimentação ou ligação entre partículas é considerada uma característica genérica das rochas (Brady e Brown, 1985). Para um particular tipo de rocha - o arenito - estes autores citam que a cimentação entre partículas influencia marcadamente a resistência e a rigidez da rocha.

Na Mecânica dos Solos clássica, a cimentação entre partículas não é considerada uma característica relevante à determinação do comportamento mecânico dos solos. Os modelos constitutivos clássicos foram desenvolvidos para solos sedimentares não-cimentados, predominantes no hemisfério norte, e envolvem conceitos de porosidade inicial e sua subsequente modificação pela história de tensões. Atualmente se reconhece a existência de diversos materiais cimentados de ocorrência natural que não podem ter suas componentes de rigidez e resistência ao cisalhamento explicadas apenas pela relação entre porosidade inicial e história de tensões (Vaughan, 1985, Vaughan, Maccarini e Mokhtar, 1988, Leroueil e Vaughan, 1990).

A presença de cimentação tem sido identificada tanto em solos sedimentares (argilas moles, argilas pré-adensadas, solos granulares) como em solos residuais, rochas brandas e alteradas. Sua origem pode ter muitas causas, como (a) deposição de sílica, carbonatos, hidróxidos e matéria orgânica em solução nos contatos entre partículas, (b) soldagem de partículas sob altas pressões ou "cold welding", (c) transformação química dos minerais primários através da hidrólise liberando óxidos de ferro e alumínio, (d) recristalização de minerais durante o intemperismo e (e) modificação da camada de água adsorvida e forças inter-partículas em solos argilosos (Mitchell e Solymar, 1984, Wesley, 1990).

Solos sedimentares se formam através de um processo de erosão e transporte, seguido de deposição e consolidação sob seu próprio peso. Posteriormente, estes solos podem sofrer alteração em suas propriedades devido a processos como pré-adensamento, consolidação secundária, lixiviação e efeitos tixotrópicos (Bjerrum, 1967a). Eventualmente, estes solos podem também estar sujeitos a cimentação - conforme Bjerrum (1967b). Em solos sedimentares cimentados, a tendência normal é o aumento da resistência com o tempo, com o enrijecimento e formação de ligações entre partículas.

Solos residuais se formam pela ação do intemperismo químico e físico sobre as rochas. O intemperismo promove a redução da densidade e resistência da rocha e ruptura das ligações cimentantes entre partículas (Wesley, 1990). Todavia, a cimentação entre partículas nos solos residuais é associada à recristalização e formação de novos minerais, precipitação de sais minerais e estrutura residual da rocha de origem.

Estudos sobre as propriedades mecânicas de materiais com características cimentadas têm mostrado que, embora a cimentação tenha origem diversa, estes solos apresentam similaridades no comportamento mecânico. Leroueil e Vaughan (1990) apresentam um estudo mostrando as similaridades entre diferentes solos estruturados - argilas moles, argilas pré-adensadas, areias, rochas brandas, solo residual e solo artificial cimentado - e indicando características comuns no comportamento destes solos. Estes autores propõem que a descrição destes efeitos seja incluída entre os conceitos gerais de mecânica dos solos.

O comportamento de um solo depende de dois fatores, quais sejam, a **composição** ou natureza das partículas do solo (sua forma, tamanho e mineralogia) e a **estrutura** na qual estas partículas existem dentro do solo, em sua condição não-perturbada (Wesley, 1990). Leroueil e Vaughan (1990) denominam o efeito combinado do arranjo de partículas e cimentação como **estrutura**. Esta estrutura pode ser destruída por remoldagem do solo, o que tipicamente afeta a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade. Vargas (1953) observou o comportamento de um

solo residual em ensaios de compressão confinada (Figura 2.1). A diferença observada na curva índice de vazios x tensão vertical efetiva entre o solo intacto e o solo remoldado pode ser explicada pelo fato de que a cimentação sustenta uma estrutura com alto índice de vazios. Por isso, uma vez destruída esta estrutura, não se consegue reproduzir a mesma relação índice de vazios x tensão vertical efetiva. Após atingir um certo nível de tensão, o solo sofre uma compressão acentuada. O ponto de ruptura da cimentação é denominado ponto de fluência (*yield point*) e se caracteriza por uma mudança no comportamento de compressão semelhante ao que ocorre para uma argila pré-adensada. Porém, a curva  $e \times \log \sigma_v'$  para solos estruturados ultrapassa a curva virgem, o que não ocorre para argilas sem estrutura. Vargas (1953) verificou que esta estrutura gera um intercepto coesivo na envoltória de resistência mesmo quando o solo é poroso e contrae durante o cisalhamento.

Ensaio de compressão triaxial drenada sobre um solo cimentado artificialmente para um índice de vazios 1.6 são apresentados na Figura 2.2 (Maccarini, 1987). A baixas tensões de consolidação o solo apresenta um pico de resistência como para um solo não-coesivo denso. Todavia, a máxima taxa de deformação não ocorre no pico, como seria para este tipo de solo, e sim para deformações maiores. Isto indica que a resistência de pico é controlada pela estrutura e não pela densidade. Para altas tensões de consolidação, a fluência ocorre bem antes da ruptura, que somente é alcançada para altos níveis de deformação.

Solos cimentados apresentam rigidez inicial muito elevada. Esta rigidez está associada a estrutura presente nestes solos e não somente a tensão de confinamento aplicada, e pode ser rompida em ensaios de compressão isotrópica. A Figura 2.3 mostra a influência da tensão de consolidação na rigidez inicial obtida de ensaios triaxiais em um solo cimentado artificialmente (Maccarini, 1987). O solo menos denso mostra uma queda na rigidez quando a tensão de confinamento ultrapassa um determinado nível.

Estudos em solos residuais (Sandroni, 1981, Maccarini, 1987) demonstram que o comportamento destes solos caracteriza um

material cimentado, com módulos de deformabilidade elevados a pequenas deformações e com uma relação rigidez-resistência irreversível após fluência.

A Figura 2.4 apresenta resultados de ensaios triaxiais drenados em dois materiais estruturados. Nos dois materiais, o teste 1 foi realizado sob baixos níveis de tensões confinantes. Neste teste, a resistência ao cisalhamento de pico ultrapassa a envoltória de resistência para grandes deformações e se deve à estrutura cimentante presente no material. O teste 3, a níveis de tensões confinantes maiores, mostra um comportamento rígido até a ruptura da estrutura (fluência), que ocorre bem antes da tensão de ruptura do solo. O teste 2 representa uma situação intermediária entre 1 e 3, onde a resistência ao cisalhamento a grandes deformações coincide com a tensão de fluência. No gráfico  $p' \times q$  (Figura 2.4.a) estes pontos definem uma curva denominada superfície de fluência (*yield surface* - Vaughan, 1985), e um valor de  $c'$ . Os solos ensaiados são argila mole e rocha calcárea. É notável que tal similaridade no comportamento se exiba entre dois materiais cujas resistências estruturais e tensões de fluência diferem de aproximadamente 300 vezes (Leroueil e Vaughan, 1990).

A Figura 2.5 mostra o resultado de ensaios unidimensionais para quatro materiais diferentes. O comportamento de solos estruturados sob compressão unidimensional gera uma forma particular de trajetória de tensões. Os solos apresentam um comportamento rígido dentro do espaço delimitado pela superfície de fluência. A fluência é atingida próximo e acima da envoltória de resistência última. Neste ponto, a compressibilidade aumenta devido a modificação da estrutura. A trajetória de tensões migra, então, em direção a trajetória  $K_0$  para solos desestruturados. Os quatro materiais que apresentam modelos similares de comportamento são argila mole, mármore, solo artificial cimentado e calcáreo. As tensões de fluência são, respectivamente, 75, 1250, 170 e 40000 KPa. Materiais diferentes, tensões de fluência diferentes, modelo de comportamento similar (Leroueil e Vaughan, 1990).

Estas observações levaram Leroueil e Vaughan (1990) a propor que a superfície de fluência pode ser dividida em tres zonas, conforme a Figura 2.6. Na primeira zona, a fluência é causada por cisalhamento. Nesta zona, a resistência ao cisalhamento coincide com o ponto de fluência a baixos níveis de tensões confinantes e se deve às características estruturais do solo, ultrapassando a envoltória de resistência de grandes deformações (pico de tensão). Na segunda zona a fluência é causada por compressão. Nesta zona, a fluência ocorre quando o valor da tensão média equaliza o nível de tensões que o solo pode sustentar devido à cimentação. A fluência, então, ocorre a níveis de tensões inferiores a resistência do solo e, por isso, a superfície de fluência fica abaixo da envoltória de resistência. A fluência pode também ser causada por expansão, quando tensões efetivas são reduzidas de modo a gerar deformações volumétricas suficientes para romper a estrutura (terceira zona).

Ledra (1990) realizou ensaios uni-dimensionais em amostras de calcáreo com diferentes índices de vazios iniciais. Os resultados são mostrados nas Figuras 2.7.a e 2.7.b A altas tensões, as curvas tendem a uma linha única. A tensão de fluência é maior para amostras mais densas. Na Figura 2.8 (Jones e Preston, 1987) a dependência da tensão de fluência com relação ao índice de vazios inicial é bem estabelecida para um calcáreo.

Maccarini (1987) estudou o efeito do índice de vazios sobre a tensão de fluência em um solo cimentado artificialmente. Este estudo mostrou que a fluência é mais claramente definida quando o índice de vazios é maior. A Figura 2.9 apresenta os resultados obtidos por Maccarini (1987) para dois índices de vazios em solo cimentado artificialmente.

A existência de cimentação pode ser verificada através de ensaios de tração, como o de tração indireta (compressão diametral). De valor relativamente pequeno, a resistência à tração é um indicador de uma adesão entre partículas. A sucção presente em solos parcialmente saturados - efeito causado pela tensão capilar da água - é, juntamente com a cimentação, responsável por esta adesão entre partículas. Pequenos valores de

resistência à tração podem produzir pequenos interceptos coesivos ( $c'$ ) nas envoltórias de ruptura dos materiais. Este fator tem uma grande influência na estabilidade de taludes (Vaughan, 1988). Esta afirmativa é suportada por evidências de campo de cortes de taludes em solos tropicais que podem ter inclinações muito acentuadas, até mesmo cortes verticais (Wallace, 1973).

Maccarini (1987) apresenta dados de ensaios de tração feitos sobre um solo artificial cimentado depois de sofrer carregamento triaxial até determinada deformação volumétrica pós-fluência. A destruição total da estrutura cimentante requer considerável deformação e não é alcançada imediatamente após o ponto de fluência (Figura 2.10).

Estas observações demonstram que a quebra da cimentação é melhor considerada como um processo progressivo. Neste aspecto, o comportamento de um solo estruturado difere do comportamento de um solo pré-adensado. Lerouiel e Vaughan (1990) propõem que a fluência da estrutura seja considerada como função de deformação ou da energia de deformação.

A Figura 2.11 foi proposta por Vaughan et al. (1988) e divide o espaço índice de vazios  $\times \sigma_v'$ , identificando uma região onde somente é possível existir um solo no estado estruturado. A partir desta figura o autor conclui o seguinte:

(a) Grandes deformações plásticas são improváveis enquanto a estrutura do solo existe no espaço permitido para o mesmo solo no estado desestruturado, independente da resistência estrutural.

(b) Somente a estrutura irá permitir o solo existir no espaço estruturado. O solo se manterá rígido até a fluência (ponto Y da Figura 2.11) e a posição do ponto de fluência dependerá da resistência da estrutura do solo.

(c) Grandes deformações de compressão se desenvolvem quando a fluência ocorre no espaço para solo estruturado, o que depende do índice de vazios e da diferença no índice de vazios

entre o ponto de fluência e a curva que limita o espaço permitido para um solo desestruturado.

(d) Solos no estado estruturado com altos graus de saturação irão mostrar severas perdas de resistência não drenada.

As superfícies de fluência definidas para diferentes solos apresentaram formas diferentes. Argilas naturais apresentaram uma superfície de fluência centrada aproximadamente sobre a linha Ko (Leroueil et al 1979). Solos residuais apresentaram uma superfície de fluência centrada aproximadamente sobre o eixo isotrópico (Maccarini, 1987). Estas diferenças são atribuídas ao grau de anisotropia do solo. Para um solo isotrópico se espera que a superfície de fluência seja centrada sobre o eixo isotrópico (Leroueil and Vaughan, 1990).

A velocidade de deformação influencia na tensão de fluência. Para velocidades de deformação maiores, o solo alcança maiores tensões de fluência. Isto foi observado em argilas moles estruturadas (Tavenas, Leroueil, La Rochelle e Roy, 1978). Bressani (1990), testando amostras similares de solo cimentado artificialmente, encontrou pequena diferença nas tensões de fluência para diferentes taxas de deformação (0.03%/hora e 5%/hora, Figura 2.12).

Este autor identifica, porém, outros fatores de maior relevância no comportamento tensão-deformação de solos cimentados. Bressani e Vaughan (1989) demonstram que a estrutura de um solo cimentado artificialmente é danificada quando o material é submetido a ciclos de tensão isotrópica. O material tem sua tensão de fluência reduzida após os ciclos de carga e descarga. O fato observado por estes autores demonstra que algumas das ligações entre partículas são rompidas antes da tensão de fluência ser alcançada. Bressani (1990), investigando a influência da técnica de saturação, conclui que saturação por contra-pressão danifica a estrutura do solo cimentado. Este autor atribui o dano aos ciclos de carga impostos pelo processo de saturação. A Figura 2.13 mostra o resultado de quatro corpos de prova carregados em compressão triaxial drenada. Os corpos de

prova 107 e 109 sofreram um descarregamento na fase de consolidação isotrópica. Ciclos de carga e descarga evidentemente afetam a tensão de fluência, como pode ser visto nesta figura.

## 2.2 Solo Residual de Arenito Botucatu

A formação Botucatu foi descrita por Gonzaga de Campos (Projeto Radam Brasil, 1986). Campos utiliza a denominação de Arenito Botucatu para os arenitos que apresentam estratificação cruzada de larga escala e que se encontram sotopostos ou intercalados com a Formação Serra Geral.

Estes arenitos apresentam granulação fina a média, grãos sub-angulares a arredondados com superfície fosca, estratificação eólica típica e cores que variam entre o amarelo e o vermelho. A composição é essencialmente quartzosa, podendo-se observar a presença de feldspatos (Tommasi e Muhlmann em Projeto Radam Brasil, 1986). Uma análise petrográfica feita recentemente em um solo residual de arenito Botucatu localizado no município de Estância Velha revelou a presença de cerca de 48% de quartzo (Azambuja, 1993).

Grehs (1976) identifica a presença de cimento limonítico interligando grãos quartzosos. Este cimento confere uma boa resistência ao arenito, podendo ser destruído pelo intemperismo, o que torna o solo facilmente erodível. Oliveira e Caruso (1981) faz uma análise microscópica do arenito Botucatu que revela grãos de quartzo arredondados e cimentados por matéria silicosa. Os grãos apresentam as superfícies cobertas por uma película ferruginosa.

Tommasi (1972) indica uma espessura máxima de 250 metros na região de Novo Hamburgo. Este arenito tem por característica pequena variação litológica devido a sua formação eólica em ambiente desértico (Projeto Radam Brasil, 1986). É suscetível à erosão, principalmente quando se expõe o horizonte C em uma direção aproximadamente paralela à direção de deslocamento da duna (Nuñez, 1991).

Coulon (1973) observou que os horizontes C residuais do arenito Botucatu apresentam ótima estabilidade nos cortes não alterados, admitindo ângulos de  $90^\circ$ .

### 2.3 Equipamentos de Ensaio

Os solos têm seu comportamento mecânico dependente da trajetória de tensões seguida. As trajetórias de tensões aplicadas nos ensaios de laboratório convencionais dificilmente são as mesmas que o solo sofre "in situ", e, como resultado, as propriedades medidas neste ensaio não representam com exatidão o comportamento do solo em campo. Embora a resistência ao cisalhamento do solo, particularmente no estado último ou estado crítico, seja pouco influenciada pela trajetória de tensões, o comportamento tensão-deformação é marcadamente dependente da trajetória de tensões (Schofield e Wroth, 1968, Atkinson, 1985).

O ensaio triaxial convencional é um ensaio de compressão ou extensão axial realizado em um corpo de prova cilíndrico com velocidade de deformação e tensão radial constantes. Este ensaio pode ser conduzido com poro-pressão constante (drenado) ou com umidade constante (não-drenado). O equipamento e procedimentos para o ensaio triaxial convencional estão descritos em Bishop e Henkel (1962).

Bishop e Wesley (1975) desenvolveram uma câmara para ensaio triaxial que permite obter trajetórias de tensões alternativas à compressão e extensão triaxial com tensão confinante constante (Figura 2.14). Nesta câmara, a força axial é aplicada por um sistema de pressão hidráulico, o que permite conduzir com relativa facilidade trajetórias de tensões com tensão controlada.

Solos cimentados são muito rígidos e, a pequenas deformações (da ordem de 0.5%), a estrutura cimentante se rompe. As medições de carga e deformação tem sido feitas, convencionalmente, externamente à câmara triaxial. Medições de deformação externas à câmara triaxial estão sujeitas a problemas tais como restrições à deformação do corpo de prova (devido ao atrito entre

a pedra porosa e o corpo de prova), deformações devidas ao acomodamento do sistema pistão - cabeçote, cabeçote -pedra-porosa, pedra-porosa - corpo de prova, falta de alinhamento destas peças, deformações da câmara triaxial e do pórtico de cargas do equipamento (Baldi et al, 1988, Campos, 1988). Estes erros são significativos a pequenas deformações e tem sido bem documentados por vários autores, como por exemplo, Kirkpatrick et al (1974), Costa Filho (1985), Sarsby et al (1982), Burland e Symes (1982).

Enquanto erros de deformações do equipamento de medição podem ser estimados com confiança através de cuidadosa calibração (Atkinson e Evans, 1985, Bressani, 1990), erros causados pelas restrições à deformação do corpo de prova (i.e. atrito entre pedra porosa e corpo de prova) e pelo acomodamento não podem ser facilmente removidos. Por isso, a medição convencional de forças e deformações realizada externamente à câmara triaxial constitui uma importante fonte de erros no estudo experimental do comportamento de solos tropicais.

Clayton e Khatrush (1988), na observação de ensaios para investigação da fluência de uma areia, comparam medições externas com medições internas de deformações. Estes autores concluem que medições externas são significativamente incorretas não apenas em pequenas deformações, mas também após inversão de trajetórias de tensões com cruzamento da linha isotrópica e após uma mudança na direção da variação volumétrica. Estes autores afirmam que estes problemas podem ser evitados pela medição local de deformações.

Bressani (1990) apresenta resultados de ensaios triaxiais que contradizem a idéia de que medições externas são inerentemente incorretas a pequenas deformações. Este autor identifica a inclinação do cabeçote como o principal fator causador de erros em medições externas. Visando minimizar estes erros, Bressani (1990) desenvolveu técnicas que melhoram os resultados dos ensaios. Estas técnicas incluem um arranjo que combina uma semi-esfera conectada a uma célula de carga e um cabeçote plano sobre o corpo de prova (Figura 2.15).

Recentemente, com o desenvolvimento de métodos numéricos, tais como elementos finitos, surge a necessidade de se obter parâmetros de resistência e deformabilidade mais acurados e realísticos. O desenvolvimento de instrumentos mais precisos para medição de deformações em ensaios de laboratório, particularmente utilizando técnicas medição local (Burland e Symes, 1982) vêm de encontro a estas necessidades, pois possibilitam a superação dos problemas associados às medições externas.

### 2.3.1 Medição Local de Deformação

Diversos modelos de transdutores de deslocamento para medição local de deformações têm sido desenvolvidos visando medir deformação axial e deformação radial. Transdutores locais de deformação axial são, normalmente, instalados aos pares, em posições diametralmente opostas, fixados diretamente ao corpo de prova ou colados na membrana. Para minimizar a influência das restrições de deformação devidas ao atrito pedra-porosa/cabeçote, estes transdutores devem ser instalados no terço médio do corpo de prova (Clayton e Khatrush, 1986).

Os principais tipos de transdutores de deslocamento axial referidos na literatura são: tipo transdutor diferencial variável linear (Costa Filho, 1985); tipo eletrônível (Burland e Symes, 1982); tipo pêndulo com extensômetros elétricos de resistência (Ackerly et al, 1987); tipo fita metálica com extensômetros de resistência (Goto et al, 1991) e tipo sensor de efeito Hall (Clayton e Khatrush, 1986). Transdutores de deslocamento radial podem ser do tipo transdutor diferencial de variação linear (Nguyen e Derkx, 1991), tipo fita metálica com extensômetros elétricos de resistência (Schnaid et al, 1983) e tipo sensor de efeito Hall (Bressani, 1990).

Os transdutores locais de deslocamento axial e radial utilizados na presente dissertação são à base de sensores de efeito Hall. O efeito Hall consiste de uma voltagem que se produz quando uma placa condutora de corrente é colocada sob um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente. Sensores de efeito Hall encontram-se comercialmente disponíveis hoje em dia. Estes

sensores são excitados com corrente contínua (8V) e apresentam uma voltagem de saída elevada, que varia linearmente com a intensidade do fluxo magnético em uma faixa específica (Clayton e Khatrush, 1986, Clayton, et al, 1989).

Sensores de efeito Hall podem ser utilizados para medir deslocamentos, desde que sejam situados em algum campo magnético onde a intensidade varie com o deslocamento relativo do sensor. Ímãs permanentes podem ser usados para gerar este campo magnético.

A Figura 2.16 mostra uma configuração de um sensor de efeito Hall e um par de ímãs permanentes. Esta configuração mostrou-se particularmente útil para a construção de transdutores de deslocamento linear (Clayton e Khatrush, 1986). Conforme a Figura 2.16, tanto a sensibilidade do transdutor como seu intervalo linear variam com o espaçamento entre os ímãs e com a folga entre sensor e ímãs.

Transdutores de deformação local com sensores de efeito Hall tem possibilitado medições de deslocamento dentro do intervalo de menos de  $1\mu\text{m}$  até cerca de 10mm. Estes transdutores permitem detectar deformações menores que 0.002%. Estes instrumentos são leves, apresentam baixo custo e são pouco sensíveis a variações de temperatura e a vibrações. Um modelo de transdutor de deformação axial foi proposto por Clayton e Khatrush (1986). Bressani (1990) desenvolveu um modelo de transdutor de deformação radial. Estes modelos foram adotados nesta pesquisa e encontram-se detalhadamente descritos no item 3.1.3.1.

### 2.3.2 Sistema Automático de Controle de Ensaio Triaxial

A seleção da técnica e equipamento de ensaio deve considerar a precisão com a qual um particular sistema pode controlar um ensaio e medir as propriedades requeridas do solo. Comparando o equipamento convencional de ensaio triaxial com operação manual e um sistema controlado por computador, este último permite ao laboratorista conduzir programas de ensaios mais complexos a baixos custos operacionais e com mínimo de erro

de operação (Sheadan, Germaine e Ladd, 1990).

Menzies et al (1977) desenvolveram um dos primeiros sistemas para simulação automática da consolidação Ko. Neste sistema, as deformações radiais eram determinadas com um transdutor local de deslocamentos, o qual era ligado a um processador eletrônico de controle (Menzies, 1976). Este controle, por sua vez, operava um servo-mecanismo de pressão de confinamento na câmara triaxial, de forma a manter a deformação radial nula. Este servo mecanismo consistia em um cilindro de pressão (Bishop e Henkel, 1962) conectado através de uma junta telescópica, a um motor elétrico e uma caixa de redução.

A câmara triaxial desenvolvida por Bishop e Wesley (1975) tornou fácil a execução de trajetórias de tensões com tensão controlada. A aplicação da carga axial nesta câmara é feita pela aplicação de pressão a uma câmara interna destinada a deslocar o corpo de prova na direção vertical contra um pistão fixo à tampa da câmara triaxial (Figura 2.14). Este sistema hidráulico permite o controle da carga axial através de um sistema de pressão que pode ser semelhante ao utilizado para aplicação da pressão de confinamento, eliminando o condicionamento da carga axial a uma prensa com velocidade de deformação constante. Os autores propõem a seguinte correção de área para propósitos de controle da aplicação da força axial:

$$\sigma_a = p(a/A) + \sigma_r(1 - a/A) - W/A \quad (2.1)$$

onde,

- $\sigma_a$  = tensão total axial média
- $\sigma_r$  = pressão na câmara triaxial
- $p$  = pressão na câmara inferior
- $A$  = área da seção transversal do corpo de prova
- $a$  = área efetiva do diafragma *Bellofram*
- $W$  = peso do pistão

Os sistemas automáticos referidos na literatura mais recente para controle de trajetórias de tensões e deformação são

compostos basicamente dos seguintes elementos:

1. câmara triaxial de ensaios
2. sistema de aplicação de pressão (motores de passo ou transdutores elétrico-pneumáticos)
3. transdutores de pressão e deslocamento
4. conversor analógico-digital
5. micro-computador e periféricos

Law (1981) descreve um equipamento capaz de impor uma trajetória de tensões qualquer ao corpo de prova utilizando uma câmara triaxial convencional. Integram este equipamento um minicomputador e transdutores eletro-pneumáticos. Através do controle automático da pressão de confinamento e da poro-pressão, o ensaio pode reproduzir diversas trajetórias de tensões. A carga axial é aplicada por uma prensa com velocidade de deformação constante.

Atkinson (1985) descreve um equipamento que, utilizando a câmara Bishop e Wesley (1975), permite controle por micro-computador tanto de tensões como de deformações. Este equipamento inclui a utilização simultânea de um atuador hidráulico com êmbolo em série com um regulador de pressão. Tensão axial, tensão radial e poro pressão podem ser controladas.

Menzies (1988) descreve um equipamento de ensaio triaxial controlado por micro-computador. Neste equipamento, tensão axial, poro pressão e tensão radial são aplicadas por meio de atuadores hidráulicos controlados por um microprocessador (denominados "controladores digitais"). O equipamento utiliza a câmara triaxial Bishop e Wesley. Menzies (1988) calcula o valor da força axial a partir da pressão aplicada na câmara inferior (vedada por uma membrana tipo *Bellofram*), empregando a correção de área proposta por Bishop e Wesley (1975), apresentada na equação 2.1. Deve-se notar que a deformação axial do corpo de prova neste equipamento é medida indiretamente, a partir da variação de volume no controlador digital ligado à câmara inferior.

Sheadan, Germaine e Ladd (1990) discutem o sistema proposto por Menzies (1988) e criticam a medição indireta da deformação axial a partir da variação de volume do controlador digital da força axial. Estes autores afirmam que esta medição está sujeita a erros devidos a expansibilidade da membrana *Bellofram*. Os mesmos autores sugerem que a medição de deformações seja feita por um transdutor de deslocamento situado externamente à câmara triaxial. Uma crítica adicional é feita ao cálculo indireto da força axial no equipamento proposto por Menzies (1988). Além do erro inerente ao cálculo, esta estimativa está sujeita a erros devidos à expansibilidade do sistema, a qual afeta a área de atuação da pressão aplicada, e ao atrito entre as partes moveis da câmara triaxial. Estes autores sugerem que a medição da força axial seja feita diretamente, a partir de uma célula de carga interna à câmara triaxial.

Clayton e Khatrush (1988) descrevem um equipamento automático para controle de trajetórias de tensões no ensaio triaxial. Este equipamento utiliza uma câmara triaxial convencional, porém a força axial não é aplicada pela prensa mecânica original do equipamento, e sim por meio de um atuador pneumático tipo *Bellofram*. A prensa apenas suporta o sistema. Este equipamento de controle é composto por um micro-computador, duas interfaces de aquisição e controle de dados e três motores de passo acoplados a reguladores de pressão de ar. As medições são feitas por célula de carga interna, transdutores de pressão e transdutores locais de deslocamento (utilizando sensores de efeito Hall).

### 2.3.3 Programa de Controle

Para um equipamento de controle automático de trajetórias de tensões ou deformações contendo um micro-computador é vantajoso se fazer máximo uso do poder de programação do micro-computador no que se refere ao controle, análise e operação de dados do ensaio. Estas operações requerem o desenvolvimento de *programas* adequados aos objetivos do usuário.

O controle do ensaio através de um micro-computador - em qualquer sistema automático - é feito continuamente pela seguinte seqüência de operações:

- tomada de um conjunto de leituras através do conversor analógico-digital
- cálculo dos parâmetros do corrente ensaio
- armazenamento dos parâmetros requeridos e plotagem de gráficos relacionando estes parâmetros
- emissão de comandos aos controladores de pressão através de relés, conversores digitais-analógicos ou portas de comunicação digitais, ajustando o ensaio sobre a trajetória de tensões ou deformações escolhida.

Uma vez estando o sistema montado para o desenvolvimento das quatro operações anteriormente descritas, a performance depende basicamente do programa de controle. Isto é vantajoso no sentido de que o programa pode ser facilmente modificado, sem mudanças em equipamento (hardware), para incorporar novos procedimentos de ensaio, como por exemplo, controle de trajetórias de deformação.

Atkinson, Evans e Scott (1985) desenvolveram um programa para controle de ensaio triaxial o qual possibilita ao usuário escolher uma trajetória de tensões ou tipo de ensaio, modificar este plano inicial a cada estágio do ensaio, especificar cada função independentemente ou não, controlar tensão ou deformação e calibrar transdutores.

Menzies (1988) descreve um programa que permite ao usuário escolher as seguintes opções de ensaio: saturação, avaliação do parâmetro B, consolidação isotrópica ou anisotrópica, compressão e/ou extensão UU, compressão e/ou extensão CIU e CAU com medida de poro pressão, compressão e/ou extensão CD, consolidação e/ou expansão  $K_0$  para solos saturados,

trajetórias de tensões lineares, drenadas e não-drenadas, carregamento cíclico, permeabilidade por gradiente hidráulico constante ou por velocidade de fluxo constante.

Outros autores (Li et al, 1988) descrevem programas similares. Law (1981) descreve um programa de controle de trajetórias de tensões não lineares. A trajetória de tensões requerida relaciona a tensão axial (cuja aplicação é feita em uma prensa mecânica, com velocidade de deformação constante) com a tensão radial através de um polinômio de quarto grau.

Khatrush (1987) descreve um programa para controle de trajetórias de tensões lineares. Neste programa, a direção da trajetória a ser seguida define a razão entre tensão axial e radial. A aplicação das tensões é feita com uma das componentes sob controle, a qual são aplicados incrementos constantes de tensão, e outra sendo ajustada em função de seguir a trajetória especificada. Posteriormente, Hopper (1992) implementou o controle de trajetórias de deformações a este programa. A Figura 2.17 mostra um fluxograma de controle de ensaio triaxial apresentado por este autor.

Programas de controle de equipamento triaxial são desenvolvidos em função das características particulares do equipamento utilizado - tipo de câmara triaxial, tipo de sistema de aplicação de pressão, tipo de conversor analógico digital e tipo de transdutores de força e deslocamento. Por isso, este tipo de programa não se encontra disponível comercialmente. No desenvolvimento deste programa é interessante se fazer máximo uso de programas aplicativos disponíveis comercialmente (planilha de cálculo, programação BASIC, etc.).

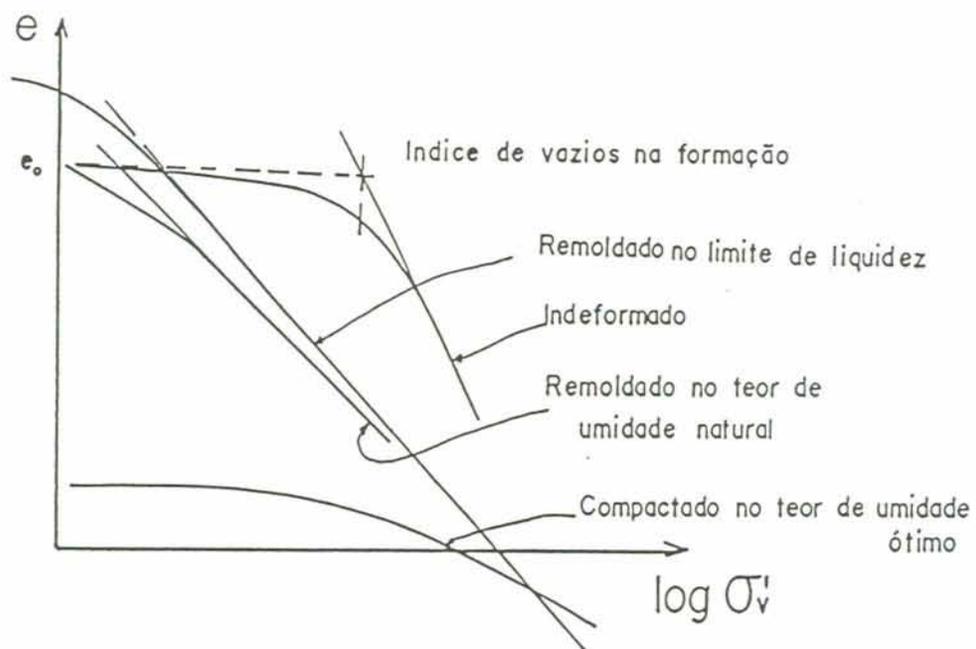


Figura 2.1 - Resultados de ensaios uni-dimensionais sobre solos residuais (Vargas, 1953)

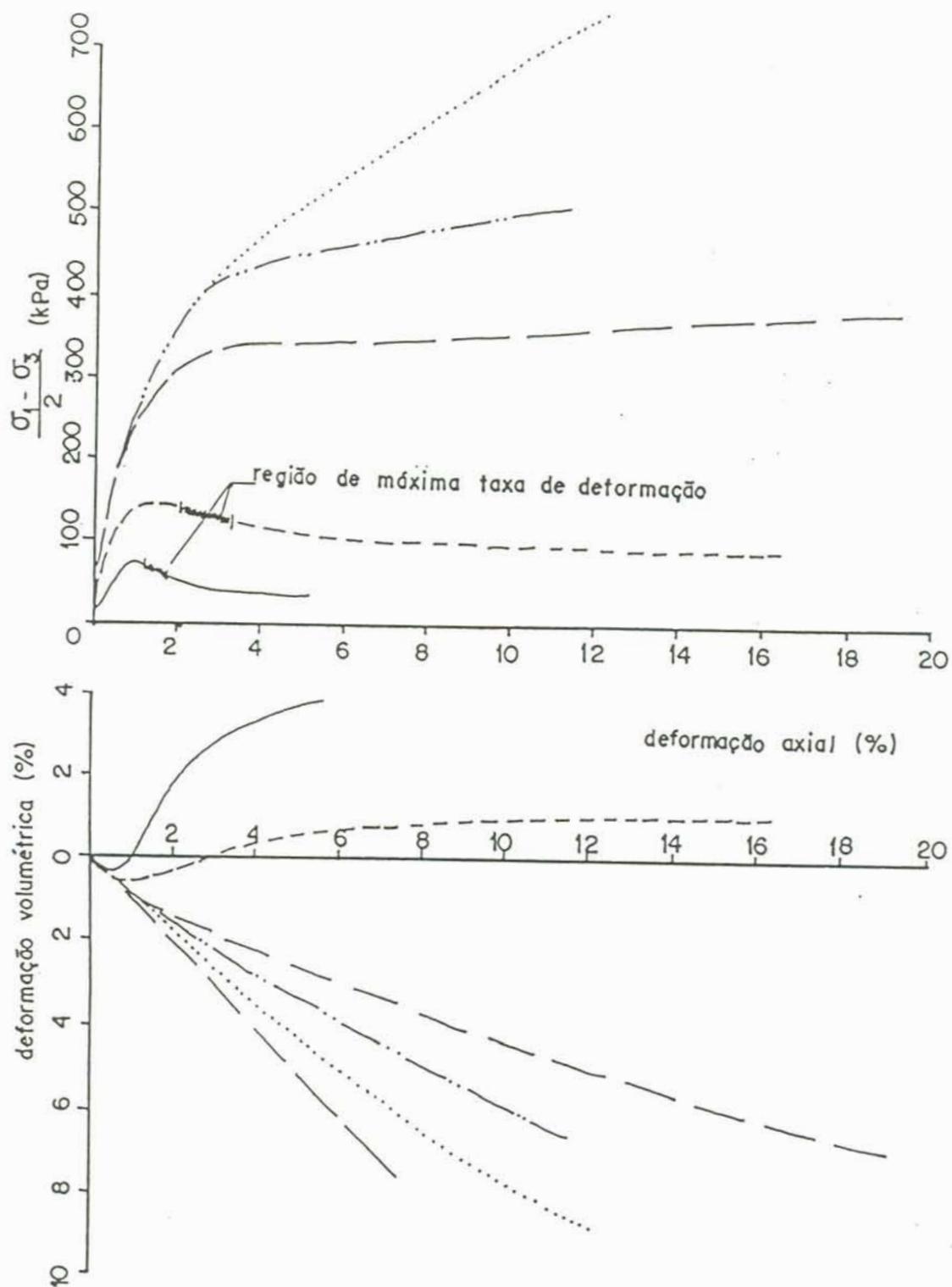


Figura 2.2 - Resultados de ensaios de compressão triaxial em solo cimentado artificialmente (Maccarini, 1987)

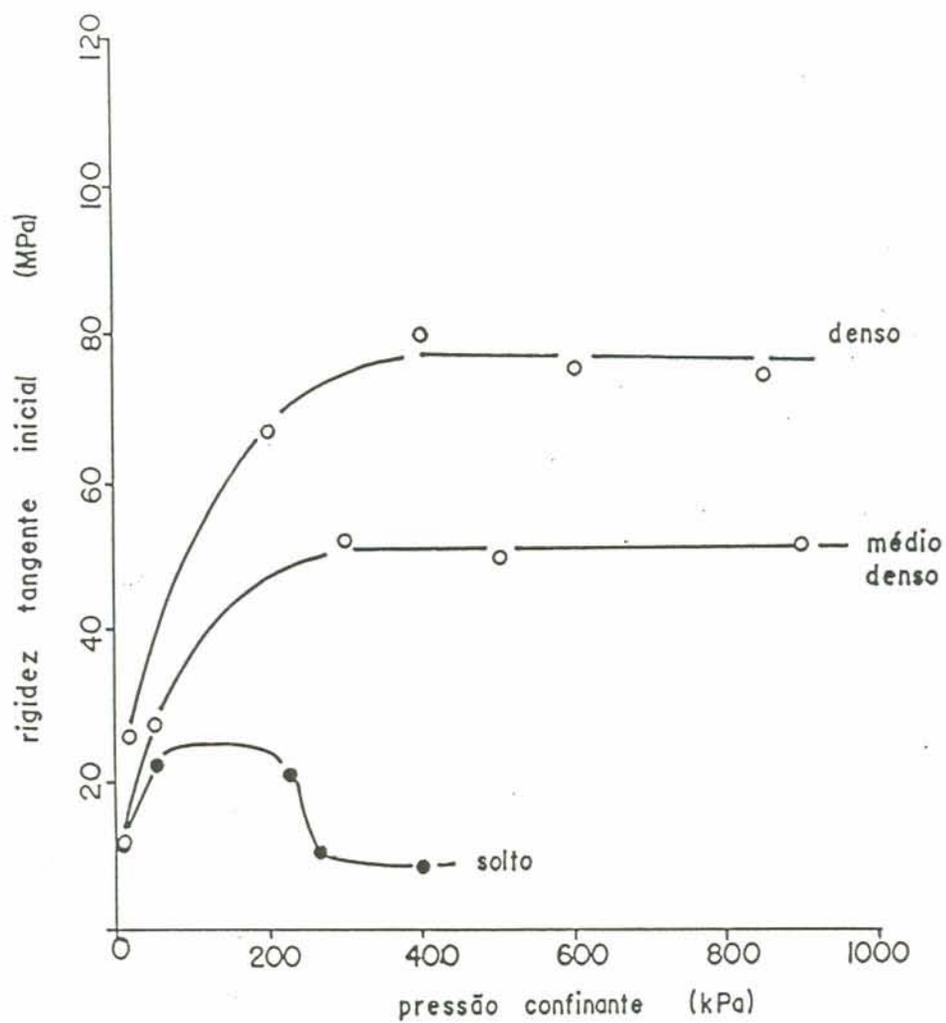


Figura 2.3 - Rigidez inicial medida em ensaios triaxiais drenados sobre solo artificial (Maccarini, 1987)

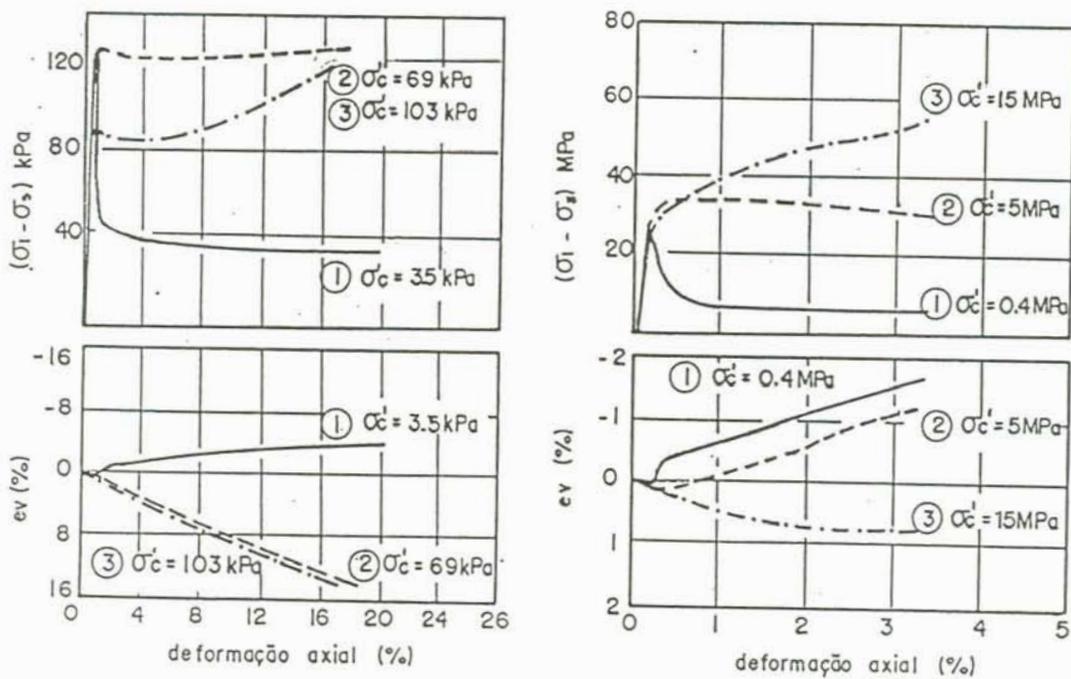
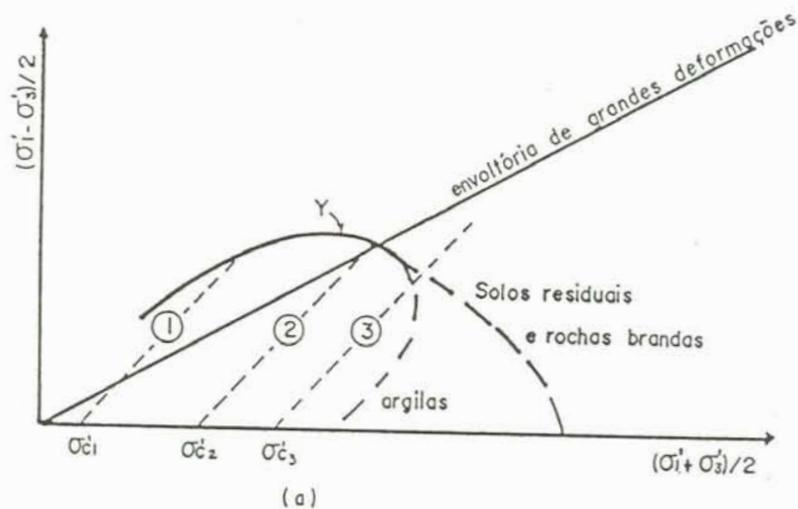


