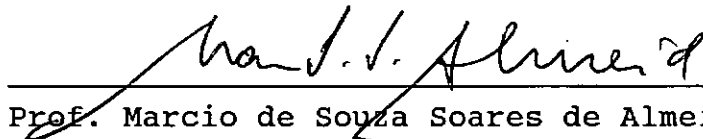



A RESISTÊNCIA RESIDUAL DE SOLOS DETERMINADA ATRAVÉS  
DO ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TORÇÃO

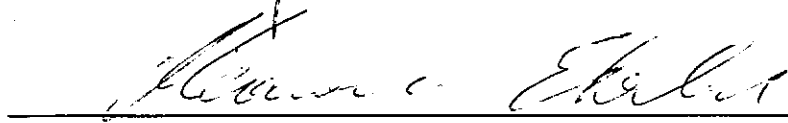
Maria de Fatima Costa de Vasconcelos

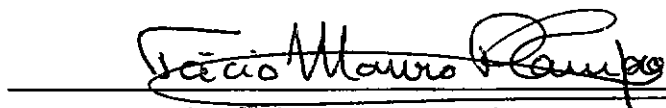
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

  
Prof. Marcio de Souza Soares de Almeida, Ph.D.  
(Presidente)

  
Prof. Willy Alvarenga Lacerda, Ph.D.

  
Prof. Mauricio Ehrlich, D.Sc.

  
Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 1992

**VASCONCELOS, MARIA DE FATIMA COSTA DE**

A Resistência Residual de Solos Determinada  
Através do Ensaio de Cisalhamento por Torção  
[Rio de Janeiro] 1992.

xi, 149 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ), M.SC.,  
Engenharia Civil, 1992).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
COPPE.

1. Resistência Residual

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Que o "residual" da humanidade seja o Amor  
sob a aplicação da força Deus que cisalha  
o orgulho drenando o egoísmo

*Aos meus Pais*

*Lucia e Lourenço*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcio de Souza Soares de Almeida pela orientação e amizade.

Ao professor Willy Alvarenga Lacerda pela co-orientação, alegria, espírito de jovialidade e luz que irradia.

Aos professores da COPPE-Civil da área de geotecnia, em especial ao Fernando Danziger pela sabedoria da simplicidade que irradia, à Laura Goretti pela transmissão da experiência de vida e pela ternura, ao Ian Martins pela convivência amistosa e ao Claudio Mahler pela amizade solícita.

Ao Edwin Alvaro Zuleta Iturri pela ternura, compreensão, apoio, dedicação, bom humor e ensinamentos, através de exemplos, de auto-superação e incentivo para finalização desta tese.

Ao amigo Marcio Alvarado Enamorado pela fiel amizade e companherismo constante; e à sua família pela hospitalidade e recepção amistosa.

A todos os colegas com quem tive a felicidade de conviver nesta superior casa de estudos, em especial aos meus amigos Carlos Alberto, Marilene, Marcos Barreto, Rogério Feijó, Brugger, Luis Francisco, Jorge Spada, Laura Borma, Sergio Ladeira, Valéria, Gláucia, Elena. A amizade é uma grande força nos empreendimentos da vida.

Ao engenheiro Silvio Pinheiro da Silva Jr. pela acertada assessoria no ajuste mecânico dos equipamentos.

A todos os funcionários do Laboratório de Geotecnia pela amizade, em especial ao Hécio, Eduardo, Ricardo Gil,

Sergio Iório, Sr. Demetre, Max, Luís Mário e Marcos, que tornaram possível que os equipamentos utilizados no presente trabalho se tornassem operativos, à Ana Maria pelo incentivo e delicadeza, à Fatima pelos trabalhos de caracterização e ao Paulo de Oliveira pela prestatividade.

Aos colegas estagiários Marcelo (Clarck), Ricardo (Jamelão) e Sidalino pela ajuda nos trabalhos computacionais.

Aos desenhistas Gilmar e Eduardo pelo cuidadoso trabalho na execução dos desenhos.

Aos funcionários da Biblioteca Central do CT, em especial à Solange, sempre simpática e solícita.

À Vera do Departamento de Registros pela simpatia e camaradagem.

Ao Laboratório de Computação do Programa de Engenharia Civil, na pessoa do funcionário Célio.

À minha família pela felicidade de tê-la.

Aos meus amigos Cleusa e Danilo pelo apoio nos momentos difíceis.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos os que contribuíram de forma material e humana na realização desta tese e principalmente por emergir do meu coração a palavra mais forte que emana de meu ser: AMOR.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

**A RESISTÊNCIA RESIDUAL DE SOLOS DETERMINADA ATRAVÉS  
DO ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TORÇÃO**

Maria de Fatima Costa de Vasconcelos

MAIO, 1992

Orientador: Marcio de Souza Soares de Almeida  
Co-orientador: Willy Alvarenga Lacerda

Programa: Engenharia Civil

Esta dissertação se propõe a implementar no Brasil o uso de um novo equipamento de cisalhamento por torção (Bromhead, 1979) para a determinação da resistência residual dos solos. Inicialmente apresenta-se uma revisão bibliográfica detalhada relativa à resistência residual. A seguir descrevem-se o equipamento e as metodologias dos ensaios de cisalhamento por torção. Apresenta-se para fins comparativos resultados de ensaios de cisalhamento direto com interface polida, descrevendo-se resumidamente o equipamento e a metodologia de ensaio.

São apresentados resultados de ensaios em misturas de caulim-bentonita à vários níveis de tensões e comparadas as técnicas de multiestágio e de único estágio para o ensaio de cisalhamento por torção. Os resultados obtidos mostram a variação da resistência residual com o nível de tensão e com a fração argila, estando estes de acordo com os obtidos na literatura por outros autores.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE RESIDUAL STRENGTH OF SOILS DETERMINED  
WITH THE RING SHEAR TEST

Maria de Fatima Costa de Vasconcelos

MAY, 1992

Thesis Supervisor: Marcio de Sousa Soares de Almeida

Co-supervisor: Willy Alvarenga Lacerda

Department: Civil Engineering

The ring shear equipment developed by Bromhead (1979) to measure the soil residual strength is used here. Initially a detailed literature review on the residual strength is presented. It follows a description of equipment and test procedures. For comparison purposes, results of the direct shear tests with polished face are presented, and corresponding equipment and test procedures are briefly described.

Results of tests on kaolin-bentonite mixtures for a number of stress levels are presented. Multistage and single-stage testing techniques are used for the Bromhead equipment.

The results obtained show the variation of the residual strength both with the stress level and with clay fraction, and are in accordance with those obtained in the literature.



## ÍNDICE

	página
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
I.1 - Considerações preliminares .....	1
I.2 - Objetivos e organização da tese .....	3
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
II.1 - Introdução .....	5
II.1.1 - Tipos de equipamentos para a determinação da resistência residual dos solos .....	5
II.1.2 - Tipos de amostras .....	7
II.1.3 - Procedimento de formação da superfície de cisalhamento .....	7
II.1.4 - Terminologia básica .....	8
II.2 - Equipamentos e procedimentos para a medição da resistência residual .....	8
II.3 - Relação entre ângulo de atrito residual e outros parâmetros do solo .....	20
II.4 - Estudos pós-Skempton (1985) sobre resistên cia residual dos solos .....	24
II.5 - Comentários .....	32
CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E METODO LOGIAS DOS ENSAIOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO .....	33
III.1 - Descrição do equipamento de cisalhamento por torção desenvolvido por Bromhead (1979)	33
III.1.1 - Aspectos gerais .....	33
III.1.2 - Lay-out .....	35



CAPÍTULO IV - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
IV.1 - Introdução .....	75
IV.2 - Resultados dos ensaios de cisalhamento por torção utilizando a técnica de multiestágio	77
IV.3 - Resultados dos ensaios de cisalhamento por torção utilizando a técnica de único estágio	90
IV.4 - Análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento por torção .....	95
IV.5 - Resultados e análise dos ensaios de cisalhamento direto com interface polida .....	103
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	112
V.1 - Conclusões .....	112
V.2 - Sugestões para pesquisas futuras .....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	116
APÊNDICE A .....	126
APÊNDICE B .....	142
APÊNDICE C .....	146

## CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

## I.1- Considerações preliminares.

Devido à geomorfologia de diversas cidades brasileiras com extensos depósitos de talus e colúvios, associada à ocorrência de chuvas intensas em determinadas estações do ano, muitas catástrofes têm ocorrido.

O comportamento de taludes com superfície de ruptura pré-existente, a ruptura de barragens de terra e outros problemas os quais a geotecnia esforça-se em resolver motivou o presente estudo, o qual trata da resistência ao cisalhamento residual de solos.

Define-se resistência residual como o valor mínimo de resistência do solo (ao atingir grandes deslocamentos) quando este é cisalhado de forma drenada, sendo importante para análises de estabilidade de taludes com rupturas reativadas (Skempton, 1964).

A envoltória de resistência residual é determinada apenas pelo ângulo de atrito residual  $\phi'_r$ , já que observa-se experimentalmente que a coesão efetiva residual  $c'_r$  é praticamente nula.

Skempton (1970) observou que várias rupturas ocorridas na argila de Londres eram consistentes com um

ângulo de atrito de estado crítico  $\phi'_{cs} = 20^\circ$ , conforme mostra a figura I.1. Exceções a esse comportamento eram oriundas de rupturas reativadas de instabilidades ocorridas no passado histórico ou geológico. Para esses casos o ângulo de atrito mobilizado era bem inferior a  $\phi'_{cs}$ .

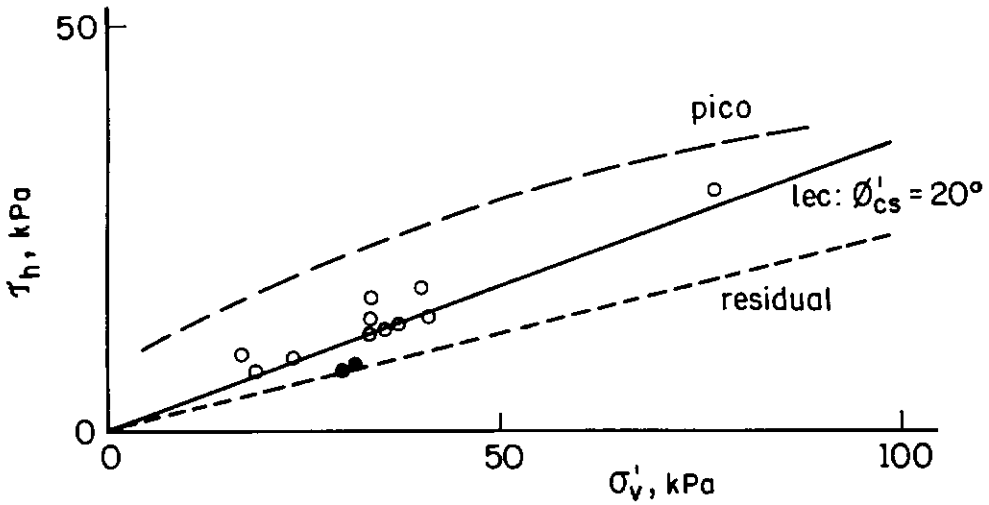


Fig. I.1 - Envoltória de resistência de pico, linha de estado crítico e envoltória de resistência residual para a argila de Londres. (Skempton, 1970; adaptado por Wood, 1990)

Hvorslev (1939) propôs a utilização de ensaios de cisalhamento que permitissem grandes deslocamentos para determinar a resistência ao cisalhamento pós-pico de solos argilosos. Concluiu Hvorslev que este objetivo somente poderia ser atingido de maneira satisfatória com o equipamento de cisalhamento por torção ("ring shear apparatus"). Desde então várias formas deste equipamento foram desenvolvidas.

O ensaio de cisalhamento por torção utilizando o equipamento desenvolvido por Bishop e outros (1971), sendo este equipamento mais sofisticado, requer uma metodologia

mais rigorosa. O único equipamento deste tipo existente no Brasil foi adquirido pela Companhia Energética de São Paulo e utilizado por Duarte (1986). Entretanto este equipamento não foi absorvido no mercado brasileiro devido ao seu alto custo. O ensaio de cisalhamento direto, que também permite a medida da resistência residual, é o mais difundido nos laboratórios brasileiros por ter metodologia mais simples.

## I.2- Objetivos e organização da tese.

A presente pesquisa tem por objetivo tornar totalmente operativo um novo equipamento de cisalhamento por torção desenvolvido por Bromhead (1979) e adquirido pela COPPE/UFRJ. Pretendeu-se nesta dissertação avaliar o funcionamento deste equipamento, mais simples e de menor custo que o equipamento de cisalhamento por torção de Bishop e outros (1971). Seus resultados serão também comparados com os obtidos em ensaios realizados com o equipamento de cisalhamento direto com interface polida.

No capítulo II apresenta-se uma revisão bibliográfica dos equipamentos e metodologia de ensaios para a determinação da resistência residual e da correlação da resistência residual com outros parâmetros do solo. Dá-se particular ênfase aos trabalhos publicados entre 1985 e 1989.

No capítulo III descreve-se os equipamentos e metodologias dos ensaios de cisalhamento por torção

desenvolvido por Bromhead (1979) e de cisalhamento com interface polida utilizados no presente trabalho.

Apresenta-se no capítulo IV os resultados dos ensaios anteriormente citados e a análise destes.

Finalmente no capítulo V são apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

Nos apêndices A, B e C apresenta-se o manual de utilização do equipamento de cisalhamento por torção tipo Bromhead (1979), os resultados dos ensaios de cisalhamento direto sem descarregamento nas reversões e as calibrações dos instrumentos medidores utilizados no presente trabalho, respectivamente.

## CAPÍTULO II

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## II.1- Introdução.

## II.1.1- Tipos de equipamentos para a determinação da resistência residual dos solos.

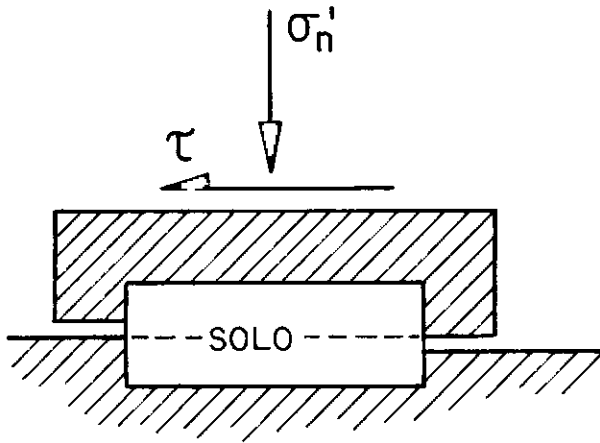
Os principais tipos de equipamentos desenvolvidos para a determinação da resistência residual, ilustrados na figura II.1, são:

- .caixa de cisalhamento direto e
- .cisalhamento por torção com anéis

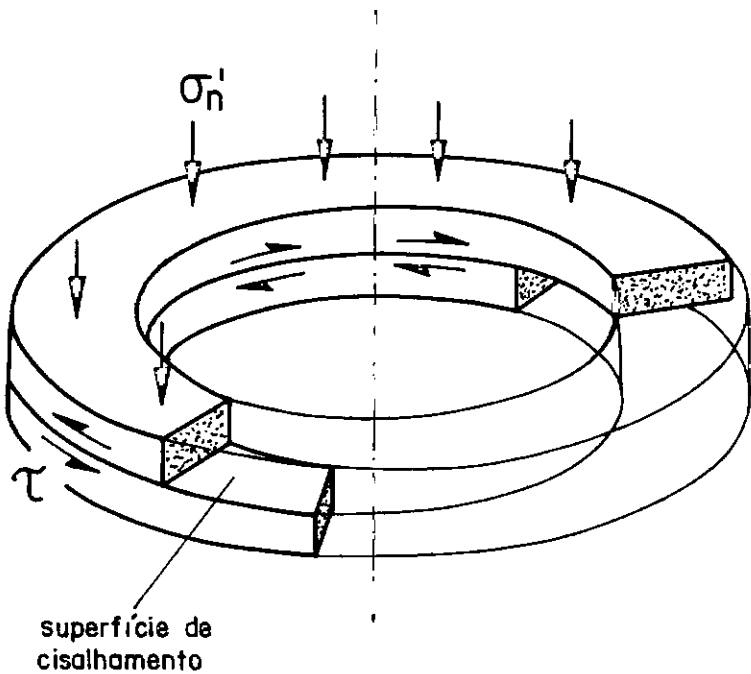
Os equipamentos de cisalhamento por torção com anéis ("ring shear apparatus") utilizam amostras anulares, e frequentemente são chamados abreviadamente de equipamentos de cisalhamento por torção. Como esta denominação é de uso corrente, a mesma será também adotada no presente trabalho.

Visto que grande parte dos trabalhos referentes a equipamentos de cisalhamento por torção foram revistos por Bishop e outros (1971), a revisão bibliográfica descrita no item II.2 menciona apenas alguns trabalhos citados por estes autores. Complementa-se este panorama histórico com





CAIXA DE CISALHAMENTO DIRETO



CISALHAMENTO POR TORÇÃO COM ANÉIS

Fig. II.1 - PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DOS SOLOS.

trabalhos publicados nas décadas de 70 e 80, onde constam tanto equipamentos como métodos desenvolvidos para os ensaios. Particular ênfase foi dada no item II.4 aos trabalhos publicados a partir de 1985.

### II.1.2- Tipos de amostras.

Os tipos de amostras utilizadas nos diversos ensaios para determinação da resistência residual são:

- .indeformadas
- .remoldadas
- .reconstituídas

As amostras reconstituídas são preparadas a partir de um solo previamente seco e em estado pulverulento e diferenciam-se das remoldadas por utilizar água com propriedades controladas (em geral água deionizada). Nos trabalhos publicados nos quais não se tem informação sobre o tipo de água utilizada foi assumido que as amostras foram remoldadas\*.

### II.1.3- Procedimento de formação da superfície de cisalhamento.

Quanto a superfície de cisalhamento as amostras podem ser:

---

\* - O termo remoldada é uma tradução do termo em inglês "remoulded", tendo uma aplicação diferente do termo amolgada ("disturbed").

- .com superfície natural de cisalhamento.
- .com superfície de cisalhamento pré-cortada.
- .com superfície de cisalhamento formada durante o ensaio.

#### II.1.4- Terminologia básica

$\tau_r$  - tensão cisalhante residual resistente ou resistência ao cisalhamento residual. Também chamada abreviadamente de resistência residual.

$\tau_r/\sigma'_n$  - coeficiente de atrito residual, onde  $\sigma'_n$  é a tensão normal efetiva.

$\phi'_r$  - ângulo de atrito residual ( =  $\arctg (\tau_r/\sigma'_n)$  ).

Os termos resistência residual de campo (  $\tau_{rf}$  ) e ângulo de atrito residual de campo (  $\phi'_{rf}$  ) deveriam em princípio ser empregados a parâmetros provenientes de retroanálises. Entretanto, alguns autores os empregam quando se referem a parâmetros obtidos de ensaios de laboratório utilizando amostras indeformadas com superfície natural de cisalhamento.

#### II.2- Equipamentos e procedimentos para a medição da resistência residual.

Os primeiros tipos de equipamento de cisalhamento por torção que se tem conhecimento foram desenvolvidos por Gruner e Haefeli (1934), Hvorslev (1936) e Cooling e Smith (1935, 1936). Hvorslev (1937) realizou ensaios de cisalhamento por torção com amostras remoldadas de solos

coesivos. Os primeiros ensaios em amostras indeformadas utilizando este tipo de equipamento foram realizadas por Tiedemann (1937). Haefeli (1938) introduziu o termo resistência "residual" ao obter resultados de ensaios de cisalhamento em solos argilosos levados a grandes deslocamentos.

No trabalho clássico de 1939 Hvorslev estabeleceu que "os dados sobre a queda da resistência dos solos após a ruptura são necessários para determinar o fator de segurança de estruturas de terra nas quais uma ruptura localizada é permitida ou não pode ser evitada".

Para que o solo atinja a resistência mínima drenada, chamada resistência residual, frequentemente são necessários grandes deslocamentos. Assim sendo vários tipos de equipamentos disponíveis na época não poderiam ser empregados para esta finalidade. O equipamento de cisalhamento por torção ("ring shearing apparatus") era, segundo concluiu Hvorslev (1939), o mais adequado para a determinação deste parâmetro. Entretanto alguns problemas ainda teriam que ser superados, como o atrito (metal-metal) entre anéis. Acrescentou Hvorslev que um equipamento deste tipo só seria plenamente viável comercialmente ao satisfazer requisitos tais como: simplicidade na preparação das amostras e na operação do equipamento, e menor tempo para realização dos ensaios.

No período de 1939 a 1964 intensificaram-se os estudos no comportamento do solo até a ruptura e houve um

desinteresse no estudo sobre a queda da resistência cisalhante pós-pico, com exceção do trabalho de Roscoe (1953) sobre estados críticos, usando o equipamento de cisalhamento simples. Hvorslev e Kaufman (1952) desenvolveram um tipo de equipamento de cisalhamento por torção, o qual não obteve projeção no meio geotécnico. Como o equipamento de cisalhamento por torção apresentava desvantagens similares às da caixa de cisalhamento direto tais como incerteza das direções das tensões principais e não uniformidade de deformações, resultou que o aperfeiçoamento deste tipo de equipamento não fosse estimulado, já que se destinava unicamente à medição da resistência residual. Assim sendo, os estudos a respeito da resistência dos solos foram desenvolvidos com o largo emprego do equipamento triaxial.

Com o trabalho clássico de Skempton (1964), mostrando o significado prático da resistência residual nos fenômenos de ruptura progressiva e na análise de estabilidade de taludes com deslizamentos reativados, o interesse pelo estudo do comportamento pós-pico dos solos foi retomado. Skempton realizou ensaios de cisalhamento direto aplicando a técnica de reversões (Hvorslev, 1960) utilizando amostras indeformadas com superfícies de cisalhamento formadas durante os ensaios, e ensaios triaxiais utilizando amostras com superfícies naturais de cisalhamento. Nos ensaios triaxiais os corpos de prova foram moldados de maneira que o ângulo formado entre a superfície de ruptura e a horizontal fosse de  $45^\circ + \phi'_r$ , sendo  $\phi'_r$  o ângulo de atrito residual provável. Foram

obtidos resultados próximos pelos dois tipos de ensaios. Chandler (1966) obteve resultados concordantes aos de Skempton realizando ensaios triaxiais em amostras indeformadas com superfícies de cisalhamento pré-cortadas.

Herrmann e Wolfskill (1966), compararam resultados obtidos com os equipamentos de cisalhamento por torção de Hvorslev e Kaufmann (1952), de cisalhamento com reversão múltipla e equipamento triaxial. Os resultados dos dois primeiros equipamentos foram concordantes, mas os resultados do último equipamento foram superiores aos dos outros.

Petley (1966) fez um estudo comparativo dos resultados de resistência residual da argila de Londres obtidos de cinco diferentes tipos de ensaios: triaxial com superfície natural de cisalhamento, triaxial com superfície de cisalhamento pré-cortada, cisalhamento direto com superfície de cisalhamento formada durante o ensaio, cisalhamento direto com superfície natural de cisalhamento e cisalhamento direto com superfície pré-cortada. Os valores mais altos corresponderam aos ensaios de cisalhamento direto com superfície de cisalhamento formada durante o ensaio e os mais baixos corresponderam aos ensaios de cisalhamento direto com superfícies pré-cortadas.

No trabalho de Petley (1966) ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas e em amostras amolgadas resultaram no mesmo valor de  $\phi'_r$ .

O conhecimento de que a resistência residual pode ser obtida ensaiando amostras remoldadas incentivou o desenvolvimento de métodos de ensaio em amostras com alturas muito pequenas (Casagrande e Hirschfeld, 1960; Kenney, 1967; La Gatta, 1970; e Bromhead, 1979).

Kenney (1967), usando o equipamento de cisalhamento simples (Bjerrum e Landva, 1966), ensaiou amostras remoldadas de pequena altura (2 a 3 mm) no teor de umidade acima do LL. Foi utilizada a técnica de reversões (Hvorslev, 1960; Skempton, 1964), sendo necessário 15 mm de deslocamento (4 reversões) para atingir a resistência residual.

Os resultados obtidos por Kenney (1967), tanto com amostras indeformadas como remoldadas, foram os mesmos, confirmando a conclusão obtida por outros autores que o tipo de amostra não influencia no valor da resistência residual. Amostras ensaiadas com diversos teores de umidade inicial e à mesma tensão normal atingiram a condição residual com o mesmo teor de umidade.

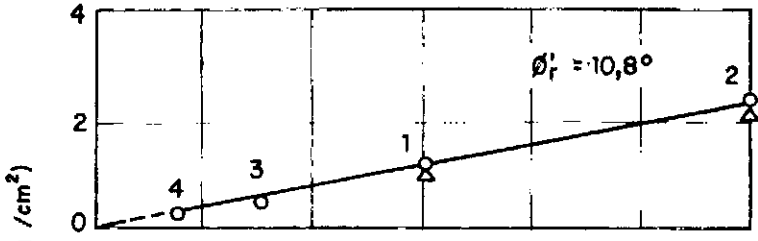
La Gatta (1970) desenvolveu um tipo de equipamento de cisalhamento por torção o qual permitia ensaiar amostras anulares e também em forma de disco. La Gatta ensaiou amostras indeformadas e remoldadas de vários solos, concluindo que a forma de preparação da amostra não influencia nos valores de resistência residual dos solos.

Nos vários equipamentos de cisalhamento por torção

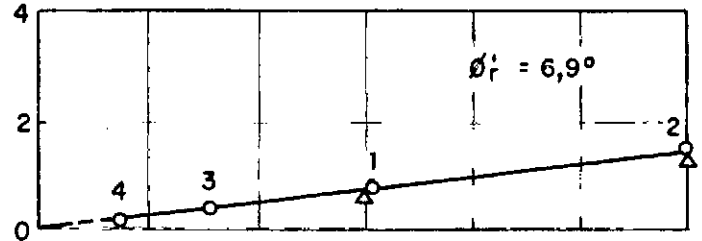
projetados uma das dificuldades apresentadas era manter a abertura entre os anéis para minimizar o atrito metal-metal durante o cisalhamento. Esta dificuldade foi superada no equipamento projetado por Bishop e outros (1971), num trabalho conjunto do Imperial College (I.C) com o Norwegian Geotechnical Institute (N.G.I). A descrição do equipamento IC-NGI, bem como a preparação das amostras e resultados de ensaios de cinco solos foram apresentados e discutidos em detalhe por Bishop e outros (1971). Com este equipamento, cuja amostra anular possui diâmetro interno  $d_i = 102$  mm, diâmetro externo  $d_e = 152$  mm e altura inicial  $h_i = 19$  mm, e com mecanismo de controle de folga entre anéis, foi possível mostrar que a resistência residual é independente da seqüência de carregamento e descarregamento, mostrado também por La Gatta (1970). Esta independência deve-se ao fato de existir uma única relação  $\tau/\sigma'_n$  (tensão cisalhante/tensão normal efetiva) versus  $\sigma'_n$ . As curvas apresentadas por Bishop e outros (1971) mostram uma diminuição de  $\phi'_r$  com o aumento de  $\sigma'_n$ .