Figura 2.4 - Ensaio triaxiais drenados sobre dois materiais estruturados (Leroueil & Vaughan, 1990)

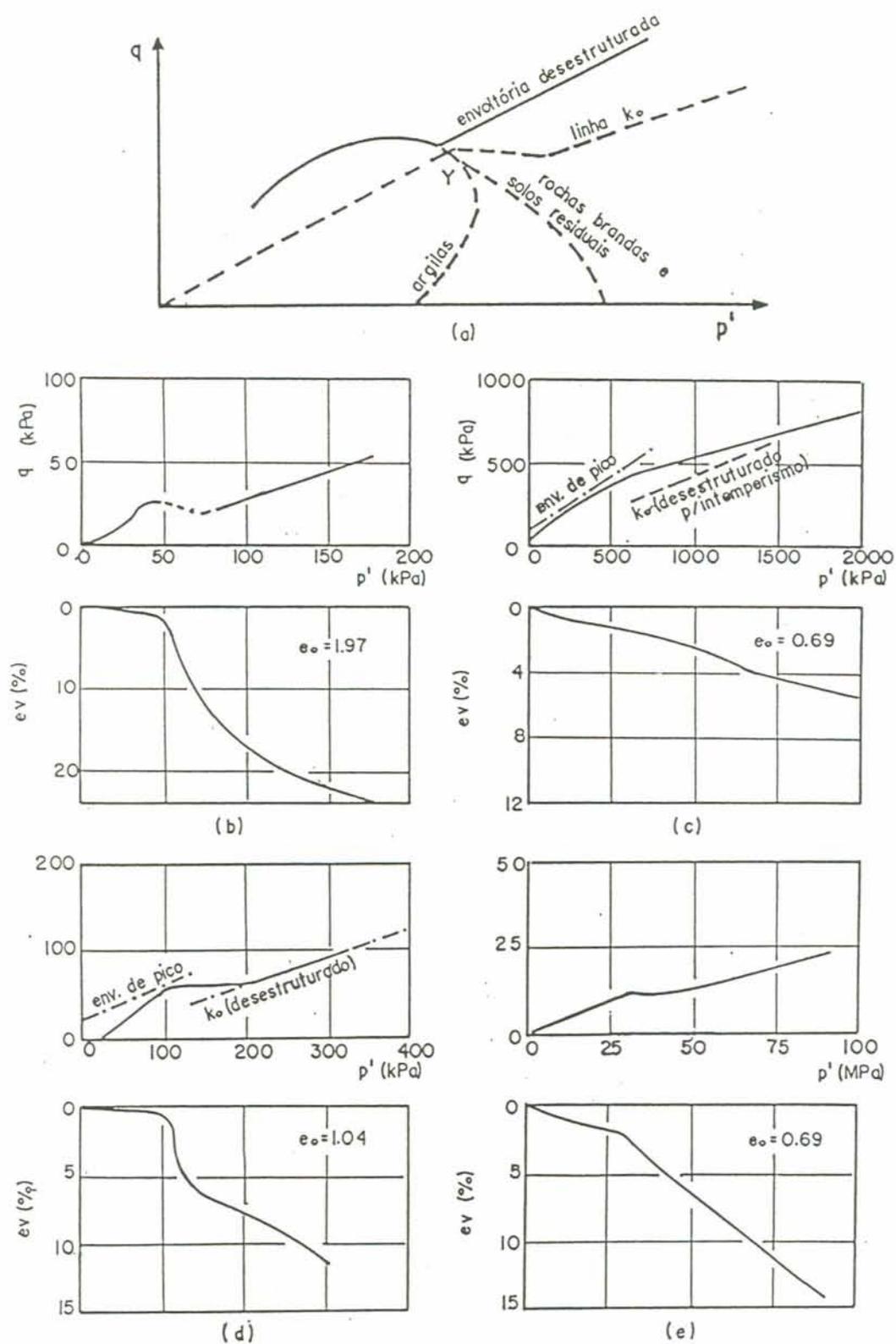


Figura 2.5 - Resultados de ensaios unidimensionais sobre quatro diferentes materiais estruturados (Leroueil e Vaughan, 1990)

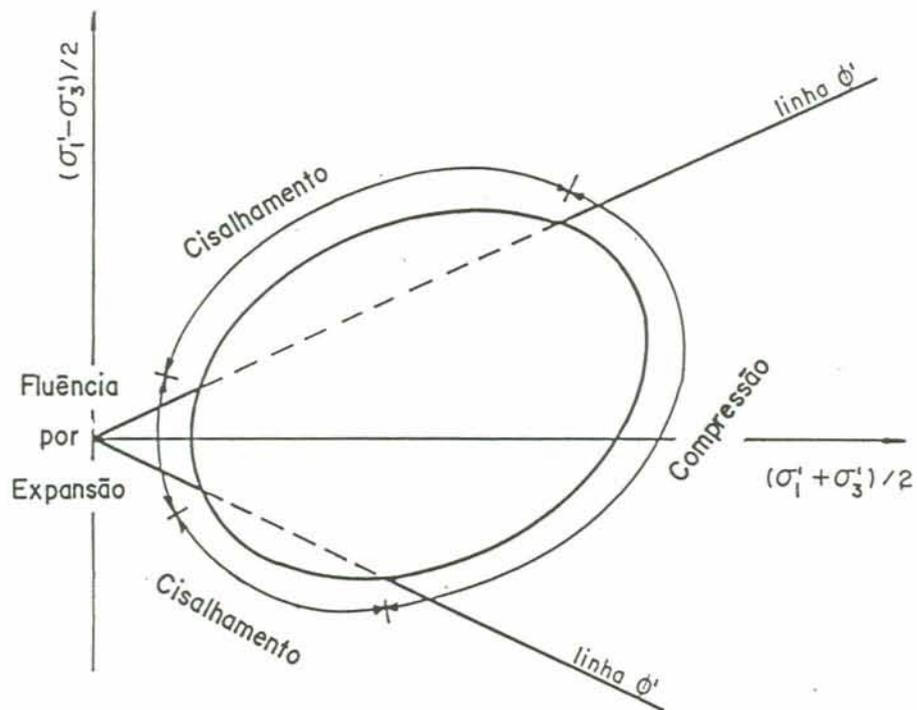


Figura 2.6 - Zonas esquemáticas de fluência de solos estruturados (Leroueil e Vaughan, 1990)

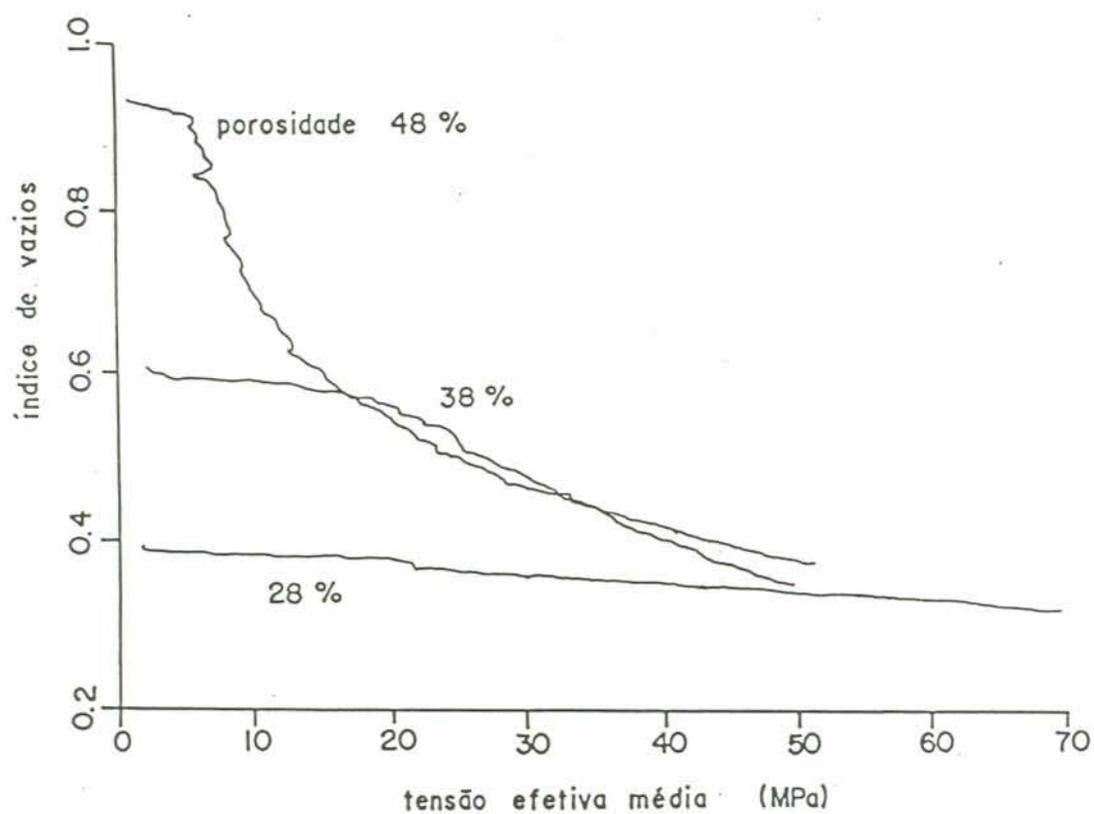
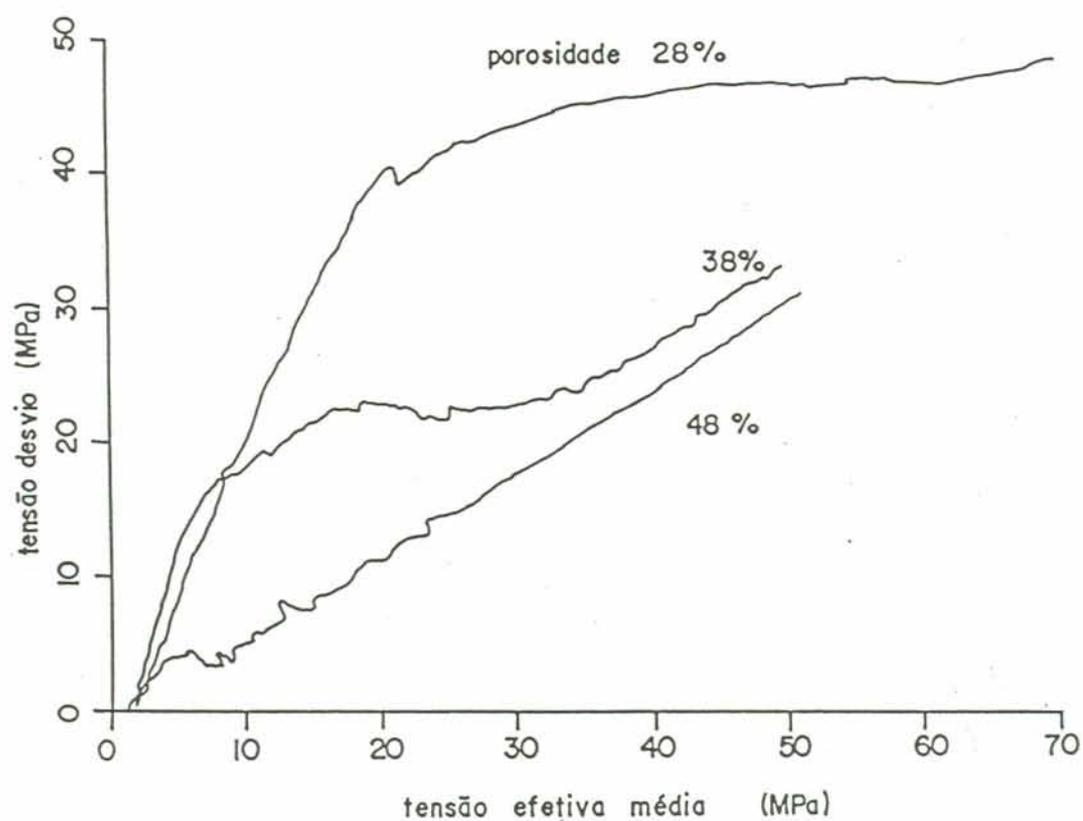


Figura 2.7 - Ensaio de compressão uni-dimensional sobre calcário (Ledra, 1990)

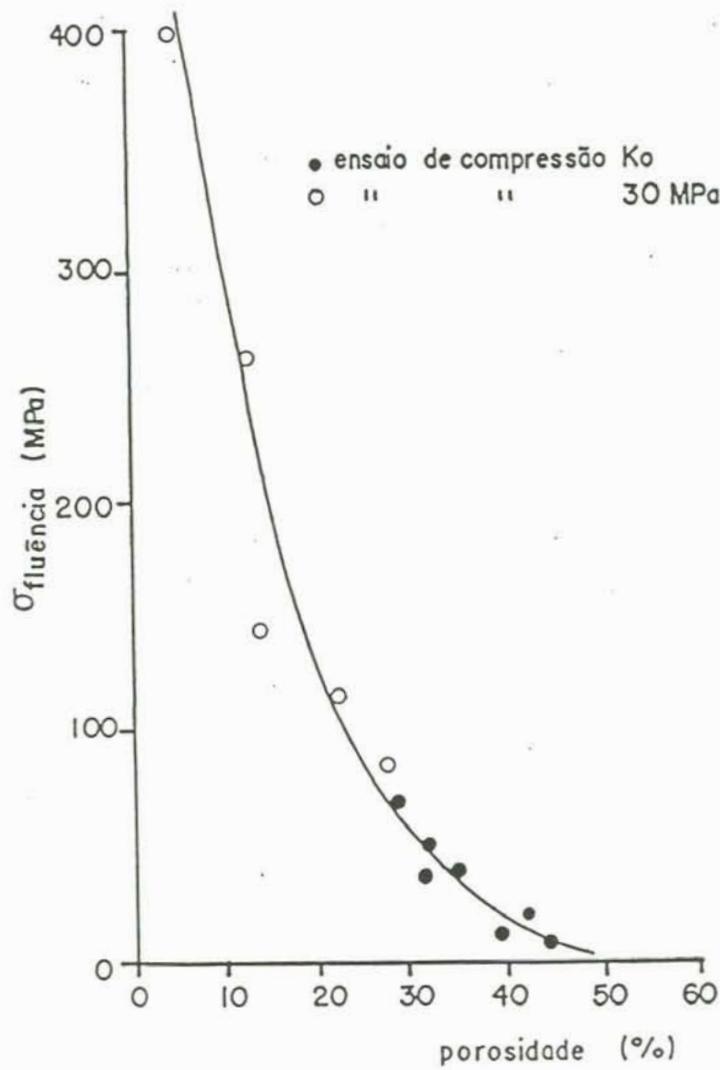


Figura 2.8 - Variação da tensão de fluência com a porosidade em calcáreo (Jones & Preston, 1987)

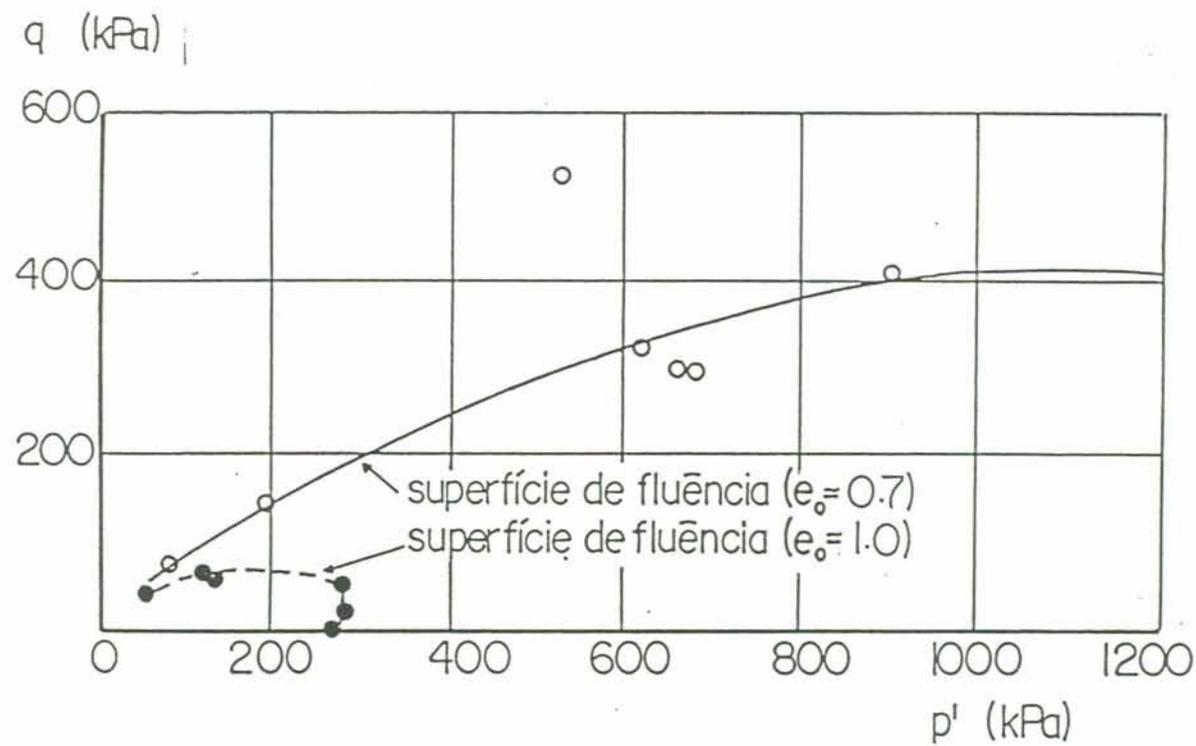
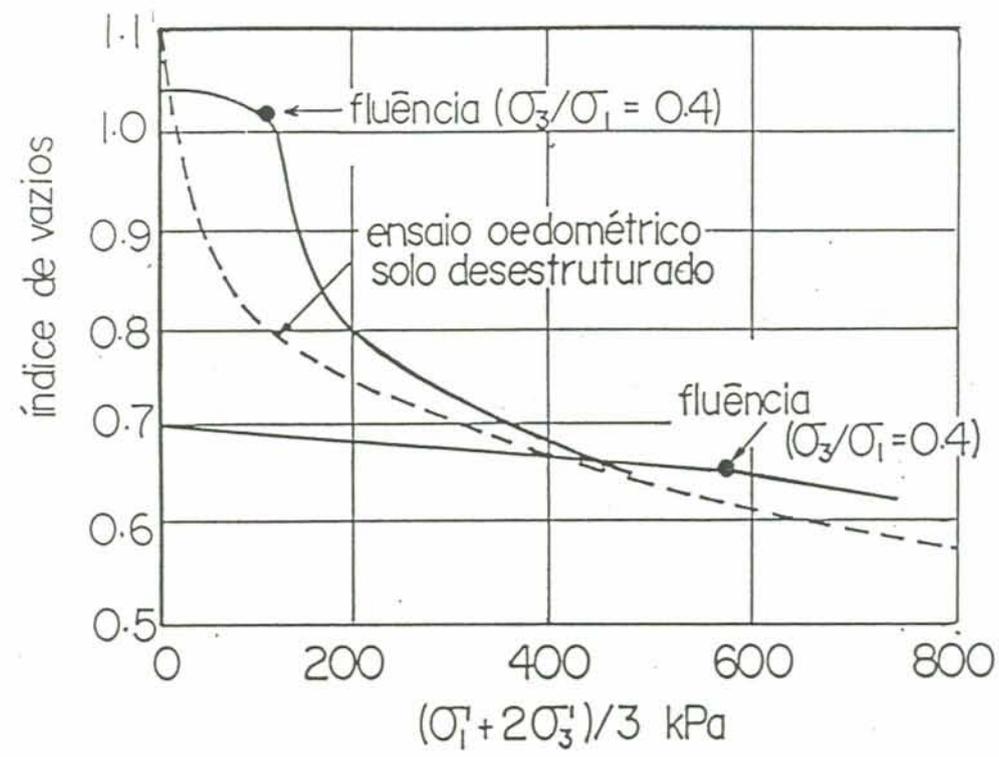


Figura 2.9 - Fluência observada em um solo cimentado artificialmente para dois índices de vazios diferentes (Maccarini, 1987)

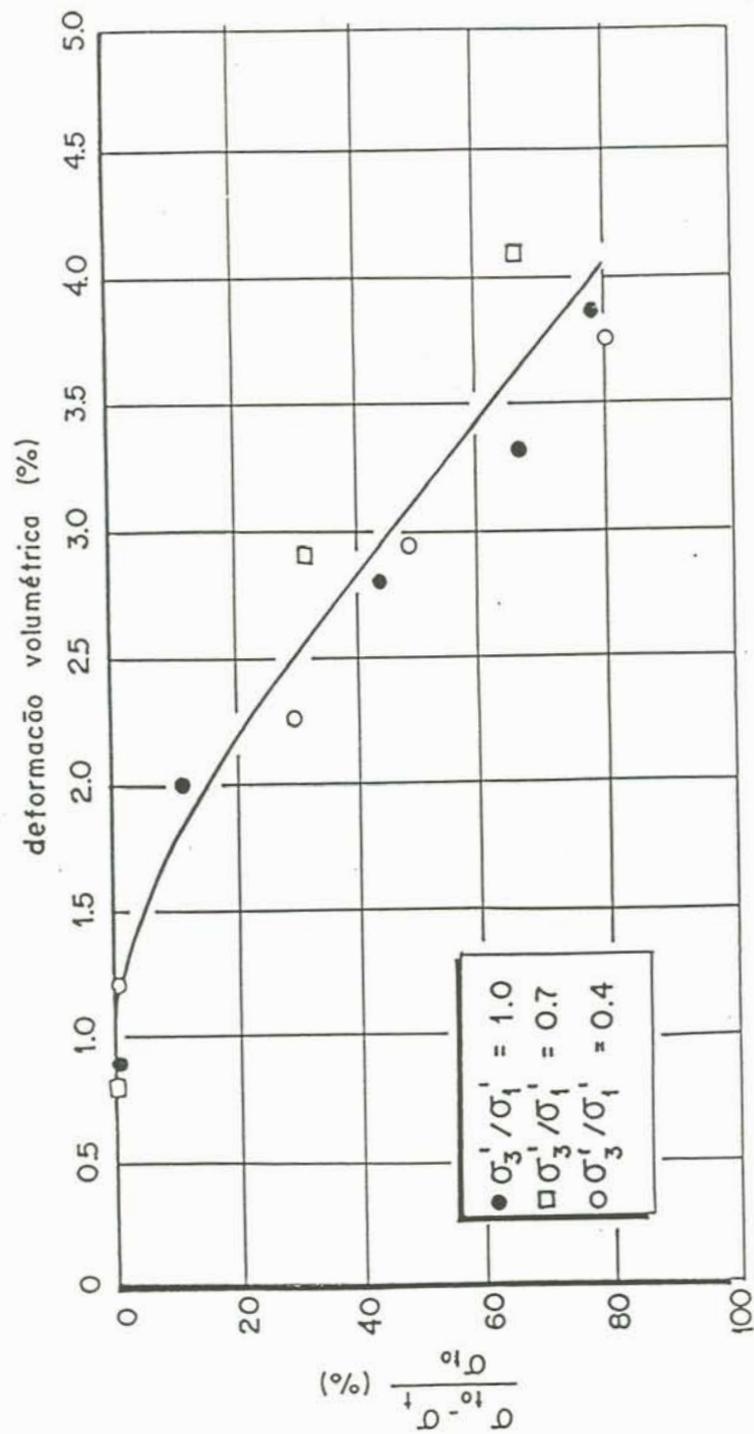


Figura 2.10 - Perda da resistência a tração com a deformação volumétrica em solo artificial (Maccarini, 1987)

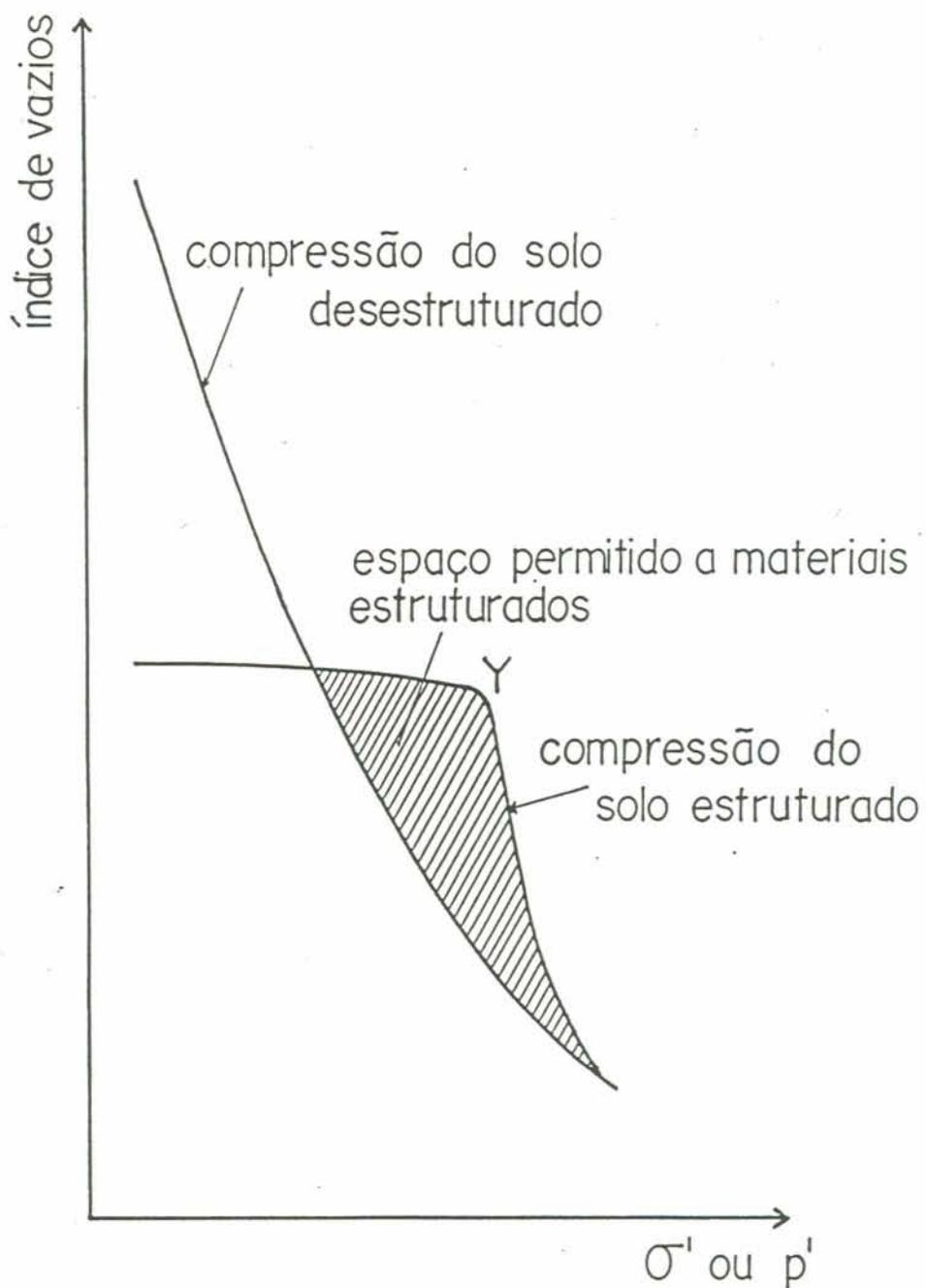


Figura 2.11 - Comparação entre compressão estruturada e compressão desestruturada no ensaio oedométrico (Vaughan, 1988)

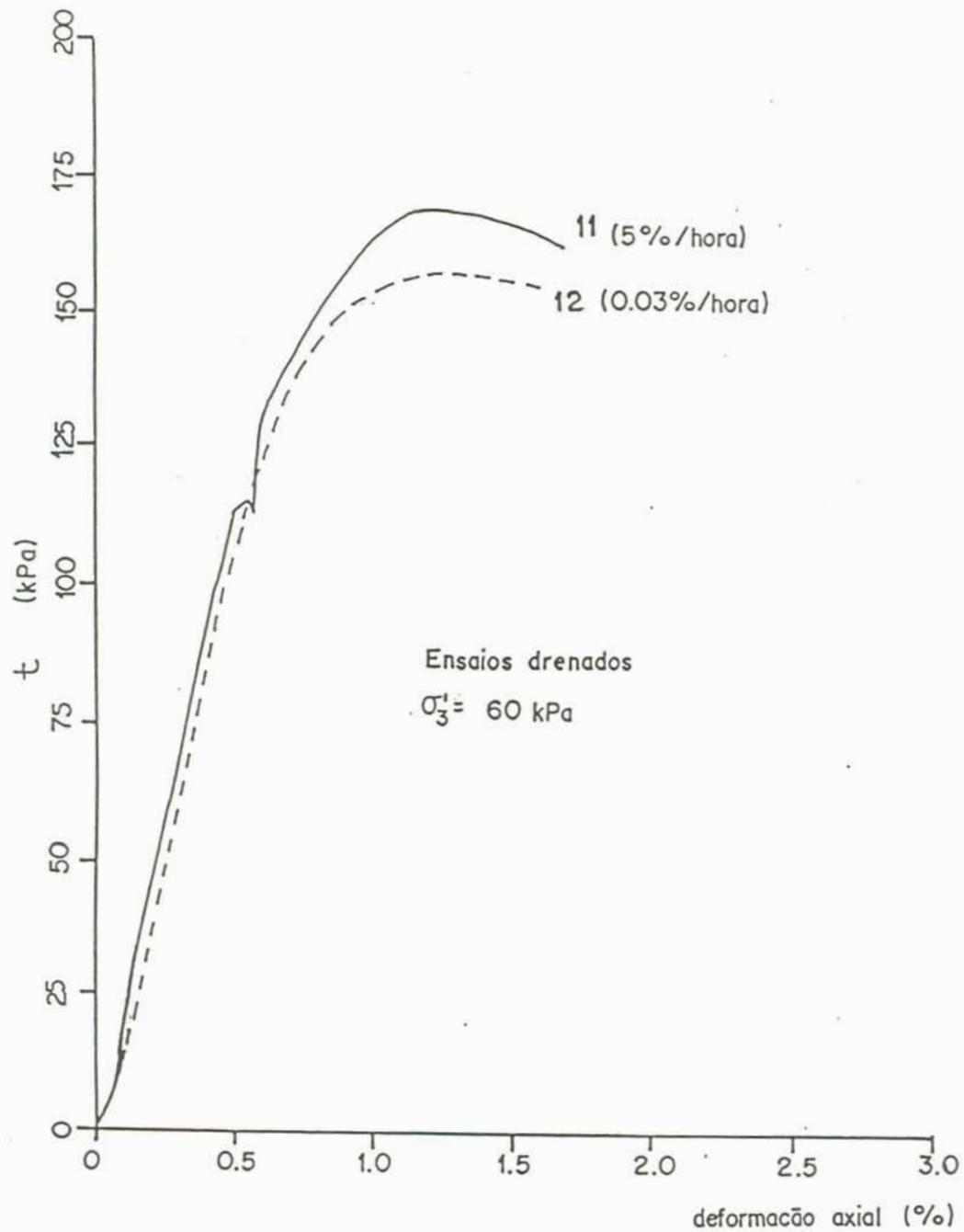


Figura 2.12 - Influência da velocidade de cisalhamento em ensaios de compressão drenados sobre solo artificial (Bressani, 1990)

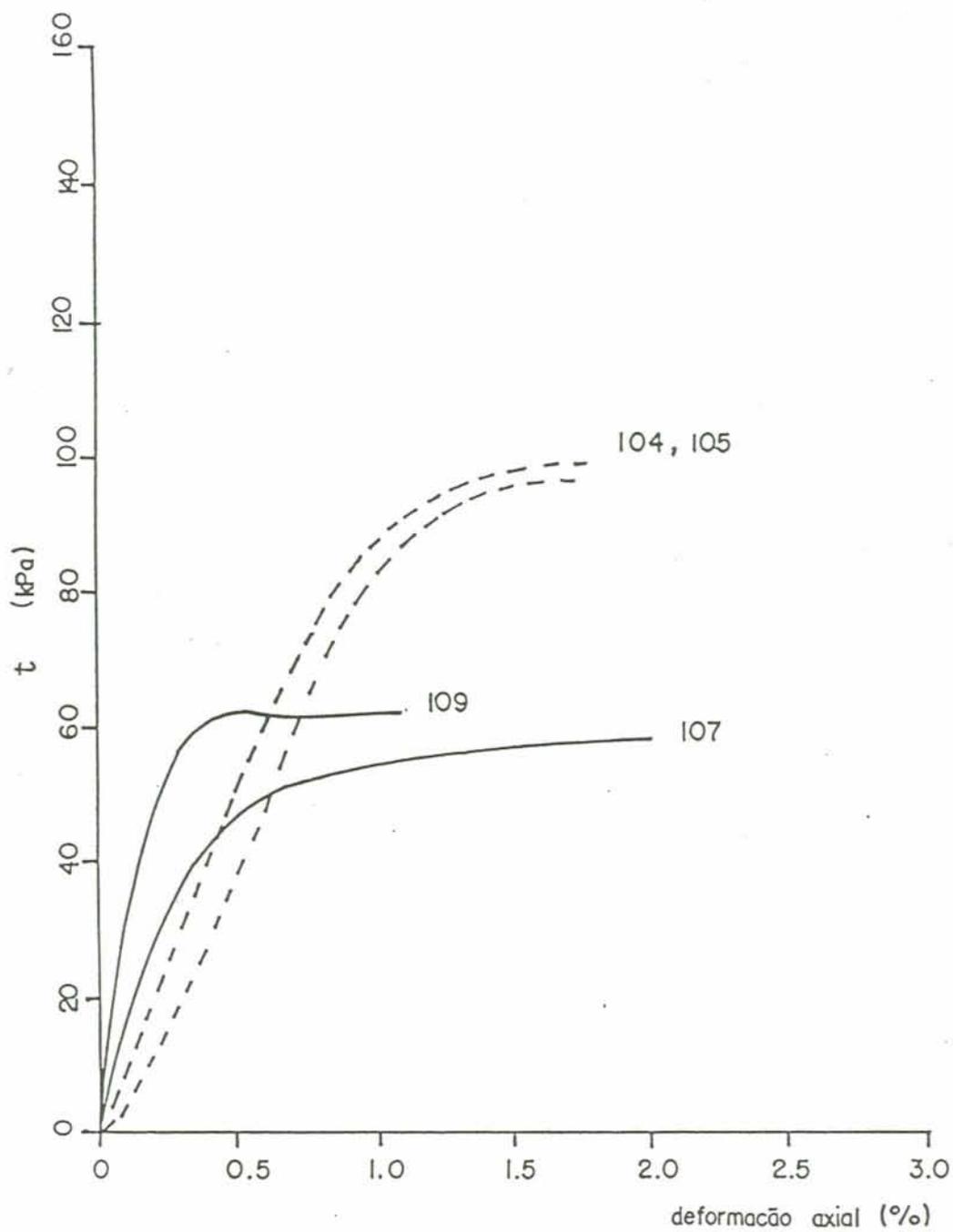


Figura 2.13 - Influência do ciclo de cargas sofrido durante a saturação - solo artificial (Bressani, 1990)

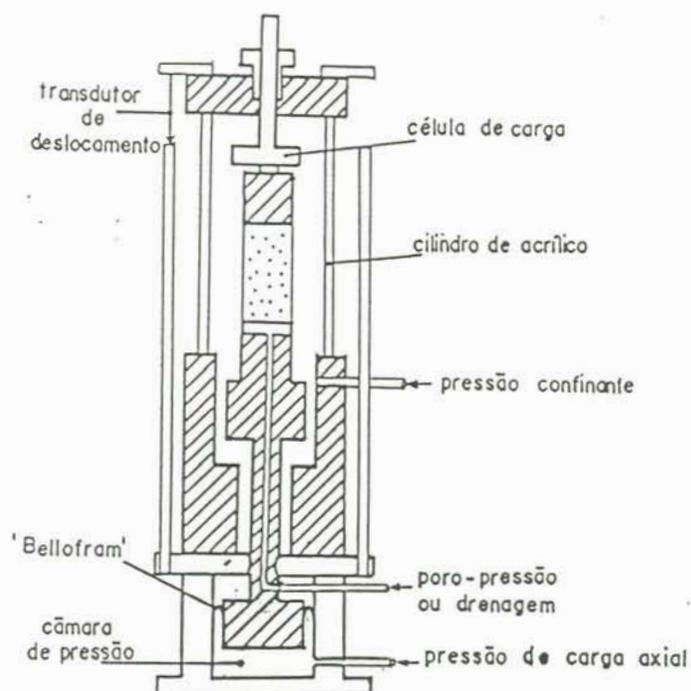


Figura 2.14 - Câmara Triaxial Bishop-Wesley (1975)

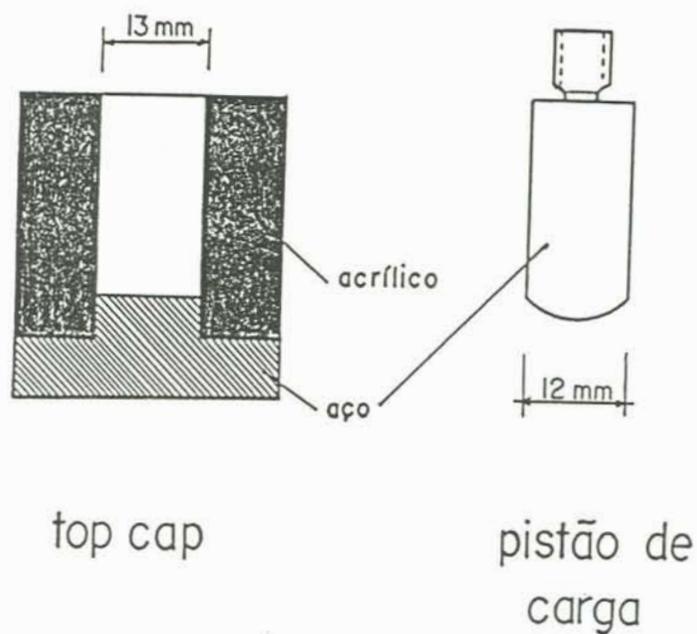


Figura 2.15 - Top-cap proposto por Bressani (1990)

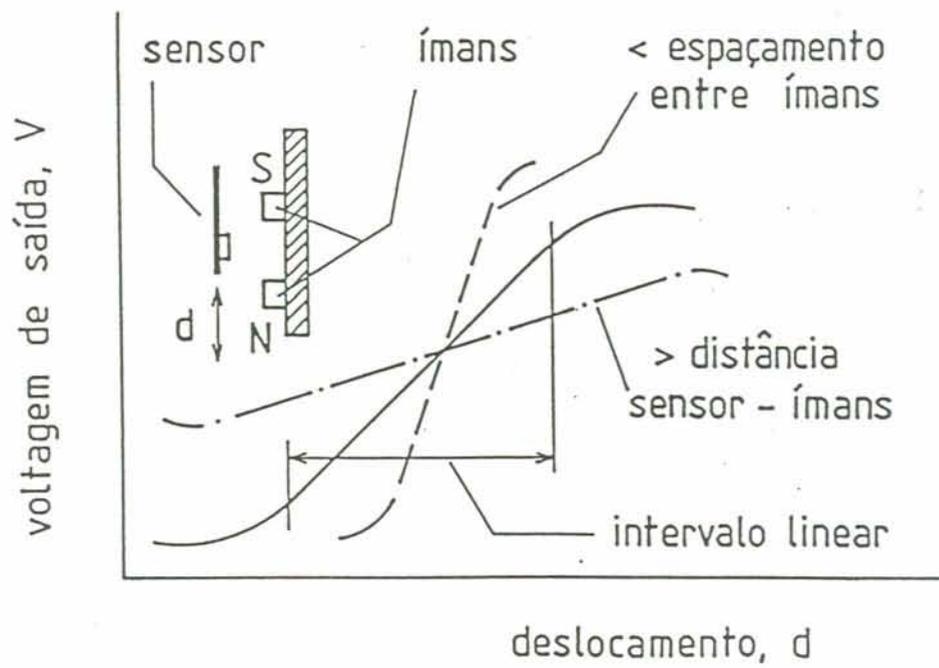


Figura 2.16 - Sensor de efeito Hall - configuração proposta por Clayton & Khatrush (1986)

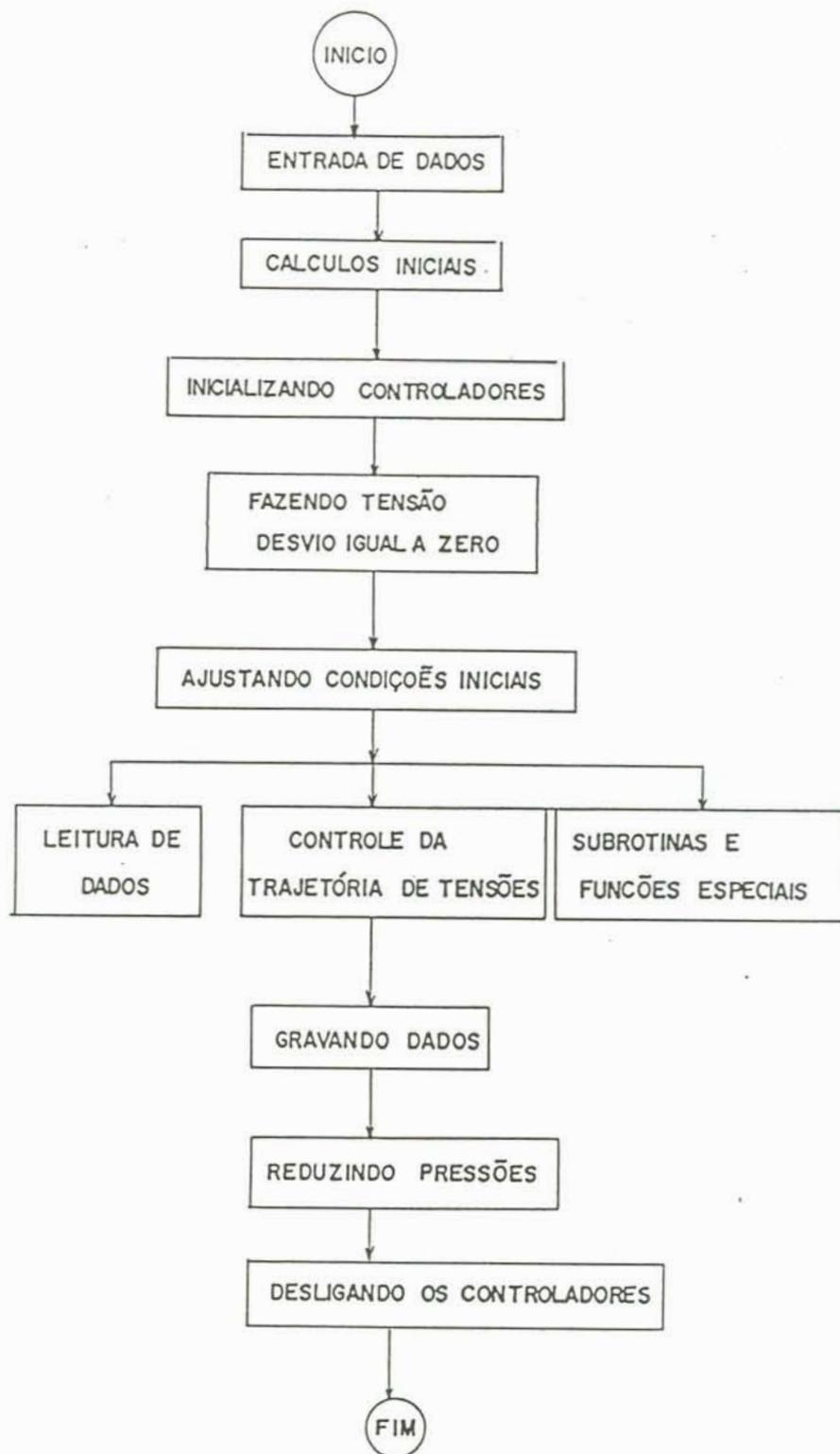


Figura 2.17 - Fluxograma do programa de controle de trajetória de tensões (Khatrush, 1987)

### 3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Um diagrama do equipamento triaxial com controle automático de trajetórias de tensões é mostrado na Figura 3.1. Do ponto de vista funcional, o equipamento é composto por três sistemas: sistema geotécnico, conversor-analógico digital, micro-computador e periféricos.

#### 3.1. Sistema Geotécnico

O sistema geotécnico é composto por uma câmara triaxial, um sistema de aplicação de pressão, e instrumentação para medição de forças e deformações. O equipamento triaxial utilizado neste trabalho foi adaptado a partir de um equipamento triaxial convencional fabricado pela empresa Wykeham-Farrance Ltd. Diversas modificações foram feitas neste equipamento, conforme descrito a seguir.

##### 3.1.1. Câmara Triaxial

A fim de viabilizar a realização de trajetórias de tensões alternativas, a câmara triaxial do equipamento Wykeham-Farrance foi substituída por uma câmara triaxial tipo Bishop-Wesley (Bishop e Wesley, 1975). Esta câmara foi construída no LMS/UFRGS, com algumas diferenças em relação ao equipamento original descrito por Bishop-Wesley (1975), mostrado na Figura 2.14.

A Figura 3.2 ilustra a câmara triaxial utilizada neste trabalho. A principal alteração em relação à câmara Bishop-Wesley original (Figura 2.14) consiste na supressão dos rolamentos lineares do pistão de cargas. No equipamento proposto, o pistão de cargas se ajusta perfeitamente à base da câmara através de uma

bucha de bronze. A vedação, neste ponto, se dá por um anel "O"-ring. A supressão dos rolamentos implica que um maior esforço é necessário para mover o pistão, devido ao atrito. No entanto, a medição da força axial é feita internamente à câmara triaxial através de uma célula de carga, e, portanto, não é afetada por este atrito.

Outra alteração refere-se à câmara triaxial propriamente dita. A câmara tipo Bishop-Wesley disponível no LMS/UFRGS foi projetada para corpos de prova com 38mm de diâmetro. Neste trabalho, porém, tendo em vista a medição local de deformações, optou-se por utilizar uma câmara do equipamento de ensaio triaxial já existente no laboratório, fabricado pela GEONOR A/S, projetada para corpos de prova com 50mm de diâmetro, incluindo a possibilidade de medição local de deformações (item 3.1.3.3). Para conectar a câmara triaxial GEONOR à base da câmara triaxial tipo Bishop-Wesley, a placa da base da câmara triaxial tipo Bishop-Wesley foi substituída por uma nova placa desenvolvida para permitir esta interface.

### 3.1.2. Sistema de Aplicação de Pressão

Para a obtenção das trajetórias de tensões requeridas, dois tipos de sistema de aplicação de pressão foram utilizados. A aplicação da pressão confinante e da força axial foi feita por um servo-mecanismo de controle. O controle de contra-pressão foi feito com um sistema de pressão constante por potes de mercúrio.

#### a) servo-mecanismo de controle de pressão

Servo-mecanismos foram implementados nos cilindros de controle de pressão originais do equipamento Wykeham-Farrance para viabilizar o controle automático de tensão confinante e força axial.

O cilindro de controle de pressão foi descrito por Bishop e Henkel (1962) e é mostrado na Figura 3.3. Este cilindro consiste de um êmbolo guiado por um eixo rosqueado através do qual se pode controlar a pressão do fluido no seu interior. Na

base do cilindro encontram-se conexões para o painel de controle de pressões do equipamento Wykeham-Farrance. A vedação do cilindro é garantida por anéis "O"-ring situados na superfície lateral do êmbolo.

A Figura 3.3 mostra o servo-mecanismo de controle de pressão que consiste dos seguintes elementos:

- *Motor de corrente contínua*, modelo Bosch DHP 12, 48 rpm, 12V. Este motor é alimentado por uma bateria de 36Ah. Esta bateria é constantemente re-carregada por uma fonte de corrente contínua de 12V, conectada à rede elétrica.

- *Caixa de Redução 1:50*, marca "Geremia"

- *Conjunto de polias e correias dentadas*. Estes componentes conectam o motor elétrico à caixa de redução e esta ao eixo rosqueado do cilindro de controle de pressão. Este conjunto gera uma redução na velocidade de rotação de 1:4, que, juntamente com a caixa de redução, produzem uma redução total de 1:200. Conforme mostrado na Figura 3.3, a polia 4 é fixada ao cilindro de controle de pressão através de dois discos que impedem movimento de translação. Para evitar o atrito entre a polia e os discos, três espaçadores são colocados entre estes componentes, garantindo um afastamento maior que a largura da polia. No espaço entre os discos e a polia foram colocadas arruelas para minimizar a folga gerada pelos espaçadores, sem, no entanto, promover atrito, pois as arruelas não são fixas e podem girar simultaneamente com a polia. Uma correia dentada conecta a polia 4 a uma polia menor (polia 3) fixada ao eixo de saída da caixa de redução. No eixo de entrada da caixa de redução outra polia (polia 2) é conectada por uma segunda correia dentada à polia 1 a qual é fixada ao eixo do motor.

#### . Dispositivos de Segurança

A introdução de controle automático permite que ensaios

de longa duração sejam realizados sem a presença de um operador, exceto para iniciar e interromper o ensaio. No entanto, tratando-se de um mecanismo servo-controlado, duas situações críticas podem ocorrer durante o ensaio: (i) término do curso do eixo rosqueado do cilindro de controle, (ii) elevação da pressão a um nível acima do nível admissível pelos componentes do sistema geotécnico. Para estas duas situações foram previstas as seguintes medidas de segurança:

(i) uso de *micro-interruptores de corrente*: são componentes eletro-mecânicos dispostos de forma a serem acionados junto ao final do curso do eixo rosqueado do cilindro de controle. Quando acionados, estes componentes interrompem a corrente de alimentação dos motores elétricos.

(ii) limitação do nível de pressão máximo admissível no programa de controle: caso a pressão medida pelo transdutor atinja um valor limite pré-estabelecido, o programa procede o desligamento do sistema.

#### **b. Sistema de Pressão Constante**

O sistema de auto-compensação de pressão constante utilizado neste trabalho foi o de potes de mercúrio, descrito por Bishop e Henkel (1962) e fabricado pela empresa Wykeham-Farrance Ltd. (modelo WF 12820). Neste sistema, a pressão é gerada pela diferença de altura entre a superfície de mercúrio em um pote superior móvel e a superfície de mercúrio em um pote inferior fixo. O pote superior é suspenso por uma mola calibrada. Qualquer variação volumétrica no corpo de prova resulta em uma mudança nos níveis de mercúrio entre os potes superior e inferior, garantindo que a altura da coluna de mercúrio entre os potes se mantenha constante, e assim, também, a pressão aplicada. Para evitar vazamentos, os potes de mercúrio originais foram substituídos por novos, acrescentando-se um reforço com placas de aço fixadas por tirantes.

### 3.1.3. Instrumentação

Neste trabalho, a medição de deformações é feita diretamente sobre o corpo de prova. A força axial foi medida internamente à câmara triaxial com uma célula de carga. Pressão confinante e poro-pressão são medidas por transdutores de pressão. Para medição da variação volumétrica, foi desenvolvido um transdutor de variação volumétrica e buretas de 0.01 ml de resolução. A seguir encontram-se descritos cada um destes instrumentos.

#### 3.1.3.1. Medição de Deformações

A medição de deformações foi feita utilizando instrumentação a base de sensores de efeito Hall.

##### (a) Deformação Axial

Os transdutores de deformação axial utilizados neste trabalho foram construídos no LMS/UFRGS, tendo sido descritos por Soares (1992). A Figura 3.4 mostra o modelo de transdutor construído, o qual foi desenvolvido originalmente por Clayton e Khatrush (1986). Conforme Soares (1992), cada transdutor consiste em um sensor de efeito Hall encapsulado em um recipiente metálico o qual é preenchido com resina epóxi e vedado por uma lamínula de vidro a fim de impedir a entrada de água. Os magnetos são fixados a uma pequena barra metálica e esta a uma sapata que se apoia diretamente sobre o corpo de prova. O compartimento do sensor é sustentado por uma haste metálica que exerce uma pequena pressão contra a barra onde situam-se os magnetos. Um pino de *teflon* fixado na barra dos magnetos impede o atrito e mantém constante o afastamento entre os magnetos e o sensor. A haste possui um rasgo que permite ajustar a posição do sensor em relação aos magnetos ao longo de um curso de 10mm para o posicionamento do sensor dentro do intervalo linear de calibração. A haste, assim como os magnetos, é fixada ao corpo de prova através de sapatas de apoio as quais são coladas diretamente sobre a membrana.

### (b) Deformação Radial

A Figura 3.5 mostra o transdutor utilizado para medição de deformação radial. Este instrumento foi desenvolvido por Bressani (1990). O transdutor de deformação radial consiste de um anel bi-partido com uma extremidade rotulada e outra aberta. De um lado da extremidade aberta encontra-se um sensor de efeito Hall encapsulado em resina epóxi e, do outro, uma barra com um par de magnetos. O anel é vinculado ao corpo de prova através de duas sapatas de apoio as quais são coladas à membrana triaxial. As sapatas possuem uma curvatura própria para adaptação sobre corpos de prova de 50 mm de diâmetro. O medidor de deformação radial se apoia às sapatas através de dois pinos cônicos que dão ao instrumento liberdade de giro, permitindo a abertura do anel. A deformação do corpo de prova promove, assim, um deslocamento relativo entre as duas sapatas e, conseqüentemente, do sensor em relação aos magnetos.

#### 3.1.3.2. Medição de Pressão Confinante e Poro-pressão

A medição da poro-pressão e da pressão confinante é feita por transdutores de pressão da marca DRUCK, modelo PDCR 810. Este modelo cobre um intervalo de até  $700 \text{ KN/m}^2$ . A voltagem de alimentação é de 10V e a correspondente leitura de fundo de escala é igual a 100,4 mV. Estes transdutores foram montados sobre blocos metálicos para permitir o fácil desairamento. Os blocos metálicos foram posicionados junto à câmara triaxial a fim de minimizar efeitos devido a expansibilidade de tubulações. Tubos de cobre foram utilizados para conectar o transdutor ao corpo de prova.

#### 3.1.3.3. Medição da Força Axial

A medição da força axial é feita por uma célula de carga situada internamente à câmara triaxial. A Figura 3.6 mostra uma célula de carga tipo cruzeta construída no LMS/UFRGS (Bica et al, 1986). Nesta célula, o elemento sensível é formado por quatro vigas engastadas a um anel rígido central. Estas vigas são instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência

conectados em ponte completa. A célula é protegida por uma membrana flexível que forma uma câmara de óleo a qual protege os extensômetros do contato com a água e, sendo a membrana flexível, evita diferencial de pressão entre a câmara triaxial e a célula de carga. Assim, a tensão de confinamento não causa deformações na célula de carga, que registra apenas a força axial imprimida contra o anel central. Células tipo cruzeta apresentam baixa não-linearidade ( $<0.3\%$ ), baixa histerese ( $<0.3\%$ ), baixa deflexão ( $<0.1\%$ ), ausência de folga e podem ser empregadas tanto na compressão quanto na extensão axial.

#### 3.1.3.4. Medição de Variação Volumétrica

##### (a) Transdutor de Variação Volumétrica tipo "Bellofram"

A Figura 3.7 mostra um modelo de transdutor de variação volumétrica tipo Imperial College. Este modelo foi construído no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS/UFRGS) e se baseia na conversão de uma variação volumétrica em um deslocamento linear. O instrumento consiste de um êmbolo cilíndrico móvel em cujas extremidades se fixam duas membranas *Bellofram*. Cada uma das membranas forma uma pequena câmara hidráulica. Uma das câmaras está conectada ao corpo de prova e a outra ao sistema de potes de mercúrio. O êmbolo flutua verticalmente conforme a variação de volume da mini-câmara conectada ao corpo de prova, promovendo um fluxo correspondente na segunda mini-câmara conectada ao sistema de potes de mercúrio, mantendo constante a pressão. Um transdutor de deslocamento linear (tipo LVDT, marca Sangamo) apoia-se a uma haste metálica conectada ao êmbolo, registrando seu movimento vertical. Antes de iniciar o ensaio, as duas mini-câmaras são equilibradas à pressão do interior do corpo de prova e o êmbolo é ajustado à posição correspondente ao intervalo linear do LVDT. Para isto, é aberta uma válvula que faz a conexão entre as duas mini-câmaras, permitindo, quando aberta, o movimento do êmbolo sem diferencial de pressão. A conexão com o corpo de prova é feita por um tubo de cobre a fim de minimizar a variação volumétrica devida a expansibilidade das tubulações.

### (b) Buretas

Alternativamente ao transdutor de variação volumétrica, foi construído um sistema de duplas buretas para medição da variação volumétrica. Proposto originalmente por Bishop e Donald (1961), o instrumento permite a medida da variação volumétrica de um sistema sob pressão pelo deslocamento da superfície entre dois líquidos não-miscíveis (querosene e água). Visando atingir uma resolução compatível ao estudo do comportamento tensão-deformação de solos naturais cimentados, os quais apresentam mudanças de comportamento à pequenas deformações, foi construído um sistema de duplas buretas utilizando buretas de 5ml (Figura 3.8). Conforme mostra a figura, o instrumento consiste de dois cilindros dentro dos quais são colocadas buretas de vidro graduadas. O topo e a base são metálicos. As buretas são conectadas pela base. Um sistema de válvulas permite conectar ora uma bureta, ora outra, ao corpo de prova ou ao sistema de potes de mercúrio. A conexão do topo liga um cilindro de acrílico ao outro. Uma vez terminado o curso de uma bureta, o sistema de válvulas permite a inversão de fluxo. As leituras são tomadas sempre na direção de fluxo descendente, evitando os erros devidos à reversão de menisco.

### 3.2. Conversor Analógico-Digital

O conversor analógico-digital é o elemento que permite a interface entre o micro-computador e o sistema geotécnico. Através do conversor A/D as leituras dos transdutores são enviadas ao micro-computador e os comandos de operação do sistema de pressões definidos no programa de controle são enviados aos motores elétricos.

A cada leitura dos transdutores, o conversor A/D converte o sinal analógico (voltagem) em um sinal digital que pode ser reconhecido pelo micro-computador. A precisão da conversão depende da resolução e da capacidade de amplificação do conversor A/D.

A resolução é determinada pelo número de divisões

(incrementos) que o conversor A/D permite obter. Um conversor de 8 bits permite dividir a escala de leitura do transdutor em 256 incrementos ( $2^8$ ). Um conversor de 15 bits (utilizado neste trabalho) pode dividir o mesmo intervalo em 32768 incrementos ( $2^{15}$ ). A conversão do sinal pode ser feita de forma a adequar a voltagem de saída do transdutor dentro de um intervalo ótimo (o menor possível) que será a base da escala a ser dividida. Assim, pode-se associar a voltagem de saída do transdutor a uma escala de 10 V com 32768 incrementos (1 incremento = 0.305 mV) ou a uma escala de 50 mV com 32768 incrementos (1 incremento = 0,0015 mV). A interface utilizada neste trabalho oferece quatro opções de escolha de intervalos escalares, respectivamente,  $\pm 10V$ ,  $\pm 1V$ ,  $\pm 100mV$  e  $\pm 50mV$ . Os transdutores utilizados no presente trabalho apresentam diferentes voltagens de saída, variando de aproximadamente 2V (sensores de efeito Hall) a 15 mV (célula de carga).

A interface utilizada neste trabalho foi fabricada pela empresa CIL Group (modelo CIL 6580). Esta interface é munida de dois sistemas padrões de transferência de dados para o micro-computador, IEEE-488 (paralela) e RS-232 (serial). Possui oito entradas (inputs) analógicas, quatro saídas (outputs) analógicas, quatro relés internos e dezesseis pinos digitais I/O (input/output). Esta interface possui uma memória RAM de 4K livre para manipulação de dados. A velocidade de leitura de dados é da ordem de uma leitura a cada meio mili-segundo. Esta velocidade pode ser artificialmente manipulada via programação. Pode-se, por exemplo, armazenar um número de leituras de até 4 kB na memória do conversor e depois enviá-las ao micro-computador. Outro artifício disponível refere-se ao comando *filtro*. Este comando permite ao usuário filtrar as leituras enviando ao micro-computador o valor médio de até 32768 leituras ( $2^{15}$ ). Este procedimento permite ao usuário obter uma estimativa mais precisa do real valor da leitura, reduzindo eventuais perturbações devidas a, por exemplo, ruídos elétricos. Por outro lado, um número muito alto de leituras envolvidas na média envolve um período de tempo da ordem de alguns minutos. Cabe ao usuário definir o equilíbrio entre consumo de tempo x precisão desejada ideal ao seu trabalho. Neste trabalho, foi adotado um filtro 8,

ou seja, o conversor envia a média de  $2^8$  leituras tomadas para cada canal.

Para acionamento dos motores foram utilizados os quatro relés disponíveis na interface CIL 6580. Estes relés podem ser acionados diretamente pelo micro-computador, através de um simples comando de operação do conversor. Entretanto, estes relés não podem ser usados para o acionamento direto dos motores que consomem uma corrente de 10 A, muito maior que a corrente de saída dos relés internos ao conversor. Por isso, quatro relés de alta amperagem (10 A de saída) foram conectados em série aos relés internos do conversor. Estes relés foram montados em uma caixa metálica a qual foi equipada com diodos emissores de luz (*leds*) destinados a informar ao usuário se os motores elétricos estão ligados ou não, bem como o sentido de giro dos motores. Os relés utilizados para acionamento dos motores são da marca SCHRACK, modelo 300012, 10 amperes, 12 volts.

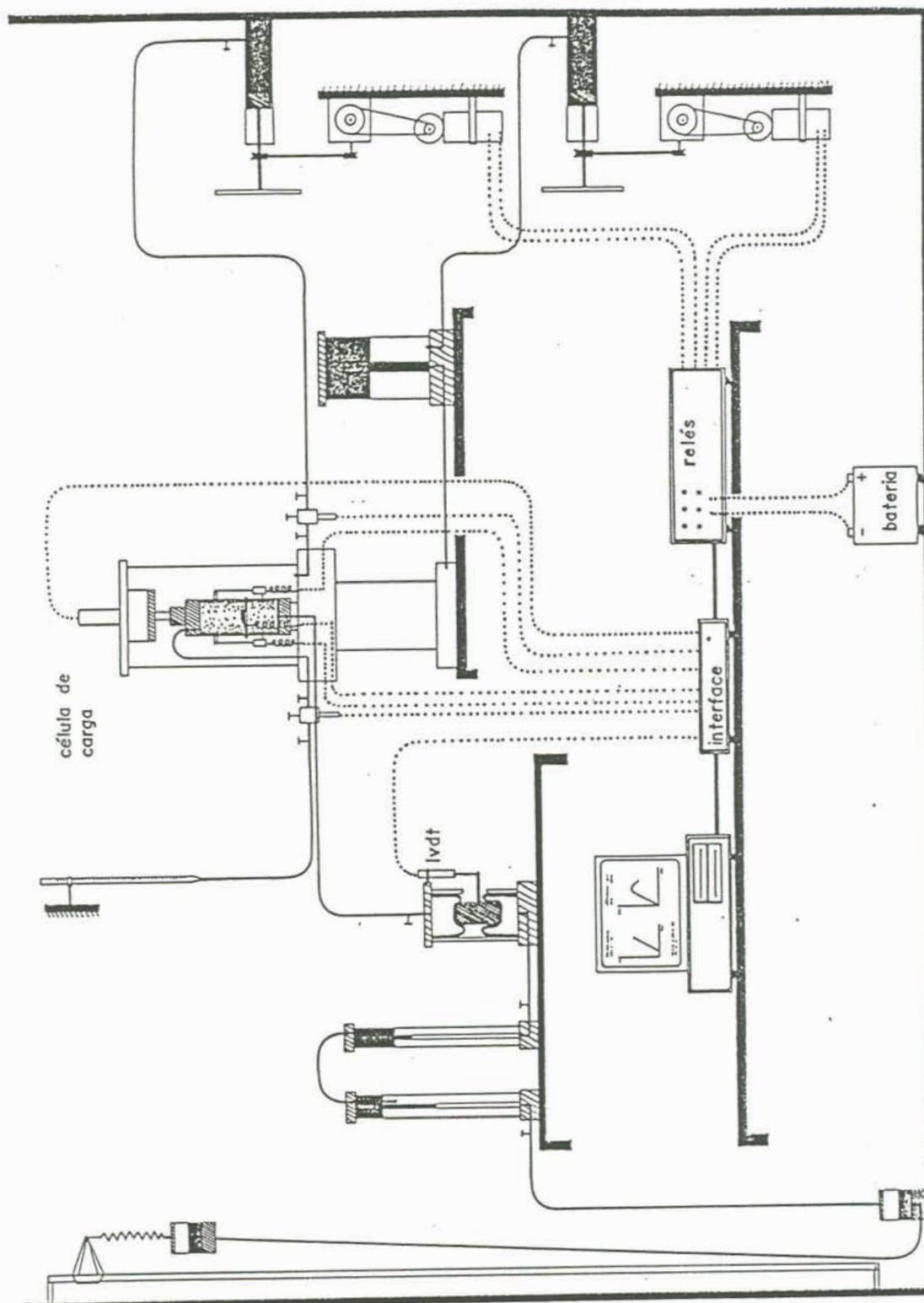


Figura 3.1 - Sistema automático de controle do equipamento triaxial proposto

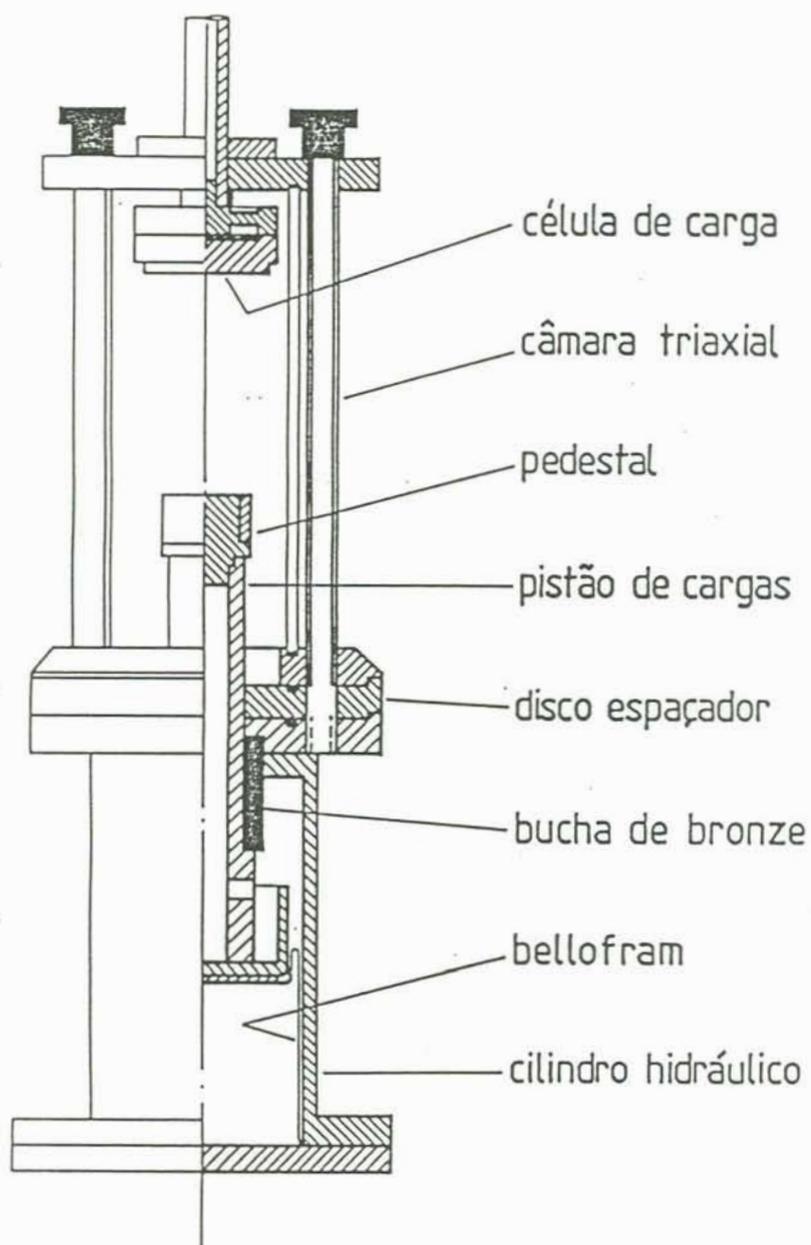


Figura 3.2 - Câmara triaxial utilizada

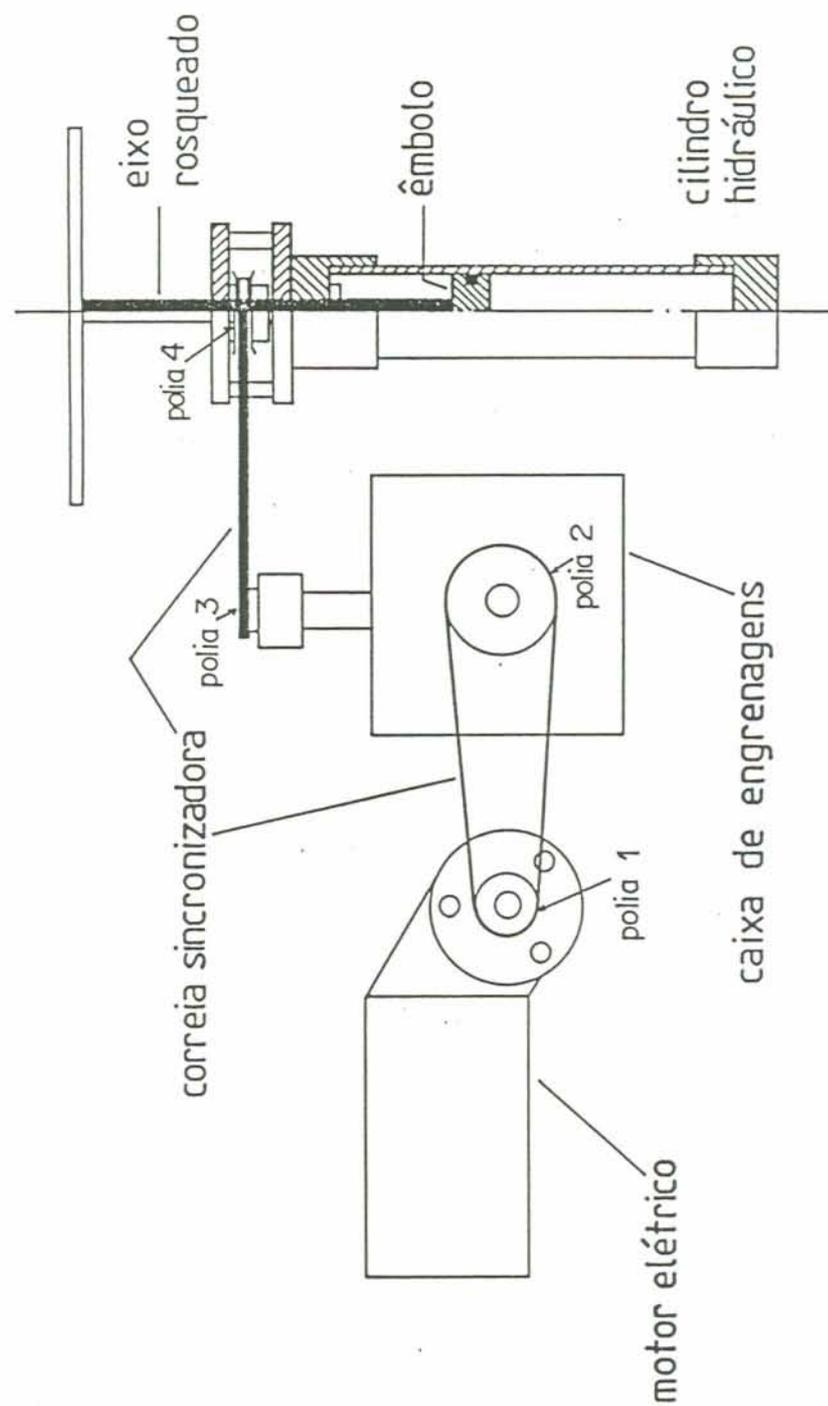


Figura 3.3 - Servo-mecanismo de controle de pressão implementado

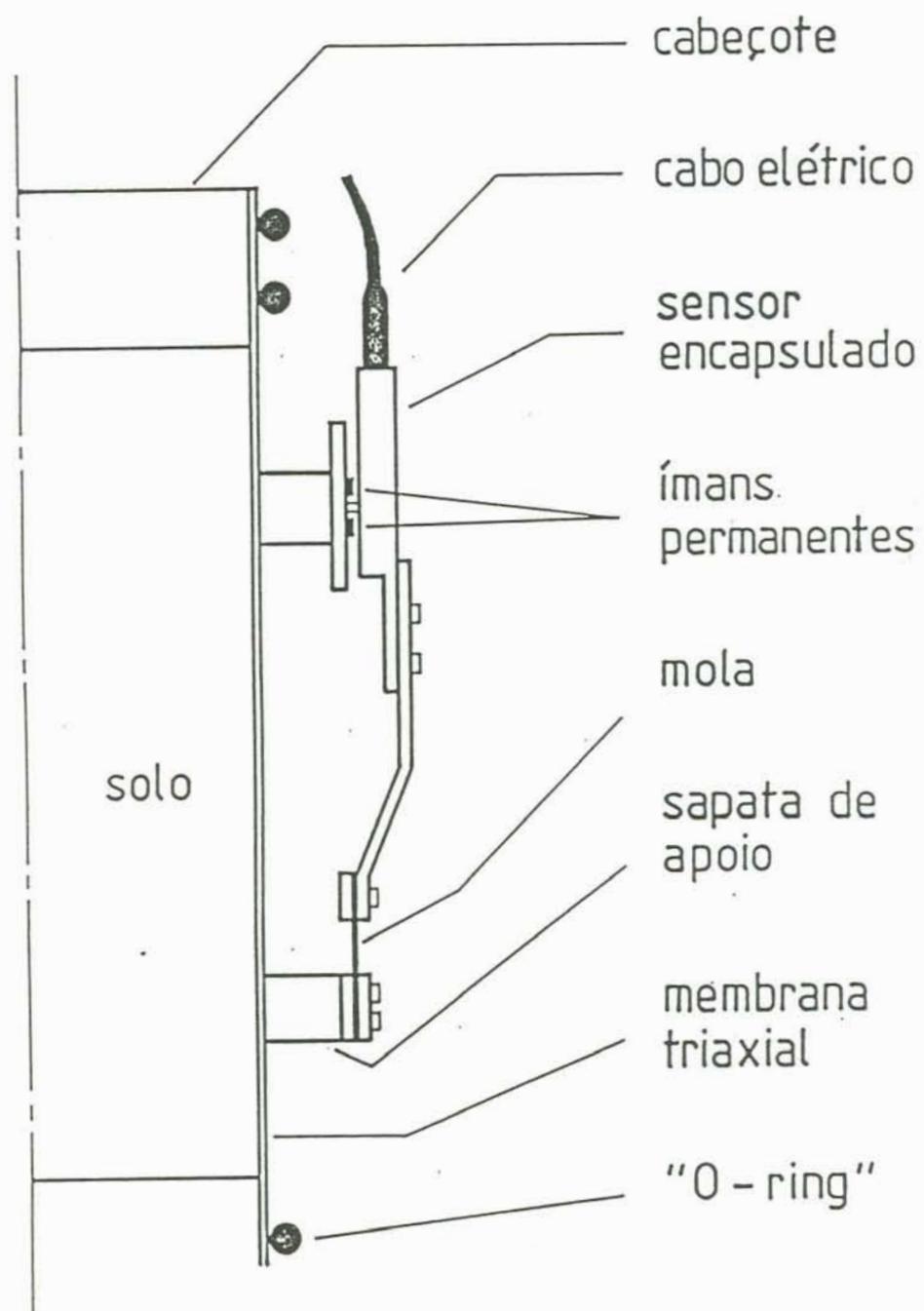


Figura 3.4 - Medidor de deformação axial a base de sensores de efeito Hall (Soares, 1992)

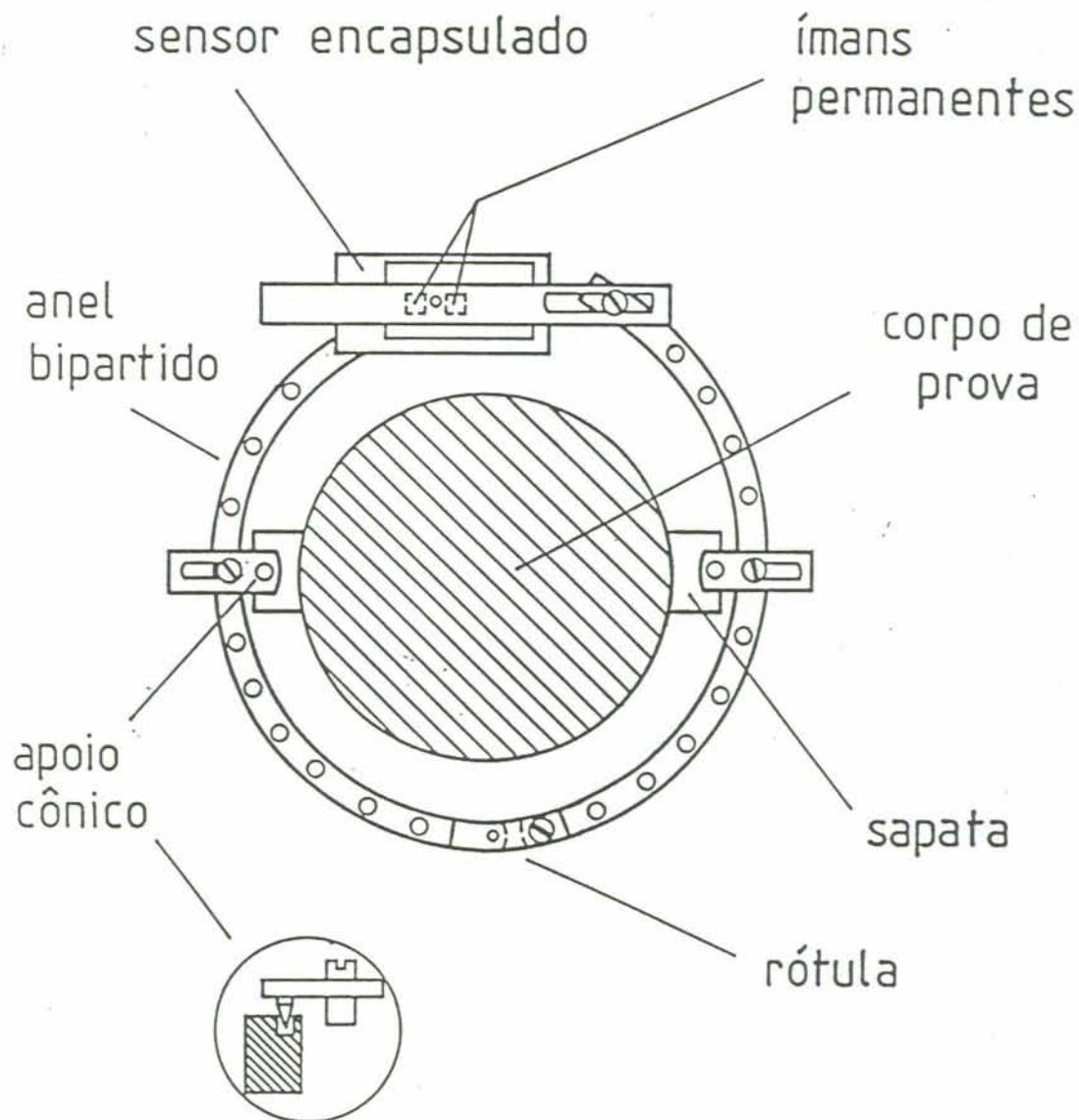


Figura 3.5 - Medidor de deformação radial a base de sensores de efeito Hall utilizado (Bressani, 1990)

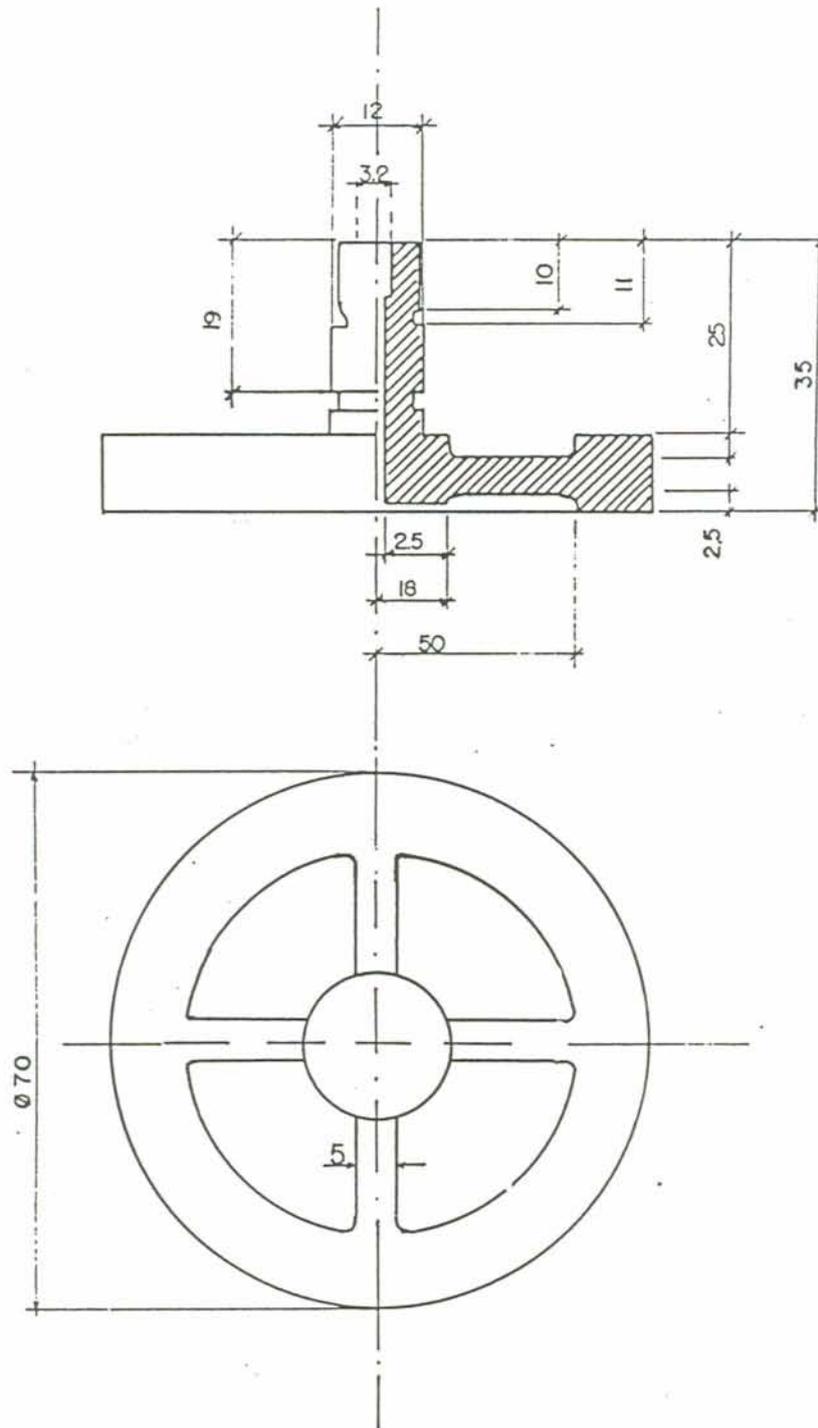


Figura 3.6 - Célula de carga tipo "cruzeta" utilizada (LMS/UFRGS)

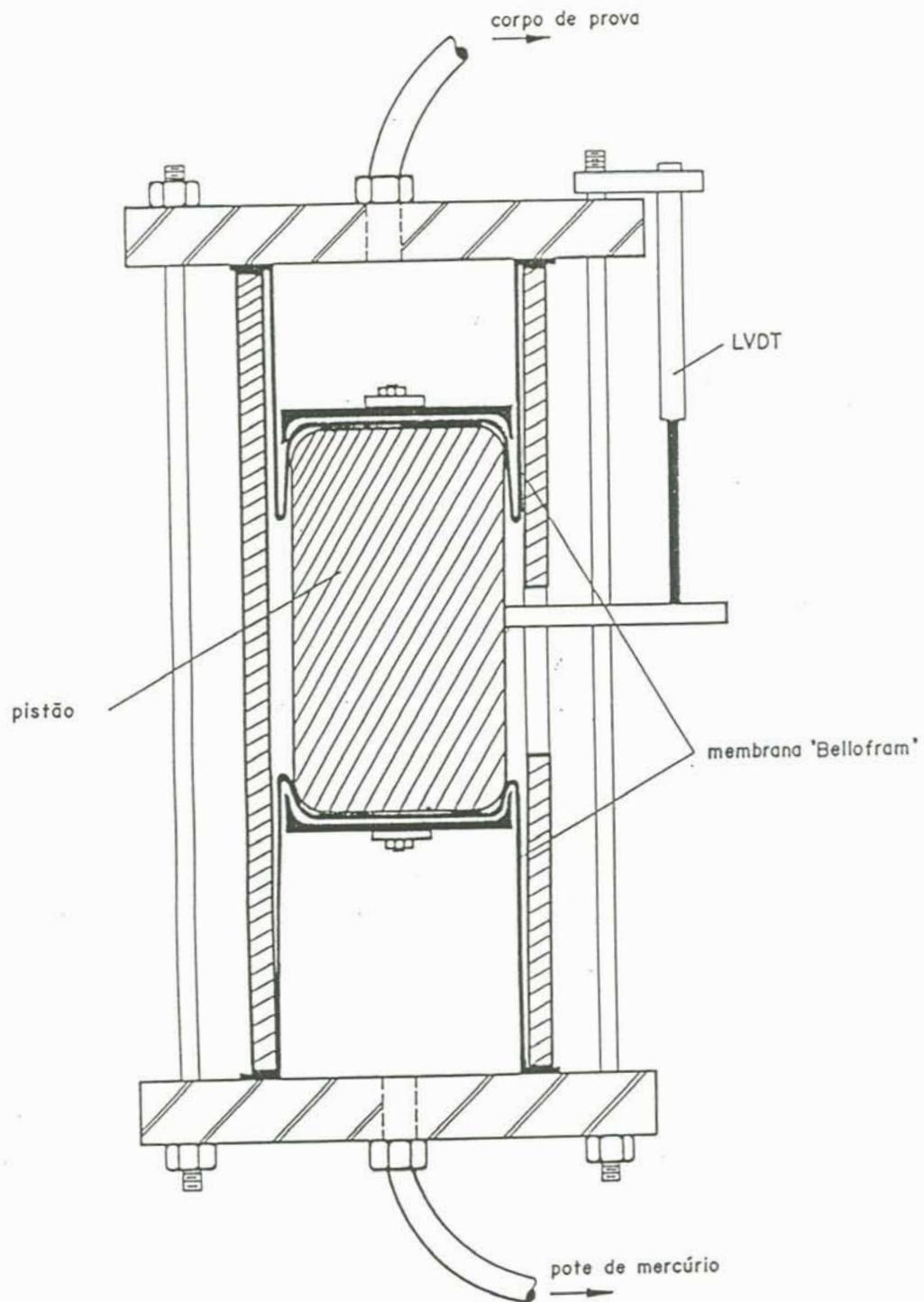


Figura 3.7 - Medidor de variação volumétrica tipo *Imperial College* desenvolvido

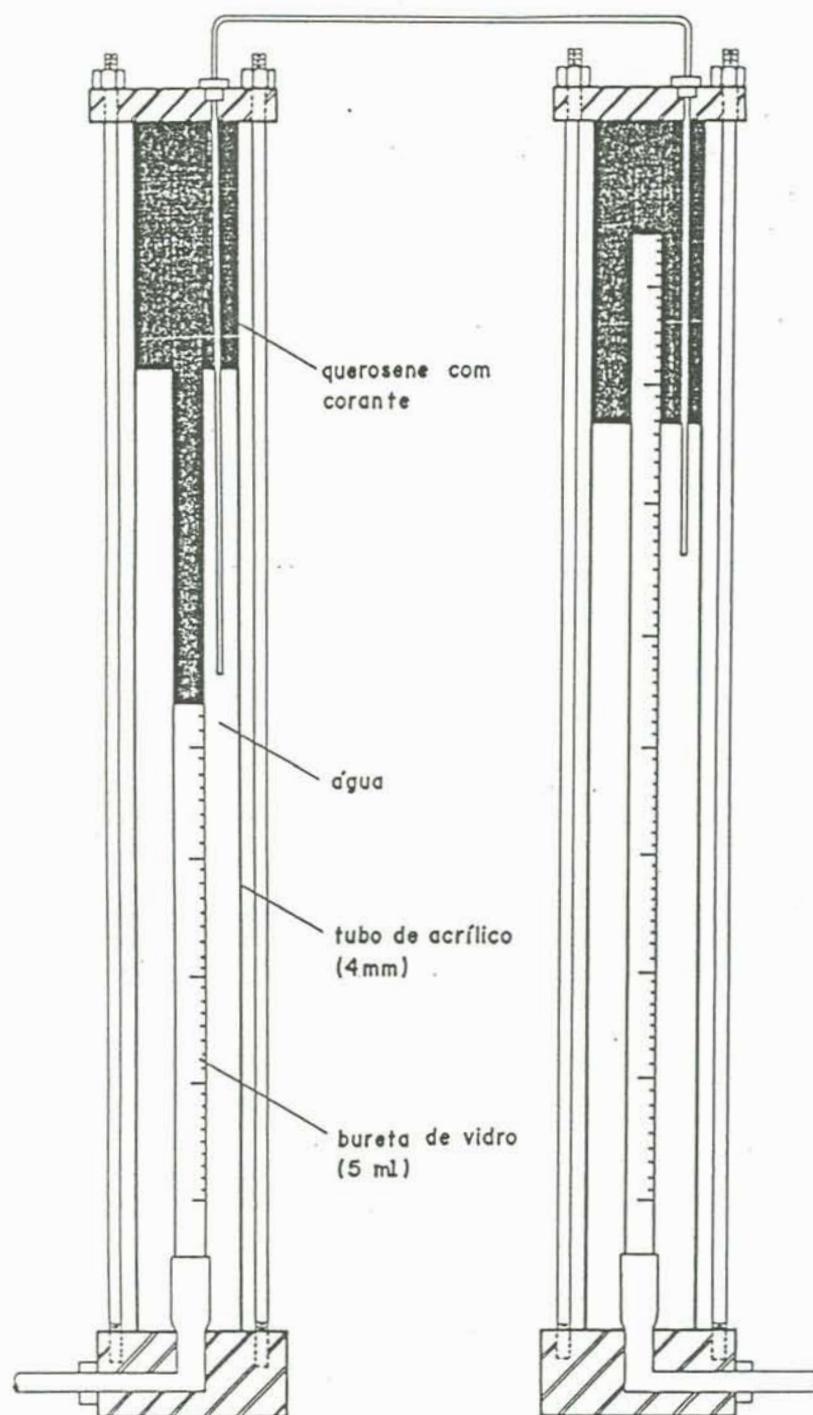


Figura 3.8 - Sistema de duplas buretas desenvolvido

#### 4. PROGRAMA DE CONTROLE

O programa de controle do equipamento triaxial foi desenvolvido objetivando o controle automático de trajetórias lineares de tensões e a trajetória de deformação radial nula.