Supunha-se que os valores de  $\phi'_r$  determinados por subseqüentes descarregamentos para tensões normais mais baixas poderiam ser prejudicados pela estrutura orientada pré-imposta sob tensões normais mais altas. Entretanto a unicidade da curva  $\tau$  versus  $\sigma'_n$  foi comprovada por Townsend e Gilbert (1973). Estes autores realizaram ensaios em amostras de cinco folhelhos e confirmaram que é possível obter os mesmos valores de  $\phi'_r$  tanto em condições de carregamento quanto em condições de descarregamento, conforme mostra a figura II.2. Os resultados concordantes

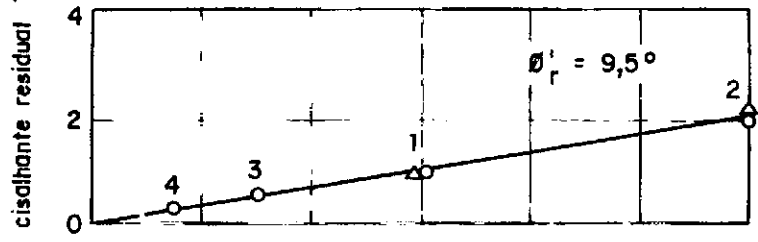




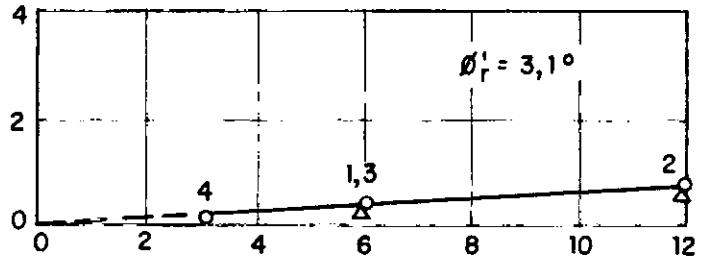
(a) folhelho Taylor , barragem de Laneport



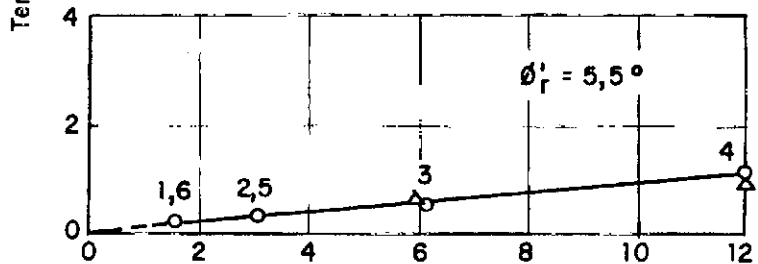
(d) folhelho Bearpaw , Barragem da Fort Peck



(b) folhelho Strawn , barragem de Proctor



(e) folhelho Pierre , barragem de Oahe



(c) folhelho Kincaid , barragem de Cooper

- Cisalhamento por torção
- △ Cisalhamento direto com reversão

Nota: os números correspondam a sequência da carregamento.

Fig. II.2 - ENVÓLTORIAS DE RESISTÊNCIA RESIDUAL PARA FOLHELHOS (TOWNSEND e GILBERT, 1973)

obtidos pelos ensaios de cisalhamento direto com reversão e de cisalhamento por torção foram atribuídos ao fato de se tratarem de materiais fortemente pré-adensados, diferentemente dos analisados por Bishop e outros (1971). Estudos posteriores mostraram que a resistência residual independe do estado de pré-adensamento das amostras de solo. Os resultados de Townsend e Gilbert (1973) mostraram também que a condição residual independe do processo de preparação da amostra, ou seja, a mesma resistência é obtida quer seja amostra indeformada ou remoldada. Verifica-se também na figura II.2 que para tensões normais maiores que 150 kPa,  $\phi'_r$  independe da tensão normal efetiva. Skempton e Petley (1967) observaram que  $\phi'_r$  torna-se constante para tensões normais maiores que cerca de 200 kPa.

Chandler e outros (1973), fazendo um estudo comparativo entre a caixa de cisalhamento direto e equipamento de cisalhamento por torção para obtenção da resistência residual, concluíram que o primeiro equipamento superestima e o segundo subestima a resistência residual de campo.

Blondeu e Josseaume (1976) realizaram ensaios triaxiais em amostras com superfícies pré-cortadas e ensaios de cisalhamento direto com superfícies pré-cortadas e com superfícies de cisalhamento formada durante o ensaio. Os ensaios triaxiais resultaram em valores mais altos. Os dois ensaios de cisalhamento direto apresentaram concordância de resultados.

Campos (1974), no estudo sobre solos residuais micáceos, concluiu que ensaios de cisalhamento direto com reversão com superfície pré-cortada são mais indicados para fornecer parâmetros de resistência residual que ensaios com superfície de cisalhamento formada durante o ensaio. Entretanto, ao utilizar o método com superfície pré-cortada, Seraphim (1974) concluiu não ter obtido valores de resistência residual ao ensaiar amostras de solo residual. Estudos posteriores levam à conclusão que os valores obtidos por este autor correspondem a valores de resistência residual.

Kanji (1974a) propôs um novo método de ensaio utilizando a caixa de cisalhamento convencional para obtenção da resistência residual de solos argilosos. O novo método consistia em preencher a metade inferior da caixa de cisalhamento com rocha polida, fazendo com que a amostra de solo deslizesse sobre esta superfície. Kanji (1974b) mostrou que valores de  $\phi'_r$  obtidos por outros métodos coincidiram com a curva obtida de resultados de ensaios de cisalhamento direto utilizando o método de interface solo-rocha polida. Kanji também observou ao ensaiar amostras remoldadas de solo que há uma queda rápida na resistência após o pico; e que a resistência mínima constante ( $\tau_{res}$ ) é obtida mesmo com um deslocamento (de cerca de 1 cm) permitido pelo equipamento de cisalhamento convencional.

Littleton (1976) e Deere (1974) em uma comunicação pessoal a Mitchell (1976) verificaram que a condição

residual em ensaios com superfícies polidas é atingida com pequenos deslocamentos.

Kanji e Wolle (1977), utilizando o método de cisalhamento direto com interface solo-rocha polida (Kanji, 1974a), verificaram que substituindo a rocha polida por outros materiais (folhas de alumínio, aço ou latão) os valores obtidos de resistência residual não eram influenciados. Kanji e Wolle obtiveram resultados concordantes com os obtidos com outros métodos por outros autores, conforme mostrado na figura II.3.

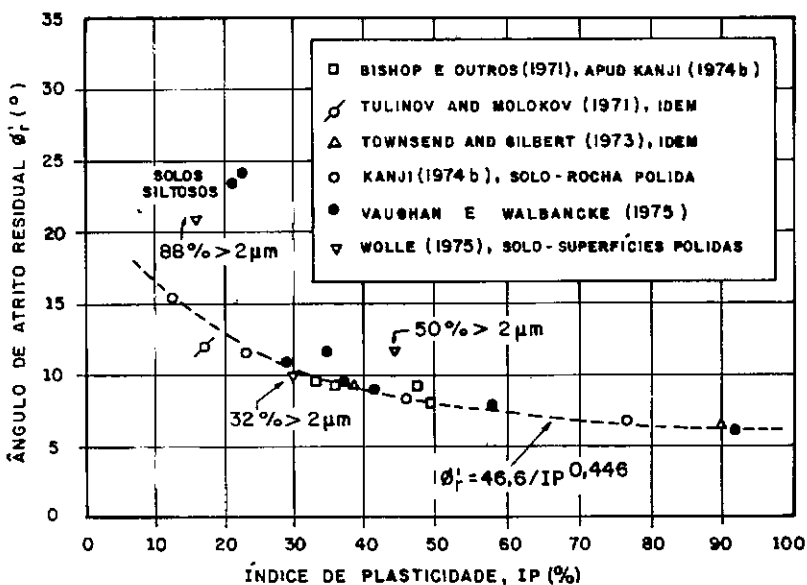


FIG. II.3 - ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL ( $\phi_r'$ ) VERSUS ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP).  
KANJI E WOLLE (1977)

O aperfeiçoamento dos equipamentos para a determinação da resistência residual dos solos foi atingido com a superação de vários problemas técnicos, já mencionados por Bishop e outros (1971). Entretanto tendo

em vista que o equipamento de cisalhamento por torção tipo IC-NGI teve sua utilização limitada devido ao seu alto custo e longo tempo de ensaio, estudos foram feitos para simplificar e difundir o uso de ensaios de cisalhamento por torção. Com estes objetivos, Bromhead (1979) desenvolveu um equipamento de cisalhamento por torção menos sofisticado, construído na Kingston Polytechnic (Londres), e viabilizou-o para fins comerciais. A descrição deste equipamento bem como o procedimento de ensaio serão detalhados no capítulo III do presente trabalho. Anayi e outros (1989) propuseram modificações no equipamento de Bromhead para ensaios com a argila Lias (Loughborough).

Hutchinson, Bromhead e Lupini (1979) compararam resultados de ensaios obtidos no equipamento IC-NGI com os obtidos no equipamento desenvolvido por Bromhead. Foi encontrada boa concordância entre os resultados destes dois equipamentos, conforme mostra a figura II.4. Além destas comparações os autores mostraram que fazendo uma interpretação adequada da resistência residual obtida por retroanálise obtém-se resultados bem próximos daqueles obtidos no ensaio de cisalhamento por torção.

Lupini e outros (1981), seguindo as proposições de Kenney (1977) e Skinner (1969), confirmaram que a proporção de partículas granulares e lamelares presentes no solo e o coeficiente de atrito inter-partículas das partículas lamelares controlam o mecanismo de cisalhamento residual.

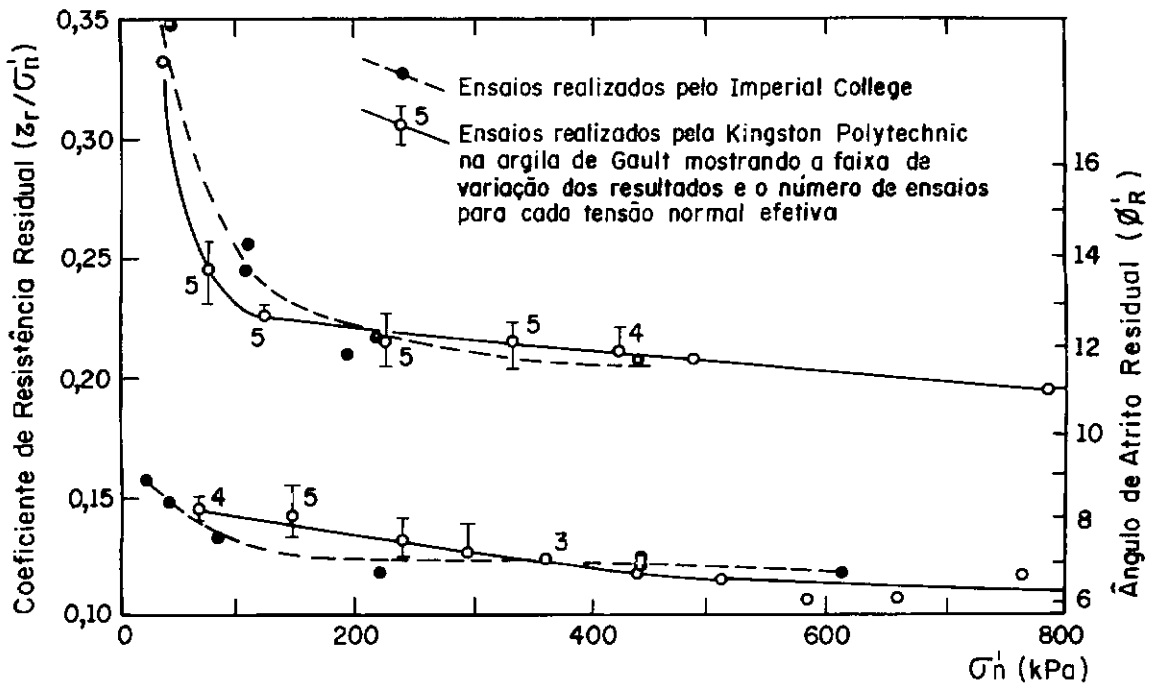


Fig. II.4 - Comparação de resultados de ensaios obtidos no equipamento desenvolvido por Bishop e no equipamento desenvolvido por Bromhead.

(HUTCHINSON e OUTROS, 1979)

Hawkins e Privett (1981, 1985) compararam a resistência residual de amostras remoldadas obtida de ensaios de cisalhamento direto com reversão e de ensaios cisalhamento por torção com o equipamento desenvolvido por Bromhead (1979). Os ensaios de cisalhamento direto tiveram suas amostras pré-cortadas e polidas manualmente antes de cisalhadas, técnica similar à usada por Marsh (1972). Mesmo assim necessitaram de 10 reversões. As curvas dos ensaios de cisalhamento direto com reversão e as obtidas dos ensaios de cisalhamento por torção apresentaram boa concordância.

Bromhead e Curtis (1983) compararam resultados de ensaios de cisalhamento direto com reversão - utilizando amostras de superfície natural de cisalhamento - e ensaios

com o equipamento de Bromhead (1979) - utilizando amostras remoldadas, conforme mostrado na figura II.5. Nota-se no gráfico da figura II.5 que alguns resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento direto foram rejeitados, em decorrência dos corpos de prova apresentarem ondulações e alinhamento incorreto da superfície de cisalhamento. Nos gráficos de tensão versus deslocamento destes ensaios a tensão crescia continuamente.

### II.3- Relação entre ângulo de atrito residual e outros parâmetros do solo.

Os estudos propondo relacionar o ângulo de atrito  $\phi$  e os limites de Atterberg são conhecidos desde a publicação do trabalho de Bjerrum e Simons (1960). Skempton (1964) propôs uma correlação entre a resistência residual e a fração argila ( $\% < 2 \mu\text{m}$ ). A correlação obtida por Chandler (1966,1969) teve concordância com a de Skempton.

Por outro lado, Kenney (1967) concluiu não haver relação entre a resistência residual e a plasticidade ou a granulometria dos solos, verificando apenas a dependência de tal parâmetro com a composição mineralógica do solo e o sistema químico. Entende-se por sistema químico a composição do fluido dos poros e os tipos de íons adsorvidos nas partículas minerais. Ramiah e outros (1970) verificaram uma redução de  $\phi'_r$  de  $33^\circ$  para  $28^\circ$  ao variarem a química da água dos poros (condição floculada para a dispersa) em ensaios de cisalhamento direto com reversão em amostras de silte argiloso (IP=17% e fração argila de 8%).