O programa é organizado na forma de sub-rotinas. No módulo principal a seqüência de sub-rotinas de controle está estruturada da seguinte maneira:

1. Sub-rotina Entrada de Dados
2. Sub-rotina Leitura das Constantes de Calibração
3. Sub-rotina Leitura dos Zeros dos Transdutores
- \*4. Sub-rotina Saturação por Contra-pressão
5. Sub-rotina Ajuste das Condições Iniciais
6. Sub-rotina Controle da Trajetória de Tensões
- \*7. Sub-rotina Controle da Trajetória de Deformação

Radial Nula

\* - opcional

Estas sub-rotinas são complementadas por sub-rotinas auxiliares, onde é feita a comunicação do micro-computador com o conversor analógico-digital e operações com os dados. São essas:

8. Sub-rotina Leitura dos Dados
9. Sub-rotina Operação dos Motores
10. Sub-rotina Gravar Dados
11. Sub-rotina Plotar Tela
12. Sub-rotina Plotar Dados

A seguir, alguns comentários são feitos sobre as principais sub-rotinas que compõe o programa.

#### 4.1 Entrada de Dados

A entrada de dados também é estruturada na forma de sub-rotinas conforme descrito a seguir:

- a. Sub-rotina Identificação do ensaio
- b. Sub-rotina Informações do corpo de prova
- c. Sub-rotina Definição da trajetória de tensões

##### a. Identificação do ensaio

Nome, tipo de trajetória, tipo de solo, data e algum comentário pertinente são os elementos solicitados para identificação do ensaio.

##### b. Informações do corpo de prova

Nesta sub-rotina o usuário informa as *dimensões* do corpo de prova (diâmetro e altura) e as *escalas* para plotagem dos gráficos tensão-deformação e  $p' \times q$  no monitor do micro-computador durante o ensaio. São definidos também: as *condições iniciais* que devem ser automaticamente estabelecidas ou verificadas pelo sistema como ponto de partida da trajetória de tensões; o *valor mínimo* de pressão efetiva admissível durante todo o ensaio e os *tempos de acionamento dos motores* e de espera para *equalização da poro-pressão*.

##### c. Definição da Trajetória de Tensões

A trajetória de tensões é definida em termos de tensões principais efetivas para ensaios drenados e totais para ensaios não-drenados através de pares coordenados  $(\sigma'_v \times \sigma'_h)$ . A trajetória pode ser uma composição de diversos segmentos de reta, com qualquer inclinação, desde que sejam respeitados os limites do equipamento triaxial. Por exemplo, o equipamento utilizado neste trabalho não permite o ensaio de extensão axial, pois o

*top-cap* não é solidário à célula de cargas.

O controle é feito na forma incremental, alternando-se incrementos de tensão desvio e tensão confinante.

Para cada segmento linear da trajetória de tensões definido pelos pares coordenados é solicitado o incremento de tensão. A trajetória de tensões é conduzida de forma iterativa, aplicando-se um incremento de tensão a uma componente e ajustando a outra componente de modo a atingir a trajetória especificada pelo usuário. O valor do incremento de tensão reflete a dispersão da trajetória seguida em relação à trajetória especificada. Um valor muito elevado implica em um maior desvio do estado de tensões do corpo de prova em relação a trajetória que se deseja seguir. Um valor muito pequeno implica em um ensaio excessivamente longo. Na Figura 4.2 está representado o procedimento iterativo de condução da trajetória de tensões. Nos ensaios realizados com o solo residual de arenito Botucatu observou-se que valores de incremento de tensão menores que  $1 \text{ kN/m}^2$  foram muito pequenos, conduzindo a um ensaio excessivamente longo e valores maiores que  $5 \text{ kN/m}^2$  foram excessivos. Foram adotados valores da ordem de  $3 \text{ kN/m}^2$ .

#### 4.2. Leitura zero dos transdutores de pressão

Estando o corpo de prova montado e os transdutores de deslocamento ajustados ao intervalo linear de calibração, são tomadas as leituras zero. Estas leituras servirão como referência para o cálculo dos parâmetros do ensaio. Assim, por exemplo, a deformação será calculada em função da diferença entre a leitura do medidor de deformação em um instante qualquer do ensaio e a leitura zero. O mesmo procedimento é adotado para os transdutores de força e pressão. Para isto, o programa instrui o operador a zerar os transdutores de pressão isolando estes transdutores do sistema e abrindo para a atmosfera a válvula correspondente do bloco de desairamento. Estes dados são gravados em um arquivo e quando solicitados podem ser facilmente acessados. Se o operador está re-iniciando um ensaio, estas leituras não devem ser renovadas, ficando o zero referenciado ao arquivo já existente.

Neste caso, o operador pode optar por não fazer a leitura zero dos transdutores e indicar o nome do arquivo de zeros que o programa deve buscar.

#### 4.3. Leitura do arquivo de constantes de calibração

O programa solicita ao usuário o nome do arquivo onde estão gravadas as constantes de calibração. Este arquivo deve ser do tipo sequencial e a ordem de disposição das constantes no arquivo deve obedecer a ordem de leitura dos transdutores, ou seja, a primeira constante deve estar referida ao transdutor conectado ao primeiro canal de leitura.

#### 4.4 Ajuste das Condições Iniciais

As condições iniciais representam as coordenadas do primeiro ponto da trajetória de tensões. É importante que o usuário esteja atento a este fato pois isso definirá, juntamente com as coordenadas do segundo ponto, a inclinação do primeiro segmento da trajetória de tensões. O programa permite definir como condição inicial um estado de tensões isotrópico ( $\sigma'_v = \sigma'_h$ ) ou anisotrópico ( $\sigma'_v \neq \sigma'_h$ ).

Como condições iniciais o usuário pode definir valores de contra-pressão inicial, tensão efetiva vertical inicial e tensão efetiva horizontal inicial. O programa executa automaticamente o ajuste destas três componentes. No entanto, para ajuste da contra-pressão o equipamento utiliza o mesmo sistema de aplicação de pressão utilizado para aplicação da carga axial. Isto devido a disponibilidade de apenas dois sistemas automáticos de aplicação de pressão. Tendo em vista esta limitação, o programa instrui o usuário a movimentar um jogo de válvulas no sentido de conectar o sistema automático de aplicação de pressão ao corpo de prova e desconectá-lo da câmara de aplicação da carga axial. A partir disto, o programa ajusta simultaneamente as condições iniciais de contra-pressão e pressão de confinamento, mantendo um valor mínimo de pressão efetiva. Este valor é definido pelo usuário e representa uma segurança no

sentido de evitar uma pressão efetiva negativa ou muito pequena, o que poderia causar danos ao corpo de prova.

Estando ajustada a condição isotrópica, programa instrui o usuário a restituir o fluxo do êmbolo de pressão com a câmara de aplicação da carga axial e conectar o corpo de prova ao sistema de pressão constante (potes de mercúrio) que deve estar previamente ajustado à contra-pressão definida pelo usuário. A partir disto, o programa ajusta a carga axial até atingir a condição anisotrópica estabelecida. Durante este ajuste, a pressão de confinamento é automaticamente controlada para que a condição de confinamento já estabelecida se mantenha constante.

Os fluxogramas da Figura 4.3 ilustram este procedimento.

#### 4.5 Controle da Trajetória de Tensões

##### 4.5.1 Procedimento de Aplicação de Carga

A seqüência lógica estabelecida no programa para conduzir a trajetória de tensões especificada é representada, de forma simplificada, no fluxograma da Figura 4.4. Nesse procedimento se diferenciam as componentes de tensões  $\sigma'_v$  e  $\sigma'_h$  no sentido de que uma destas componentes será acrescida de um valor pré-estabelecido (incremento de tensão) e a outra será ajustada para atingir a trajetória de tensões especificada. A componente que sofre o incremento de tensão pré-estabelecido será denominada aqui, para fins de identificação, componente sob controle. A componente que sofre o ajuste será chamada componente a ser ajustada.

O procedimento de aplicação do incremento de carga é feito através de sucessivos ciclos de ligar e desligar os motores e subsequente verificação das tensões até que se atinja o incremento desejado. A cada incremento de tensão aplicado, o programa interrompe o procedimento durante o tempo de espera para equalização da poro-pressão.

Seja  $\sigma_d$ , por exemplo, a componente de tensão sob controle e  $\sigma_c$  a componente ajustável da trajetória. A seqüência lógica consiste em promover um pequeno acréscimo de tensão desvio e verificar o valor da tensão confinante em função da inclinação da trajetória especificada. Se o valor de  $\sigma_c$  diferir do calculado, o programa instruirá o sistema a aumentar ou diminuir a pressão confinante até atingir o valor calculado com uma aproximação de  $\pm 0.5 \text{ kN/m}^2$ .

Atingida a trajetória especificada, com uma margem de  $\pm 0.5 \text{ kN/m}^2$ , o procedimento é interrompido durante o tempo de espera para equalização da poro-pressão. Após este tempo, o processo reinicia com novo incremento de tensão desvio e o ciclo se repete até que a coordenada alvo da tensão desvio (componente sob controle) seja alcançado.

#### 4.5.2 Interdependência entre $\sigma_v \times \sigma_h$

Em uma primeira versão deste programa a componente a ser mantida sob controle ( $\sigma_v'$  ou  $\sigma_h'$ ) era escolhida em função da inclinação da trajetória de tensões, de tal forma que a componente que apresentasse maior variação se mantivesse sob controle. Esta definição visava a otimização do controle da trajetória. Dado início aos ensaios, porém, notou-se que algumas trajetórias eram instáveis e de difícil reprodução. A observação dos resultados mostrou a forte interdependência entre tensões confinante e axial, uma característica do tipo de câmara triaxial utilizado (tipo Bishop-Wesley). A interdependência observada se deve à estrutura mecânica desta câmara (Figura 3.2), composta de uma câmara de pressão superior (câmara triaxial), uma câmara de pressão inferior e um pistão de cargas. A diferença de pressão entre as duas câmaras interfere diretamente sobre a carga suportada pelo corpo de prova.

A aplicação da tensão desvio, que se dá pelo aumento da pressão na câmara inferior, gera o movimento do pistão para o interior da câmara triaxial, aumentando o volume e, conseqüentemente, a pressão dentro desta. Isto dependerá da rigidez do corpo de prova. Quanto mais rígido o corpo de prova,

menores serão as deformações axiais para um dado incremento de carga, e conseqüentemente, menor a alteração de volume no interior da câmara triaxial. Por outro lado, uma diminuição da tensão desvio promovida pela diminuição da pressão na câmara inferior e conseqüente deslocamento do pistão para fora da câmara triaxial, reduzindo o volume dentro dela, gera uma redução da pressão confinante.

A aplicação da carga axial promove, portanto, uma alteração na tensão de confinamento diretamente proporcional ao incremento de tensão desvio aplicado. Ou seja, um acréscimo de tensão desvio implica em um acréscimo de tensão confinante e uma diminuição da tensão desvio implica em uma diminuição da tensão confinante.

Por outro lado, a aplicação da tensão confinante, atuante também sobre o topo do corpo de prova, gera uma alteração inversamente proporcional na tensão desvio. A diminuição da pressão confinante, aliviando a tensão axial sobre o topo do corpo de prova e desestabilizando o equilíbrio entre as câmaras superior e inferior, implica em um movimento ascendente do pistão contra a célula de cargas fixa na tampa da câmara triaxial. Como consequência, ocorre um aumento da tensão desvio aplicada. Por outro lado, o aumento da pressão confinante atuando sobre o topo do corpo de prova promove um movimento descendente do pistão, com conseqüente alívio da tensão desvio.

A interdependência entre as tensões confinante e axial dificultou o procedimento de ensaio, tornando difícil o ajuste à trajetória especificada e ineficiente o controle de algumas trajetórias.

Estas observações motivaram a modificação do critério de controle. Foi estabelecido um novo critério em função da relação de proporcionalidade entre tensões, de forma que, nas trajetórias com uma relação de crescimento de tensões desvio e confinante diretamente proporcional, o controle é feito pela aplicação da tensão desvio e subsequente correção da pressão confinante. Nas trajetórias com uma relação inversamente

proporcional entre tensão desvio e pressão confinante, o controle é feito pela aplicação da pressão confinante com subsequente correção da tensão desvio.

Os resultados obtidos a partir deste critério de controle permitiram reproduzir trajetórias de tensões que haviam se mostrado instáveis e de difícil reprodução com o critério anterior, em função da componente ( $\sigma_v$  ou  $\sigma'_h$ ) de maior variação.

As Figuras 4.5.a e 4.5.b ilustram as diferenças entre os dois critérios de controle. Na Figura 4.5.a está exemplificado um procedimento de controle em função da inclinação da trajetória e, na Figura 4.5.b, um procedimento de controle em função da relação de proporcionalidade entre tensões. No primeiro segmento de reta da Figura 4.5.a, a variável sob controle, tensão desvio, coincide com a variável sob controle do mesmo segmento da Figura 4.5.b. Caso este segmento fosse menos inclinado em relação ao eixo  $p'$ , a variável sob controle escolhida em função da inclinação da trajetória seria a tensão confinante, o que não seria conveniente. No segundo segmento a tensão desvio se mantém como variável sob controle na Figura 4.5.a enquanto que na Figura 4.5.b a tensão confinante passa a ser controlada. Neste segmento a escolha da tensão desvio como variável sob controle é inadequada. A redução da tensão desvio gera uma redução da tensão confinante dificultando o controle, já que a direção deste segmento requer um crescimento inversamente proporcional entre estas componentes. Como é exemplificado na Figura 4.5.a, vários ciclos de ajuste são necessários, os quais, obedecendo o mesmo critério de controle, tornam o procedimento de aplicação de carga pouco eficiente.

#### 4.5.3 Resolução da Trajetória de Tensões

O servo-mecanismo de controle de pressão implementado no equipamento triaxial não permite, por sua simplicidade, o controle direto do incremento de tensão que se deseja aplicar. Este controle é feito de forma indireta através do controle do tempo de acionamento dos motores.

Em uma primeira versão deste programa, o incremento de pressão se dava pelo acionamento dos motores e, com estes ligados, pela leitura contínua dos transdutores de carga ou pressão até se atingir os incrementos especificados, quando só então era ordenado o desligamento dos motores. Para algumas trajetórias de tensões testadas, porém, o tempo gasto na leitura dos dados superava o tempo necessário para ajustar as tensões à trajetória. Isto implicava em um desvio da trajetória em relação a trajetória especificada, o qual se tentava corrigir utilizando o mesmo procedimento que havia causado o erro. Isto gerava muitos ciclos de reajuste. O procedimento se mostrou ineficiente.

O procedimento posteriormente adotado foi o acionamento dos motores durante um tempo pré-determinado (tempo de acionamento de motores definido na entrada de dados) e relativamente curto, após o qual os motores são desligados e somente então são tomadas as leituras dos transdutores. O programa verifica se o incremento de tensão desejado foi alcançado e, se necessário, repete o procedimento. Este tempo é limitado inferiormente apenas pelo tempo de execução da sub-rotina de operação dos motores (da ordem do décimo de segundo).

Pode-se definir diferentes incrementos de tensões para diferentes segmentos da trajetória de tensões. O usuário pode também definir tempos diferentes de atuação dos motores elétricos dos cilindros de controle da tensão desvio e da tensão confinante, sendo recomendável que esses tempos sejam da ordem do segundo.

A resolução da trajetória de tensões passou a depender, a partir disto, do incremento de tensão especificado e do tempo de acionamento dos motores. Tempos ou incrementos muito altos conduzem a um desvio significativo da trajetória de tensões. Por outro lado, tempos ou incrementos muito pequenos conduzem a um ensaio excessivamente lento.

#### 4.5.4 Velocidade de Ensaio

Por características próprias o sistema não permite um

ensaio com velocidade controlada. Porém, o usuário dispõe de alternativas para estabelecer o tempo mínimo dentro do qual o ensaio seja realizado. Definidas na entrada de dados, as variáveis tempo de equalização da poro-pressão e tempo de acionamento do motor permitem obter um controle sobre a velocidade máxima de procedimento do ensaio.

O limite superior do tempo de procedimento do ensaio, porém, não pode ser controlado. Para isto, seria preciso conhecer o número de ciclos de acionamento do motor necessário para promover um determinado incremento de carga. Isto, porém, é função das características de rigidez do solo, que variam ao longo do ensaio, e do grau de saturação do mesmo. Além dos intervalos de tempo acima mencionados, o programa consome algum tempo nas sub-rotinas de leitura, gravação e plotagem dos dados, que são executadas durante o ciclo incremental de carga. Pode-se, entretanto, afirmar que o programa permite proceder o ensaio a uma velocidade tão lenta quanto se desejar.

#### 4.6 Comunicação com o *Data-Logger*

As operações de comunicação com o *Data-Logger* são executadas em apenas duas sub-rotinas do programa: a. Sub-rotina de leitura dos dados e b. Sub-rotina de operação dos motores.

##### a. Sub-rotina de Leitura de *Dados*

Esta sub-rotina fornece, constantemente, informações ao módulo principal sobre o estado de tensão e deformação em que o corpo de prova se encontra. A partir destas informações, decisões são tomadas pelo programa no sentido de definir operações de controle dos motores, de forma a seguir convenientemente a trajetória de tensões pré-estabelecida.

A comunicação do micro-computador com o *Data-Logger* obedece a comandos específicos deste equipamento (CIL 6580). Nesta sub-rotina, a comunicação é aberta para leitura dos canais aos quais estão conectados os transdutores de força, deformação e pressão.

Diferentes tipos de transdutores utilizados no equipamento triaxial apresentam diferentes voltagens de saída para uma mesma voltagem de excitação (8 Volts). A precisão da leitura pode ser otimizada em função da amplificação desta voltagem, a partir do comando GANHO. O valor deste comando é definido na comunicação entre o micro-computador e o *Data-Logger*, associando o número de 32768 bits ( $2^{16}$ ) ao máximo valor de voltagem de saída do transdutor (vide item 3.2). Para leitura de transdutores com diferentes ganhos, é necessário estabelecer, encerrar e re-estabelecer a comunicação com novo valor de ganho. Devido a velocidade do micro-computador utilizado (33 MHz), esta operação pode implicar em uma variação de voltagem muito rápida para transmissão do sinal ao micro-computador, o que se reflete em erros em leituras sucessivas. Foi necessário, por isso, a imposição de intervalos de tempo entre estas operações. Um intervalo de 0.2 segundos se mostrou adequado.

#### b. Sub-rotina de Operação dos Motores

Sempre que se torna necessário a operação dos motores, esta sub-rotina é solicitada. Previamente, o programa estabelece valores às variáveis que identificam o motor a ser ligado e o sentido de giro, em função de aumentar ou diminuir as pressões. Estas variáveis são associadas aos relés internos ao conversor os quais estão dispostos em série a relés externos que controlam os motores. Um comando específico de comunicação com o conversor permite ligar ou desligar os relés internos ao conversor.

Cada vez que esta sub-rotina é executada apenas uma operação de ligar ou desligar um motor é procedida. Por exemplo, para ligar um dos motores o programa executa a sub-rotina, retorna ao módulo principal, espera que se transcorra o tempo de acionamento do motor, redefine as variáveis associadas aos relés e executa novamente a sub-rotina para desligar o motor.

#### 4.7 Sub-rotina do ensaio Ko

Consolidação Ko é usada para simular o carregamento vertical sob deformação radial nula e objetiva reproduzir o

estado de tensões que o solo se encontra no campo. Esta técnica tem sido contestada sob o argumento, entre outros, de que quando do descarregamento devido a amostragem, a amostra sofre deformações laterais e, por isso, a técnica ideal de re-consolidação deveria recuperar as deformações sofridas neste processo (Fahey, 1992).

A importância desta sub-rotina, porém, não está na técnica de consolidação, e sim, na possibilidade de se obter, a partir de um estado de tensão definido, a inclinação da trajetória de deformação radial nula, e se possa comparar este valor com valores medidos em campo. Nesta pesquisa, especificamente, há interesse em verificar o padrão de comportamento do solo estudado quando submetido a uma trajetória de deformação radial nula.

O programa de controle do ensaio  $K_0$  consiste de uma sub-rotina do programa principal. A opção pela trajetória  $K_0$  é feita na entrada de dados, quando se define as coordenadas da trajetória de tensões. O programa permite combinar trajetória de tensões e trajetória de deformação radial nula. Assim, é possível, por exemplo, definir uma trajetória de tensões que reproduza o estado de tensões *in situ* e, a partir deste ponto, proceder a trajetória de deformação radial nula.

A deformação radial é medida por um medidor de deformação radial tipo caliper com base em sensores de efeito Hall (vide item 3.1.3.1). A partir de uma leitura de referência do sensor de deformação radial, um pequeno acréscimo de tensão desvio é aplicado. O caliper acusa qualquer mudança de diâmetro do corpo de prova, com uma sensibilidade de  $0.05 \mu\text{m}$ . O programa opera a tensão de confinamento no sentido de restituir o diâmetro original, ou, a leitura de referência do sensor radial. Esta seqüência se repete até que o valor máximo de tensão vertical efetiva especificado pelo usuário seja alcançado.

Okochi e Tatsuoka (1984), investigando os efeitos de varios fatores sobre os valores de  $k_0$  em areia, observaram a forte dependência da inclinação da trajetória de deformação lateral

nula em relação ao intervalo de tolerância de variação da deformação radial admitido. Estes autores concluem que para obter valores de  $k_0$  razoavelmente precisos deve-se limitar a variação da deformação radial a um valor pequeno. Para o solo estudado, estes autores indicam como aceitável o intervalo de  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Não foi objeto desta dissertação identificar o intervalo de tolerância ideal para o tipo de solo ensaiado. Neste trabalho, tendo em vista a disponibilidade de um instrumento de alta resolução, estabeleceu-se o intervalo de tolerância de  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  ao desvio da trajetória de deformação radial nula. Um fluxograma da sub-rotina de controle da trajetória de deformação radial nula é mostrado na Figura 4.6.

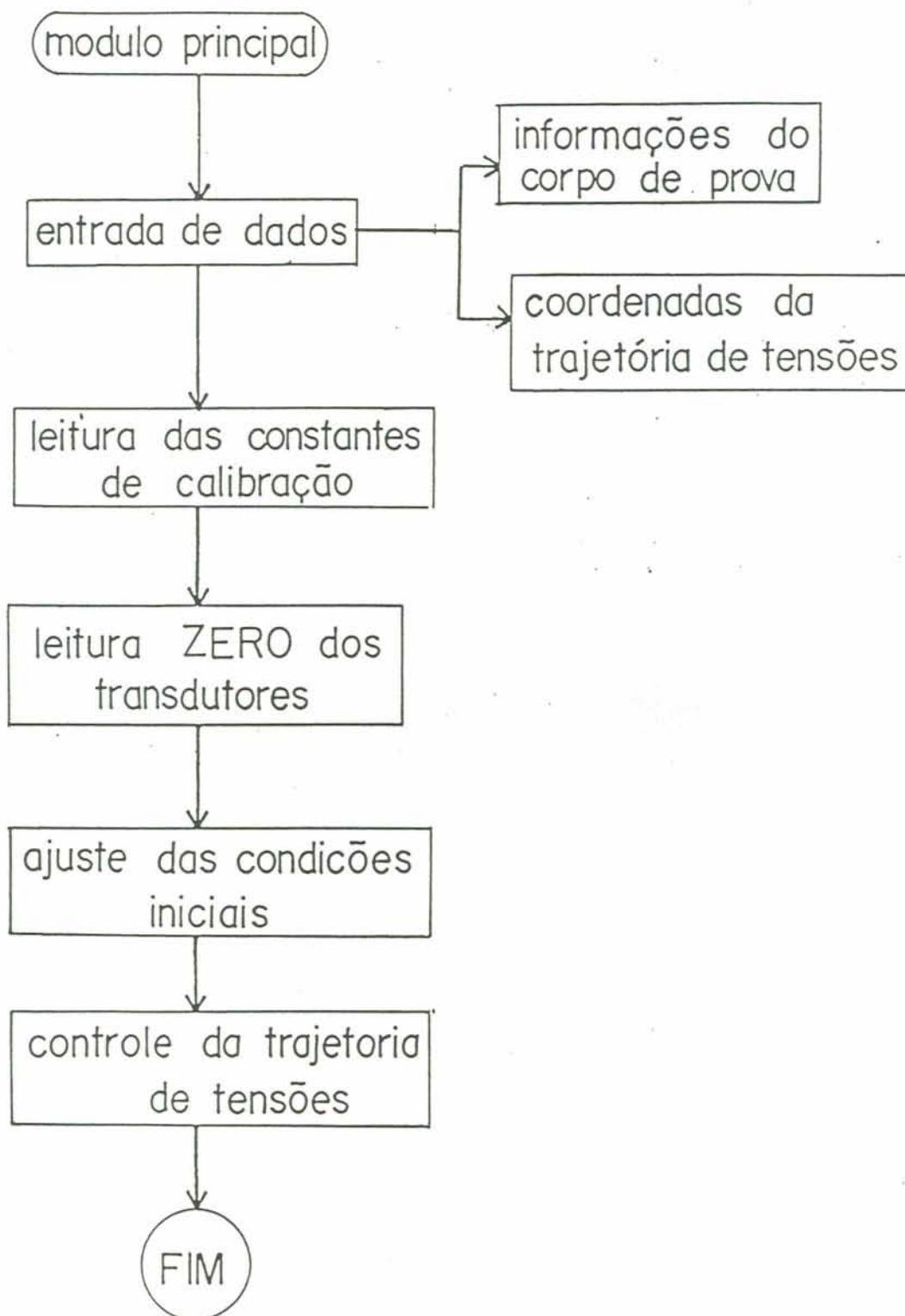


Figura 4.1 - Fluxograma do programa de controle de trajetórias de tensões

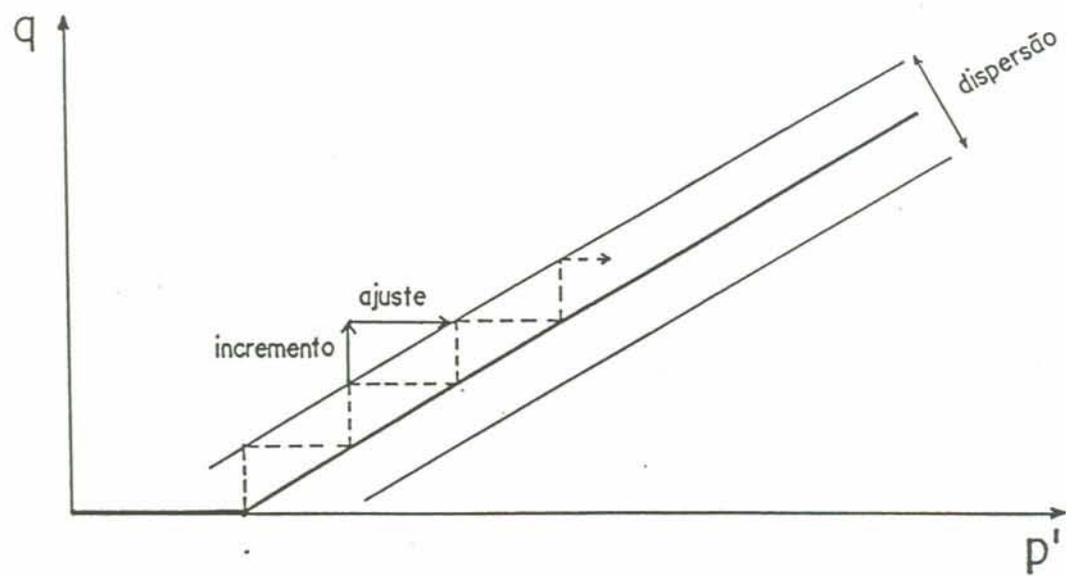


Figura 4.2 - Procedimento iterativo de condução da trajetória de tensões

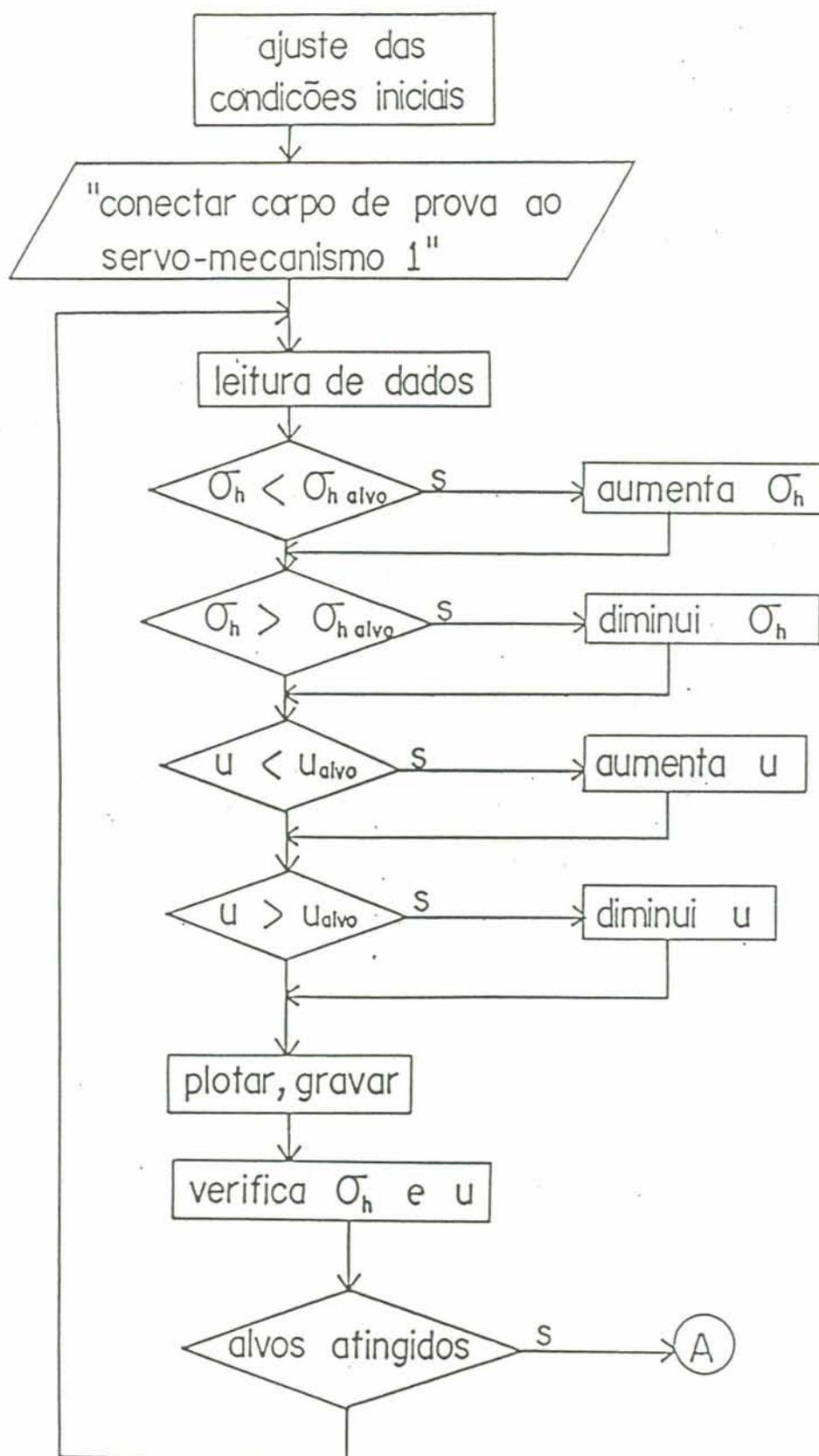


Figura 4.3 - Fluxograma da sub-rotina de ajuste das condições iniciais (cont.)

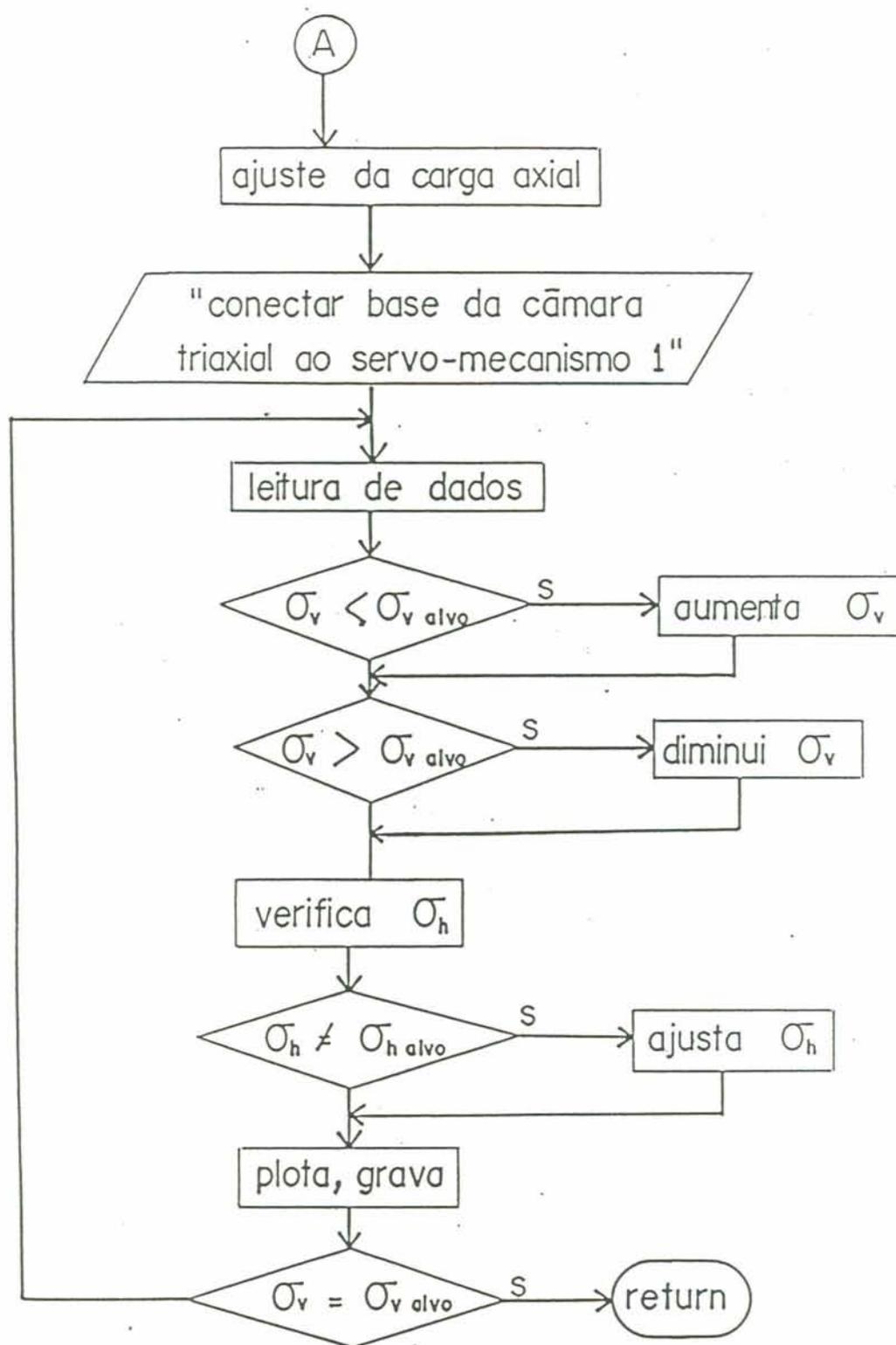


Figura 4.3 - (cont.) fluxograma da sub-rotina de ajuste das condições iniciais

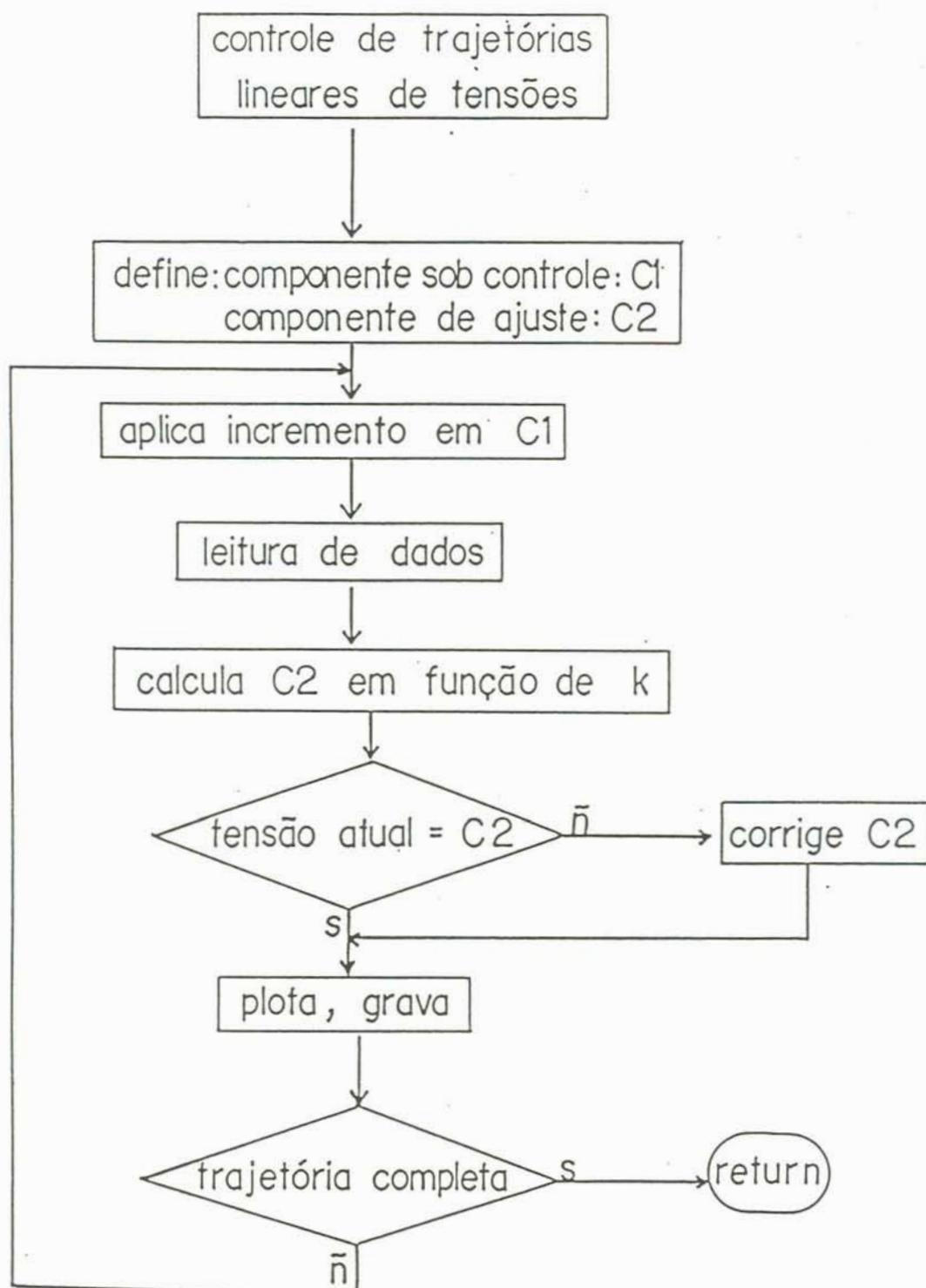
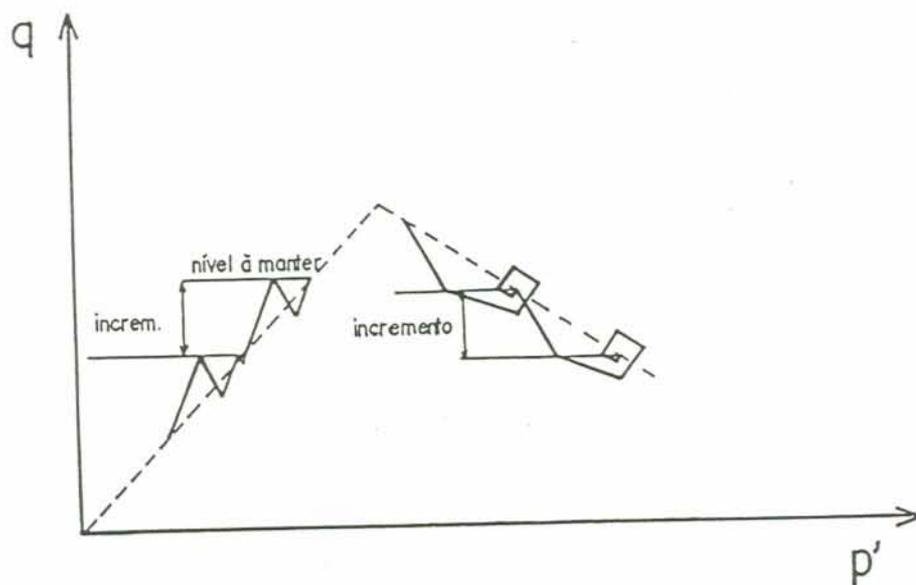
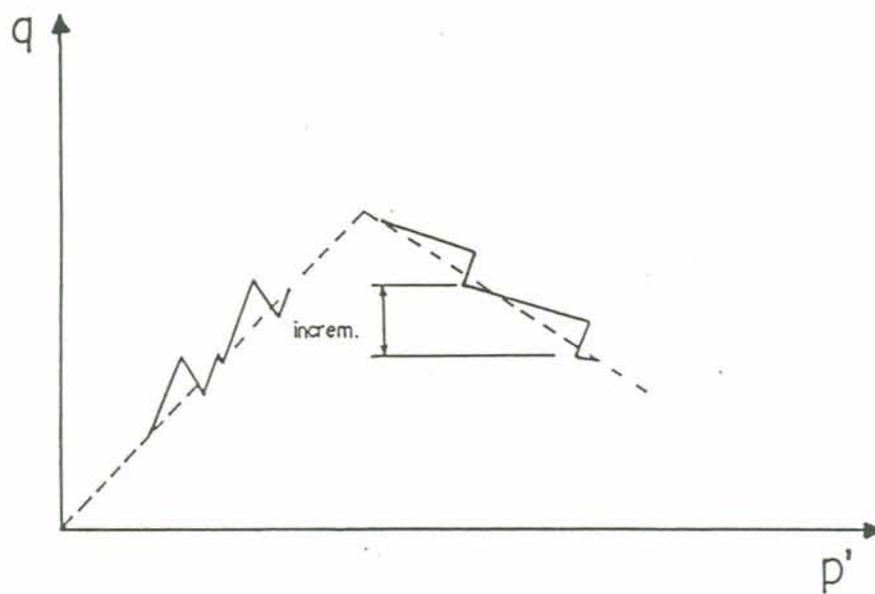