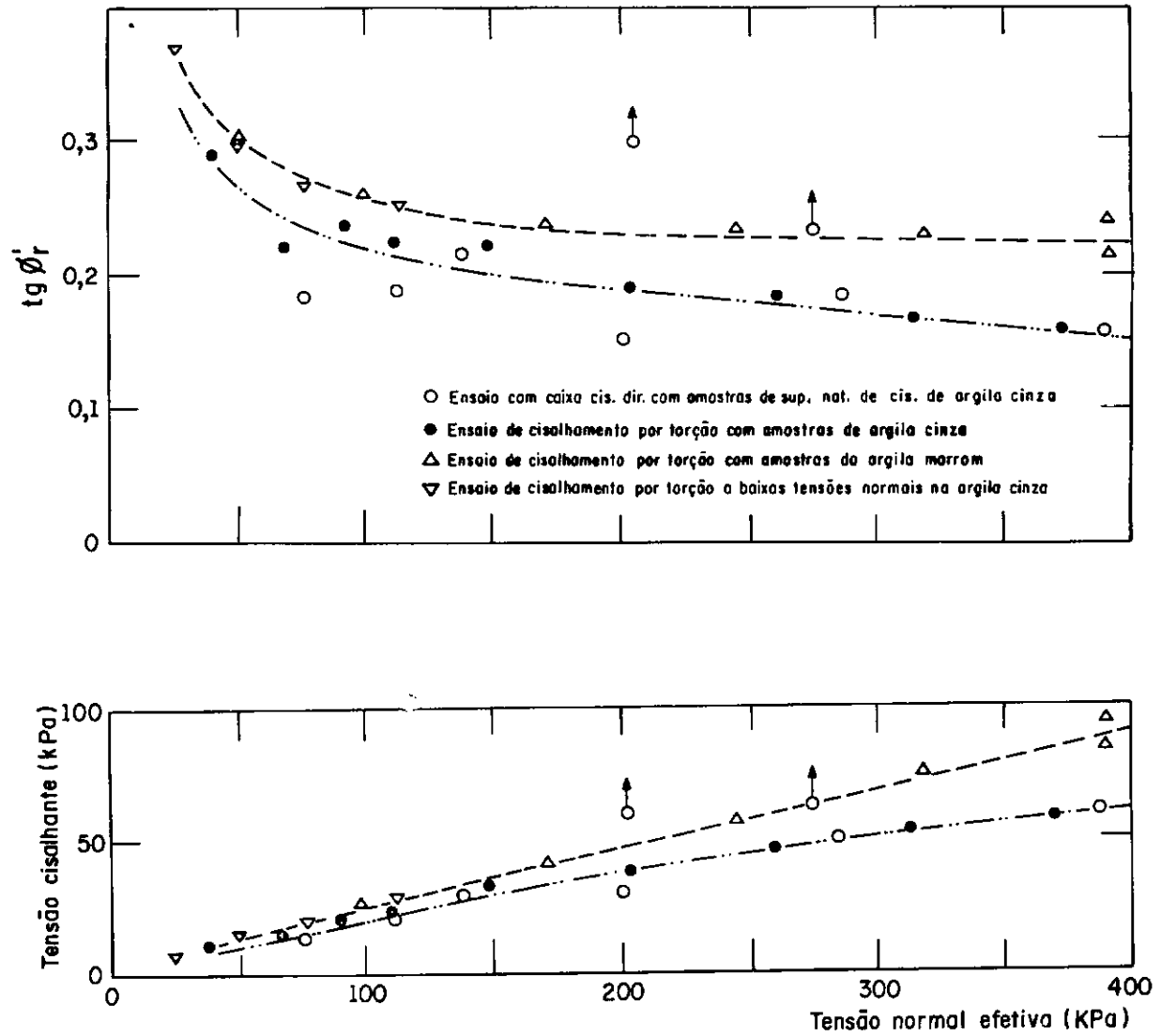


Fig. II.5 - COMPARAÇÃO DE ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL.  
(BROMHEAD e CURTIS, 1983)



Baseado em trabalhos anteriores, dentre eles o de Kenney (1967), onde verificou-se a dependência da composição mineral e do sistema químico, e considerando que estes fatores afetam os limites de Atterberg, Voight (1973) concluiu que existe uma correlação entre a resistência residual e o índice de plasticidade (IP).

Kanji (1974b) citou trabalhos os quais relacionavam IP com  $\phi$  tais como Kenney (1959), Holt (1962), Skempton (1964), Brooker (1964), Brooker e Ireland (1965), Mitchell (1965), Bjerrum (1967), Deere (1967). Entretanto, segundo Kanji, estes autores não deixaram claro que as correlações se referiam à resistência residual ou à de pico.

Análises feitas por Kanji e Wolle (1977) limitaram a aplicação da equação apresentada na figura II.3 para solos argilosos. Para solos siltosos a relação não se verifica, conforme mostrado na figura.

As curvas relacionando  $\phi'_r$  com IP propostas por vários autores foram apresentadas por Lupini e outros (1981) em um único gráfico, conforme mostra a figura II.6. Hawkins e Privett (1985) chamaram a atenção que as correlações da resistência residual com parâmetros como IP e fração argila ( $\% < 2 \mu\text{m}$ ) deveriam considerar a tensão normal efetiva, já que, como discutido anteriormente,  $\phi'_r$  depende da tensão normal efetiva. Segundo Hawkins e Privett (1985), as correlações de  $\phi'_r$  com a fração argila, estabelecida por Skempton (1964), e de  $\phi'_r$  com IP estabelecida por Vaughan e Walbancke (1975) e Ingold

(1975), não mencionavam a que tensão normal foram obtidas.

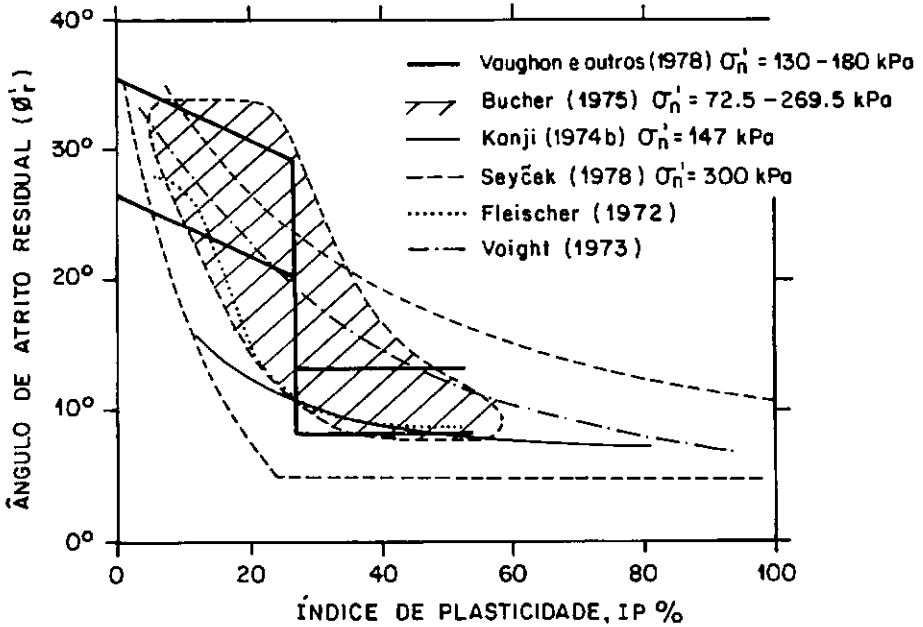


Fig. II.6 - CORRELAÇÕES DO ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL ( $\phi'_r$ ) COM O ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP).  
(LUPINI e OUTROS, 1981)

Collota e outros (1989), com dados de ensaios de 150 amostras, relacionaram simultaneamente LL, IP e fração argila ao  $\phi'_r$  de solos coesivos. Os ensaios utilizaram a caixa de cisalhamento direto em amostras indeformadas, e o equipamento de Bromhead em amostras remoldadas de material passando na peneira 40 (abertura de malha de 0,425 mm). Os autores propuseram a seguinte correlação, aplicável a solos com mais de 80% passando na peneira 40:

$$\phi'_r = f(\text{CALIP})$$

onde:

$$\text{CALIP} = (\overline{\text{CF}})^2 \times \text{LL} \times \text{IP} \times 10^{-5} \quad (\text{II.1})$$

sendo:

$\overline{\text{CF}}$  = fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ) em % do material que passa na peneira 40.

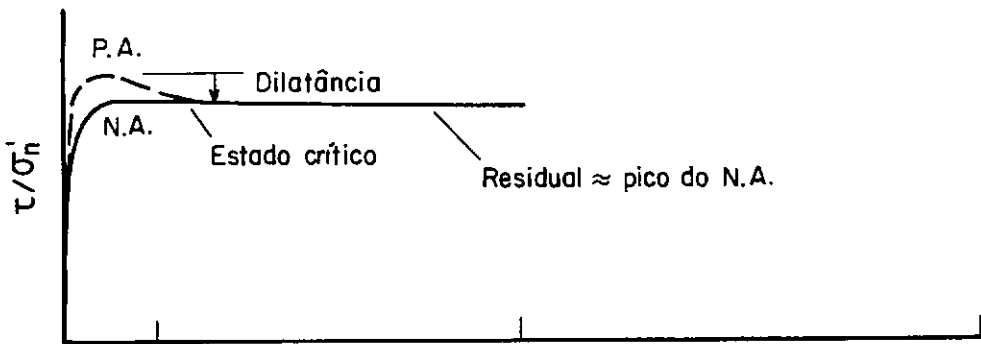
Fazendo uso da relação II.1 os gráficos apresentaram-se menos íngremes e com menos dispersão que os gráficos que relacionam fração argila a  $\phi'_r$ . Collota e outros (1989) observaram que, para valores de CALIP maiores que 60, os ângulos de atrito residuais obtidos pelos dois equipamentos são quase os mesmos. Para valores de CALIP menores que 60,  $\phi'_r$  obtidos com a caixa de cisalhamento são 15 a 20% maiores que os obtidos com o equipamento de cisalhamento por torção.

#### II.4- Estudos pós-Skempton (1985) sobre resistência residual dos solos.

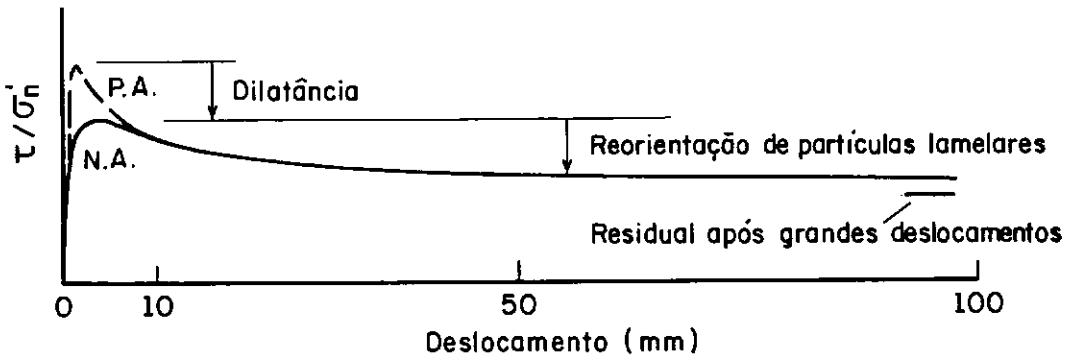
Segundo Skempton (1985) o gráfico típico resistência cisalhante drenada versus deslocamento apresenta um valor máximo, a resistência de pico, seguida de uma queda passando pelo estado crítico, quando apresenta volume constante, e atingindo finalmente seu valor mínimo, ou seja, a resistência residual. A queda até o estado crítico deve-se à continuidade da dilatância, atingida com pequenos deslocamentos e a queda até a resistência residual deve-se à orientação de partículas, atingida com grandes deslocamentos. A figura II.7 mostra as curvas  $\tau/\sigma'_n$  versus deslocamento características para solos granulares (fig.II.7.a) e para solos argilosos (fig.II.7.b).

Segundo Skempton (1985), os solos com fração argila < 25% , pré-adensados ou normalmente adensados, não apresentam orientação de partículas. Assim a resistência residual é aproximadamente igual à resistência do estado

crítico. No caso de solos granulares normalmente adensados, os quais não apresentam dilatância, os valores de resistência de pico, resistência de estado crítico e resistência residual são aproximadamente iguais, conforme mostra a figura II.7.a. Costuma-se chamar a resistência residual dos solos granulares de resistência a volume constante ( $\phi'_{cv}$ ).



a) Solos com fração argila  $< 25\%$



b) Solos com fração argila  $> 50\%$

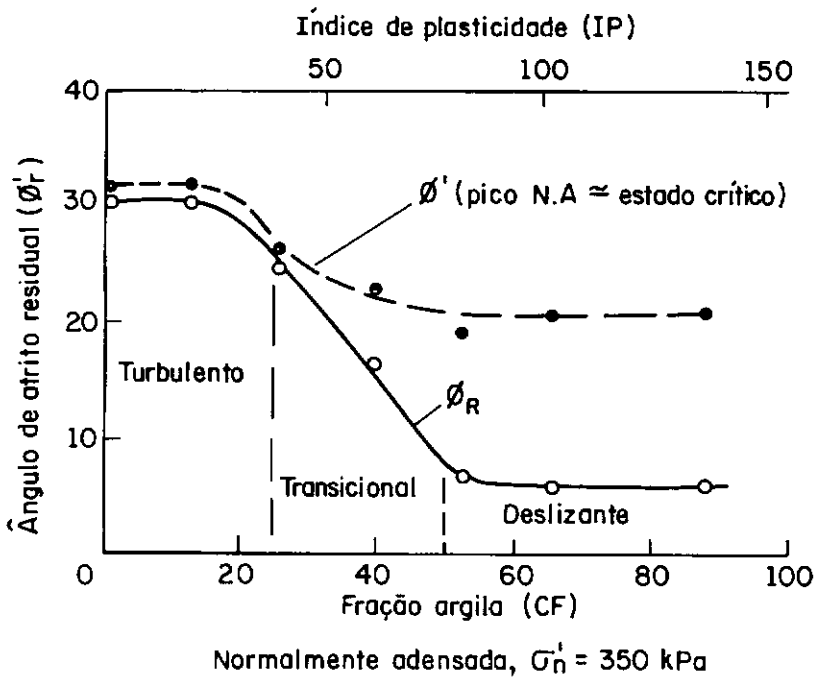
Fig. II.7 - GRÁFICO  $\tau/\sigma'_n$  VERSUS DESLOCAMENTO A  $\sigma'_n$  CONSTANTE (SKEMPTON, 1985)

Nos solos argilosos, com fração argila  $> 50\%$ , o comportamento pós-pico predominante é a orientação de partículas argilosas no sentido do deslocamento. No caso

de argilas pré-adensadas, após o pico continua ocorrendo dilatação, reduzindo a resistência cisalhante. Continuando o deslizamento a resistência cisalhante diminui à medida que aumenta o grau de orientação das partículas de argila, chegando a um valor constante, ou seja, à resistência residual. Neste caso têm-se valores bem diferentes para resistência de pico, de estado crítico e residual, conforme mostra a figura II.7.b. No caso de argilas normalmente adensadas, não havendo dilatação, a queda da resistência pós-pico deve-se exclusivamente à reorientação de partículas de argila. Como se observa na figura II.7, o valor da resistência residual é o mesmo tanto na condição pré-adensada quanto na condição normalmente adensada.