Figura 4.4 - Fluxograma da sub-rotina de controle de trajetórias lineares de tensões



a) Controle em função da inclinação da trajetória



b) Controle em função da proporcionalidade entre tensões

Figura 4.5 - Procedimentos de condução de trajetórias de tensões

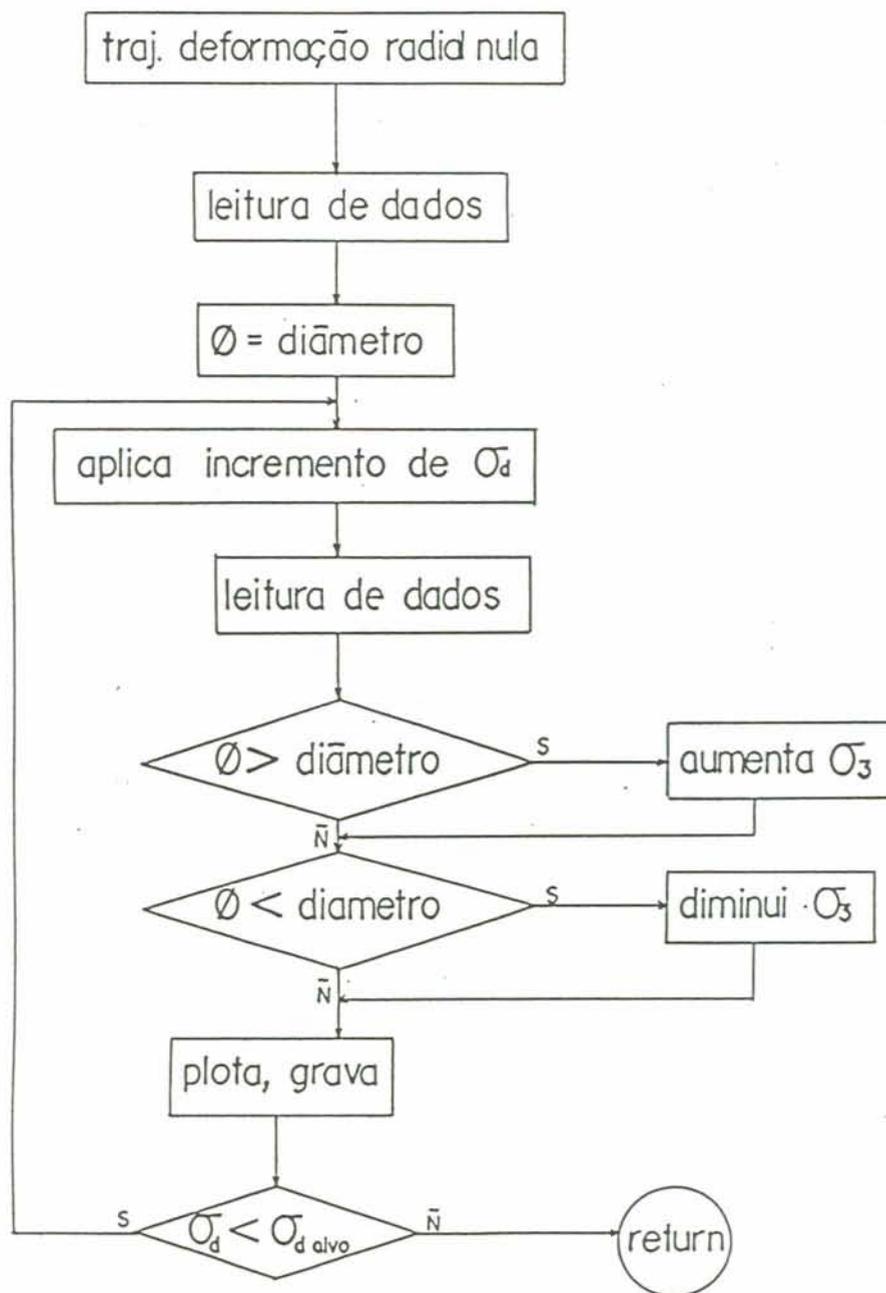


Figura 4.6 - Fluxograma da sub-rotina de controle da trajetória de deformação radial nula

## 5. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Amostras

O solo foi coletado de uma antiga jazida de material de empréstimo que se localiza em Vila Scharlau, ao lado da rodovia RS-240, município de São Leopoldo, RS.

O solo desta jazida foi estudado por Nuñez (1991) como material a ser estabilizado com cal para emprego em pavimentação. Neste trabalho, Nuñez salienta a homogeneidade da jazida e apresenta os seguintes resultados de ensaios de caracterização deste solo:

#### .Limites de Consistência

Limite de Liquidez (LL):	21%
Limite de Plasticidade (LP):	17%
Limite de Contração (LC):	19%

Pela análise dos limites de consistência, Nuñez (1991) identifica o arenito Botucatu como um solo arenoso com presença de argilos-minerais predominantemente do tipo caolinita, de baixa atividade. Densidade real dos grãos de 2,67.

Na Figura 5.1 são apresentadas as curvas granulométricas de amostras retiradas até a profundidade de 18m e de uma amostra retirada a profundidade de 5m. Os resultados desta análise evidenciam a predominância da fração areia (53% dos grãos possuem diâmetro entre 2 e 0.074mm), com elevada

porcentagem de silte (33% dos grãos possuem diâmetro entre 0.074 e 0.005mm) e pequena porcentagem de argila (14% dos grãos possuem diâmetro inferior a 0.005mm e 4% dos grãos possuem diâmetro inferior a 0.001mm). O solo é mal graduado.

Nuñez (1991) apresenta uma análise difratométrica deste solo com os seguintes resultados:

Fração Cristalina	15.7%, constituída de:
Caolinita	9.2%
Hematita	3.2%
Micas e ilita	2.1%
Quartzo	1.2%
Fração amorfa	84.3%

Orlandini (1990), buscando a caracterização do arenito Botucatu para fins de mapeamento pedológico, estudou diversas jazidas do solo de arenito Botucatu com amostragem indeformada. Aquele trabalho atesta a heterogeneidade de comportamento entre solos de diferentes jazidas. A jazida utilizada no presente trabalho não foi objeto de pesquisa de Orlandini (1990).

Na tabela 5.1 o solo da jazida da Vila Sharlau é classificado segundo alguns sistemas de classificação de solos atualmente em uso.

## 5.2 Técnica de Amostragem e Preparação dos Corpos de Prova

A preservação das características cimentantes do Arenito Botucatu requer a retirada de amostras indeformadas. A técnica utilizada foi a amostragem em bloco.

Blocos de 30x30x30cm foram retirados de um talude a uma profundidade de 4,20m a partir do nível do terreno. Para evitar a perda de umidade, os blocos foram parafinados. Afim de proteger o solo durante o transporte, os blocos foram colocados em caixas

de madeira e recobertos com serragem. No laboratório, os blocos permaneceram nas caixas até a retirada para corte do prisma para moldagem dos corpos de prova. Após o corte, os blocos eram recobertos com parafina e mantidos em câmara úmida.

Os prismas foram moldados em um torno especialmente desenvolvido para corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro. Neste torno, os prismas foram lentamente desgastados com um fio de *nylon* esticado em arco metálico. Por suas características frágeis de cimentação, o solo residual de arenito Botucatu é facilmente moldado por este processo.

Definido o formato cilíndrico e o diâmetro de aproximadamente 50mm, os corpos de prova foram colocados em um berço com 10cm de comprimento. Neste berço os corpos de prova foram desgastados em sua altura com o arco metálico. As extremidades do berço delimitam a altura do corpo de prova, permitindo um corte perpendicular à seção longitudinal do corpo de prova.

Uma vez moldados, os corpos de prova foram pesados e suas dimensões anotadas. Não sendo necessário sua utilização imediata, os corpos de prova eram protegidos por uma embalagem plástica e mantidos em câmara úmida.

Na montagem, os corpos de prova foram colocados no pedestal da câmara triaxial, sobre papel filtro e pedra-porosa. Em dois ensaios excluiu-se o papel filtro por ser um fator de erros nas medições externas de deformações (Bressani, 1990). Se tratando, porém, de um ensaio com medição local de deformações, o papel filtro foi mantido na maioria dos testes. No topo do corpo de prova, depois do papel filtro e da pedra-porosa, era colocado o *top-cap*.

Sobre o pedestal da câmara triaxial, os corpos de prova foram imediatamente cobertos pela membrana e esta fixada por anéis de vedação (*O-rings*) para evitar perda de umidade. A membrana deve, neste momento, estar preparada para a colagem dos sensores de efeito Hall. Para isto, marcas são feitas com

antecedência, posicionando os medidores de deformação axial em pontos diametralmente opostos e sobre o terço médio do corpo de prova. As sapatas de suporte do medidor de deformação radial são coladas no centro do corpo de prova, em uma posição que admita o movimento do instrumento sem colisão com os medidores de deformação axial.

A colagem dos medidores de deformação axial e radial é feita cuidadosamente, buscando o alinhamento em relação às marcas feitas na membrana (verticalidade dos medidores de deformação axial e horizontalidade do medidor de deformação radial).

Durante os primeiros testes feitos com o equipamento, a montagem dos medidores de deformação axial foi feita colando-se o par de magnetos à sapata inferior e a haste de fixação do sensor à sapata superior, com o compartimento do sensor direcionado para baixo. Este procedimento facilitou a montagem da instrumentação, pois o peso do sensor auxiliava o alinhamento (Figura 5.2.a). Porém, com o movimento descendente do pistão na fase de carregamento isotrópico, os condutores elétricos dos sensores tendiam a tocar a placa da base da câmara triaxial. Tocando a placa da base da câmara triaxial, os sensores eram desviados do curso, gerando erros nas medidas de deformações. Adotou-se, por isso, a fixação invertida dos sensores, colando o par de magnetos à sapata superior e a haste de fixação dos sensores à sapata inferior (Figura 5.2.b).

Este procedimento, porém, tem como inconveniente que o peso dos sensores tende a girar a sapata de apoio, descolando a membrana do corpo de prova. Uma técnica sugerida por Bressani (1990) foi adotada para superar esta dificuldade. Esta técnica consiste na aplicação de vácuo no interior do corpo de prova durante a montagem e a utilização de uma tira de membrana para pressionar as sapatas contra o corpo de prova. Este procedimento mostrou-se eficiente e foi adotado em todos os ensaios apresentados nesta dissertação.

Depois de colados e alinhados, os sensores são ajustados para o início do intervalo linear da calibração, de forma a maximizar o curso dos sensores. Este ajuste é feito através do monitoramento das leituras no micro-computador.

### 5.3 Procedimento de ensaio

Após a colagem dos sensores, e ainda sob a aplicação do vácuo, a câmara triaxial é enchida com água desairada. O vácuo, então, é substituído pela pressão de confinamento, mantendo-se uma pressão efetiva de 20 kN/m<sup>2</sup>. Sob esta pressão efetiva percola-se água destilada e desairada, no sentido base-topo do corpo de prova. Com alimentação continuada do nível d'água na bureta, o processo de percolação era mantido durante pelo menos 24 horas. Para que o processo não fosse interrompido durante a noite, substituía-se a bureta pelo pote de mercúrio sob uma pressão mínima (5 kN/m<sup>2</sup>) até a manhã seguinte.

Após a fase de percolação, o solo era submetido a incrementos de contra-pressão e pressão confinante, visando o aumento do grau de saturação e a diminuição da sucção. Nesta fase, a aplicação de contra-pressão e da pressão de confinamento foi feita pelo sistema de potes de mercúrio. Durante este processo manteve-se uma pressão efetiva constante de 20 kN/m<sup>2</sup>.

A medida do parâmetro B, para avaliação do grau de saturação atingido, foi feita em apenas um dos corpos de prova ensaiados tendo em vista que a estrutura cimentante é afetada por ciclos de carregamento (Bressani e Vaughan, 1989). Foi medido um valor de  $B = 0.96$ .

O procedimento de saturação por contra-pressão foi adotado em todos os ensaios com trajetória de tensões controlada. Nos ensaios com trajetória de deformação radial nula, não se aplicou contra-pressão para permitir que o solo fosse levado a níveis de tensões efetivas maiores, tendo em vista as limitações do equipamento (700 kN/m<sup>2</sup> de tensão de confinamento) e a baixa inclinação desta trajetória no espaço  $p' \times q$ .

Antes de iniciar o ensaio, algumas verificações eram feitas, tais como voltagem de saída da fonte de alimentação dos transdutores, carga da bateria de alimentação dos motores elétricos, conexões dos canais de leitura com os respectivos transdutores e válvulas do painel de controle do ensaio.

O ensaio é iniciado com a execução do programa de controle de trajetórias de tensões desenvolvido. Antes de iniciar o controle da trajetória de tensões estabelecida, o programa ajusta as condições iniciais determinadas na entrada de dados. Como o equipamento dispõe de apenas dois motores para controlar tensão desvio, contra-pressão e pressão de confinamento, contra-pressão e tensão desvio são controladas pelo mesmo motor e mesmo painel de controle. Para viabilizar este controle, um esquema de válvulas permite isolar a tubulação de aplicação da tensão desvio da tubulação de aplicação da contra-pressão, bem como, colocar o pote de mercúrio em série com o corpo de prova. A contra-pressão é controlada pela sub-rotina de ajuste das condições iniciais, em uma fase inicial, quando contra-pressão e pressão de confinamento são ajustadas. Atingido o valor estabelecido na entrada de dados, o programa instrui o usuário a operar as válvulas de modo a isolar o corpo de prova do sistema de aplicação de pressão, coloca-lo em série com o pote de mercúrio e abrir a válvula para aplicação da tensão desvio.

Estando ajustada a condição inicial estabelecida, o programa parte para o controle da trajetória de tensões, que, a partir deste momento, dispensa a participação do operador exceto em caso de falta de energia, quando o ensaio é interrompido e precisa ser reiniciado e no caso do operador querer interromper o ensaio durante a noite.

Durante o ensaio, as leituras em bits dos transdutores de força, pressão e deformação são armazenadas em um arquivo de dados. Em outro arquivo são armazenados os valores calculados de carga, pressão e deformação nas respectivas unidades de engenharia (kN, kN/m<sup>2</sup>). Esses valores são calculados a partir das constantes de calibração e das leituras zero dos transdutores (item 4.1). Ao longo do ensaio, são plotados na tela a trajetória

de tensões seguida (em um diagrama  $p' \times q$ ) e o gráfico  $q \times \varepsilon_a$ . Estes dados, após o ensaio, podem ser importados e analisados em uma planilha de cálculo. Em todos os ensaios realizados optou-se por importar o arquivo de leituras em bits e recalculá-los os parâmetros a partir destes dados. Este procedimento permitiu a identificação e filtragem de pequenas falhas que eventualmente ocorreram ao longo dos ensaios, tais como, falhas nos contatos elétricos, tomada da leitura zero após o início do ensaio por erro do operador e re-avaliação da leitura zero em função das primeiras leituras gravadas. A gravação das leituras em bits facilita, também, a recuperação dos dados caso seja necessário uma reavaliação ou uma eventual alteração nas constantes de calibração.

#### 5.4 Apresentação dos Resultados dos Ensaios

Seis ensaios foram executados no equipamento triaxial com controle automático de trajetória de tensões utilizando o solo residual de arenito Botucatu. Destes, quatro foram ensaios com controle de trajetória de tensões e dois com controle de trajetória de deformação radial nula. Estes ensaios foram escolhidos com dois objetivos: identificar a superfície de fluência deste solo e verificar a capacidade do equipamento em controlar trajetórias de tensões diversas.

Visando atingir estes objetivos foi elaborado um programa de ensaios no qual, através de diferentes inclinações de trajetórias de tensões, se pudesse identificar pontos da superfície de fluência.

Tendo em vista que a fluência se dá a baixos níveis de deformação, alguns ensaios foram interrompidos antes do solo atingir a envoltória de resistência. Isto porque em algumas trajetórias escolhidas a envoltória de resistência somente seria atingida para altos níveis de tensão e/ou deformação, para os quais o equipamento não foi dimensionado, ou para a trajetória de deformação radial nula, a qual não cruza a envoltória de resistência do solo. Para identificar a envoltória de resistência

do solo foram realizados ensaios de cisalhamento direto.

Também foram realizados ensaios de adensamento com o objetivo de comparar o comportamento unidimensional do solo remoldado com o solo no estado indeformado.

#### 5.4.1 Ensaio Triaxiais

Os ensaios triaxiais conduzidos no equipamento triaxial com controle automático foram todos drenados. A Tabela 5.2 identifica os ensaios triaxiais realizados pela inclinação da trajetória. As trajetórias escolhidas são mostradas na Figura 5.3.

A fim de facilitar a comparação dos resultados obtidos, as escalas de deformações radial, axial e volumétrica são iguais para todos os gráficos apresentados. Os resultados aqui apresentados são discutidos no capítulo 6.

##### 1. TT45

Neste ensaio seguiu-se a trajetória de tensões CD (Consolidado-Drenado) típica do equipamento triaxial convencional com velocidade de deformação constante. O solo foi consolidado a uma tensão efetiva de  $200 \text{ kN/m}^2$  com uma contra-pressão de  $200 \text{ kN/m}^2$ . A este nível de tensões iniciou-se a fase desviatória, mantendo-se constante a tensão de confinamento através da intervenção do servo-mecanismo de controle nas tensões atuantes.

A Figura 5.4 mostra os resultados obtidos neste ensaio. Pode-se perceber uma dispersão acentuada da trajetória seguida em relação à especificada ( $45^\circ$  no espaço  $p' \times q$ ). Esta dispersão é analisada no capítulo 6, ítem 6.1.1. Durante a fase desviatória o solo sofreu dois descarregamentos. O primeiro devido a interrupção do ensaio durante a noite. O segundo devido a um vazamento no painel de controle da carga axial. Corrigido este vazamento, o ensaio foi levado até deformações da ordem de 3% (somadas as deformações do carregamento isotrópico), não tendo atingido a ruptura final.

O descarregamento devido ao vazamento promoveu um deslocamento da trajetória de tensões para a esquerda. Recuperado o controle, a inclinação estabelecida ( $45^\circ$  no espaço  $p' \times q$ ) foi mantida.

A mudança de comportamento claramente definida que foi observada a deformações da ordem de 0.3% caracteriza o ponto de fluência. Não há ruptura por cisalhamento, visto que o solo continua admitindo acréscimos de tensão desvio após este ponto.

Pouco antes do descarregamento sofrido devido ao vazamento no painel de controle da carga axial pode-se observar no gráfico tensão x deformação alguma instabilidade na tensão desvio. Nesta fase o vazamento já estava ocorrendo e se tentou, manualmente, manter o nível de tensões até que fosse possível localizá-lo e consertá-lo. O vazamento aumentou e foi dispendido algum tempo para identificar a válvula com problemas.

## 2. TT90

Neste ensaio seguiu-se uma trajetória de tensões vertical no espaço  $p' \times q$  após uma consolidação isotrópica a uma tensão efetiva de  $200 \text{ kN/m}^2$  com uma contra-pressão de  $150 \text{ kN/m}^2$ . A trajetória vertical representa um descarregamento lateral com aumento de tensão desvio, mantendo-se constante o nível médio de tensões.

A Figura 5.5 mostra os resultados obtidos neste ensaio. O ponto de fluência foi atingido para deformações axiais em torno de 0.3% da fase desviatória, tendo o corpo de prova sido levado a deformações da ordem de 4% a fim de definir a envoltória de ruptura por cisalhamento.

A curva tensão-deformação não forma pico e não admite acréscimos de tensão após a mudança de comportamento observada. É interessante notar a pequena deformação radial que houve para deformações axiais menores do que 0.3%, em torno da qual parece haver a maior mudança estrutural.

No início da fase desviatória a trajetória sofreu um desvio para a esquerda. Este desvio foi causado por uma escolha inadequada dos valores de incremento de tensão e intervalo de tempo de acionamento dos motores de controle. Para permitir maior rapidez do ensaio na fase de consolidação, foram definidos valores relativamente altos para estas variáveis. Para o controle da fase desviatória, quando se estabelece a interdependência entre tensões axial e confinante, estes valores se mostraram excessivos. Quando a tensão desvio se aproximava de  $100 \text{ kN/m}^2$  ( $q \approx 50 \text{ kN/m}^2$ ) estes valores foram, então, redefinidos. A partir deste ponto manteve-se constante o valor médio de tensões em  $195 \text{ kN/m}^2$ .

### 3. TT135

Neste ensaio seguiu-se a trajetória de descarregamento lateral ( $135^\circ$  com a horizontal). O solo foi consolidado a uma tensão efetiva de  $200 \text{ kN/m}^2$  com uma contra-pressão de  $150 \text{ kN/m}^2$ . Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.6.

O solo foi levado a deformações da ordem de 4% (somadas as deformações da fase isotrópica). No gráfico tensão deformação observa-se um pico de resistência. Este comportamento evidencia a presença de uma estrutura, a qual permitiu o solo ultrapassar a envoltória de resistência ao cisalhamento para grandes deformações. O pico foi claro e se deu para deformações muito pequenas.

Em torno de 2% de deformação axial a drenagem foi fechada com o objetivo de acelerar e evidenciar a tendência de comportamento do solo. O solo se manteve sobre a envoltória de resistência com pequena variação crescente no nível de tensão desvio. O nível de deformações atingido (4% de deformação axial total) ultrapassou o intervalo linear de calibração dos transdutores. A leitura externa da deformação axial, através do defletômetro, permitiu a avaliação da deformação axial a partir de 4%. No gráfico da Figura 5.6.c pode-se identificar o final do intervalo de calibração linear do transdutor de deformação radial pelo retorno da curva  $\varepsilon_2$  x  $\varepsilon_1$  (curva tracejada). Sendo o interesse deste estudo analisar o comportamento de fluência do material,

que se dá a baixos níveis de deformação, não houve preocupação em corrigir estes dados.

#### 4. TT1.2

Neste ensaio seguiu-se uma trajetória de tensões com  $k$  constante e igual a 1.2. O solo foi consolidado a uma tensão efetiva de  $200 \text{ kN/m}^2$  com uma contra-pressão de  $150 \text{ kN/m}^2$ . A trajetória representa um carregamento triaxial anisotrópico com o nível médio de tensões crescente. O solo foi levado a deformações da ordem de 4% (somadas as deformações da fase isotrópica), não tendo atingido a envoltória de ruptura.

A Figura 5.7 mostra os resultados obtidos neste ensaio. Durante a fase desviatória o solo sofreu dois descarregamentos durante a noite. Ao reiniciar o ensaio após o primeiro descarregamento, a trajetória de tensões desviou um pouco da trajetória alvo. Este desvio se deveu a erros de leitura gerados por falha no contato do transdutor de pressão de confinamento com a fonte de alimentação e o conversor analógico-digital. A falha foi corrigida e a trajetória retomada.

O segundo descarregamento foi imposto tendo em vista a interrupção do ensaio durante a noite. Este descarregamento consistiu apenas em um alívio da tensão desvio. A inclinação deste descarregamento, porém, evidencia um descarregamento lateral - ângulo de  $30^\circ$  com a horizontal. Isto é razoável tendo em vista a interdependência entre as tensões confinante e axial. Ao aliviar a tensão desvio há um deslocamento do pistão da base para fora da câmara triaxial com conseqüente alívio da pressão de confinamento.

A inclinação da trajetória de tensões seguida neste ensaio gerou uma deformação radial muito pequena, como pode-se observar na Figura 5.7.c.

#### 5. TD1

Este ensaio seguiu a trajetória de deformação radial

nula, tendo sido o solo submetido apenas à percolação para diminuição da sucção. Durante o ensaio manteve-se a drenagem aberta para buretas pelo topo e base do corpo de prova.

Os resultados são apresentados na Figura 5.8. O solo foi levado a deformações da ordem de 3.5%. A trajetória de tensões obtida apresenta uma forma curva, confirmando os resultados de trabalhos anteriores (Bressani, 1990). Para baixos níveis de tensão esta trajetória ultrapassa a envoltória de resistência ao cisalhamento associada a grandes deformações. A avaliação da precisão do controle pode ser feita pela observação da Figura 5.8.c em que estão plotados deformação radial x deformação axial. Foi atingida uma precisão da ordem do décimo do micron. Nos estágios iniciais do ensaio a deformação radial foi mantida em torno de -0.07% e posteriormente manteve-se em 0.02%. Esta variabilidade se deve a interrupção do ensaio e variação da leitura durante o tempo em que se manteve inoperante o sistema. Ao recomeçar o ensaio, o programa instrui o sistema de forma a manter inalterada a leitura do transdutor, mesmo sendo esta leitura diferente da leitura tomada antes do ensaio ser interrompido.

## 6. TD2

Este ensaio repetiu o procedimento do ensaio anterior, ou seja, um ensaio com trajetória de deformação radial nula. Os resultados são mostrados na Figura 5.9.

Neste ensaio a avaliação da deformação axial foi prejudicada pela perda do sinal de um dos sensores. O outro sensor axial sofreu, no início do ensaio, um afastamento em relação ao par de magnetos fixado ao corpo de prova, gerando leituras defasadas da real deformação axial. Optou-se em dar continuidade ao ensaio ao invés de submeter o solo a um descarregamento sob uma trajetória diferente da de deformação radial nula com conseqüente alteração do diâmetro do corpo de prova. A trajetória de tensões seguida, porém, pôde ser avaliada pela leitura dos transdutores de carga e pressão e é mostrada na figura 5.9.a. O comportamento tensão-deformação pode ser avaliado

somente em seu aspecto qualitativo (Figura 5.9.b).

A trajetória de tensões descrita apresenta uma forma curva em tudo semelhante à descrita no ensaio anterior. Num mesmo gráfico  $p' \times q$  não é possível diferenciar as duas trajetórias, exceto pelo início, que se deu a diferentes níveis de tensão.

Próximo a  $150 \text{ kN/m}^2$  de tensão desvio ( $q \approx 75 \text{ kN/m}^2$ ) o controle da trajetória de deformação radial nula ficou instável durante algum tempo. Através da análise do arquivo de leituras em bits foi identificado que havia problemas nas leituras dos três sensores de efeito Hall, que estavam ligados a uma mesma caixa a qual fazia a conexão destes sensores com a fonte de alimentação e com o conversor analógico-digital. Uma falha nos contatos desta caixa com a fonte de alimentação foi identificada e consertada. Durante este período até o controle ser reestabelecido não foi possível reproduzir a trajetória de deformação radial nula, tendo em vista o desconhecimento do real estado de deformação do corpo de prova. Posteriormente, a trajetória de deformação radial nula foi retomada.

#### 5.4.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi feito para quatro níveis de tensão vertical diferentes - respectivamente 25, 50, 100 e  $200 \text{ kN/m}^2$  - com o objetivo de identificar a envoltória de resistência do solo. Os resultados obtidos são apresentados nos gráficos da Figura 5.10. Observa-se que as curvas tensão-deformação apresentam pico de resistência que não coincide com expansão, características de solos estruturados.

No diagrama  $p' \times q$  apresentado na Figura 5.11 estão plotados os resultados obtidos nos ensaios triaxiais juntamente com os resultados do ensaio de cisalhamento direto. A envoltória de resistência obtida a partir dos valores de pico apresenta uma forma curva para baixos níveis de tensão. A envoltória final de resistência definida neste diagrama está referenciada aos valores obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para 10% de deformação. Esta envoltória se assemelha aquela obtida para

grandes deformações no equipamento triaxial.

#### 5.4.3 Ensaio de Compressão Confinada

Foram feitos dois ensaios de adensamento convencionais de compressão confinada. Um ensaio com o solo em seu estado natural e outro sobre o solo remoldado. Ambos os ensaios foram inundados. Os resultados são mostrados na Figura 5.12. Na curva log tensão x índice de vazios obtida no ensaio sobre o solo em seu estado natural pode-se identificar uma mudança nítida de comportamento, semelhante a que ocorre com argilas pré-adensadas. No ensaio sobre o solo remoldado não se observa mudança significativa de comportamento. Tendo em vista o fato de que a cimentação sustenta um alto índice de vazios, o solo foi remoldado próximo ao limite de liquidez. Obteve-se um índice de vazios superior ao encontrado no solo em seu estado natural. De valor relativamente baixo, a compressibilidade do solo residual de arenito Botucatu permite associar o comportamento unidimensional a um comportamento tipicamente arenoso.

Tabela 5.1 - Classificação do Solo (Nuñez, 1990)

SISTEMA	CLASSIFICAÇÃO
AASHTO	A-4(3)
USCS	SM-SC
Trilinear	lemo-arenoso
Pedológico	saprólito de arenito
NOGAMI	NA - não laterítico areno-siltoso

Tabela 5.2 - Identificação dos ensaios triaxiais drenados

ENSAIO	TRAJETÓRIA
TT45	carregamento convencional (45° em $p'$ x $q$ )
TT90	descarregamento lateral com aumento de $\sigma_1$ (90° em $p'$ x $q$ )
TT135	descarregamento lateral com $\sigma_1$ constante (135° em $p'$ x $q$ )
TT1.2	$k$ constante e igual a 1.2
TD1	trajetória com deformação radial nula
TD2	trajetória com deformação radial nula

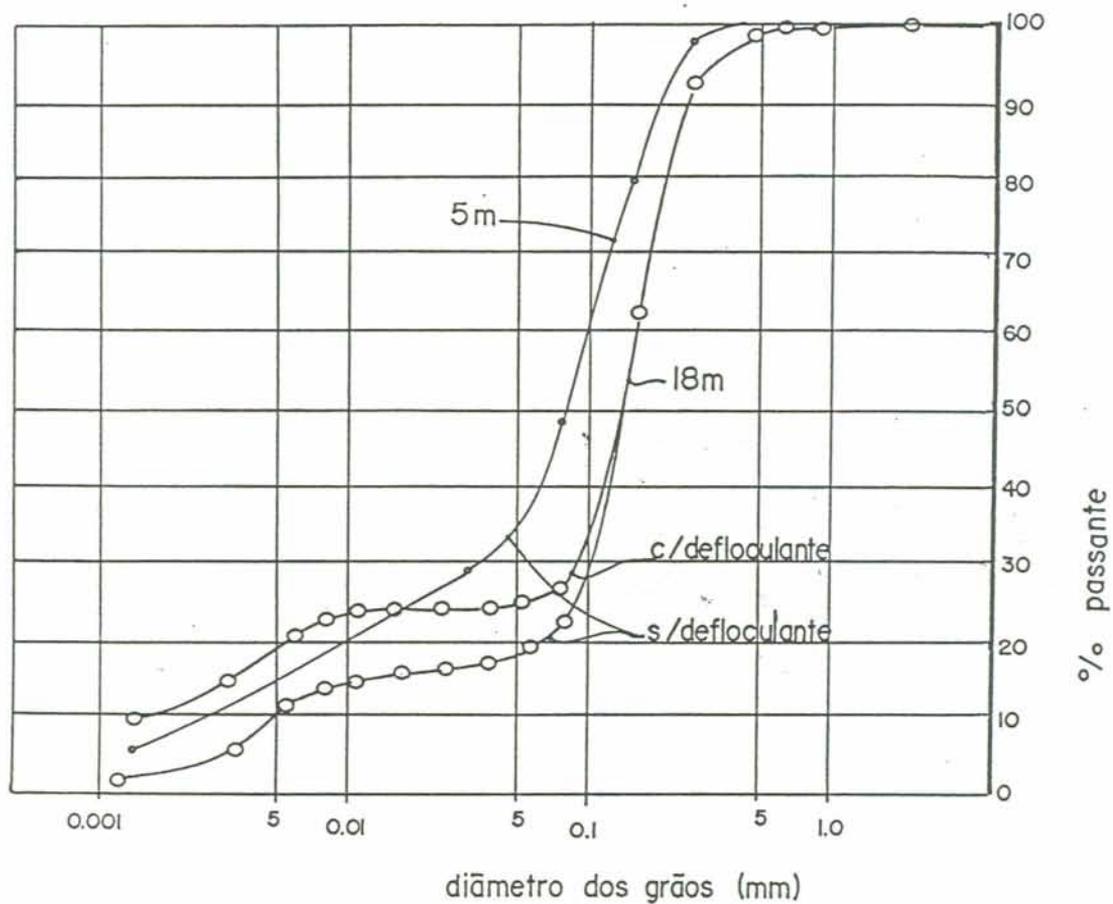
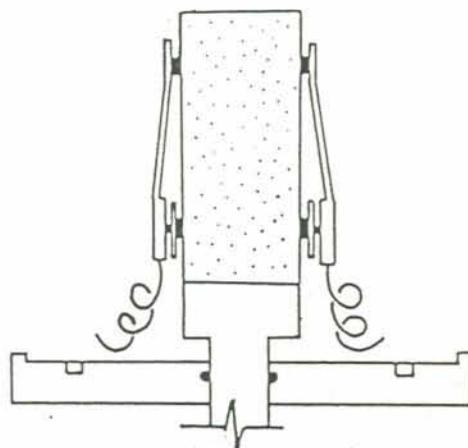
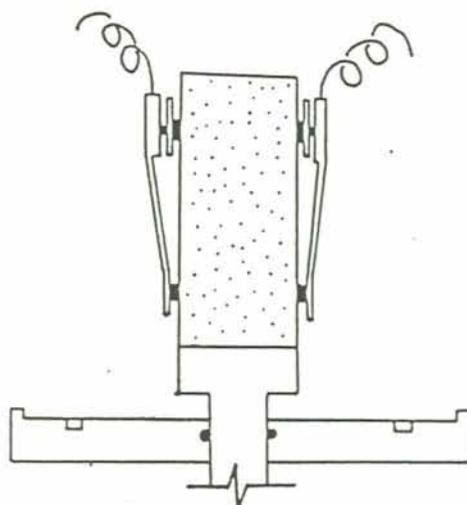


Figura 5.1 - Curvas granulométricas do horizonte C do solo residual de arenito Botucatu (Nuñez, 1990)



(a) primeira opção



(b) solução com maior liberdade de movimento

Figura 5.2 - Posição dos medidores de deformação axial sobre o corpo de prova .

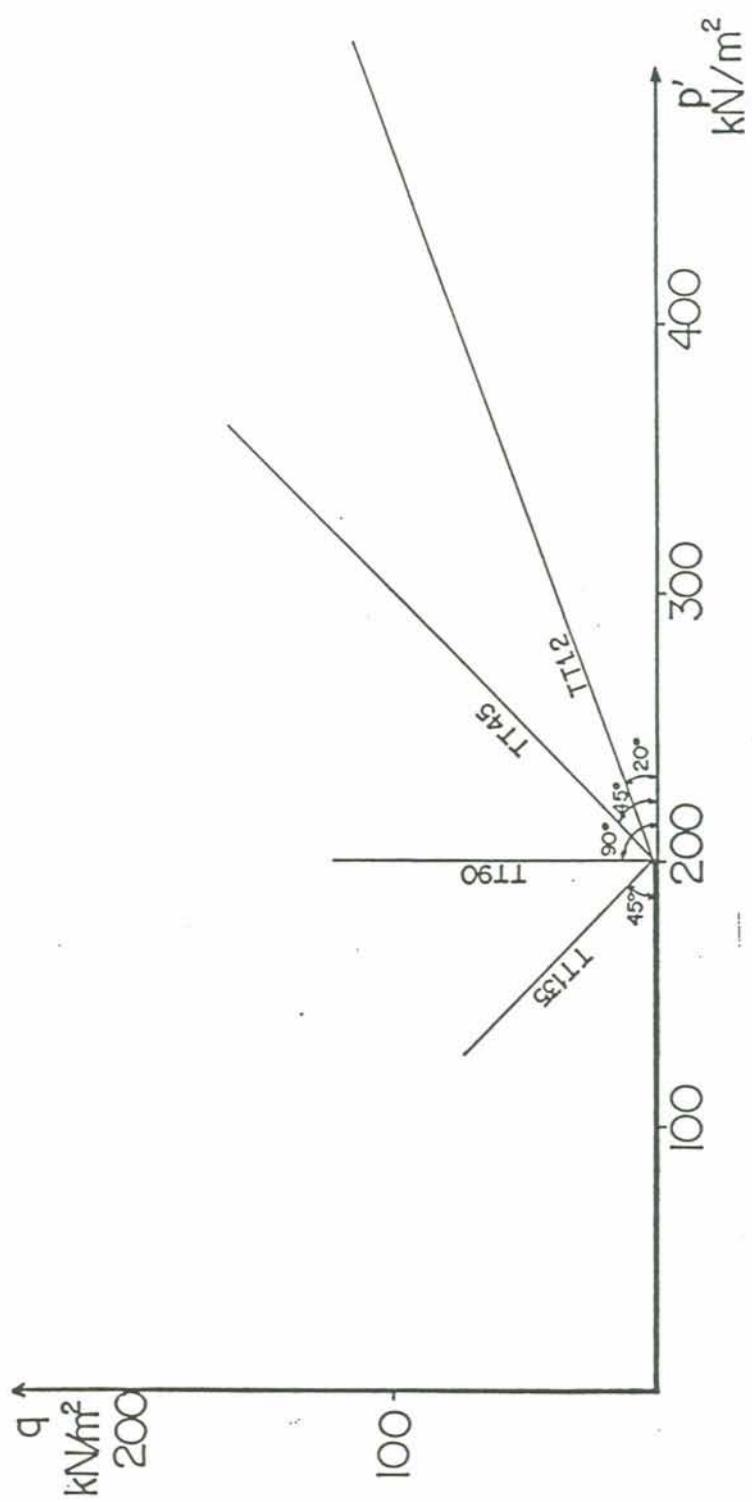


Figura 5.3 - Trajetórias de tensões programadas

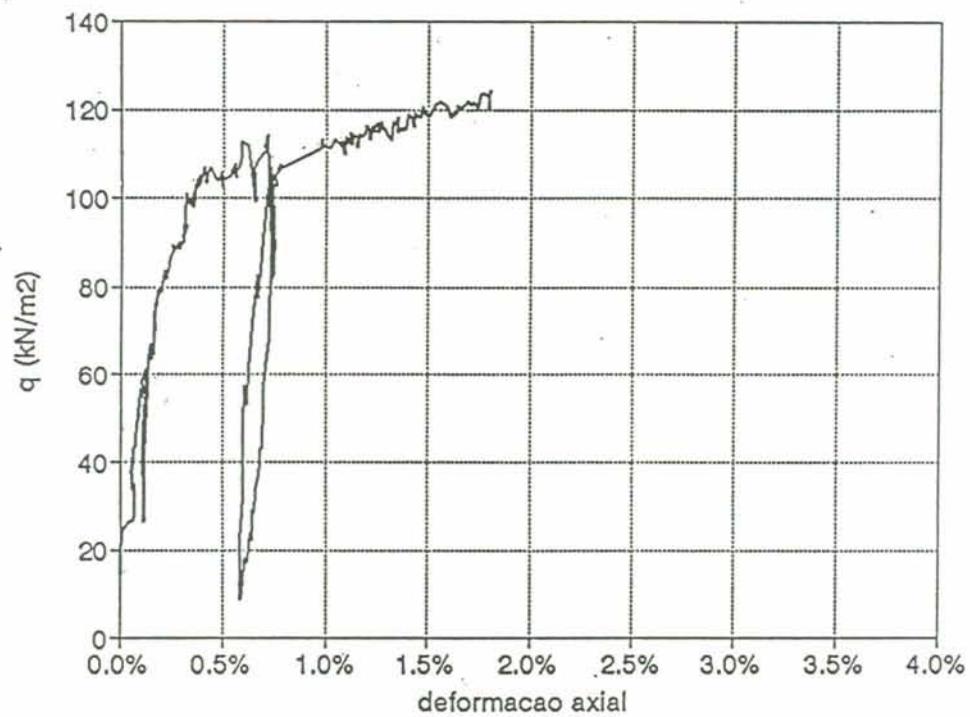
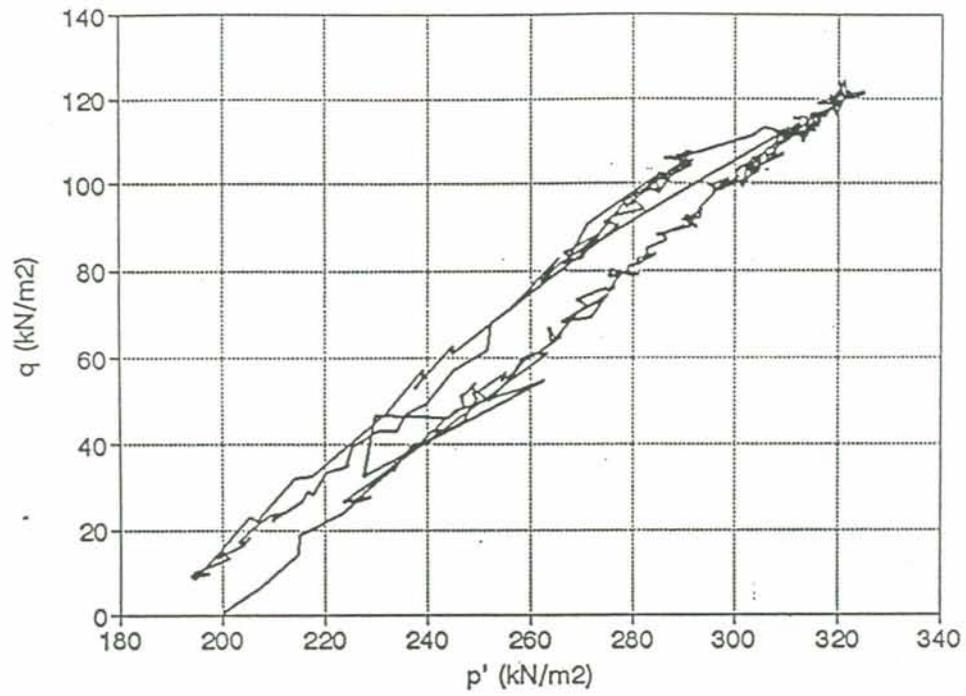


Figura 5.4 - Resultados do ensaio TT45  
(a)  $p' \times q$ , (b)  $\epsilon_a \times q$  (cont.)