Quando o solo possui percentagem de fração argila entre 25% e 50% apresenta um comportamento "transicional" (fig. II.8) e assim a resistência residual depende tanto da porcentagem quanto do tipo de partículas argilosas. A figura II.8, apresentada no trabalho de Skempton (1985) baseada no trabalho de Lupini e outros (1981), mostra os três tipos de comportamento (turbulento, transicional e deslizante) com misturas areia-bentonita ensaiadas com o equipamento de cisalhamento por torção. Nota-se que à medida que se varia as porcentagens de areia e bentonita, da mistura argilosa ( $> 50\%$  de fração argila) caracterizando um cisalhamento deslizante, até a mistura arenosa ( $< 25\%$  de fração argila) caracterizando um deslizamento turbulento, o valor da resistência residual vai se aproximando do valor da resistência de pico, até

quase coincidirem para as misturas arenosas.



**Fig. II.8** - Ensaio de cisalhamento por torção com misturas areia - bentonita.  
(LUPINI, SKINNER e VAUGHAN, 1981 ; adaptado por SKEMPTON, 1985)

Comparando-se os mecanismos de estado crítico e residual torna-se claro que os mesmos são muito diferentes. Quando o solo está no estado crítico sua estrutura permanece randômica. Entretanto a condição residual em uma superfície de ruptura significa partículas fortemente orientadas devido aos grandes deslocamentos, conforme mostrado na figura II.9 (Wood, 1990). Isto ilustra porque o ângulo de atrito residual  $\phi'_r$  é, em solos argilosos, bastante inferior ao ângulo de atrito de estado crítico  $\phi'_{cs}$ .

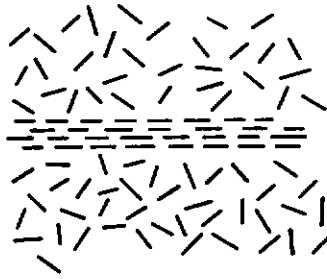


Fig. II.9 - Orientação das partículas de argila na superfície de cisalhamento na condição residual.  
(WOOD, 1990)

Skempton (1985) definiu como resistência residual de campo ("field residual") quando se obtém, em ensaios com amostras com superfície natural de cisalhamento, a resistência residual com deslocamentos praticamente nulos, isto é, quando os deslocamentos ocorridos na natureza ocasionaram o grau de orientação de partículas e a variação na umidade suficientes para que a condição residual fosse estabelecida. A resistência residual de campo foi atingida utilizando a caixa de cisalhamento direto, conforme mostra a figura II.10. Nestes ensaios nota-se depressões no segundo curso, entretanto o valor atingido no primeiro curso volta a ser atingido. Para se eliminar este efeito, inerente ao ensaio de cisalhamento direto com reversão, deve-se descarregar a amostra na reversão.

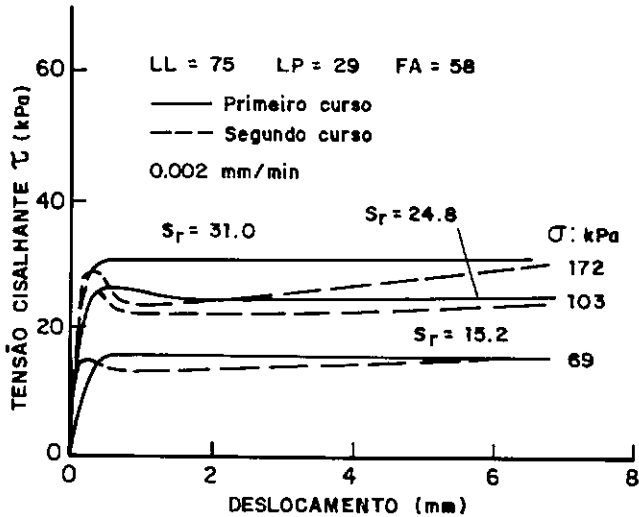


Fig. II.10 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO COM REVERSÃO NA ARGILA DE ATHERFIELD. (SKEMPTON, 1985)

Segundo Skempton (1985), a melhor concordância possível entre ensaios de laboratório e retroanálises apresenta uma acurácia de  $\pm 10\%$  e que a resistência residual obtida em ensaios de cisalhamento por torção subestima a obtida por retroanálises em cerca de  $1,5^0$ .

Bromhead e Dixon (1986) consideraram que a acurácia das retroanálises para a determinação da resistência residual depende da localização correta da superfície de ruptura e do conhecimento das poro-pressões. Entretanto a pouca quantidade de dados de retroanálises e a inevitável dispersão dos resultados de cisalhamento por torção impedem afirmar que os resultados são similares.

Hawkins e Privett (1985) ensaiaram solos coesivos com o equipamento tipo Bromhead e obtiveram as curvas típicas mostradas na figura II.11. Como o valor de  $\phi'_r$  varia com a



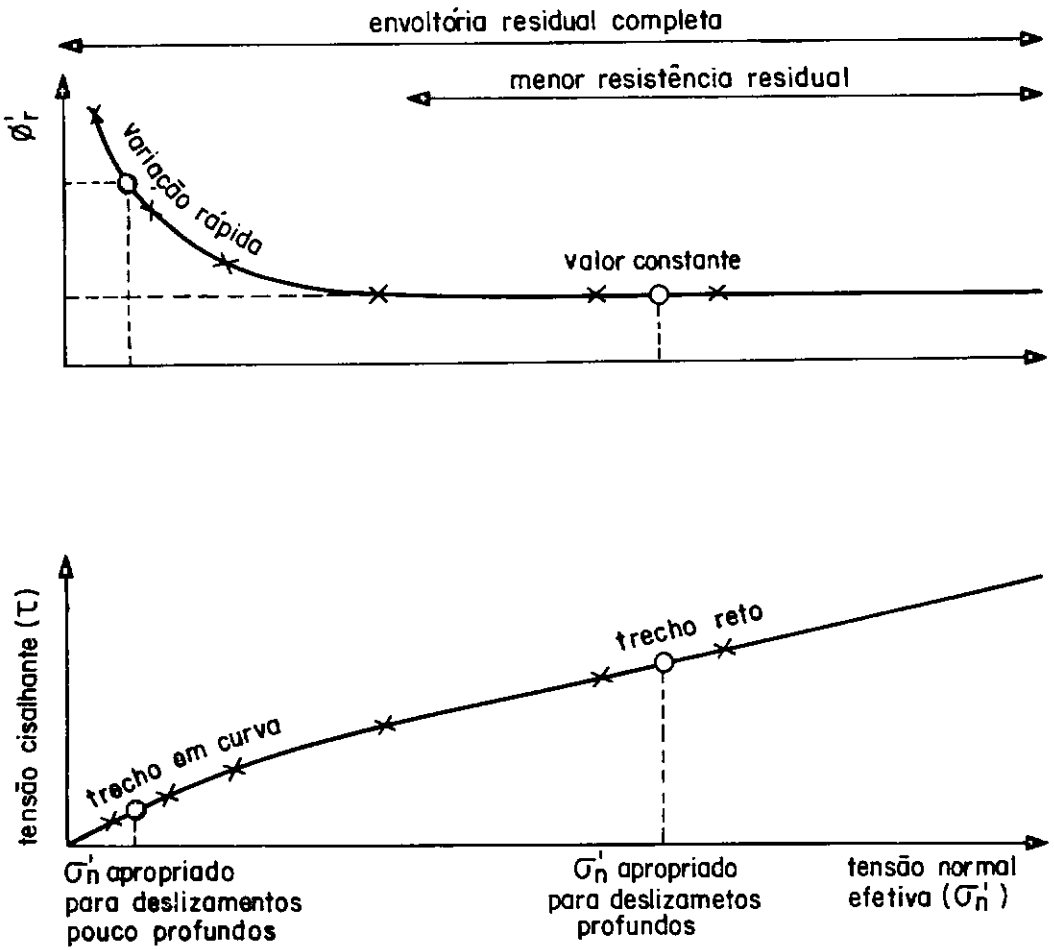


Fig. II.11 - CURVAS TÍPICAS DE  $\phi_r'$  VERSUS  $\sigma_n'$  e  $\tau$  VERSUS  $\sigma_n'$   
 (HAWKINS e PRIVETT, 1985 ; BASEADO NO TRABALHO  
 DE LUPINI e OUTROS, 1981)

tensão normal efetiva, estes autores introduziram dois novos termos: Envoltória Residual Completa ("Complete Failure Envelope") e Menor Resistência Residual ("Lowest Residual Strength"). A resistência residual da maioria dos solos estudados varia acentuadamente para tensões normais efetivas abaixo de cerca de 200 kPa, aproximando-se de um valor constante para tensões normais efetivas superiores. A este valor constante Hawkins e Privett (1985) chamaram de menor resistência residual. A variação da resistência residual com a tensão normal é de suma importância para fins de projeto. Assim sendo é necessário determinar a envoltória de resistência residual completa.

Chandler e Hardie (1989) propuseram um método de ensaio utilizando a caixa de cisalhamento direto com amostras de alturas pequenas (variáveis entre 1,5 e 10 mm). Partículas maiores que 0,425 mm foram removidas e as amostras remoldadas acima do LL. Foram realizados ensaios variando-se a posição da pedra porosa inferior até que ficasse nivelada com o plano de separação das metades da caixa. Os autores chegaram à conclusão que à medida que se diminuía a altura das amostras menores deslocamentos eram necessários para se atingir a condição residual (amostras da argila de Londres com  $h_1 = 2,1$  mm atingiram a condição residual com 17 mm de deslocamento, correspondendo a três reversões apenas). Observou-se que amostras com  $h_1 = 10$  mm não atingiram a condição residual mesmo com 25 mm de deslocamento, não sendo vantajosos ensaios com esta altura; levando Chandler e Hardie a recomendarem ensaios com  $h_1$  de 2 a 5 mm, conforme mostra a figura II.12.

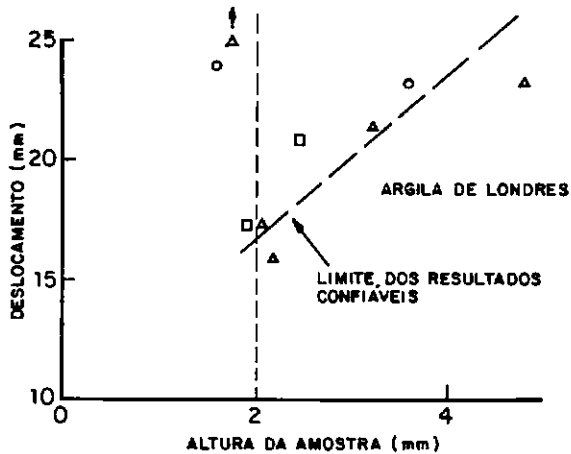


Fig. II.12 - RELAÇÕES ENTRE ALTURA DE AMOSTRA E DESLOCAMENTO NECESSÁRIO PARA ATINGIR A CONDIÇÃO RESIDUAL. (CHANDLER e HARDIE, 1989)

#### II.5- Comentários.

Os trabalhos revisados neste capítulo mostram a variedade de métodos e equipamentos existentes para a determinação da resistência residual.

Bromhead (1979) desenvolveu um equipamento de cisalhamento por torção simples, a ser utilizado neste trabalho. Por outro lado, autores como Kanji e Wolle (1977) e Chandler e Hardie (1989) propuseram métodos para adequar a caixa de cisalhamento direto a fim de determinar a resistência residual mais rapidamente que o ensaio convencional com reversões. No presente trabalho far-se-á uso dos métodos de Kanji e Wolle (1977) e de Chandler e Hardie (1989) com a caixa de cisalhamento direto utilizando amostras com alturas de 5 mm. Esses resultados serão comparados com os obtidos com o equipamento de cisalhamento por torção de Bromhead (1979).

## CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS DOS ENSAIOS  
UTILIZADOS NESTE TRABALHOIII.1 - Descrição do equipamento de cisalhamento por  
torção desenvolvido por Bromhead (1979)

O equipamento de cisalhamento por torção utilizado no presente trabalho é mostrado nas figuras III.1 a III.3.

## III.1.1 - Aspectos gerais

O equipamento descrito a seguir ensaia amostras de  $d_e=100$  mm e  $d_i=70$  mm e  $h_i=5$  mm confinadas radialmente entre anéis concêntricos.

As amostras são carregadas verticalmente entre anéis porosos de bronze sinterizado, por meio de um sistema de alavanca com um braço com relação 1:10. Um motor de 1 HP e um sistema de engrenagens impõe uma velocidade constante de rotação à parte inferior da célula de cisalhamento, na qual se situa a amostra. Na parte superior da célula, assente sobre a amostra, se localiza o braço de torque. Inicialmente o solo se "adere" ao anel poroso superior. A rotação causa o cisalhamento da amostra, formando uma superfície de cisalhamento próximo ao anel poroso superior. O torque transmitido através da amostra é medido por um par de anéis dinamométricos. A medição do recalque ocorrido durante o ensaio é feito através de um



Fig. III.1 - Vista Lateral do Equipamento de Cisalhamento por Torção Tipo Bromhead



Fig. III.2 - Perfil do Equipamento de Cisalhamento por Torção Tipo Bromhead

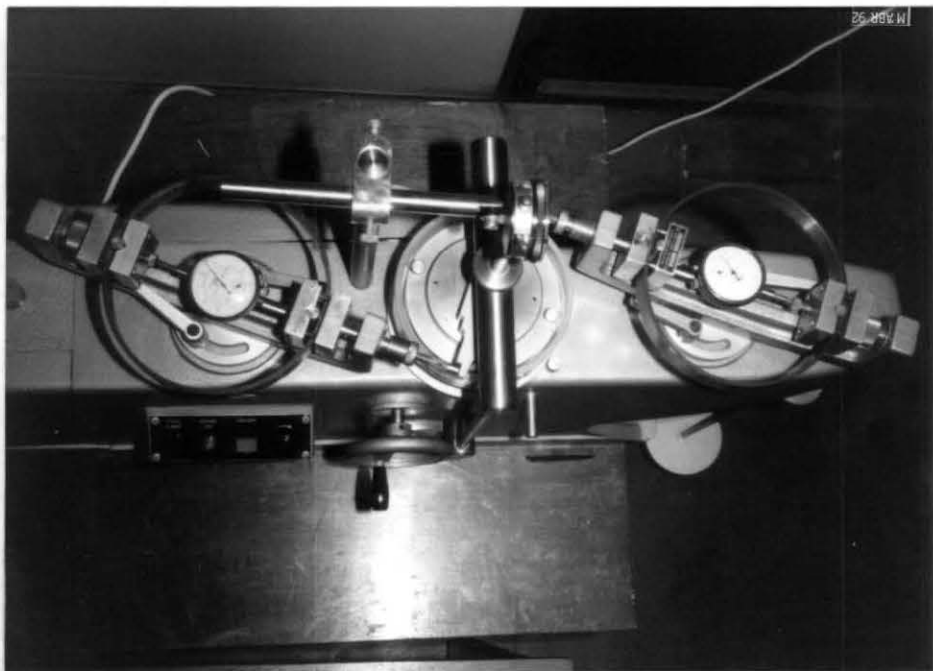


Fig. III.3 - Vista Superior do Equipamento de Cisalhamento por Torção Tipo Bromhead

extensômetro posicionado verticalmente ao centro da célula.

### III.1.2 - Lay-out

Apresenta-se a seguir a relação das peças que constituem o equipamento desenvolvido por Bromhead (1979). Os esquemas mostrados nas figuras III.4 a III.6, constam do manual do fabricante - Wykeham Farrance Engineering Limited - WF 25850 (1987). A legenda destas figuras é a que se segue:

- (1) - haste vertical
- (2) - braço de suporte do extensômetro
- (3) - braço de alavanca
- (4) - pendural de carga
- (5) - contrapeso p/ equilíbrio do sistema de carregamento
- (6) - parafuso limitador de curso do braço de alavanca
- (7) - estribo (canga) de carregamento
- (8) - parafuso de ajuste do estribo (canga)
- (9) - porca de ajuste do estribo (canga)
- (10) - pinos de repouso do estribo (canga) de carregamento
- (11) - suportes (garfos) dos anéis dinamométricos
- (12) - adaptadores dos anéis dinamométricos
- (13) - hastes transmissoras do torque
- (14) - apoio com rolamentos de esfera
- (15) - trava do desengate rápido
- (16) - alavanca de mudança da relação de transmissão
- (17) - acesso para a troca de engrenagens
- (18) - caixa de engrenagem
- (19) - acoplamento das engrenagens
- (20) - volante manual
- (21) - engrenagem tipo coroa
- (22) - parafuso sem-fim
- (23) - motor
- (24) - acesso para a colocação de óleo
- (25) - acesso para a verificação do nível de óleo
- (26) - painel de controle
- (27) - base rotativa da célula
- (28) - pino de centragem

- (29) - escala em graus
- (30) - referência fixa da escala em graus
- (31) - recipiente de água de acrílico
- (32) - "o-ring" de vedação do recipiente de acrílico
- (33) - disco inferior
- (34) - cavidade anular para amostra
- (35) - parafusos para elevação do disco inferior
- (36) - porca recartilhada para fixação do disco inferior
- (37) - anéis porosos de bronze sinterizado
- (38)- "top cap" ou disco superior
- (39) - braço de torque
- (40) - pino centralizador
- (41) - encaixes para as hastes transmissoras do torque
- (42) - extensômetro



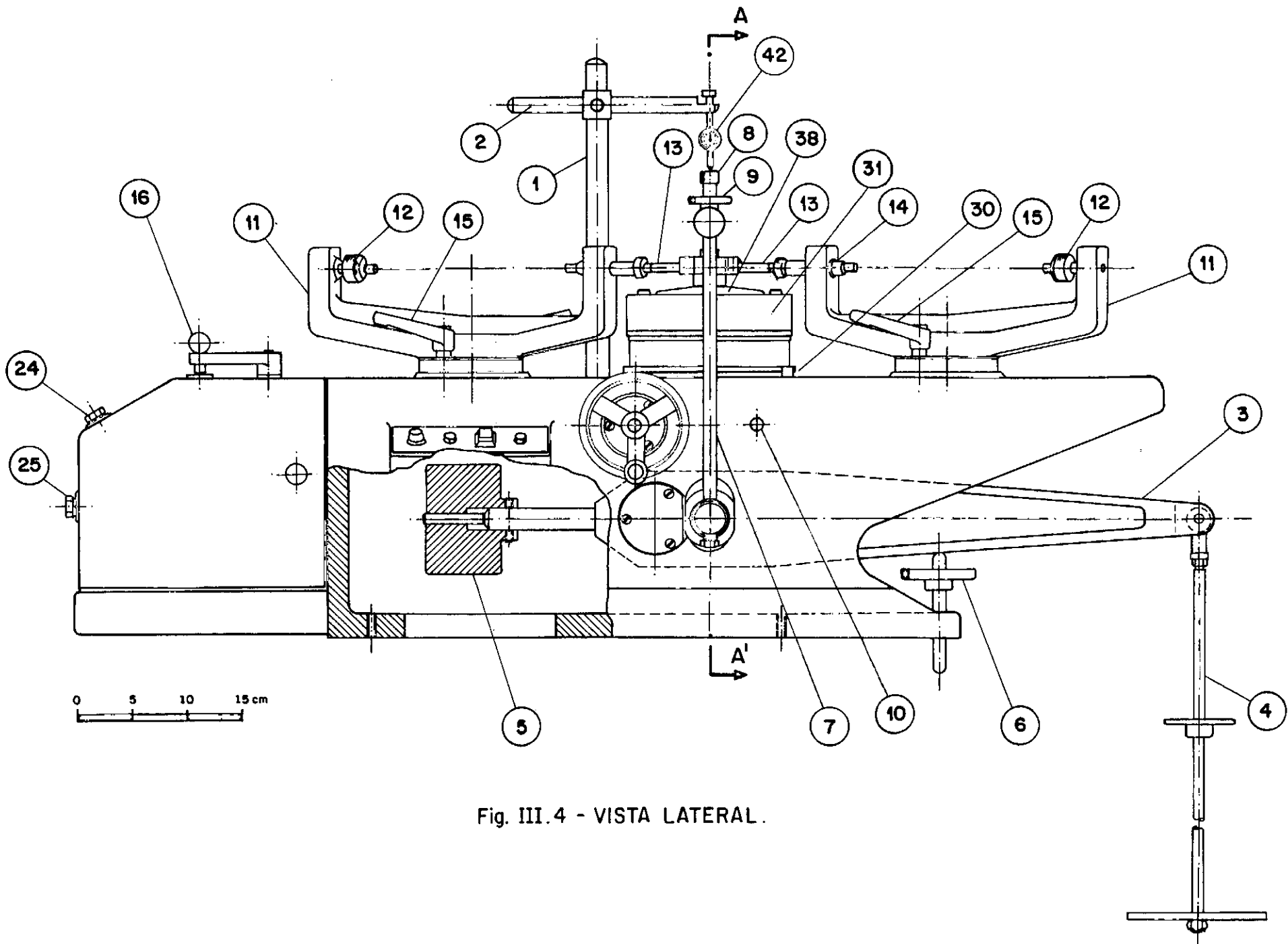


Fig. III.4 - VISTA LATERAL.

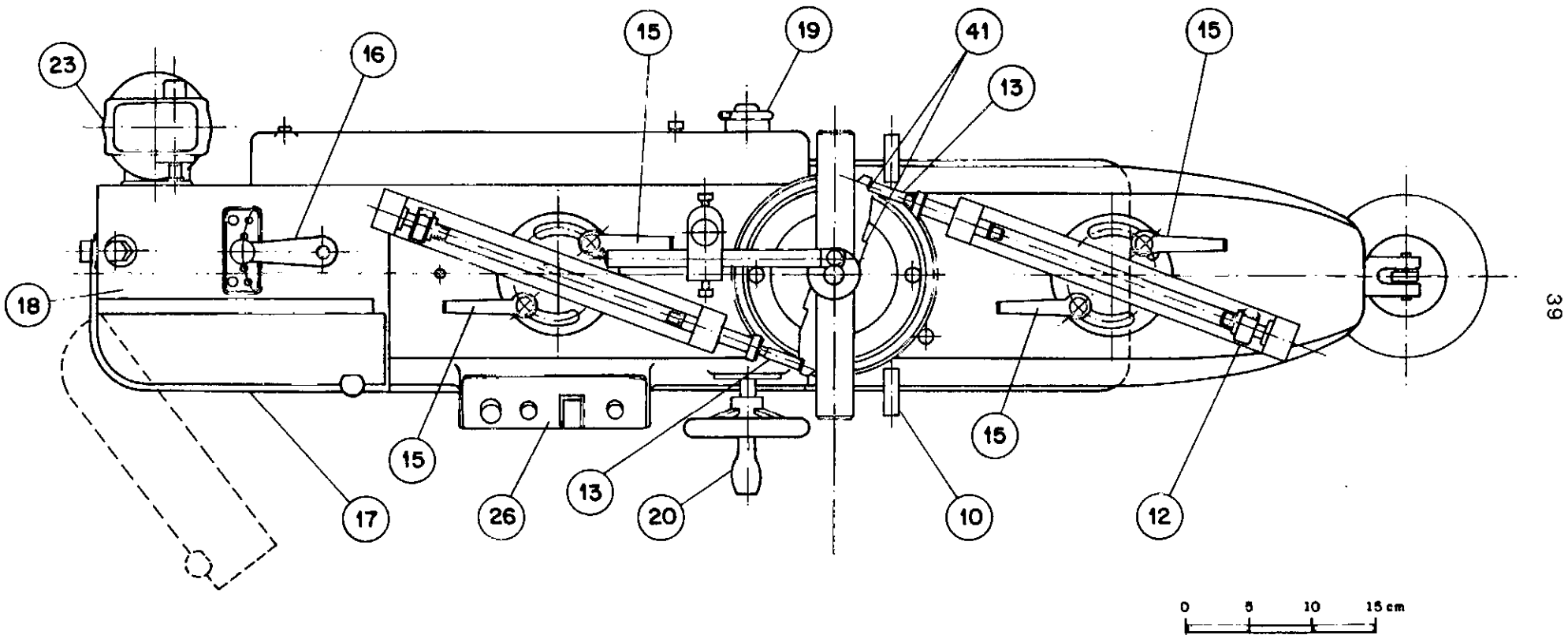


Fig. III.5 - VISTA SUPERIOR.