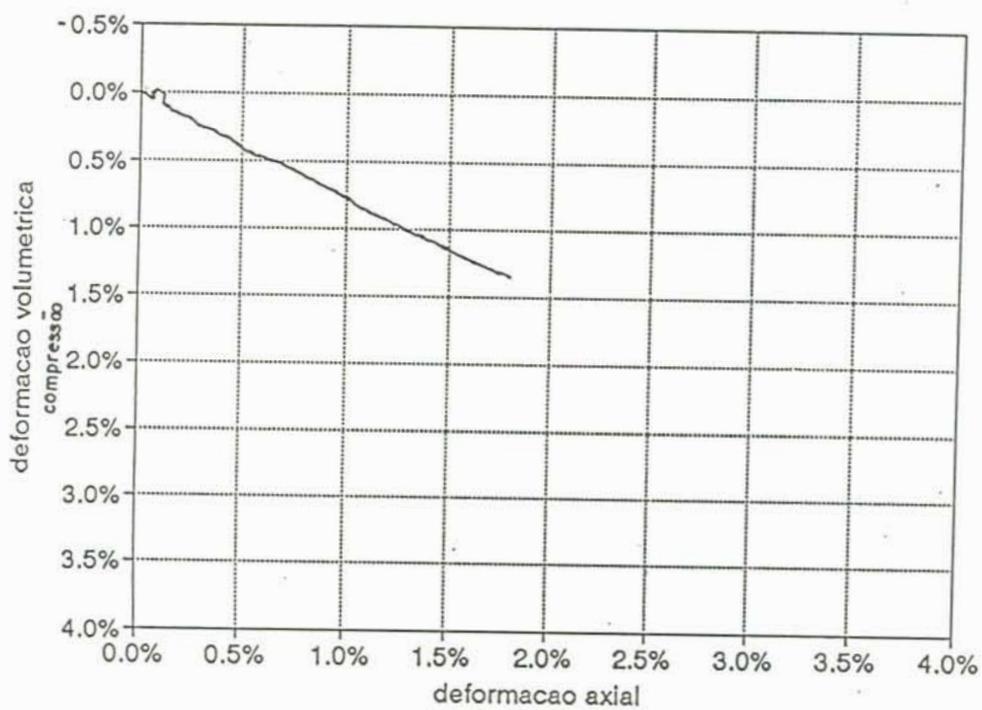
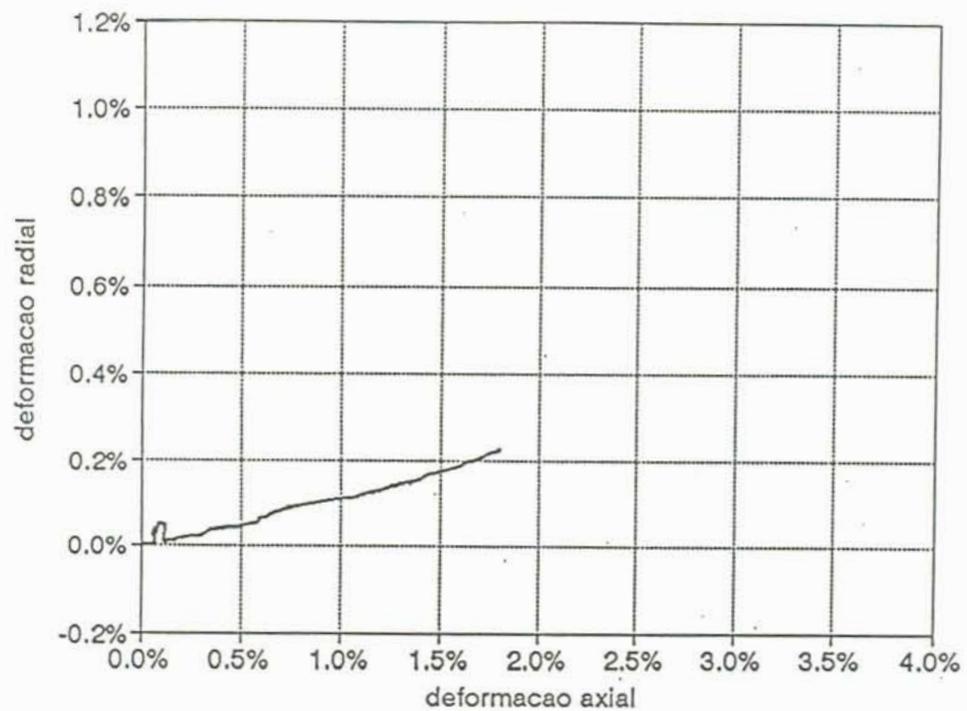


Figura 5.4 - (cont.) (c)  $\epsilon_r \times \epsilon_a$ , (d)  $\epsilon_v \times \epsilon_a$

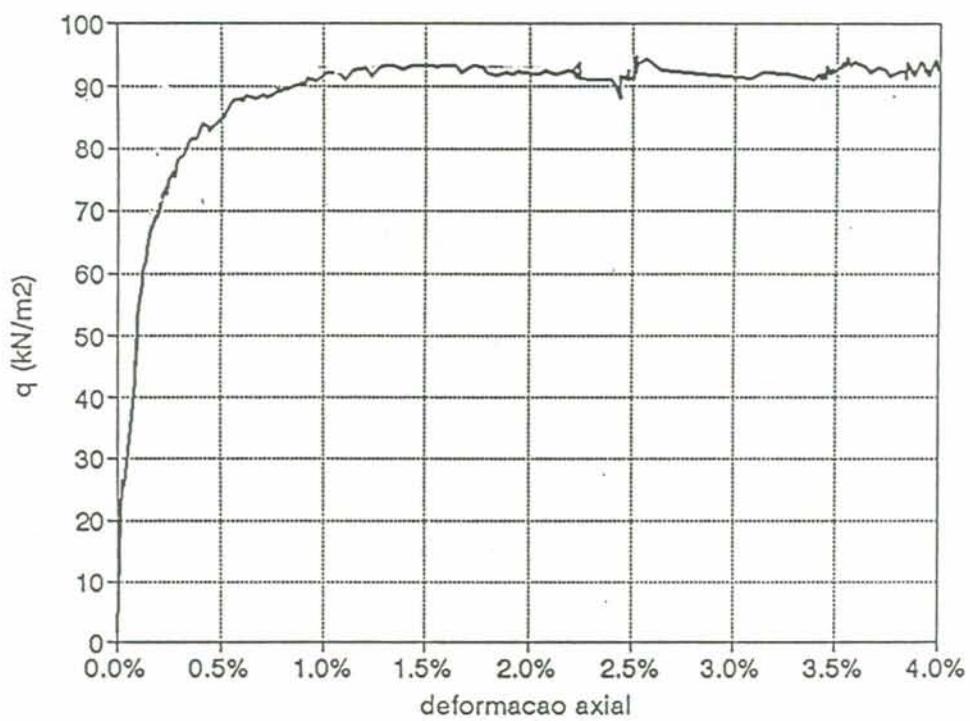
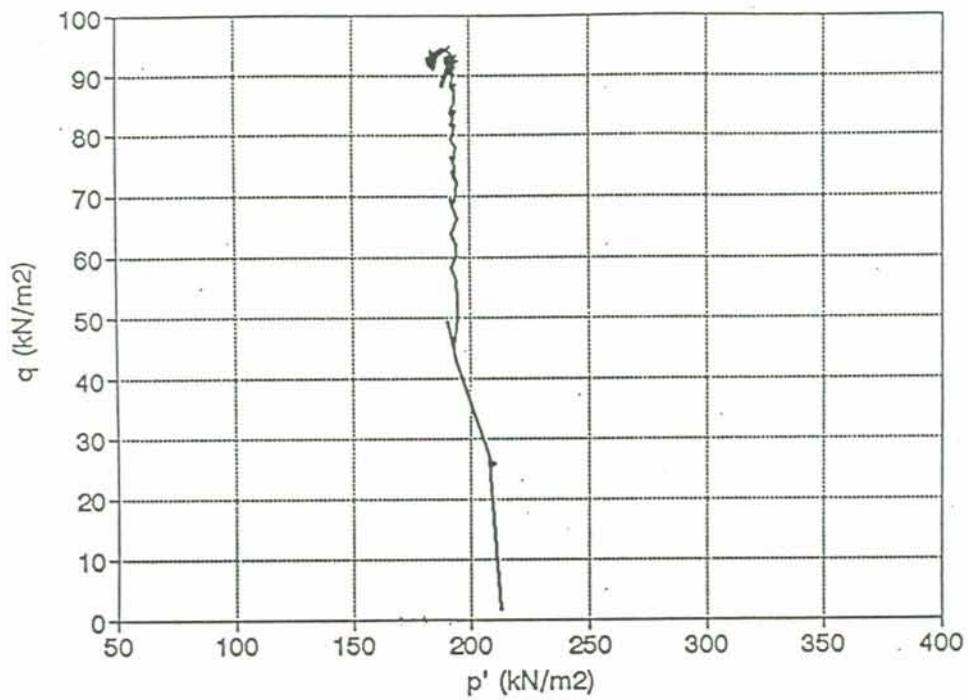


Figura 5.5 - Resultados do ensaio TT90  
(a)  $p' \times q$ , (b)  $\epsilon_a \times q$  (cont.)

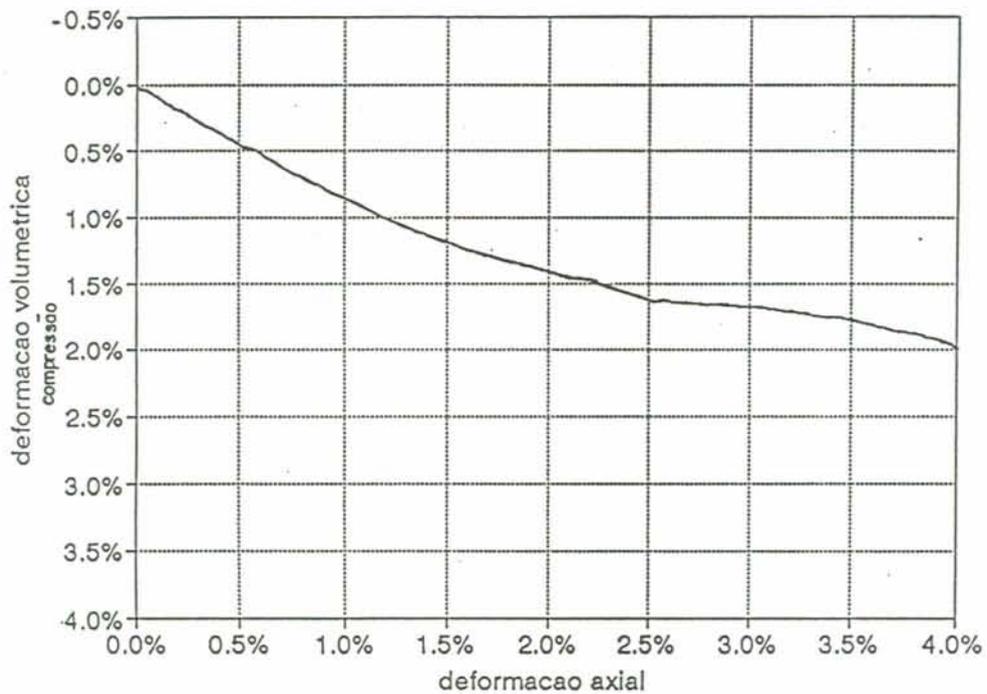
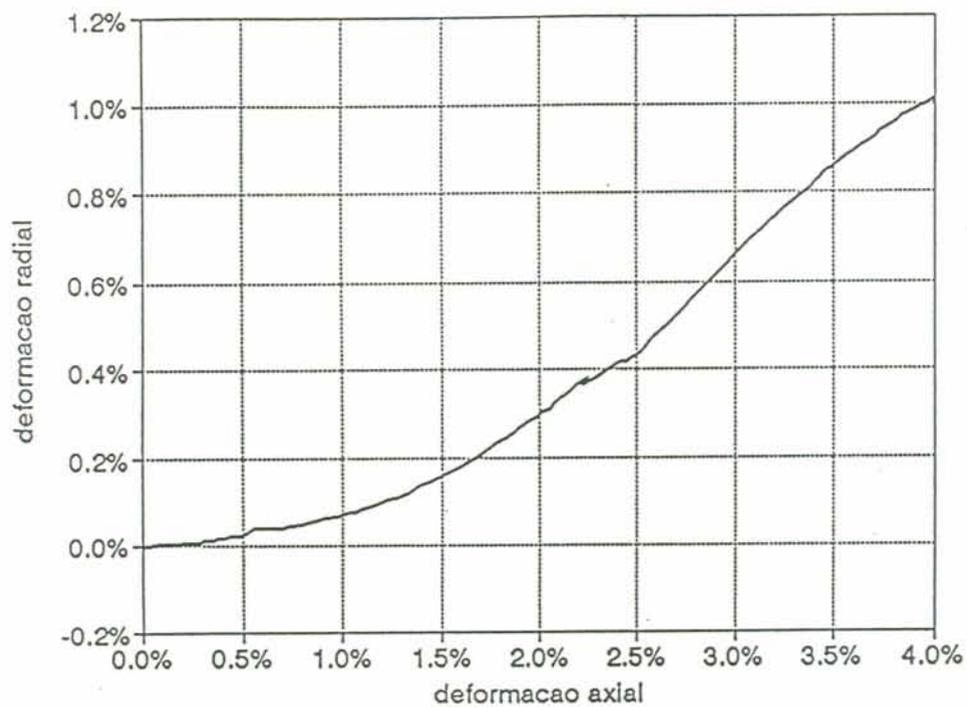


Figura 5.5 - (cont.) (c)  $\epsilon_r \times \epsilon_a$ , (d)  $\epsilon_v \times \epsilon_a$

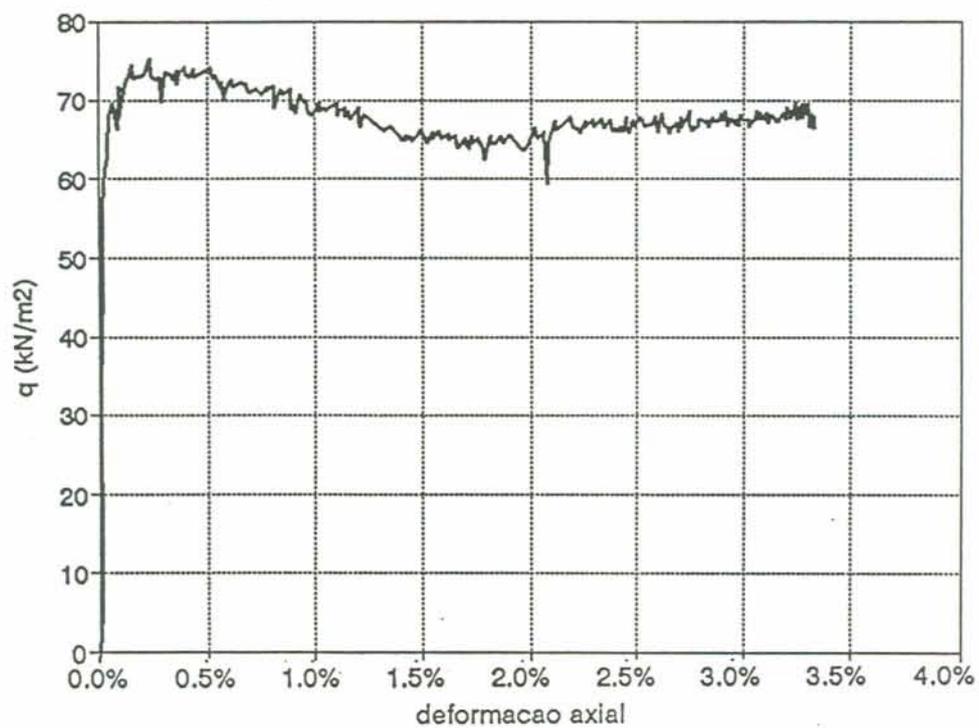
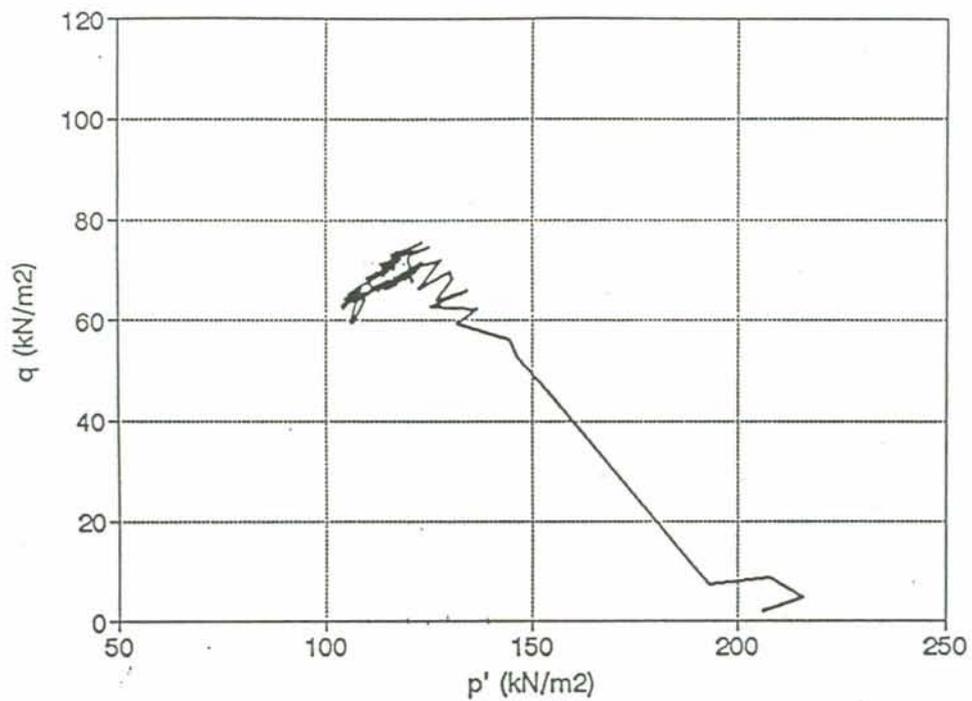


Figura 5.6 - Resultados do ensaio TT135  
(a)  $p' \times q$ , (b)  $\epsilon_a \times q$  (cont.)

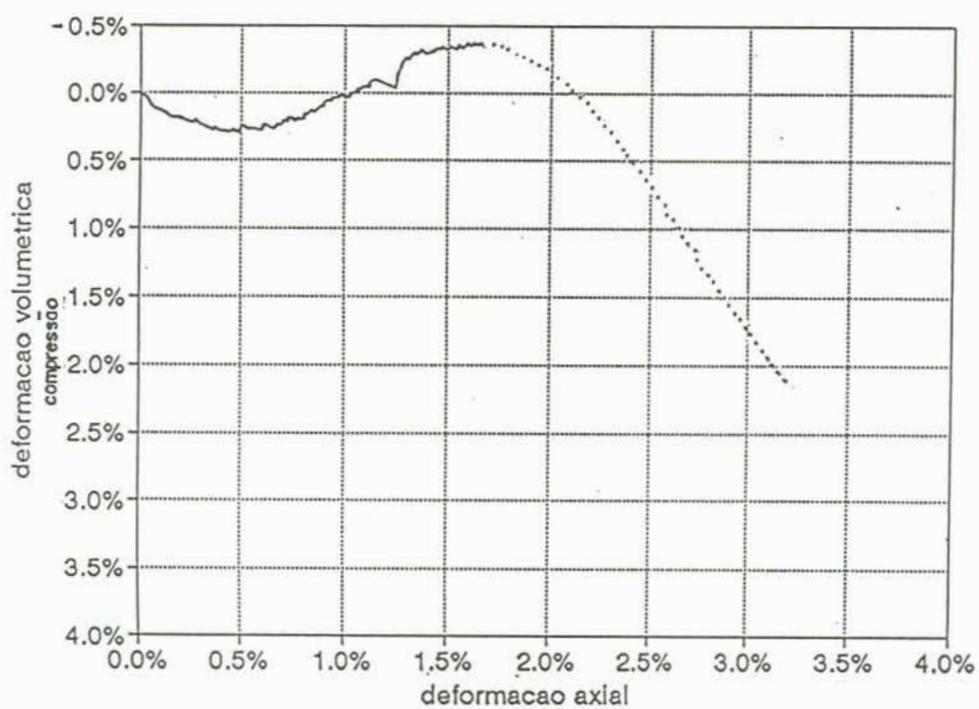
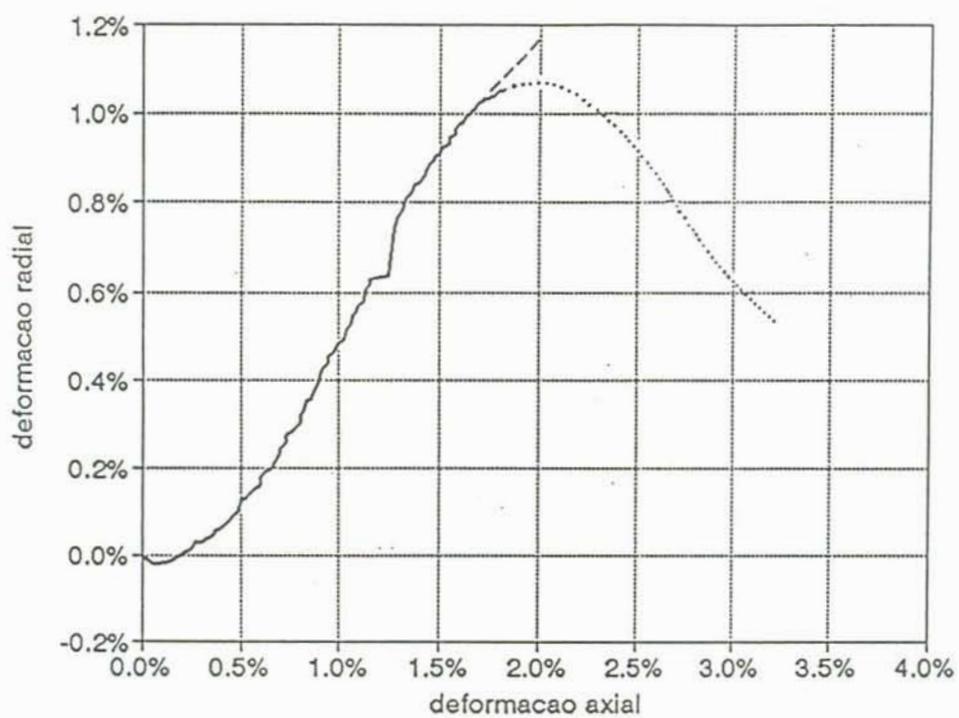


Figura 5.6 - (cont.) (c)  $\epsilon_r \times \epsilon_a$ , (d)  $\epsilon_v \times \epsilon_a$

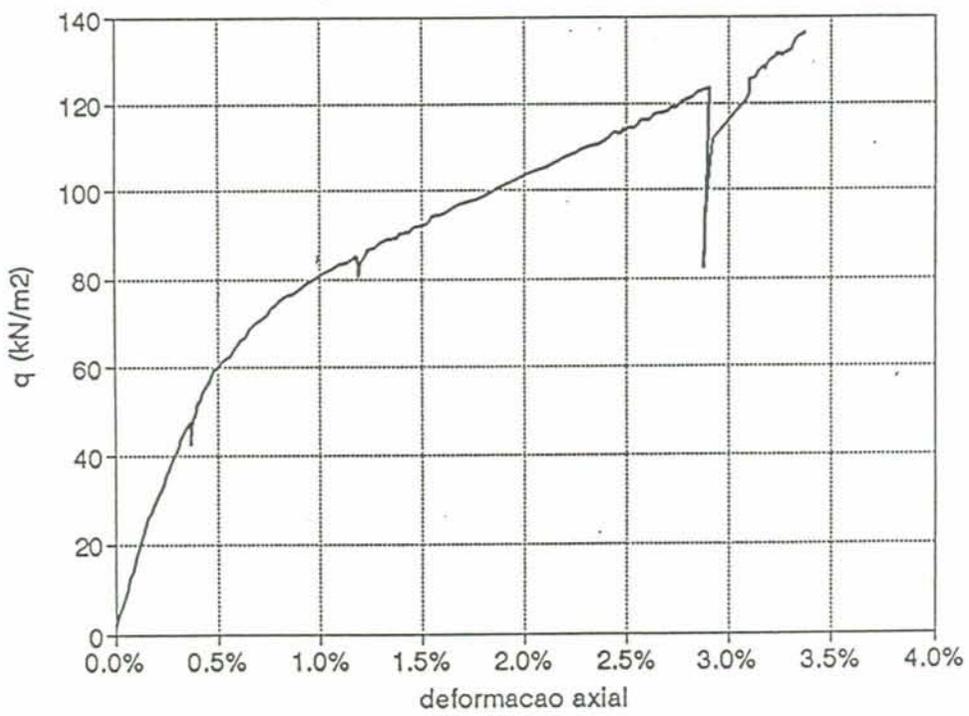
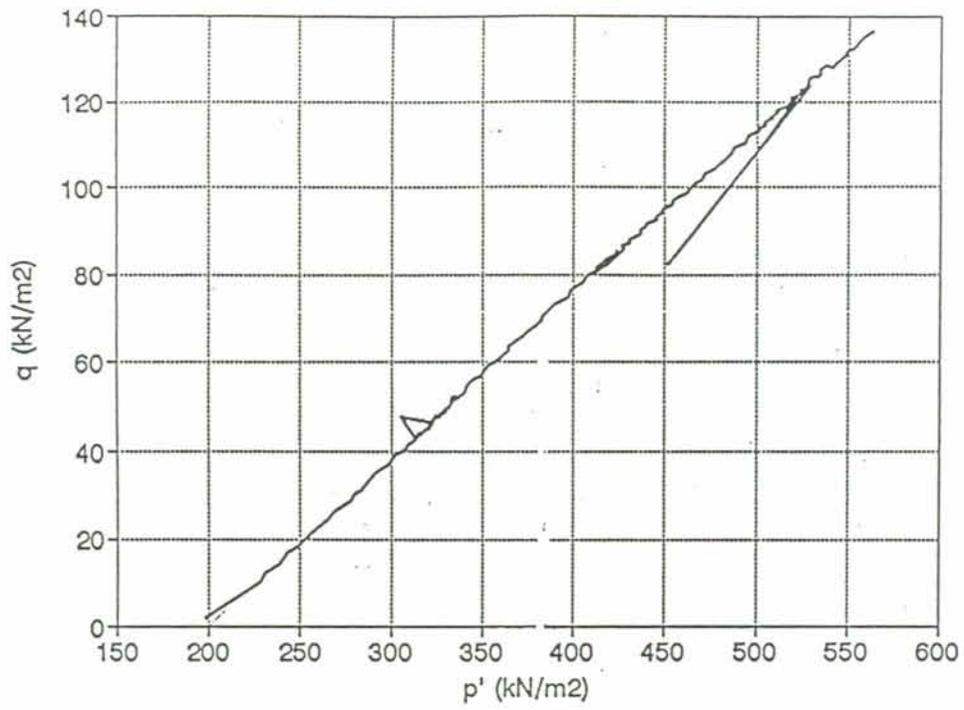


Figura 5.7 - Resultados do ensaio TT1.2  
(a)  $p' \times q$ , (b)  $\epsilon_a \times q$  (cont.)

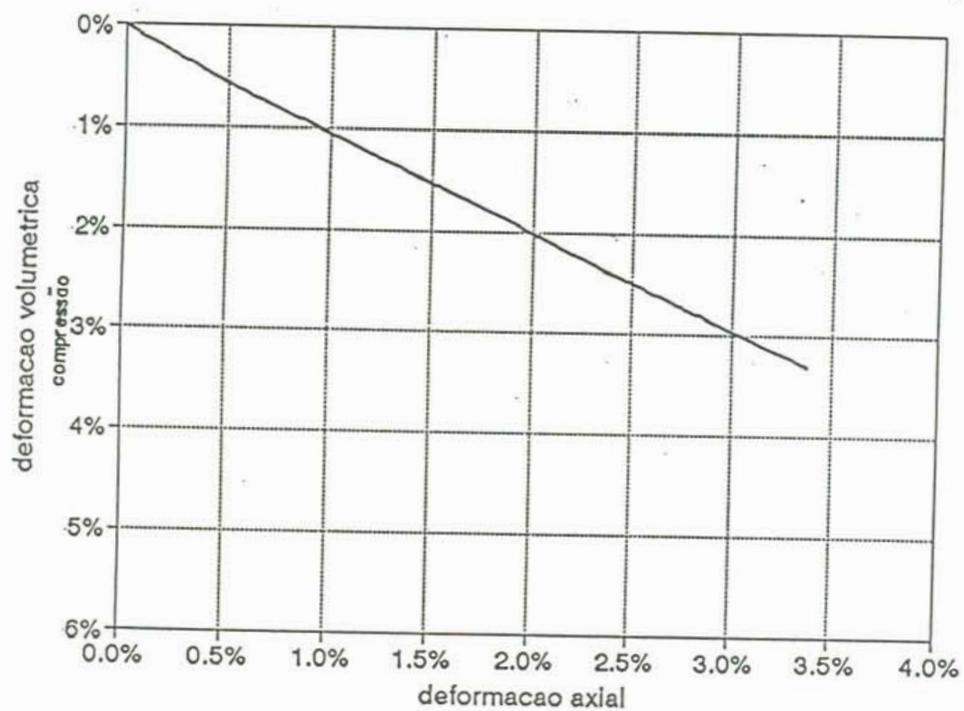
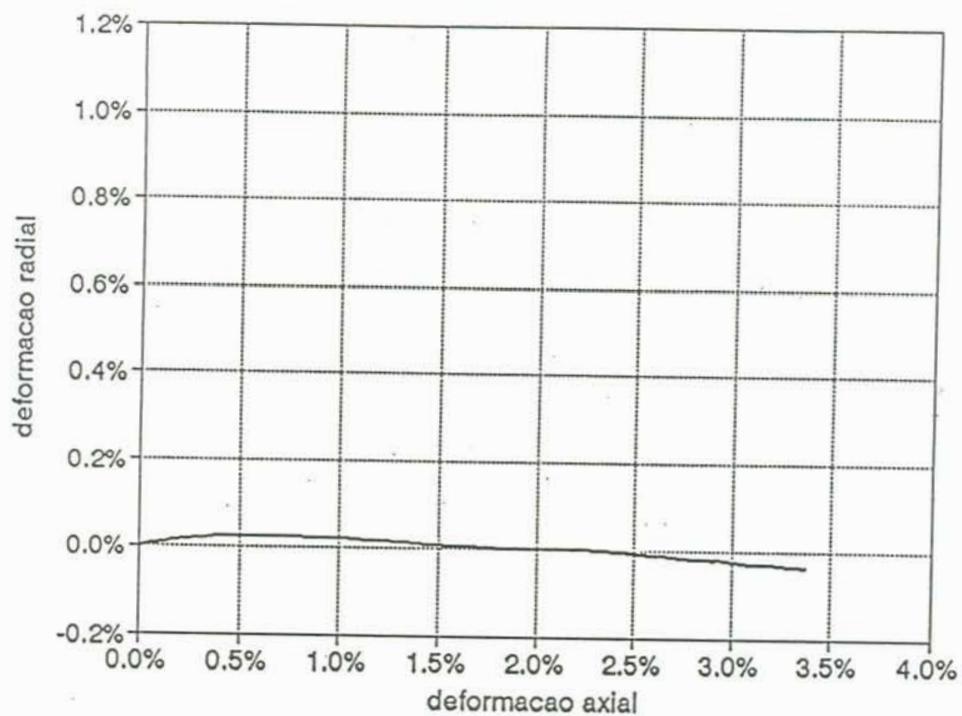


Figura 5.7 - (cont.) (c)  $\epsilon_r \times \epsilon_a$ , (d)  $\epsilon_v \times \epsilon_a$

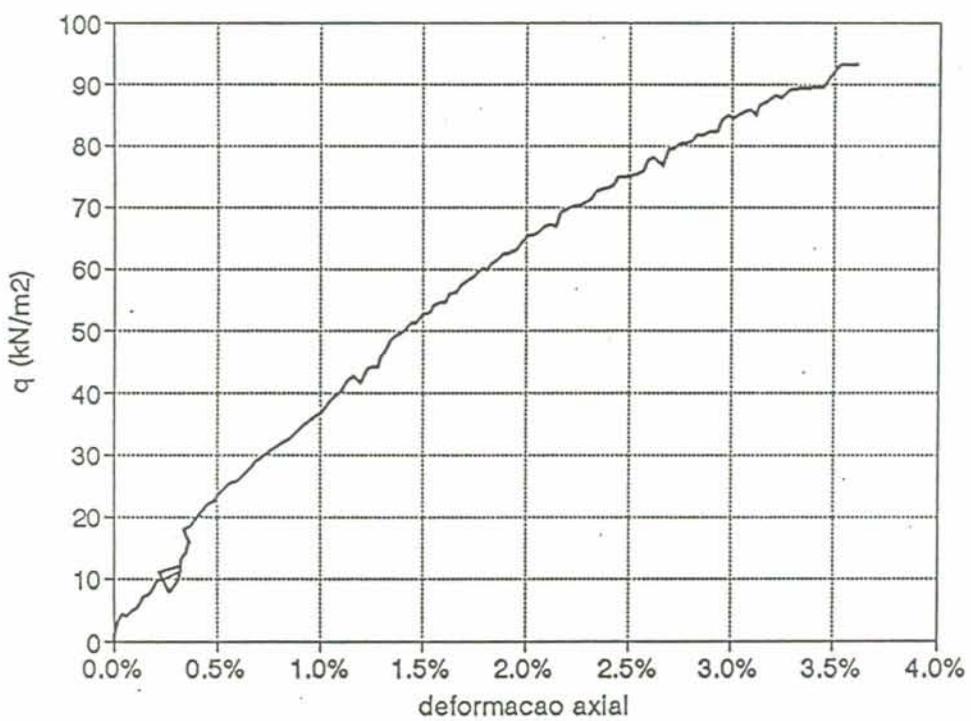
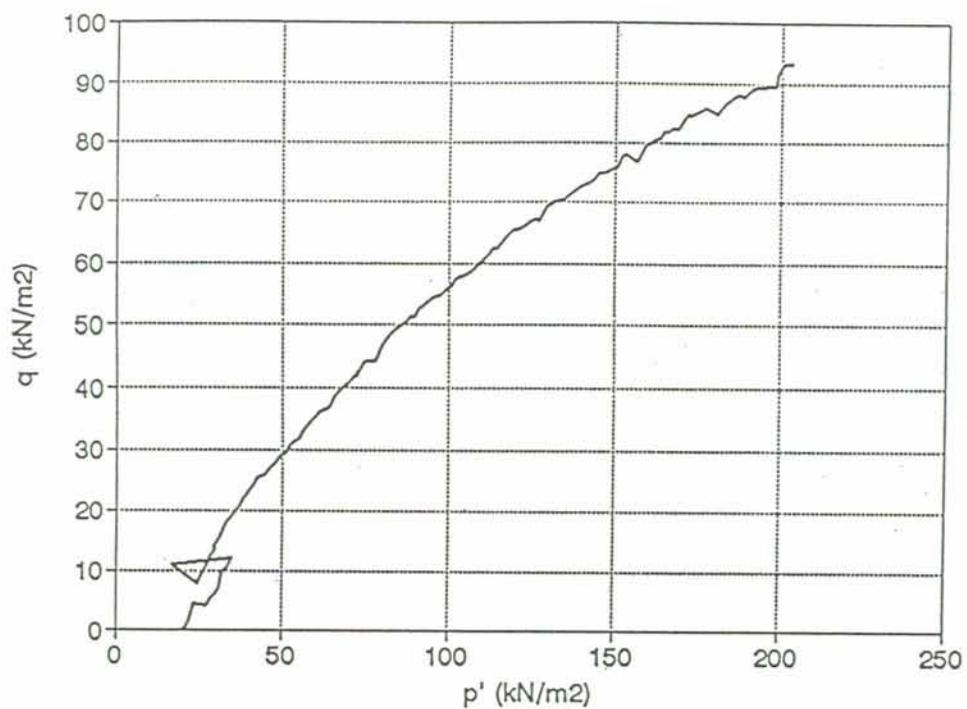


Figura 5.8 - Resultados do ensaio TD1  
(a)  $p' \times q$ , (b)  $\epsilon_a \times q$  (cont.)