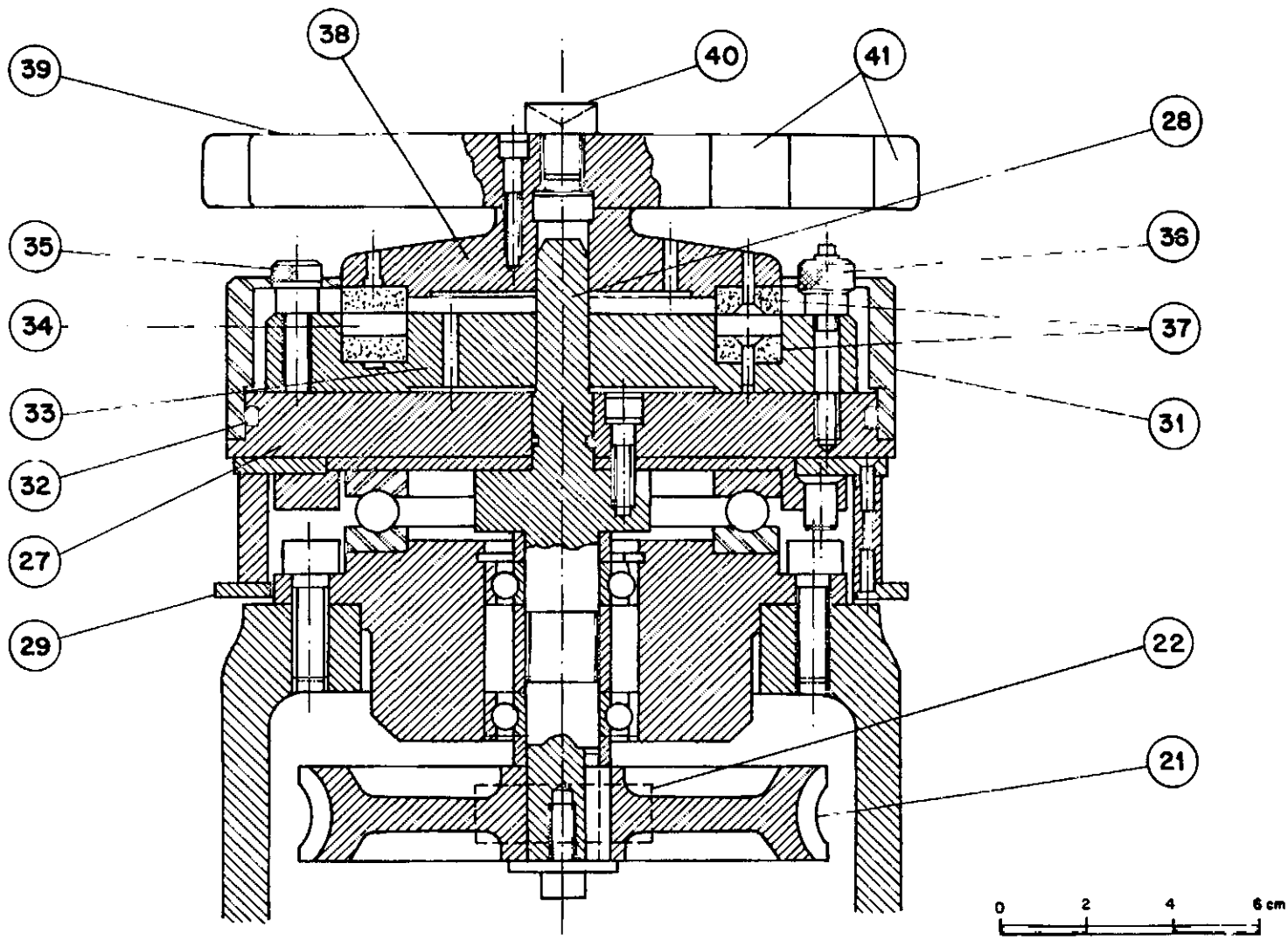


Fig. III.6 - SEÇÃO AA'

### III.1.3 - Partes constitutivas

-Sistema de medição:

a) Extensômetro (42)

Usado para medir o deslocamento vertical da amostra. Tem sensibilidade de 0,002 mm e é fixado ao braço de suporte (2).

b) Par de anéis dinamométricos (figura III.7)

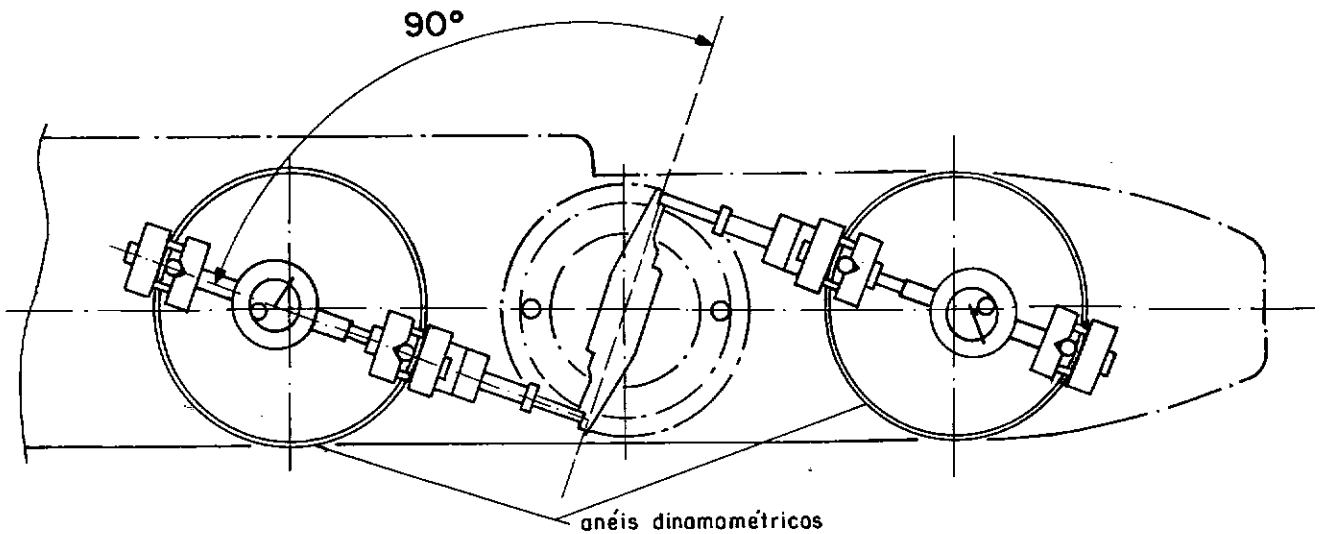


Fig. III.7 - POSIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TORQUE PARA O INÍCIO DO ENSAIO.

Usado para medir o torque transmitido pela amostra. Ambos os anéis\* foram fabricados com aço 420 (tratado termicamente\*\* na oficina do Programa de Metalurgia da COPPE) e montados na

\* - a máquina foi fornecida pelo fabricante sem os anéis.

\*\* - o material não tratado termicamente apresentou deformações plásticas.

oficina do laboratório de Geotecnia da COPPE. Apresentam capacidade nominal de 50 kgf; como recomenda o fabricante do equipamento. Aos anéis foram adaptados extensômetros com sensibilidade de 0,002 mm. Conferiu-se rigorosamente a mesma constante de 0,050 kgf/div aos dois anéis. Os anéis são ajustados aos adaptadores e estes, por sua vez, são fixados aos garfos.

c) Escala em graus (29)

Usada para medir o deslocamento angular da base rotativa (27), onde a parte inferior da célula de cisalhamento é fixada. Tem sensibilidade de 2° e possui um mecanismo de ajustagem o qual não permite movimentos acidentais.

-Sistema de engrenagens:

- a) Engrenagens (18) e alavanca de mudança da relação de transmissão (16) – As velocidades de ensaio são estabelecidas encaixando-se os pares de engrenagens e selecionando-se a posição (A, B, C, D ou E) da alavanca de mudança. São fornecidas seis engrenagens (60 , 36 , 30 , e duas de 45 ). As velocidades permitidas pelo equipamento (no total de 25) são mostradas na tabela III.1.

Tab. III.1 - Velocidades do equipamento de cisalhamento por torção:

VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (graus/min)					
POSIÇÕES DA ALAVANCA DE MUDANÇAS	ENGRENAGENS				
	60-30	54-36	45-45	36-54	30-60
A	60,0	45,0	30,0	20,0	15,0
B	12,0	9,00	6,00	4,00	3,00
C	2,40	1,80	1,20	0,80	0,60
D	0,48	0,36	0,24	0,16	0,12
E	0,096	0,072	0,048	0,032	0,024

PARA CONVERTER graus/min PARA mm/min MULTIPLICAR  
POR 0,742 (DIÂMETRO MÉDIO DA AMOSTRA = 85 mm)

b) Acoplamento das engrenagens (19)

O acoplamento das engrenagens, localizado na parte posterior do equipamento, permite embrear o sistema.

-Sistema de carregamento :

a) Braço de alavanca (3)

Transmite a carga do pendural com uma relação 1:10 à canga de carregamento (7). Foi colocado um nível de bolha para garantir a posição horizontal. Possui na sua extremidade um contrapeso (5) para equilíbrio do sistema de carregamento (interior ao corpo do equipamento)

b) Pendural de carga (4)

Usado para a colocação dos pesos

## c) Estribo (canga) de carregamento (7)

O parafuso de ajuste da canga (8), localizado na barra superior da canga, ajusta a canga ao pino centralizador (40). O pino localiza-se na parte superior da célula (alojado no braço de torque). Foi colocada uma esfera de 5 mm de diâmetro, devidamente lubrificada, entre o parafuso de ajuste da canga (8) e o pino centralizador (40), para reduzir o atrito.

**-Sistema de transmissão de torque :**

## a) Braço de torque (39)

O braço de torque, fixado sobre o "top cap", possui dois pares de encaixes (41) para as hastes transmissoras (13). Os encaixes mais próximos ao centro do "top cap" ampliam a medição do torque.

## b) Hastes transmissoras de torque (13)

O torque transmitido pela amostra é medido nos anéis dinamométricos através de duas hastes (13), que são posicionadas no início do ensaio nos encaixes do braço de torque (41), formando  $90^\circ$  com ele, conforme mostrado na figura III.7. Estas hastes atravessam os orifícios dos garfos (11), onde se localizam apoios de bronze com rolamentos de esfera (14).

**-Sistema de rotação :**

## a) Base rotativa (27)

A base rotativa possui um pino de centragem (28) no qual as partes superior e inferior da célula de cisalhamento são

encaixadas para a realização do ensaio. A rotação imposta pelo motor (23) é transmitida à base rotativa (27) através de um parafuso sem-fim (22) e uma engrenagem tipo coroa (21) (localizadas no interior do corpo do equipamento). O parafuso sem-fim e a engrenagem tipo coroa devem ser devidamente lubrificados (com graxa) periodicamente.

b) Volante manual (20) :

O volante manual, localizado ao lado do painel de controle, permite a rotação manual quando o acoplamento das engrenagens é desconectado.

-Painel de controle (26)

Apresenta um botão de energização do equipamento, um botão para acionamento do sistema de rotação e um fusível.

-Célula de cisalhamento:

A célula de cisalhamento é mostrada nas figuras III.8.a à III.8.c.

a) Parte superior

No "top cap" ou disco superior (38) são fixados o anel poroso superior de bronze sinterizado (37), o braço de torque (39) e o pino centralizador (40).

b) Parte inferior

O disco inferior apresenta uma cavidade anular na qual é fixado o anel poroso inferior de bronze sinterizado (37). Na cavidade anular molda-se o corpo prova.



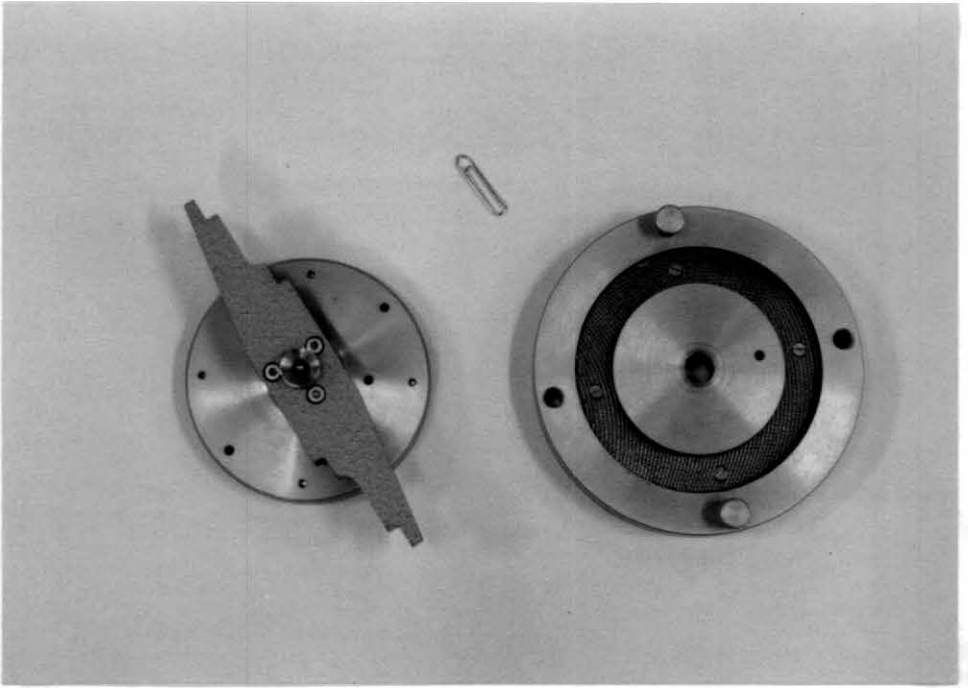


Fig. III.8.a - Célula de Cisalhamento  
(em detalhe o braço de torque)