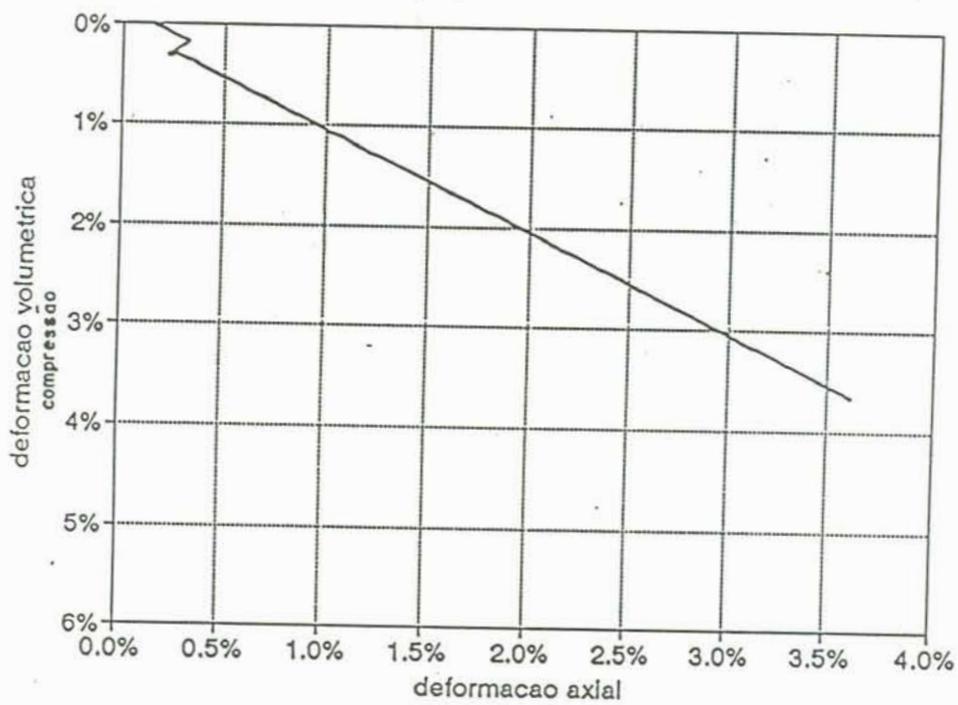
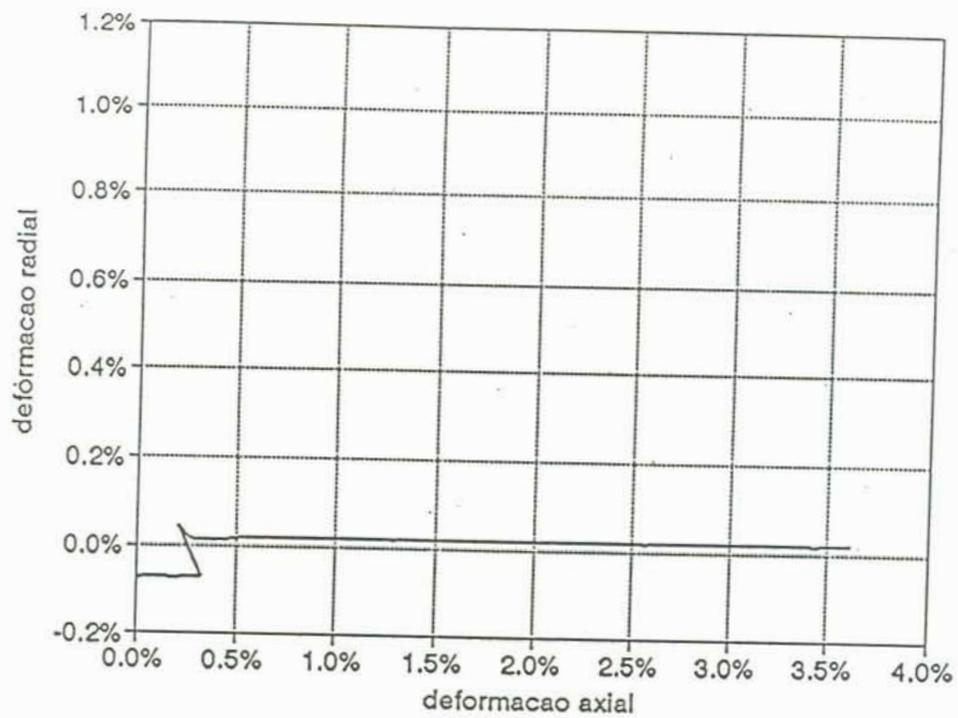


Figura 5.8 - (cont.) (c)  $\epsilon_r \times \epsilon_a$ , (d)  $\epsilon_v \times \epsilon_a$

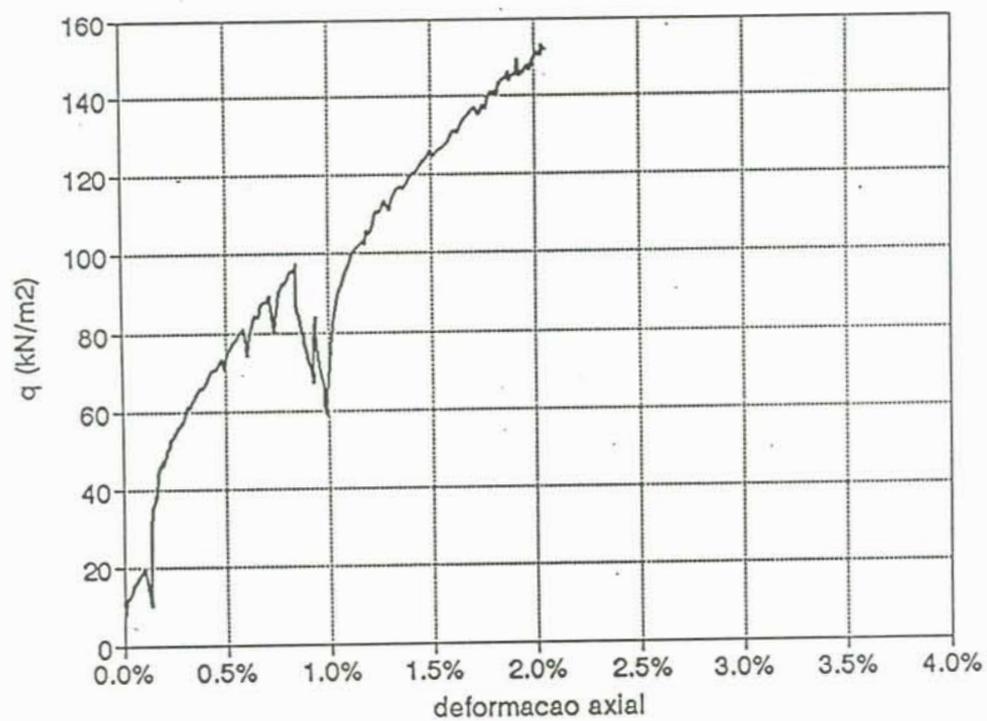
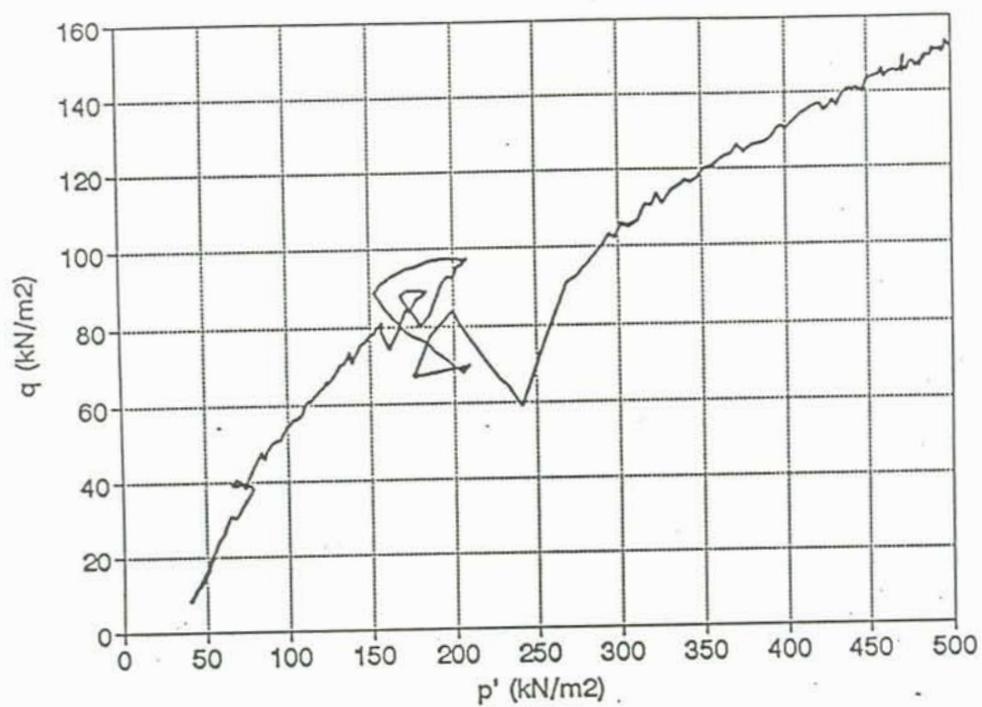


Figura 5.9 - Resultados do ensaio TD2  
(a)  $p' \times q$ , (b)  $\epsilon_a \times q$  (cont.)

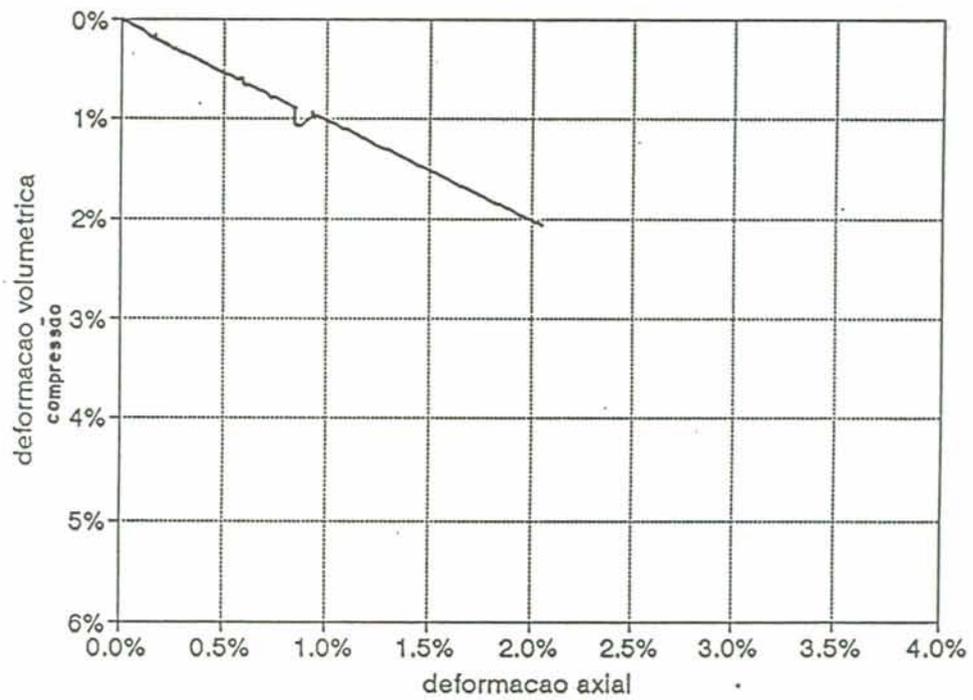
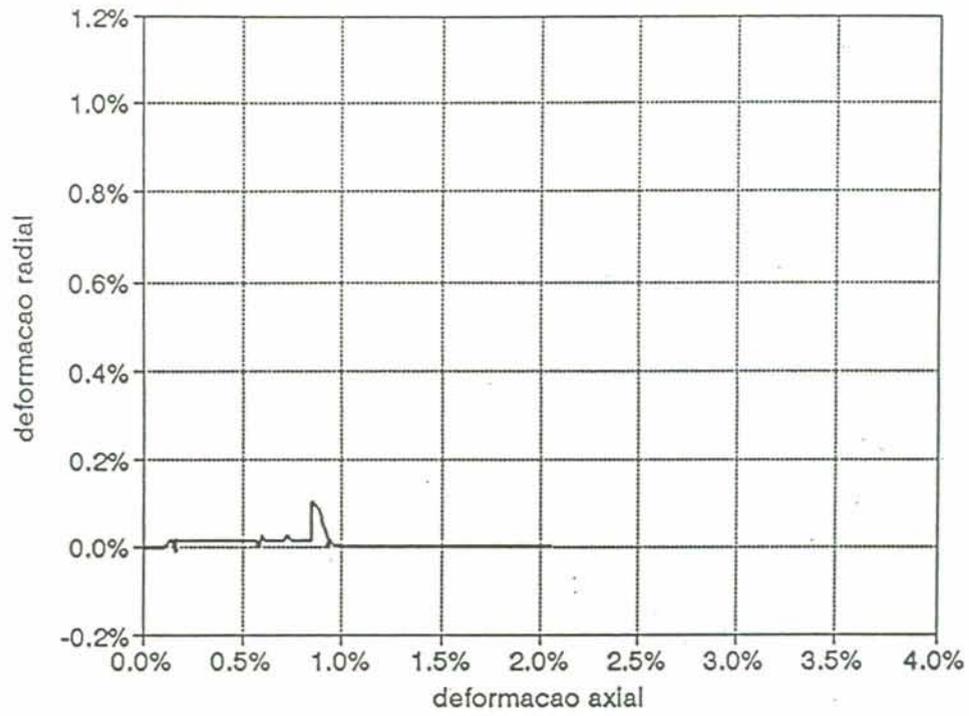


Figura 5.9 - (cont.) (c)  $\epsilon_r \times \epsilon_a$ , (d)  $\epsilon_v \times \epsilon_a$

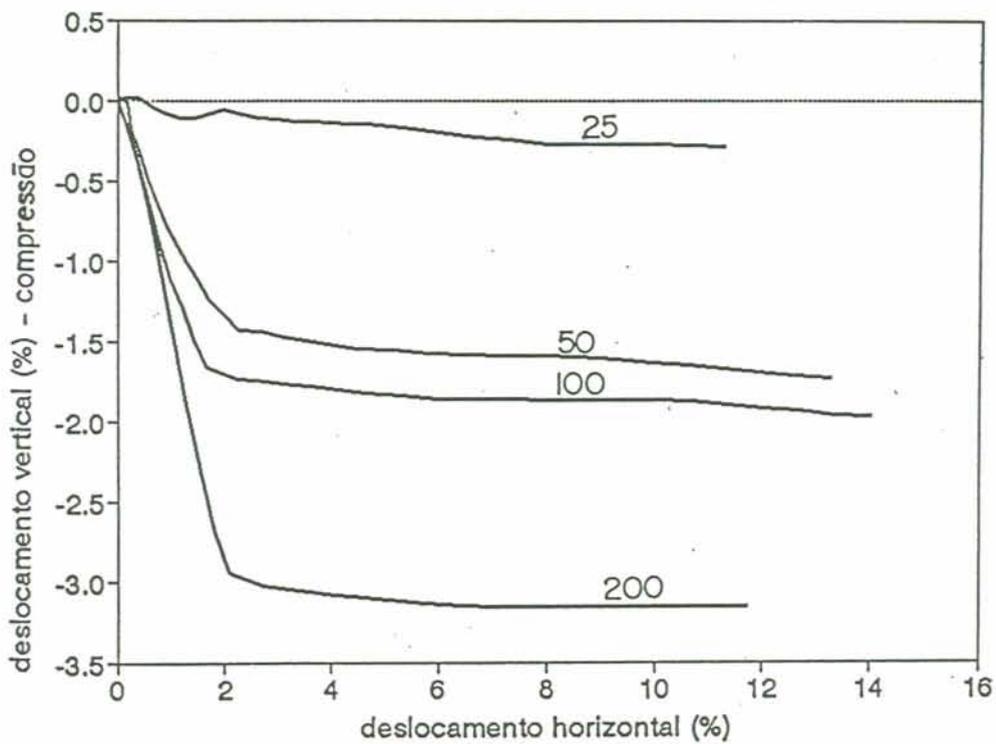
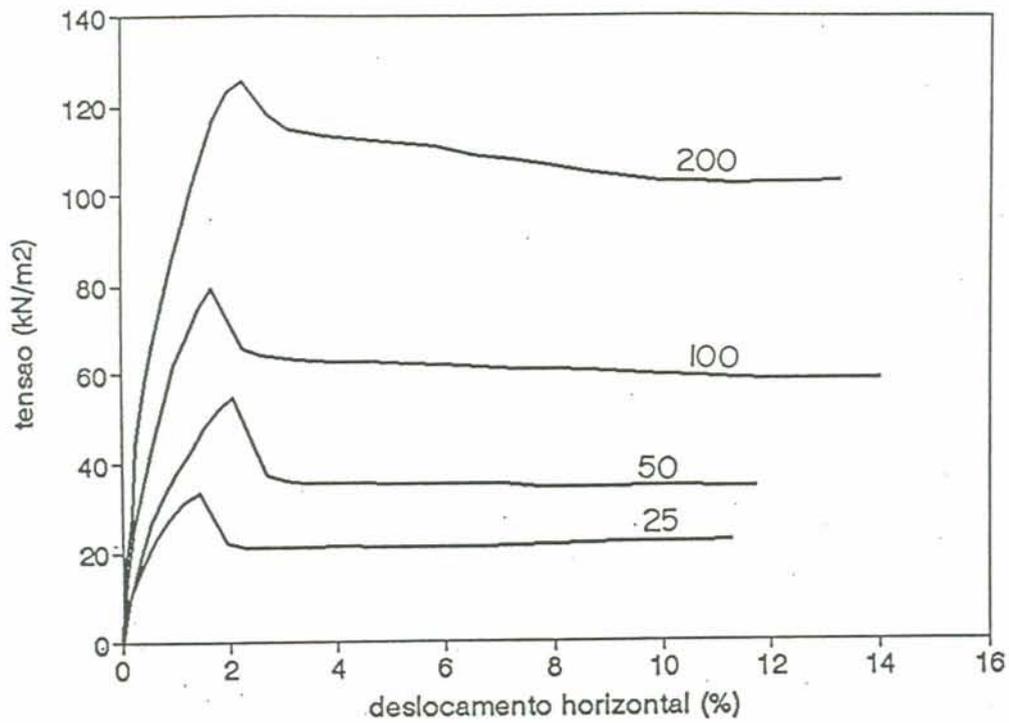


Figura 5.10 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto  
(a) Tensão x deslocamento horizontal  
(b) Desl. vertical x desl. horizontal (cont.)

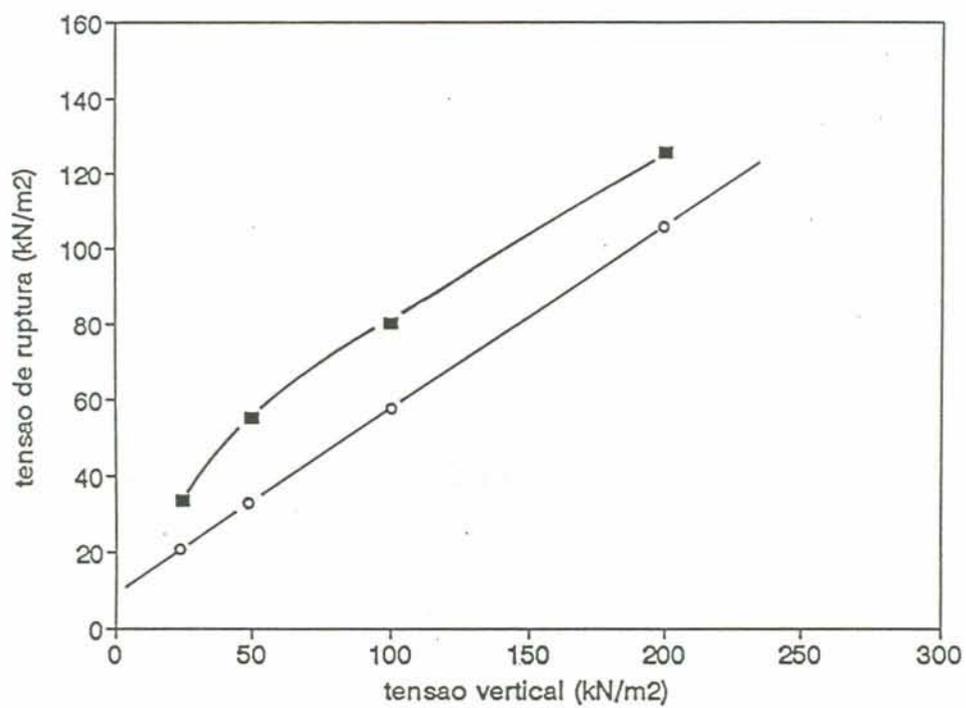


Figura 5.10 - (cont.) (c) Envoltória de resistência - valores de pico e para 10% de deformação

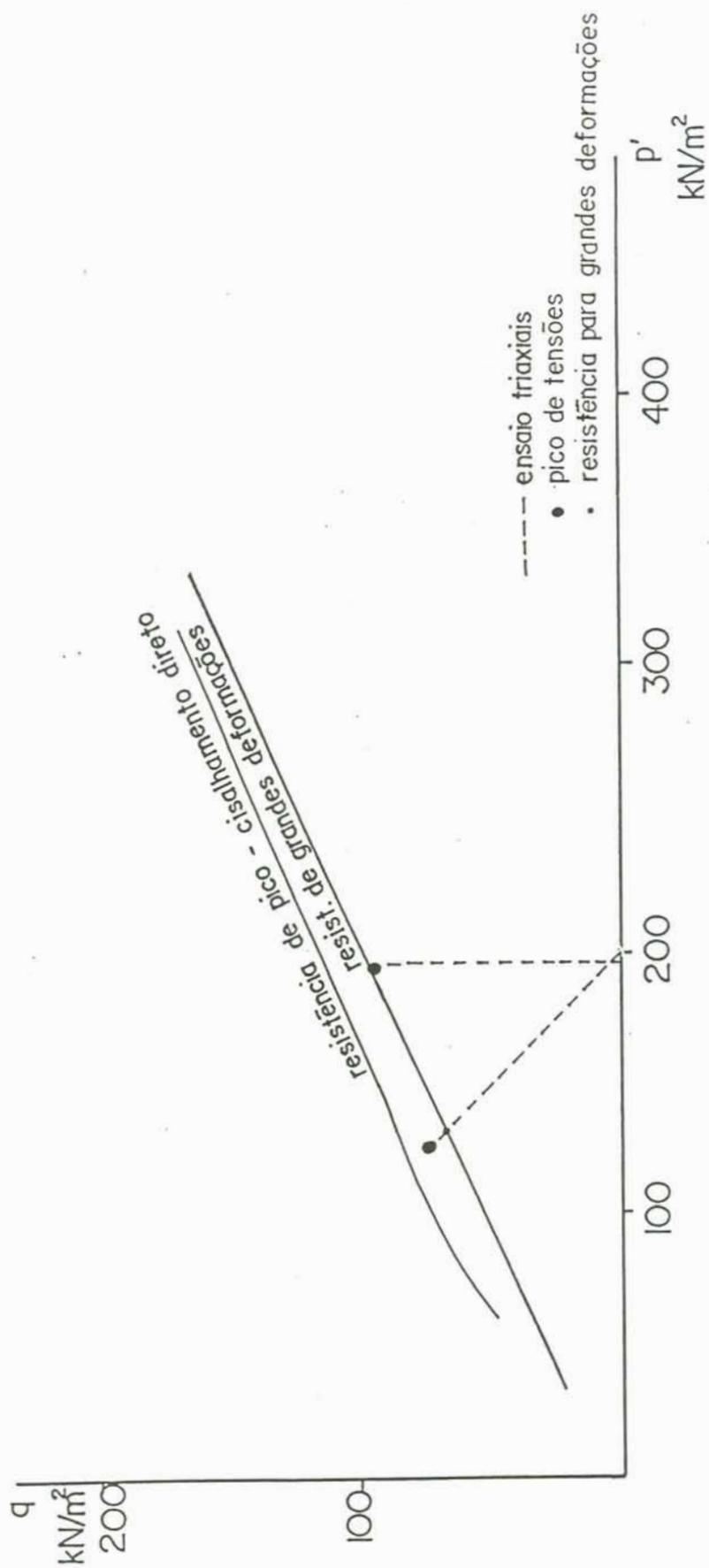


Figura 5.11 - Envoltórias de resistência de pico e de grandes deformações obtidas dos ensaios de cisalhamento direto x ensaios triaxiais

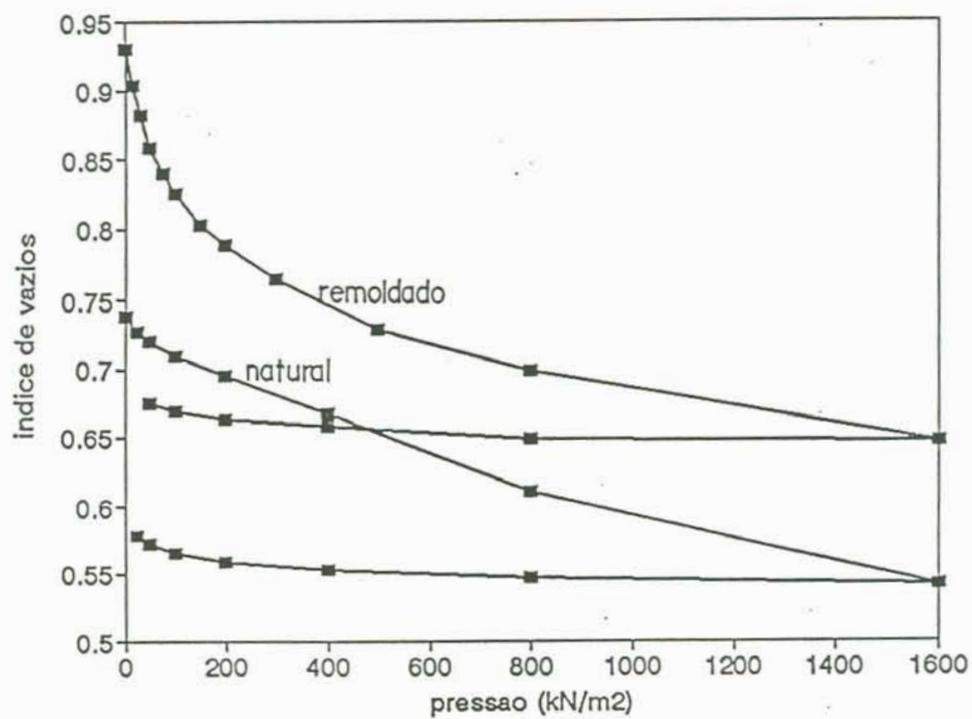
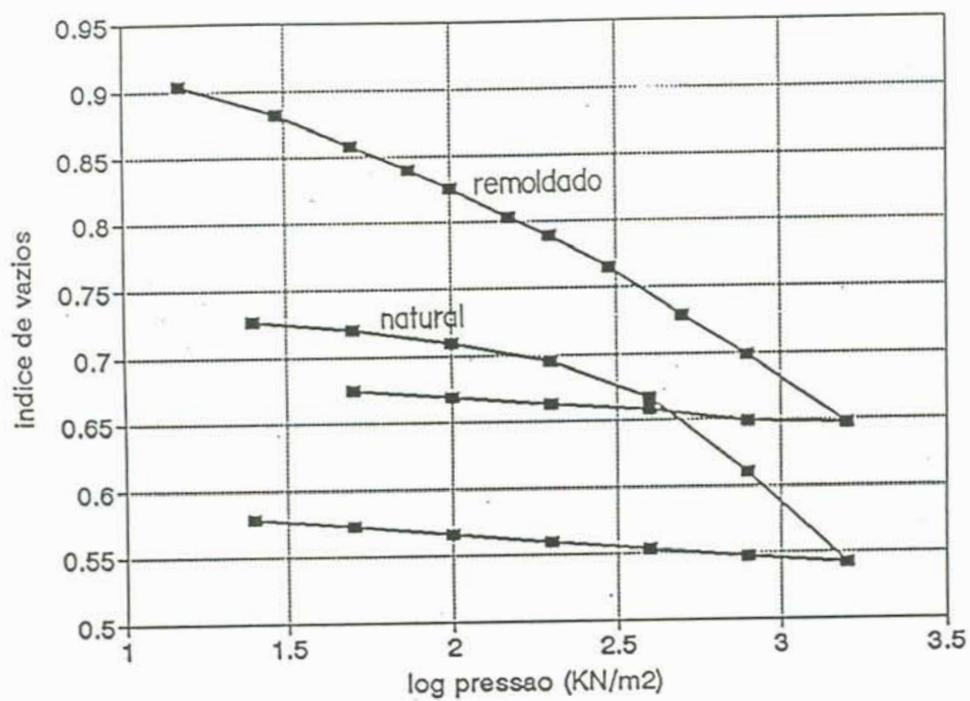


Figura 5.12 - Resultados dos ensaios de compressão confinada  
(a) escala logarítmica (b) esc. normal,

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 Adequação do Equipamento ao Estudo de Solos Tropicais Cimentados

A automatização do equipamento triaxial objetiva o estudo do comportamento de solos cimentados sob os seguintes aspectos:

1. observação da mudança de comportamento que ocorre em solos residuais cimentados a pequenas deformações;
2. análise do comportamento deste material sob diversos tipos de carregamento.

Para atingir o primeiro objetivo o equipamento foi projetado com medição local de deformações e aquisição automática de dados. Para atingir o segundo objetivo o equipamento foi desenvolvido com controle automático.

Os resultados dos ensaios confirmam o padrão de comportamento descrito na literatura (Vargas, 1953, Leroueil e Vaughan, 1990) e atestam a importância da medição local de deformações para este estudo. A partir da medição local de deformações, foi possível, nas quatro trajetórias de tensões seguidas, identificar com nitidez a mudança de comportamento que o solo sofre a pequenas deformações.

A medição local de deformação radial viabilizou, juntamente com o controle automático, a condução da trajetória de deformação radial nula. Para o solo ensaiado, a baixos níveis de deformação, esta trajetória apresenta uma forma curva,

contornando internamente a superfície de fluência, e definindo para  $k_0$  um valor variável com o nível de tensões.

A importância prática do controle automático de trajetórias de tensões para o estudo do comportamento de solos tropicais cimentados consiste na possibilidade de se reproduzir em laboratório o tipo de carregamento que o solo irá sofrer em campo. Ensaio realizados em um solo residual de granito de Hong Kong (Geotechnical Control Office, 1982) reproduziram trajetórias tipo CU, CID e compressão uniaxial com aumento de contra-pressão. Os resultados mostraram diferenças entre os parâmetros de resistência obtidos para as três trajetórias. Para a trajetória de compressão uniaxial com aumento de contra-pressão foram obtidos os maiores valores.

Segundo Bressani e Vaughan (1989) diferentes trajetórias de tensões implicam em diferentes valores de tensão de fluência, sendo esta diferença mais significativa para baixos níveis de tensão. Estes autores associaram uma superfície de fluência a valores de tensão de fluência obtidos a partir de trajetórias tipo CD. Maiores valores de tensão de fluência foram obtidos a partir de uma trajetória de descarregamento pelo aumento da poro-pressão, mantendo-se constante a tensão desvio.

A trajetória de tensões do tipo compressão drenada (CD) parece, portanto, inapropriada para o estudo de estabilidade de taludes, por exemplo, onde a ruptura ocorre devido a aumento de poro-pressão. A trajetória de tensões seguida tem uma marcada influência sobre a resistência observada a baixas tensões efetivas em materiais fracamente cimentados.

A seguir são analisados aspectos do equipamento no que se refere à capacidade do equipamento em controlar trajetórias lineares de tensões e trajetória de deformação radial nula. Se discute a resolução e os resultados obtidos com medição local de deformações.

### 6.1.1 Controle da Trajetória de Tensões

Foram realizados quatro ensaios com diferentes trajetórias de tensões e dois ensaios com trajetória de deformação radial nula (resultados apresentados no capítulo 5). O sistema desenvolvido mostrou-se eficiente no controle automático destas trajetórias. As alterações feitas no programa de controle no sentido de eliminar os problemas originados pela interdependência entre as tensões confinante e axial (descritas na secção 4.2.2) permitiram a execução de trajetórias de tensões potencialmente instáveis. Entretanto, o controle automático do ensaio na câmara triaxial tipo Bishop-Wesley segundo uma trajetória de descarregamento lateral e nas outras trajetórias com inclinação próxima a desta mostrou-se especialmente difícil. Embora a escolha da variável sob controle em função da relação de proporcionalidade entre tensões tenha favorecido o controle, a trajetória de descarregamento lateral apresenta maior dispersão em relação a trajetória linear estabelecida, quando comparada com as demais.

Para entender melhor estes efeitos, alguns ensaios foram feitos em corpos de prova de aço. O objetivo foi testar a eficiência do controle de diversas trajetórias de tensões. A Figura 6.1 mostra um destes ensaios onde diversos segmentos de reta compunham a trajetória de tensões estabelecida. O critério de escolha da variável sob controle foi definido em função da relação de proporcionalidade entre as tensões. Observa-se que as trajetórias de descarregamento lateral com aumento de tensão desvio e carregamento lateral com diminuição da tensão desvio (ângulo de  $135^\circ$  em relação ao eixo  $p'$ ) apresentam maior dispersão em relação às demais, sendo a trajetória de carregamento lateral com diminuição de tensão desvio a mais difícil de ser reproduzida.

A diminuição tanto do incremento de tensão como do tempo de operação dos motores elétricos favorece o controle das trajetórias de tensões mais difíceis. Entretanto, caso estas variáveis sejam excessivamente pequenas, o ensaio se torna muito lento. Nas condições do LMS/UFRGS à época da realização dos

ensaios descritos nesta dissertação era necessário interromper o ensaio durante a noite. Conseqüentemente, o corpo de prova sofria um descarregamento parcial. Para recomeçar o ensaio, algum tempo era dispendido até recuperar o estado de tensões anterior ao descarregamento. Devido a este processo, um ensaio poderia durar varios dias.

Durante o ensaio TT45 (Figura 5.4) e o início do ensaio TT90 (Figura 5.5) observou-se uma oscilação nas leituras dos transdutores. Esta oscilação teve origem numa instabilidade na voltagem de alimentação. A fonte de alimentação dos transdutores é ligada a uma rede de 220 Volts e o restante do equipamento (micro-computador, conversor A/D) é alimentado por uma rede 110 Volts. A diferença na voltagem de alimentação dos equipamentos interligados gerou a oscilação na voltagem de alimentação dos transdutores. Esta dificuldade foi contornada com a instalação de um condutor elétrico conectando a carcaça do micro-computador à fonte de alimentação dos transdutores, produzindo, assim, um aterramento entre os equipamentos. A diferença pode ser claramente visualizada comparando-se o ensaio TT1.2 (Figura 5.7) com o ensaio TT45 (Figura 5.4). A estabilidade das leituras foi atingida durante o ensaio TT90 (Figura 5.5).

#### 6.1.2 Medição Externa x Medição Local de Deformações

A medição externa de deformações foi feita através de um defletômetro instalado sobre um braço fixo ao pistão móvel em relação à placa da base da câmara triaxial. Uma comparação entre medição local e medição externa é feita na Figura 6.2. Estes dados correspondem aos ensaios TT45 e TT1.2. A diferença observada entre as curvas tensão-deformação com medição local e com medição externa demonstra que a deformabilidade do sistema interfere nas leituras tomadas pelo defletômetro não somente nos primeiros níveis de deformação, mas durante grande parte da fase desviatória. Para o ensaio TT45 (Figura 6.2.a), a determinação da tensão de fluência pelo gráfico tensão-deformação obtido com medição externa de deformações seria feita com uma ampla margem de erro. Para o ensaio TT1.2 (Figura 6.2.b), a mudança de módulo é mais sutil. Embora esta mudança seja nítida no gráfico com

medição local, é menos perceptível no gráfico com medição externa. Os valores de tensão de fluência obtidos no gráfico com medição local diferem significativamente dos valores de tensão de fluência obtidos no gráfico com medição externa.

A medição local de deformações atesta que o solo residual de arenito Botucatu apresenta uma rigidez inicial muito elevada. Esta rigidez seria erroneamente quantificada se para isto fossem utilizados os resultados obtidos com medição externa de deformações (Figura 6.2).

Estes resultados não podem, todavia, ser analisados sem que se leve em consideração a deflexão do sistema (deformabilidade da célula de carga, deformabilidade da câmara triaxial, acomodamento do sistema corpo de prova - pedra porosa - top-cap). Conforme sugerido por Bressani (1990), uma calibração da deflexão do sistema utilizando um corpo de prova de aço possibilitaria quantificar estes erros. Isto permitiria a correção da medição externa de deformações com significativa melhoria dos resultados obtidos. O procedimento sugerido por Bressani (1990) não foi adotado por não ser objeto desta dissertação analisar em detalhe o tema medição externa de deformações.

A medição local de deformações e o controle automático possibilitaram a execução de ensaios com trajetória de deformação radial nula. Este controle alcançou resultados altamente satisfatórios. O equipamento foi capaz de conduzir esta trajetória com uma variabilidade de deformação radial da ordem do décimo do micron, superando as expectativas iniciais. Esta realização foi possível graças ao medidor de variação radial utilizado, a base de sensor de efeito Hall (ítem 3.2.1), cuja resolução é da ordem de 0.05  $\mu\text{m}$ .

## 6.2 Comportamento do Solo Residual de Arenito Botucatu

### 6.2.1 Fluência

Fluência, neste trabalho, é associada a mudança de

comportamento que ocorre em solos estruturados a baixos níveis de deformação com significativa alteração da rigidez destes materiais, conforme exposto no capítulo 2. Esta mudança de comportamento se dá, em geral, de forma gradual. No entanto, é possível identificar no gráfico tensão x deformação uma região onde ocorre uma mudança significativa de comportamento e associar esta região a um ponto representativo do estado de tensões no espaço  $p'$  x  $q$ , o qual é chamado ponto de fluência (capítulo 2).

Alguns autores propõe que a identificação do ponto de fluência seja feita em uma escala log-log (Vaughan, 1988) ou em uma escala aritmética-log (Maccarini, 1987), no espaço tensão x deformação. Bressani (1990) observou que, para os solos por ele ensaiados, quaisquer dos métodos conduziram a um mesmo valor, coincidente também ao valor identificado na escala natural.

Estes pontos estabelecem uma superfície de fluência que limita a região no espaço de tensão dentro da qual o solo apresenta um comportamento mais rígido. Esta superfície é representada na Figura 6.3. Na tabela 6.1 são apresentados os pontos de fluência identificados para as diversas trajetórias de tensões seguidas.

Para o solo residual de Arenito Botucatu estudado nesta dissertação, a identificação dos pontos de fluência foi feita sem muita dificuldade. O ponto de fluência foi definido pela intersecção das retas representativas da inclinação dos trechos da curva tensão x deformação antes e depois da mudança de comportamento que se observa. Como pode ser visto nas Figuras 5.4 a 5.7, estas retas são de fácil identificação visual.

Para o ensaio TT1.2 (Figura 5.7), o gráfico logarítimo da tensão x deformação permitiu uma definição mais clara do ponto de fluência. Porém, este valor coincidiu com o valor definido na escala simples. A Figura 6.4 apresenta o gráfico tensão x deformação para as duas escalas. O mesmo foi observado para os demais ensaios.

Na Figura 5.11 são plotados em um diagrama  $p'$  x  $q$  os

resultados dos ensaios de cisalhamento direto e triaxiais. Esta figura demonstra que, tanto no ensaio triaxial como no ensaio de cisalhamento direto, uma superfície de fluência pode ser definida. As duas superfícies, porém, não são coincidentes, sendo que a superfície de fluência obtida dos ensaios de cisalhamento direto se situa bem acima da obtida dos ensaios triaxiais. Esta observação é coerente com resultados obtidos por Bressani e Vaughan (1989), que demonstram que a tensão de fluência é dependente da trajetória de tensões imposta ao solo.

É interessante comparar a superfície de fluência definida pelos ensaios com controle de trajetórias de tensões com a trajetória de tensões seguida pelos corpos de prova nos ensaios de deformação radial nula (Figura 6.5). A baixos níveis de tensão, a trajetória descrita pelos ensaios de deformação radial nula contorna a superfície de fluência. Esta trajetória ultrapassou a envoltória de resistência de grandes deformações obtida a partir dos ensaios de cisalhamento direto, percorrendo uma região entre esta envoltória e a superfície de fluência definida nos ensaios triaxiais. Resultados similares foram obtidos por Maccarini (1987) e Bressani (1990).

O comportamento pós-fluência diferiu para os diversos ensaios realizados. Nos ensaios TT45 e TT1.2 a mudança estrutural (associada a fluência) ocorre antes do solo atingir a envoltória de ruptura e se distingue desta pelo fato do solo admitir acréscimos de carga após fluência. A fluência, neste caso, é evidente devido à redução da rigidez que o solo sofre. Este é o comportamento de fluência observado para níveis de pressão mais altos. No ensaio TT90 o comportamento foi representativo de uma ruptura. No ensaio TT135 (Figura 5.6) observa-se a formação de um pico de tensão e que a amostra ultrapassou a envoltória de resistência obtida nos ensaios de cisalhamento direto para grandes deformações. O comportamento antes da ruptura é bastante rígido.

Conforme pode ser visto na Figura 6.5, a superfície de fluência obtida para o horizonte C do solo residual de arenito Botucatu mostra uma tendência elíptica assimétrica. Segundo

Leroueil e Vaughan (1990), a superfície de fluência apresenta uma forma elíptica e pode se dividir em três zonas: fluência por cisalhamento, fluência por compressão e fluência por expansão (Figura 2.6). A superfície de fluência cruza o eixo isotrópico e é centrada em torno de um eixo (eixo  $k_0$  no caso de argilas e eixo isotrópico no caso de solos residuais). Neste trabalho, a superfície de fluência do solo residual de arenito Botucatu foi apenas parcialmente obtida. Não foi possível investigar a fluência sobre o eixo isotrópico e, por isso, é difícil precisar a forma desta superfície.

### 6.2.2 Parâmetros de Deformabilidade

Nos ensaios realizados, o comportamento do solo é marcado por uma mudança de comportamento (fluência) que ocorre a baixos níveis de deformação e que se caracteriza por uma perda de rigidez. A Figura 6.6 reúne os resultados de todos os ensaios em um mesmo espaço  $\sigma_d \times \varepsilon_a$ . Como se observa na figura, a deformabilidade é influenciada pela inclinação da trajetória de tensões seguida. Para a avaliação do módulo de rigidez do solo é necessário que se considere o tipo de carregamento ao qual o solo é submetido.

O módulo de Young pode ser calculado a partir das equações básicas da teoria da elasticidade para um material homogêneo, isotrópico e elástico. Para uma condição de carregamento onde  $\sigma_{\text{radial}} = \text{constante}$  (condição de carregamento triaxial convencional), o módulo de Young é representado pela relação  $\sigma_d/\varepsilon_a$ , ou seja, pela declividade da curva tensão x deformação. Para outros tipos de carregamento, no entanto, o módulo de Young não pode ser interpretado pela declividade da curva tensão x deformação e é calculado por uma expressão particular para cada tipo de carregamento.

Embora o solo ensaiado apresente nítida estratificação horizontal, sinal indicativo de anisotropia, o mesmo foi considerado isotrópico para fins de uma estimativa dos módulos de deformabilidade. Aceitou-se a hipótese de que este solo tem, a

baixos níveis de deformação, um comportamento elástico. A partir disto, o módulo de Young foi calculado para cada um dos carregamentos impostos. Os resultados obtidos são mostrados na figura 6.7.

Nesta figura observa-se o seguinte:

. todos os ensaios mostraram uma queda acentuada de rigidez com a deformação;

. os resultados obtidos refletem uma proporcionalidade entre a rigidez e a inclinação da trajetória.

. se observa uma forte semelhança entre os resultados do ensaio de deformação radial nula e o ensaio TT1.2 (para o qual se obteve uma deformação radial muito pequena).

Estas observações poderiam induzir a afirmação de que a rigidez do material é dependente do tipo de carregamento ao qual este material é submetido. Porém, tendo em vista que os diversos carregamentos impostos variaram basicamente a condição de carregamento radial, e que nesta direção o solo apresenta-se estratificado, é provável que a variabilidade do módulo esteja associada a estas condicionantes.

Tabela 6.1 - Tensões de Fluência

ENSAIO	TRAJETÓRIA	TENSÃO DE FLUÊNCIA (kN/m <sup>2</sup> )		
		$\sigma_d$	q	p'
TT45	consolidado drenado	204	102	300
TT90	p' constante	188	94	195
TT1.2	k = 1.2	144	72	-365
TT135	descarregamento lateral	148	74	124

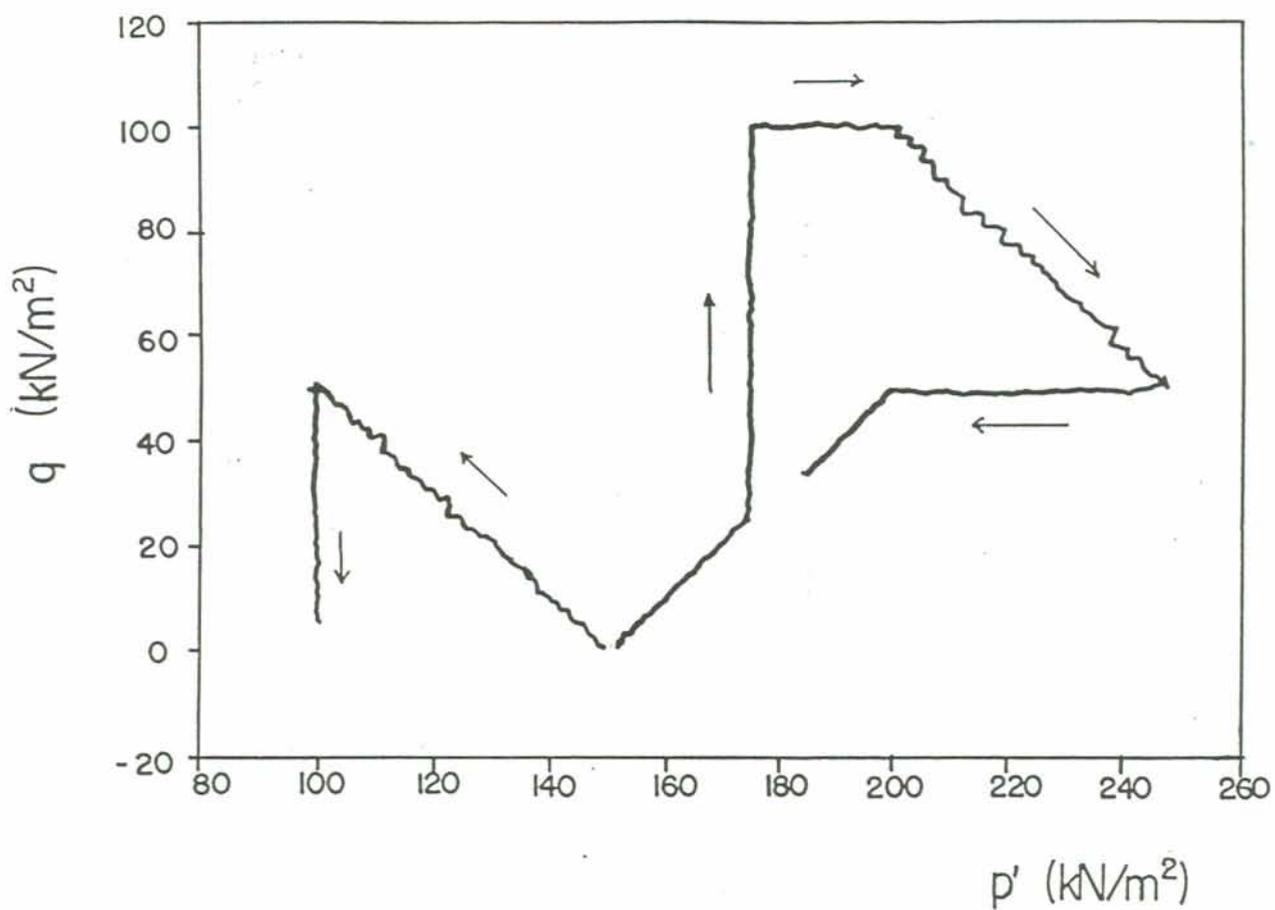


Figura 6.1 - Resultados dos testes sobre corpos de prova de aço

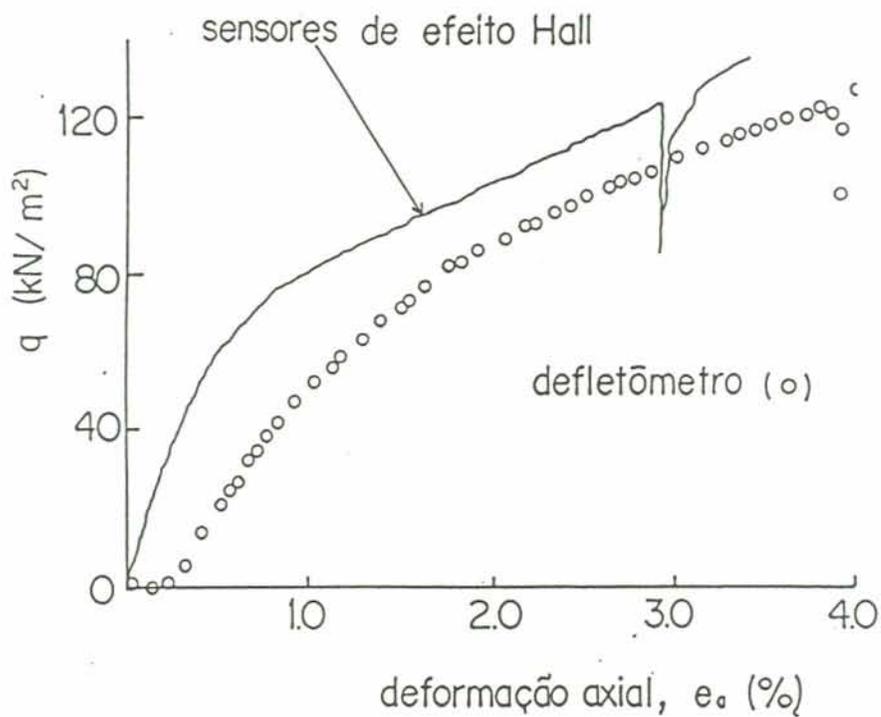
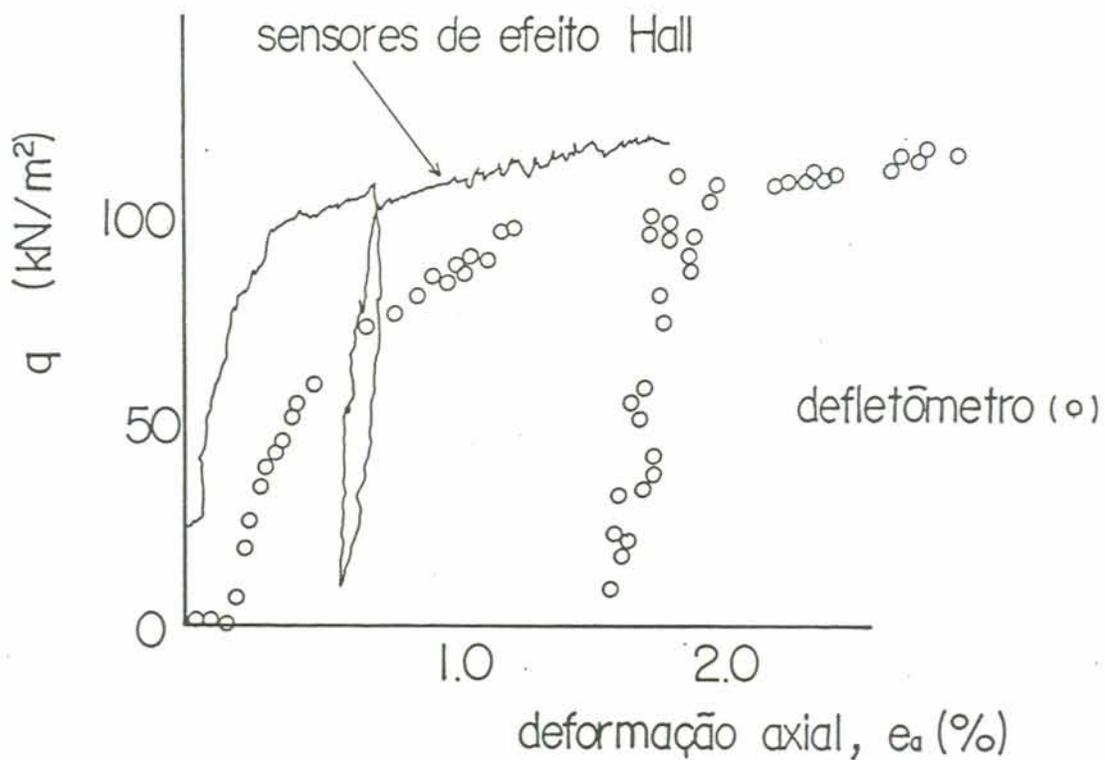


Figura 6.2 - Medição externa x medição local  
(a) ensaio TT45, (b) ensaio TT1.2

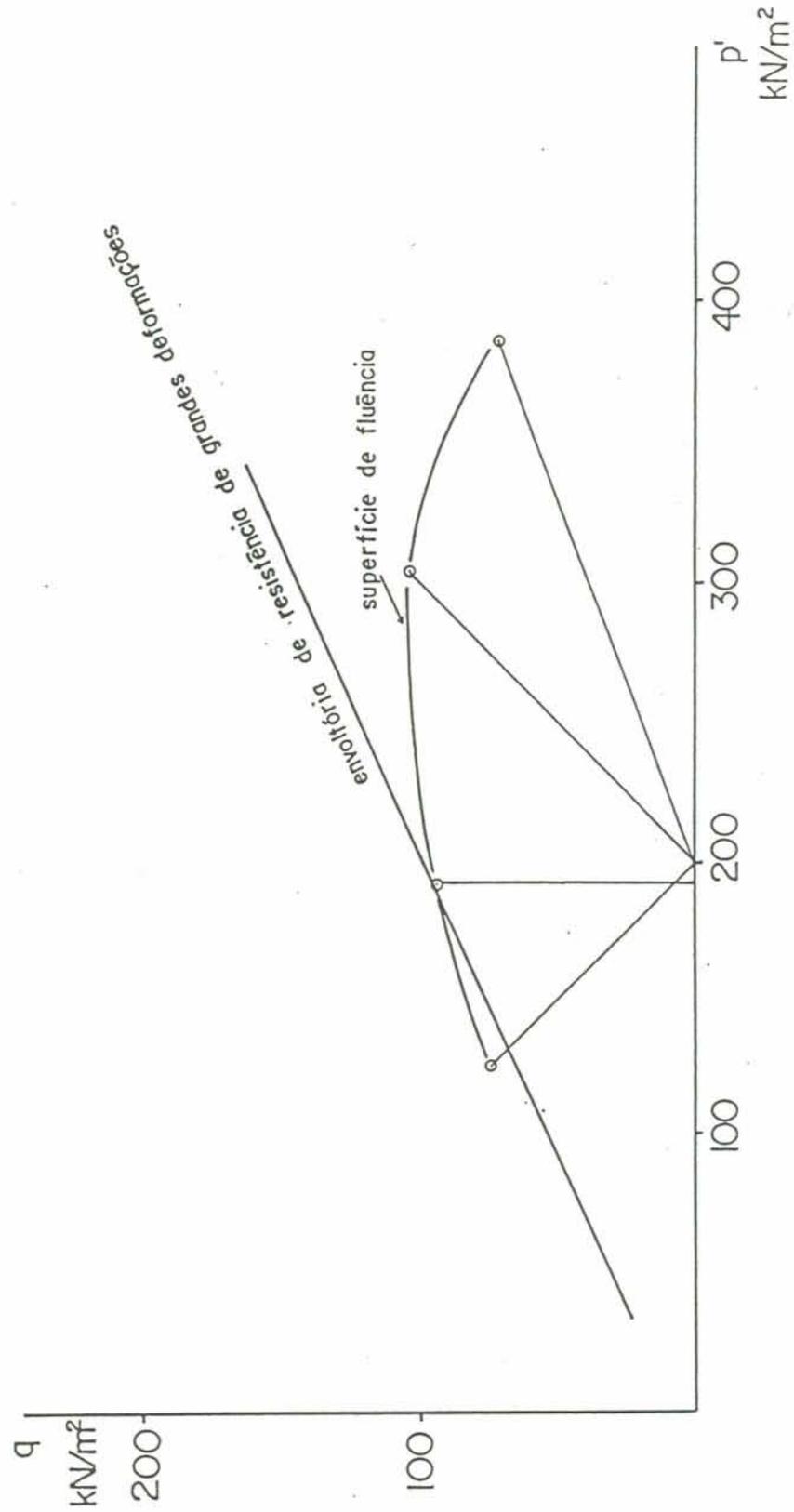


Figura 6.3 - Superfície de fluência obtida para o solo residual de Arenito Botucatu

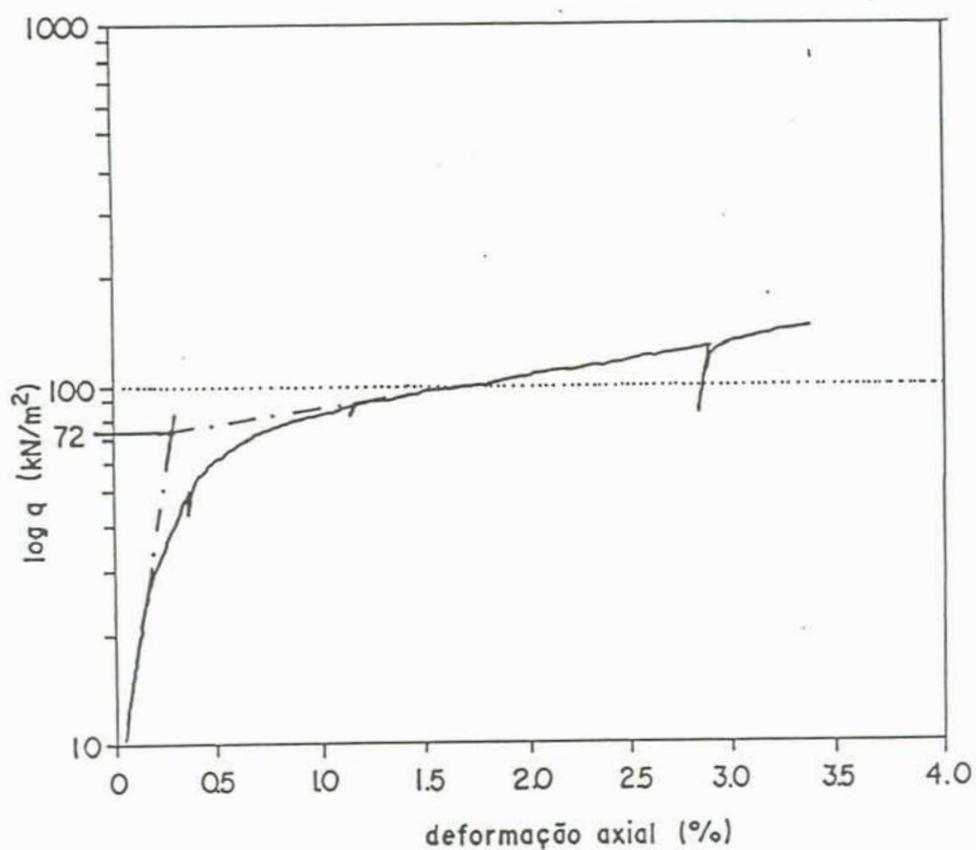
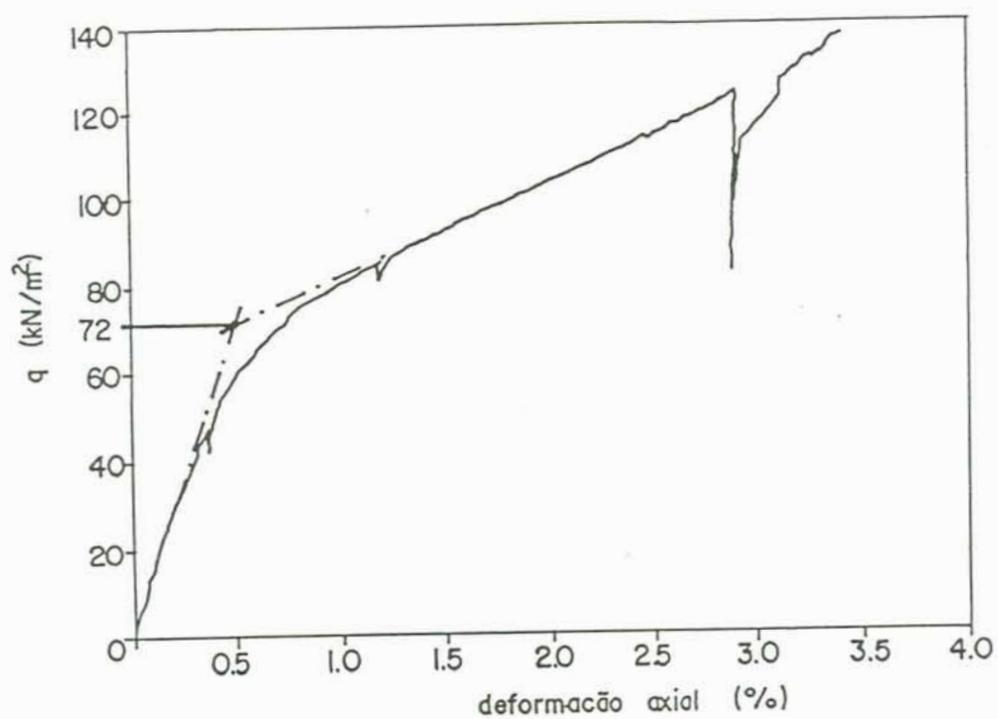


Figura 6.4 - Definição do ponto de fluência para o ensaio TT1.2  
(a) escala normal, (b) escala logarítmica

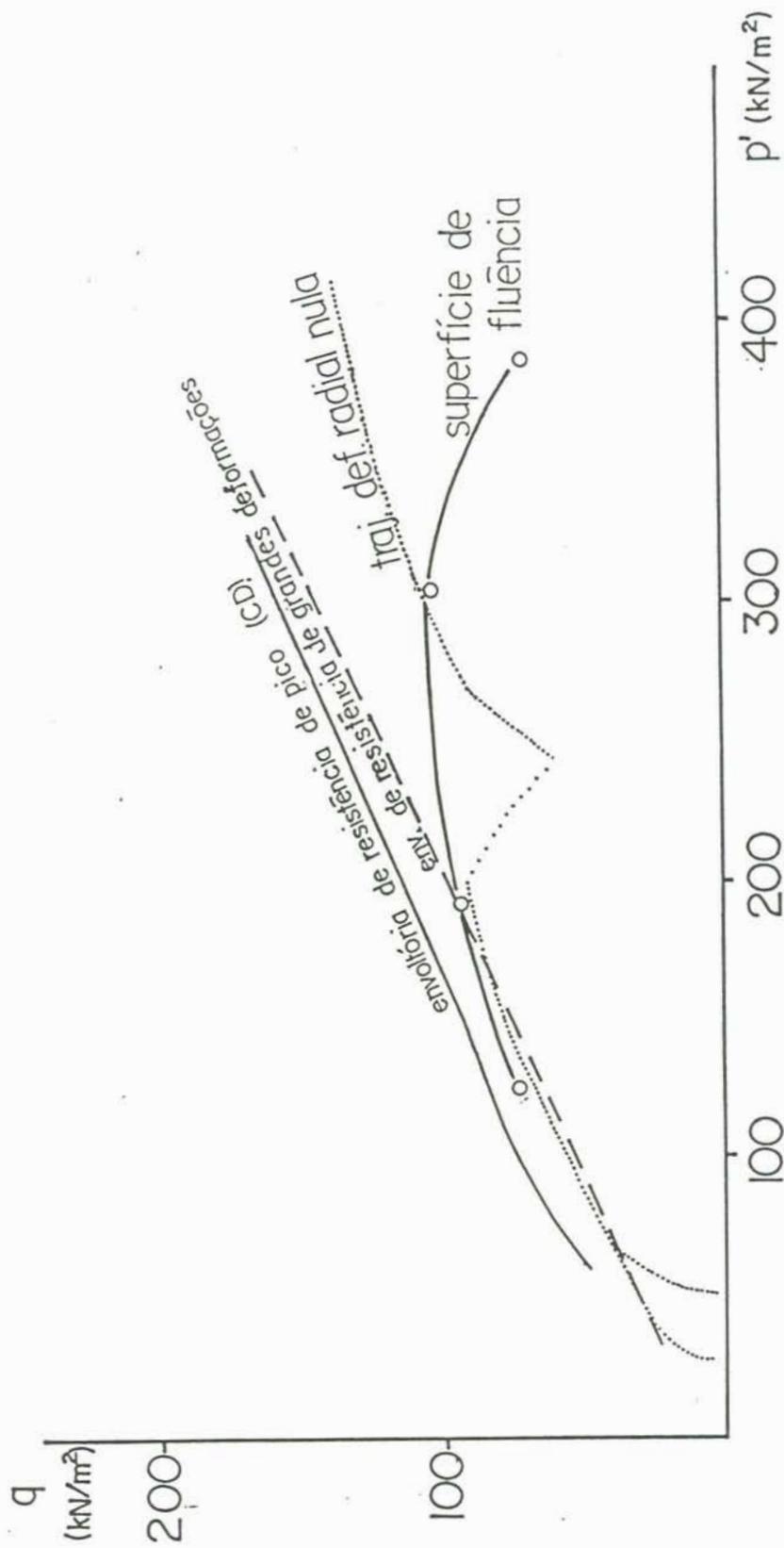


Figura 6.5 - Trajetória descrita pelos ensaios de deformação radial nula

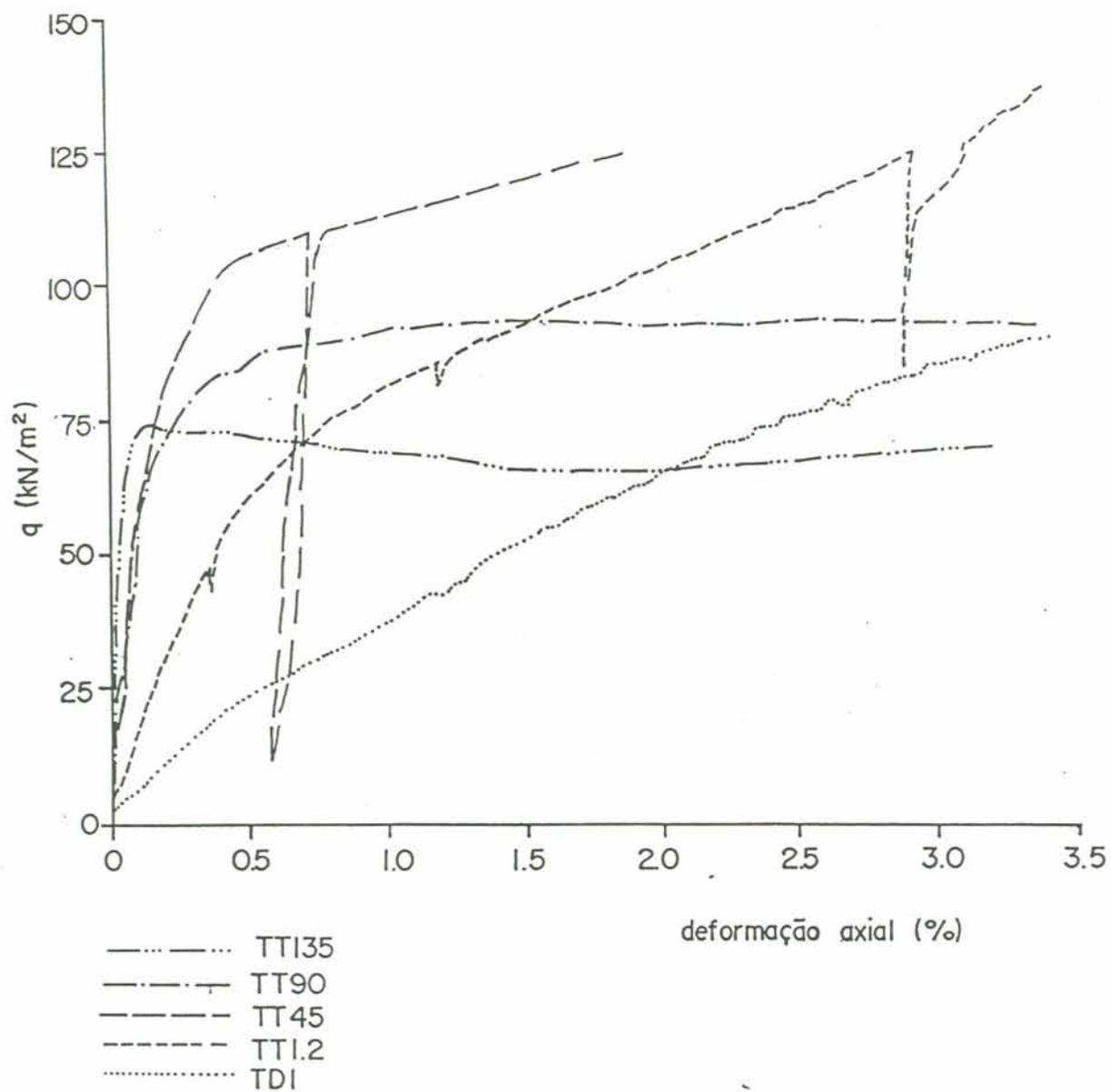
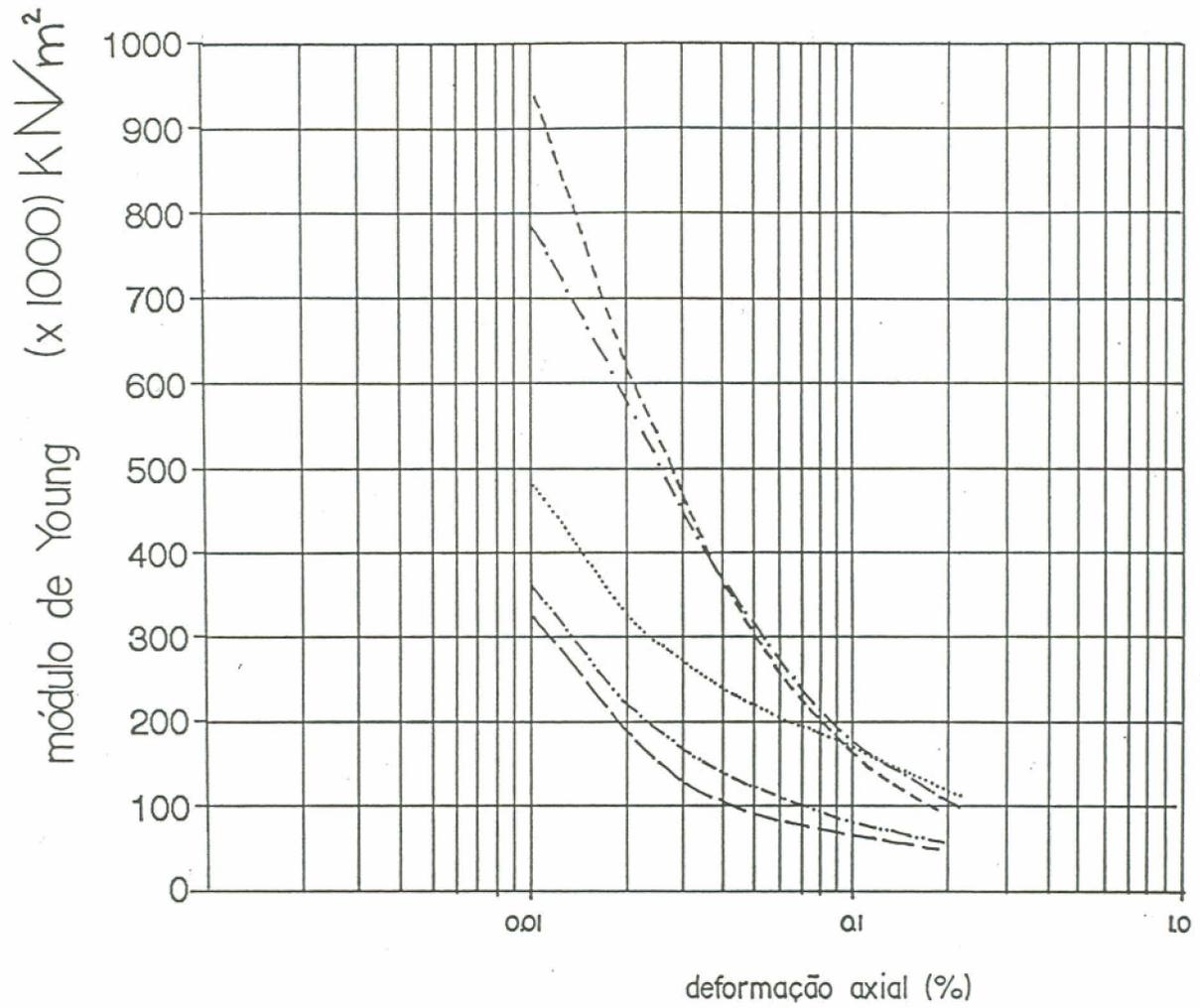


Figura 6.6 - Curvas tensão x deformação dos ensaios triaxiais feitos sobre o solo residual de arenito Botucatu



- TT135
- · - · - TT90
- TT45
- · - · - TD1
- TT1.2

Figura 6.7 - Módulo de Young x deformação axial

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

### 7.1 Equipamento

A proposta de automatização do equipamento triaxial convencional através da implementação de componentes de baixo custo se mostrou viável, gerando resultados altamente satisfatórios. Devido à ocorrência de problemas relacionados às conexões elétricas, porém, é necessário proceder a substituição destas conexões por outras de melhor qualidade (e maior custo).

Os transdutores de deformação à base de sensores de efeito Hall permitiram obter alta precisão na medição de pequenas deformações, pré-requisito fundamental para análise do comportamento de solos cimentados. O transdutor de deformação radial utilizado, desenvolvido por Bressani (1990), permitiu a realização do ensaio de deformação radial nula com uma resolução de 0.1  $\mu\text{m}$ .

O programa de controle desenvolvido mostrou-se apto para o controle de ensaios com trajetórias lineares de tensões quaisquer e para o controle da trajetória de deformação radial nula.

A principal dificuldade encontrada no programa de controle consistiu em superar os efeitos da interdependência entre tensões confinante e axial existente na câmara triaxial utilizada (tipo Bishop-Wesley). O controle do equipamento somente mostrou-se satisfatório quando esta relação entre tensões foi considerada. A comunicação com o operador ainda é precária. A modificação de parâmetros de controle tais como incremento de

tensão e/ou tempo de acionamento dos motores requer a interrupção do programa. O mesmo ocorre para uma eventual alteração na trajetória de tensões a ser seguida. Sugere-se que esta comunicação seja aprimorada através da implementação de rotinas via de teclas de funções.

## 7.2 Comportamento do solo residual de arenito Botucatu

Os resultados obtidos permitem comparar o comportamento do solo residual de arenito Botucatu com o modelo de comportamento de materiais estruturados sugerido na literatura (Maccarini, 1987, Leroueil e Vaughan, 1990, Bressani, 1990). Neste modelo, é possível identificar uma superfície de fluência que limita a região no espaço de tensões onde o solo apresenta maiores módulos de deformabilidade. A baixos níveis de tensões, esta superfície coincide ou mesmo ultrapassa a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo em certas condições. Para maiores níveis de tensão, esta superfície situa-se abaixo da envoltória de resistência.

Sob muitos aspectos, este comportamento se assemelha ao de um material pré-adensado. Os resultados do ensaio de adensamento revelam a predominância de um comportamento arenoso, o que torna difícil a definição do espaço permitido somente a materiais estruturados (Leroueil e Vaughan, 1990). Embora não se tenha esta evidência, algumas observações indicam a presença de cimentação:

- o material apresenta um comportamento rígido-frágil (quebradiço) quando manipulado;

- a componente sucção foi eliminada pelo processo de saturação, o que permitiu isolar o efeito da estrutura cimentante;

- o índice de vazios elevado e o comportamento frágil observado nos ensaios;

- a variação de volume sempre de compressão, mesmo nos ensaios que apresentaram pico.

O número reduzido de ensaios realizados não permitiu uma investigação mais detalhada sobre a magnitude e importância do efeito da cimentação. Ensaios de tração no material submetido a diferentes níveis de tensão isotrópica, como realizado por Maccarini (1987), evidenciariam o dano causado à estrutura, atestando a existência e magnitude desta.

A pesquisa foi montada sobre a hipótese de que solos residuais apresentam uma estrutura a qual é em parte residual da rocha de origem e em parte adquirida pelo solo em seu processo de formação (item 2.1). Nas amostras utilizadas nesta pesquisa, a estratificação visivelmente presente é um indicador da influência da rocha de origem, solo de horizonte C (rocha alterada). É possível a existência de cimentação residual daquela rocha. Sugere-se que seja desenvolvido um trabalho com o mesmo solo em horizontes mais alterados, nos quais não se constate mais a presença de uma estrutura residual a fim de verificar a presença e o efeito da estrutura adquirida ao longo do processo de formação de solos tropicais.

Embora em algumas trajetórias o ponto de fluência seja de fácil identificação, a ruptura da cimentação se dá, em geral, de forma gradual. O ponto de fluência não estabelece a ruptura da cimentação, mas sim, o nível de tensões que promove uma instabilidade estrutural no solo capaz de modificar significativamente seu comportamento tensão-deformação. Para as trajetórias seguidas e para o solo ensaiado não houve dificuldade em identificar os pontos de fluência. Pode-se notar, no entanto, que a mudança de comportamento é mais suave para as trajetórias que formam ângulos menores com o eixo  $p'$ . Por outro lado, para a trajetória de descarregamento lateral esta mudança é extremamente brusca. Torna-se necessário a definição de uma metodologia ou de um critério universal de determinação do ponto de fluência.

A rigidez aparente (ou deformabilidade) antes da fluência é, para uma mesma tensão de confinamento inicial,

influenciada pela inclinação da trajetória de tensões seguida. Isto pode estar em parte relacionado ao grau de pré-adensamento do solo quando submetido a um descarregamento e, em parte, ao comportamento estruturado deste material. Em um ensaio do tipo  $k = 1.2$ , a estrutura é gradualmente modificada ao longo de todo o ensaio. Para um ensaio do tipo TT135, o comportamento é totalmente diferente, havendo uma tensão limite após a qual há uma ruptura brusca. Sugere-se que outras pesquisas sigam nestas verificações, as quais têm fundamental relevância na estabilidade de taludes de solos residuais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERLY, S.K.; HELTINGS, J.E.; JARDINE, R.J. A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens. Discussion. *Geotechnique*, London, v.37, n.3, p.414-415, 1987.
- ANDRESEN, A.; SIMONS, N.E. Norwegian triaxial equipment and technique. In: RESEARCH CONFERENCE ON SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS, 1960, Boulder, Colo. *Proceedings ...* New York: ASCE, 1961, p.695-709.
- ATKINSON, J.H.; EVANS, J.S.; SCOTT, C.R. Developments in microcomputer controlled stress path testing equipment for measurement of soil parameters. *Ground Engineering*, v.18, n.1, p.15-22, 1985.
- ATKINSON, J.H. A simple and inexpensive pressure control equipment for conventional and stress path triaxial testing of soils. *Geotechnique*, v.35, n.1, p.61-63, 1985.
- ATKINSON, J.H.; EVANS, J.S. Discussion. *Geotechnique*, v.35, n.3, p.378-380, 1985.
- AZAMBUJA, M. A. Comunicação pessoal, Porto Alegre, 1993.
- BALDI, G.; HIGHT, D.; THOMAS, D. A reevaluation of conventional triaxial test methods. In: SYMPOSIUM ON ADVANCED TRIAXIAL TESTINGS OF SOIL AND ROCK, 1986, Louisville. *Proceedings ...* Philadelphia: ASTM, 1988. p.219-263 (ASTM. STP, 977)
- BICA, A.V.D. A study of free embeded cantilever walls in granular soils. Surrey: University of Surrey, 1991. PhD Thesis.
- BICA, A.V.D.; SCHNAID, F.; BRESSANI, L.A. Celulas de carga eletricas para ensaios triaxiais. *Solos e Rochas*, v.9, n.3, p.35-40, 1986.
- BISHOP, A.W.; DONALD, I.B. The experimental study of partly saturated soils in the triaxial apparatus. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1961, Paris. *Proceedings ...* Paris, Dunod, 1961, v.1, p.13-21.
- BISHOP, A.W.; HENKEL, D.J. The measurement of soil properties in triaxial test. Londres: Edward Arnold, 1962.
- BISHOP, A.W.; WESLEY, L.D. A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique*, v.25, n.4, p.657-670, 1975.
- BJERRUM, L.(a) Engineering geology of norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Geotechnique*, v.27, n.2., p.83-117, 1967.

- BJERRUM, L.(b) Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New York, ASCE, v.93, v.5, p.3-49, 1967.
- BRADY, B.H.G.; BROWN, E.T. *Rock mechanics for underground mining*. London: George Allen & Unwin, 1985.
- BRESSANI, L.A. *Experimental properties of bonded soils*. London: Imperial College, University of London, U.K, 1990. PhD Thesis.
- BRESSANI, L.A.; VAUGHAN, P. W. Damage to soil structure during triaxial testing. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 12., 1989, Rio de Janeiro. *Proceedings ... Rotterdam, A.A.Balkema*, 1989, v.1, p.17-20.
- BURLAND, J.B.; SYMES, M. A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, v.32, n.1, p.62-65, 1982.
- CAMPOS, T.M.P.de Instrumentação especial em ensaios triaxiais. In: *SIMPÓSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO EM GEOTECNIA*, 1988, Rio de Janeiro. *Anais ... Rio de Janeiro: COOPE/ABMS/ABGE*, 1988, v.1, p.29-55.
- CLAYTON, C.R.I.; KHATRUSH, S.A. A new device for measuring local strains on triaxial specimens. *Geotechnique*, v.36, n.4, p.593-597, 1986.
- CLAYTON, C.R.I.; KHATRUSH, S.A. The use of an automated triaxial system with local axial and radial strain measurement to investigate the yielding of a sand. In: *SIMPÓSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO EM GEOTECNIA*, 1988, Rio de Janeiro. *Anais ... Rio de Janeiro: COOPE/ABMS/ABGE*, 1988, v.1, p.57-70.
- CLAYTON, C.R.I.; KHATRUSH, S.A.; BICA, A.V.D. et al. The use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal*, v.12, n.1, p.69-76, 1989.
- COSTA FILHO, L.M. Measuring of axial strains in the triaxial testes of london clay. *Geotechnical Testing Journal*, v.8, n.1, p.3-13, 1985.
- COULON, F.K. *Mapeamento geotécnico de Morretes e Montenegro*. Porto Alegre: UFRGS/CPGEC, 1973. Dissertação de mestrado.
- FAHEY, M. Measuring  $k_0$  in the triaxial test. *Australian Geomechanics*, n.22, 1992.
- GEOTECHNICAL CONTROL OFFICE *Mid-levels study - report on geology, hydrology and soil properties*. Hong Kong: Government Printer, 1982.

- GOLDSMITH, A.S. Permeability decline and compressibility in sandstone reservoir rocks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK AT GREAT DEPTH, 1989, Pau. *Proceedings ... Rotterdam, A.A.Balkema, n.1, p.923-928.*
- GOTO, S.; TATSUOKA, F. et al. A simple gauge local small strain measurements in the laboratory. *Soils and Foundations, v.31, n.1, p.169-180, 1991.*
- GREHS, S.A. Mapeamento geológico preliminar de Santa Cruz do Sul visando obter informação básica do planejamento integrado. *Acta Geológica Leopoldênsia, São Leopoldo 1(I): 121-39, 1976.*
- HOPPER, R.J. The effects and implications of sampling clay soils. Surrey: University of Surrey, 1992. Tese de Doutorado.
- JONES, M.F.; PRESTON, R.M.I. Introduction in: deformation of sediments and sedimentary rocks. *Geological Society Special Publication. London, n.29, p.1-8, 1987.*
- KHATRUSH, S.A. The yielding of a fine sand in triaxial stress space. Surrey: University of Surrey, 1987. Tese de Doutorado.
- KIRKPATRICK, W.M.; SEALS, P.K.; NEWMAN, F.B. Stress distribution in triaxial compression samples. *Journal of Geotechnical Engineering. New York, ASCE, v.100, n.2, p.190-196, 1974.*
- LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. *Soil mechanics. New York: John Wiley, 1969.*
- LAW, K.T. A servo system for controlled stress path tests. In: LABORATORY SHEAR STRENGTH OF SOIL, 1981. *Proceedings ... Philadelphia: ASTM, 1981, p.164-179. (ASTM.SP,740)*
- LEDRA, M.J. Deformation of chalk through compaction and flow. London: University of London, 1990. Tese de Doutorado.
- LEROUEIL, S.; TAVENAS, F.; BRUCY, F. et al. Behaviour of de-structured natural clays. *Journal of Geotechnical Engineering. New York, ASCE, v.106, n.6, p.759-778, 1979.*
- LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P.R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Geotechnique, v.40, n.3, p.467-488, 1990.*
- LI, X.S.; CLARENCE, K.C.; SHEN, C.K. An automated triaxial testing system. In: SYMPOSIUM ON ADVANCED TRIAXIAL TESTING OF SOIL AND ROCK, 1986, Louisville. *Proceedings ... Philadelphia: ASTM, 1988, p.95-106. (ASTM.STP,977)*
- MACCARINI, M. Laboratory studies of a weakly bonded artificial soil. London: University of London, 1987. Tese de Doutorado.
- MENZIES, B.K. Strength, stability and similitude. *Ground Engineering, v.9, n.5, p.32-36, 1976.*

- MENZIES, B.K.; SUTTON, H.; DAVIES, R.E. A new system for automatically simulating  $K_0$  consolidation and  $k_0$  swelling in the conventional triaxial cell. *Geotechnique*, v.27, n.4, p.593-596, 1977.
- MENZIES, B.K.; SUTTON, H. A control system for programming stress paths in triaxial cell. *Ground Engineering*, v.13, n.1, p.22-31, 1980.
- MENZIES, B.K. A computer controlled hydraulic triaxial testing system. In: SYMPOSIUM ON ADVANCED TRIAXIAL TESTING OF SOIL AND ROCK, 1986, Louisville. *Proceedings ... Philadelphia: ASTM*, 1988, p.88-94. (ASTM.STP,977).
- MITCHELL, J.K.; SOLIMAR, Z.V. Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York, ASCE, v.110, n.11, p.1559-1576, 1984.
- NGUYEN, D.C.; DERKX, F. Determination du Module Elastique des Materiaux de Chaussées Traités aux Liants Hydrauliques avec l'Essai de Compression Diamétrale. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Paris, n.171, p.7-12, janv.-févr., 1991.
- NUÑEZ, W.P. Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu visando seu emprego na pavimentação. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1991. Dissertação de Mestrado.
- OKOCHI, Y.; TATSUOKA, F. Some factors affecting  $k_0$ -values of sand measured in triaxial cell. *Soils and Foundations*, v.24, n.3, p.52-68, 1984.
- OLIVEIRA, J.E.; CARUSO, L.G. Contribuição no Conhecimento atual de características tecnológicas de rochas sedimentares em alguns estados brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3, 1981, Itapema, S.C. *Anais ... São Paulo: ABGE*, 1981. V.3, p.221-234.
- ORLANDINI, R. Unidades geotécnicas dos municípios de Novo Hamburgo e Campo Bom - RS e caracterização geomecânica de perfis típicos de solos de arenito. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1991. Dissertação de Mestrado.
- PROJETO RADAM BRASIL Folha SH.22 Porto Alegre e Parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796p. (Levantamento de Recursos Naturais, 33).
- SANDRONI, S.S. Solos residuais de gnaiss. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1981. *Anais ... Rio de Janeiro: Comp. Brasileira de Artes Graficas*, v.2, p.30-65, 1981.
- SARSBY, R.W.; KALTEZIOTIS, N.; HADDAD, E.H. Compression of 'free ends' during triaxial testing. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York, ASCE, v.108, p.83-107, 1982.
- SCHOFIELD, A.N.; WROTH, C.P. *Critical state soil mechanics*, London: McGraw Hill, 1968.

- SCHMERTMANN, J.H. Discussion. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York, ASCE, v.118, n.2, p.343, 1992.
- SCHNAID, F.; COSTA FILHO, L.; MEDEIROS, L.V. Um equipamento para medida de deformações radiais em ensaios triaxiais. *Solos e Rochas*, v.6, n.3, p.35-40, 1983.
- SHEADAN, T.C.; GERMAINE, J.T.; LADD, C.C. Automated triaxial testing of soft clays: an upgraded commercial system. *Geotechnical Testing Journal*, v.13, n.3, p.153-163, 1990.
- SIDDIQUE, A. A numerical and experimental study of sampling disturbance. Surrey: University of Surrey, 1990. Tese de Doutorado.
- SOARES, J.M.D. Medição local de deformações com transdutores utilizando o princípio do efeito Hall. Relatório Interno, CPGEC/UFRGS, 1992.
- TAVENAS, F.; LEROUÉIL, A.; LA ROCHELLE, P. et al. Creep behaviour of an undisturbed lightly over-consolidated clay. *Canadian Geotechnical Journal*, v.15, n.3, p.402-423, 1978.
- TOMASI, E. Geologia de semi-detalhe do nordeste do Rio Grande do Sul. Ponta Grossa: Petrobrás/Desul, 1972. 28p. (Relatório Técnico Interno, 414).
- VARGAS, M. Some engineering properties of residual clay soils occurring in southern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Zurich, 1953. *Proceedings ... v.1*, p.67-71.
- VARGAS, M. Structurally unstable soils in southern Brazil. In: 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Moscow, 1973. *Proceedings ... 2.2*, 239-246.
- VAUGHAN, P.R. Mechanical and hydraulic properties of in situ residual soils. In: 1<sup>st</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 1985. *Proceedings ... Brasília*, v.3, p.213-263, 1985.
- VAUGHAN, P.R. Characterising the mechanical properties of in situ residual soil. In: 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, Singapore, 1988. *Proceedings ... Singapore*, v.2, p.469-487.
- VAUGHAN, P.R.; MACCARINI, M.; MOKHTAR, S.M. Indexing the engineering properties of residual soils. In: *Quart. Journal of Engineering Geological*, 1988, v.21, n.1, p.69-84.
- WALLACE, K.B. Structural behaviour of residual soils of the continuously wet highlands of Papua. Nova Gineia, *Geotechnique*, 1973, v.23, n.2, p.203-218.
- WESLEY, L.D. Influence of structure and composition on residual soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York, ASCE, v.116, n.4, p.589-603, 1990.