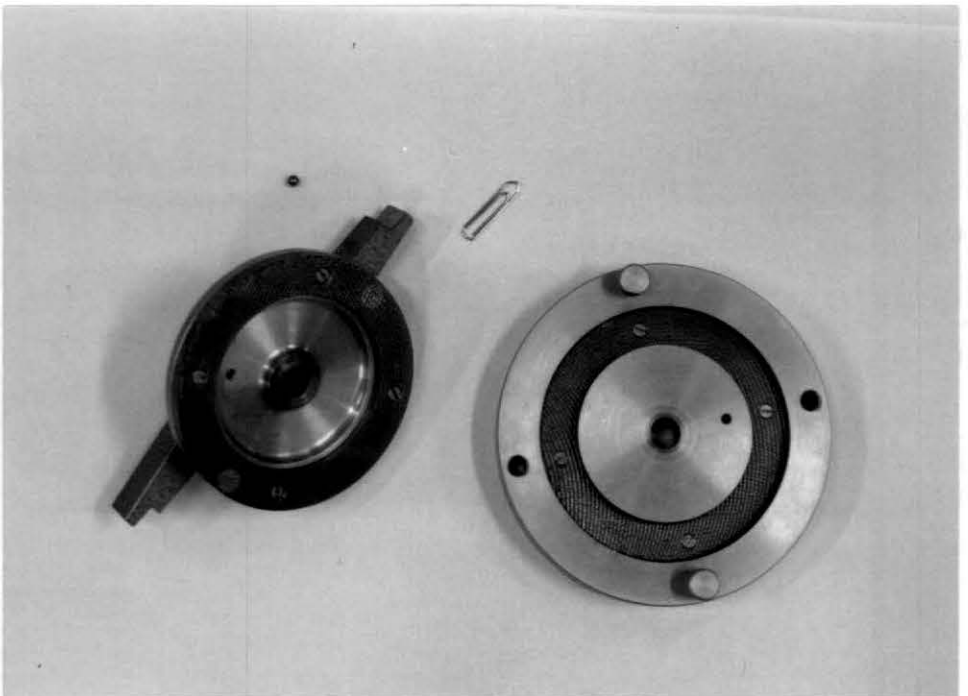
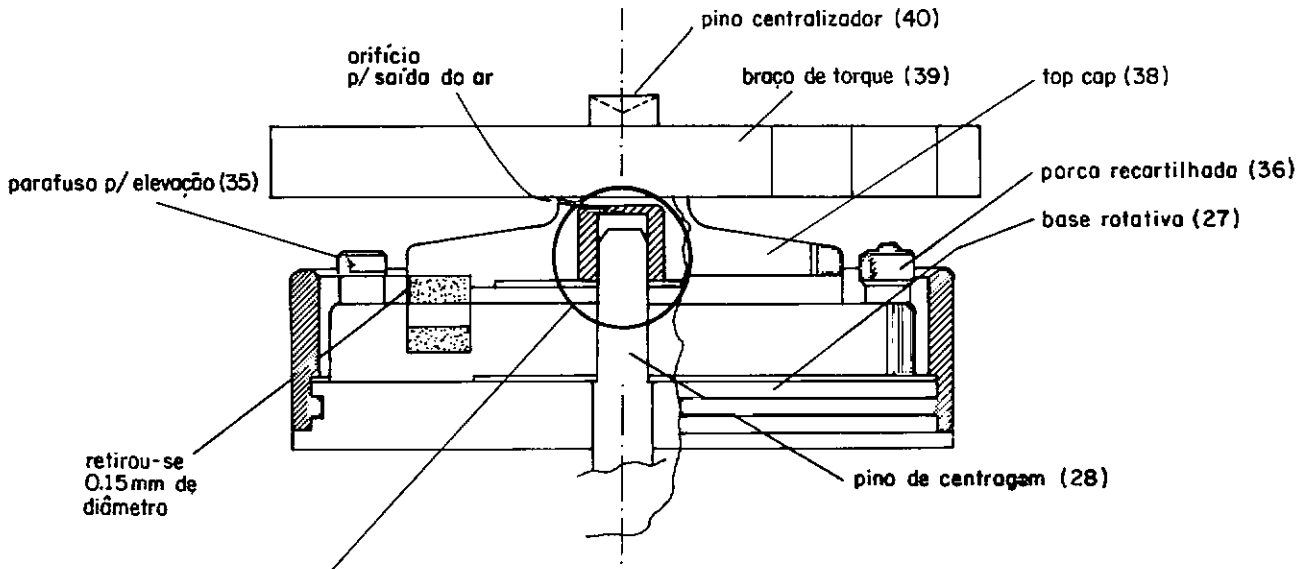
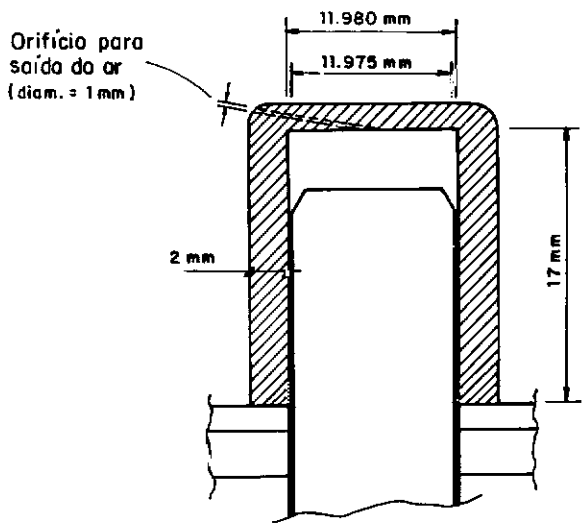
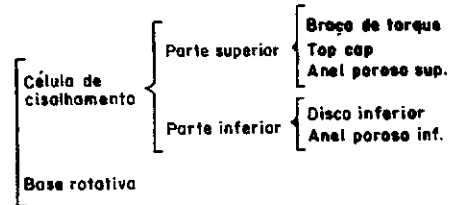


Fig. III.8.b - Célula de Cisalhamento  
(em detalhe o anel poroso superior)



DETALHE A



DETALHE A

Fig. III.8.c - CÉLULA DE CISALHAMENTO E BASE ROTATIVA.

### III.2 - Procedimento de ensaio

#### III.2.1 - Considerações preliminares

A condição residual ocorre após a formação total da superfície de cisalhamento. No processo de formação da superfície de cisalhamento ocorre a mudança na estrutura original da superfície de cisalhamento e das regiões vizinhas a ela. Como se descreveu no item II.2, os valores de resistência residual são similares quando se ensaiam amostras indeformadas, remoldadas ou reconstituídas. Assim sendo, a resistência residual dos solos pode ser determinada utilizando amostras remoldadas ou reconstituídas.

O processo de formação da superfície de cisalhamento está associado à friabilidade ("brittleness") do solo e se manifesta em teores de umidade abaixo do limite de plasticidade (LP). Assim sendo, Bromhead (1986) recomenda que as amostras sejam moldadas em umidades iguais ou abaixo do LP, pois quanto mais úmida a amostra mais material escapa da célula de cisalhamento. O equipamento desenvolvido por Bishop e outros (1971) possui controle de folga entre os anéis superior e inferior, aceitando portanto amostras bem mais úmidas.

Com relação à superfície de cisalhamento, no equipamento IC-NGI esta ocorre aproximadamente à meia altura ( $h/2$ ) da amostra. Entretanto no equipamento de Bromhead o cisalhamento ocorre próximo ao anel superior

onde as partículas estão fortemente orientadas. Conseqüentemente, menores deslocamentos são necessários para se atingir a resistência residual do que no equipamento IC-NGI. Pode-se à primeira vista pensar que equipamentos que utilizam amostras amolgadas não medem corretamente a resistência residual porque o anel superior "derrapa" sobre o solo. Segundo Bromhead (1986), é necessário apenas formar uma superfície de deslizamento em uma camada de argila abaixo da superfície de contato, para permitir a medida da resistência residual, o que é assegurado no presente equipamento no qual o anel superior é aspero comparado com a partícula mineral de argila. Este princípio está bem comprovado através de comparações com resultados de outros equipamentos e com retroanálises.

Como o equipamento de Bromhead ensaia amostras com altura de 5 mm adequa-se à obtenção da resistência residual de solos que passam\* na peneira 40. A respeito de ensaios em solos contendo grãos maiores, Bromhead (1986) menciona a realização de ensaios em mica (crushed mica schist) nos quais obteve concordância de resultados com ensaios realizados com a caixa de cisalhamento direto. Menciona também Bromhead que, ao serem ensaiadas areias neste equipamento de cisalhamento por torção, resultados típicos de  $\phi_{cv}$  (ângulo de atrito a volume constante -

---

\* - Para o equipamento de Bishop e outros (1971) recomenda-se que o material a ser ensaiado apresente diâmetro máximo igual a abertura da peneira n<sup>o</sup> 10 ASTM (2 mm - areia média) ou no máximo 10% de material em peso entre as peneiras n<sup>o</sup> 10 e n<sup>o</sup> 4 ASTM (4,75 mm - areia grossa) - CESP/MSL-16.

estado crítico) foram encontrados.

O procedimento de ensaio descrito a seguir baseia-se na metodologia proposta por Bromhead (1979, 1986), no procedimento de ensaio usado na Universidade de Surrey, na disciplina de ensaios de laboratório (Clayton, 1989), e no manual da Wykeham Farrance relativo ao equipamento. Além disso, foram incluídos nesta descrição comentários e observações da autora da presente dissertação.

### III.2.2 - Descrição da técnica de multiestágio

#### a) MOLDAGEM

De acordo com Bromhead (1986) a amostra reconstituída com umidade igual ou inferior ao LP deve ser colocada na célula pressionando com os dedos ou com auxílio de uma espátula e em seguida arrasada e nivelada com o auxílio de uma régua. Não é prejudicial que o processo de arrasamento induza alguma orientação nas partículas minerais.

#### b) FORMAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE CISALHAMENTO

A formação da superfície de cisalhamento, realizada durante o primeiro estágio de carga (no presente trabalho  $\sigma_n = 50$  kPa), pode ser feita ajustando a máquina a uma velocidade de cisalhamento mais alta (Bromhead, 1986). Bromhead (1986) realizou ensaios com aquisição de dados automatizada e demonstrou que as condições residuais são atingidas se a velocidade é ajustada de forma a permitir 3 revoluções entre a noite e a manhã do dia seguinte (aprox.  $1^0$ /min). Verificou também que ao continuar o deslocamento

a velocidades lentas o decréscimo da resistência era desprezível.

Alternativamente pode-se proceder à 1 a 3 rotações manuais (dependendo da quantidade de solo que escapa da célula de cisalhamento) com o volante (Clayton, 1989). Observa-se entretanto que altas velocidades de cisalhamento podem causar maior escape de material que o aceitável. Para que se permita a devida drenagem é necessário um período de baixa velocidade de cisalhamento para a obtenção da resistência residual correta.

A rotina de ensaios da Kingston Polytechnic e da Universidade de Surrey recomenda, de maneira conservativa, começar o ensaio no final da tarde, à velocidade de  $0,048^\circ/\text{min}$  (justificada no item c a seguir), observar somente no seu início e fazer a leitura do valor atingido na manhã seguinte, conforme mostrado no estágio 1 da figura III.9.

#### c) VELOCIDADE A ADOTAR NO ENSAIO

Kenney (1967) realizou ensaios variando a velocidade de  $0,0170 \text{ mm/min}$  a  $0,0024 \text{ mm/min}$ , concluindo que esta apresenta influência desprezível na resistência residual. Ramiah e outros (1970) ao estudarem a influência da velocidade de deslocamento de  $60 \text{ mm/min}$  para  $0,02 \text{ mm/min}$  na resistência residual de amostras de silte argiloso concluíram que a influência da velocidade é desprezível. No trabalho de La Gatta (1970) foi demonstrado que para o folhelho Cucaracha um aumento na velocidade de

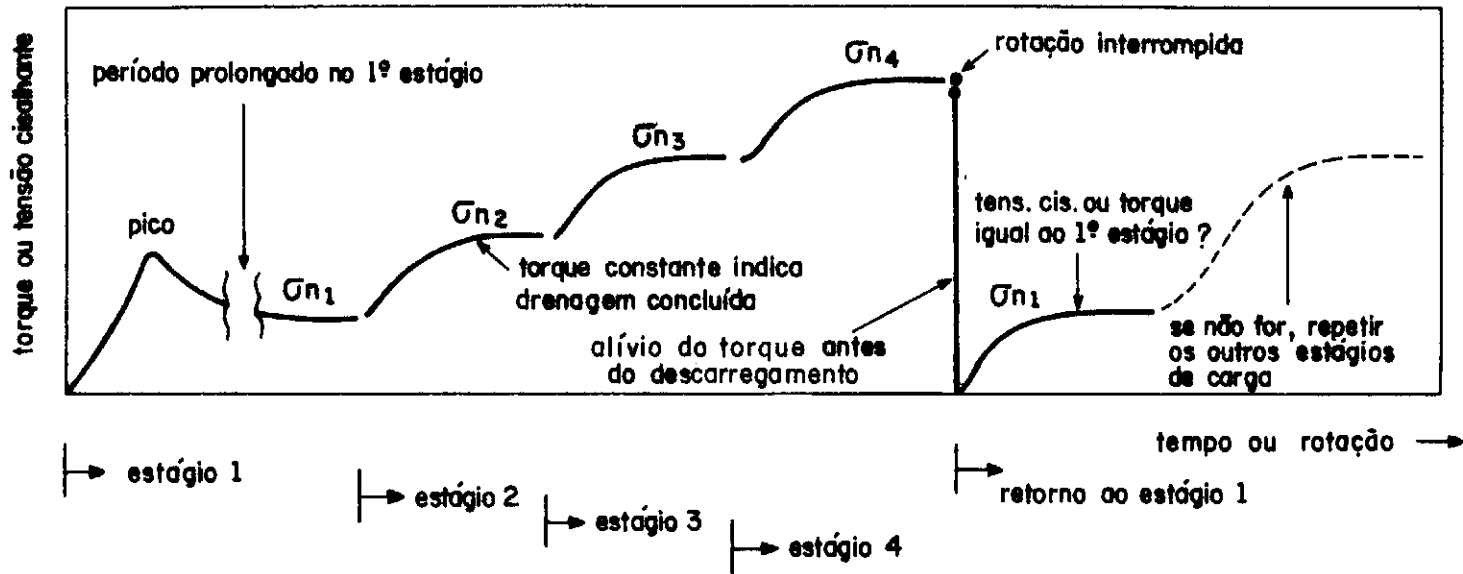


Fig. III.9 - TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO.  
(BROMHEAD, 1986)

deslocamento de 0,006 mm/min para 0,600 mm/min ocasiona um aumento na resistência residual de 3,5%.

Skempton (1985) estudou a influência de baixas velocidades de deslocamento na resistência residual dos solos. Reunindo a seus dados os obtidos por outros autores, como Petley (1966) e Lupini (1980), Skempton verificou que tomando-se como referência a velocidade de 0,005 mm/min e a resistência correspondente e variando a velocidade de 0,5 mm/min a 0,00005 mm/min (100 vezes maior e 100 vezes menor que a velocidade de referência) a variação da resistência residual é menor que 2,5 % por ciclo logarítmico, conforme mostra a figura III.10. Para velocidades usuais de laboratório, de 0,002 a 0,010 mm/min esta variação é desprezível.

Para altas velocidades, segundo Skempton (1985), uma vez atingida a condição residual, e aumentando-se a velocidade de ensaio (de 0,01 mm/min para 100 mm/min e de 0,01 mm/min para 400 mm/min) verifica-se um ganho de resistência. Skempton atribui este ganho à perturbação na orientação das partículas e à geração de poro-pressões negativas. O aumento da tensão normal efetiva ( $\sigma'_n$ ) acarreta um aumento da tensão cisalhante ( $\tau$ ) mobilizada, e assim a relação  $\tau/\sigma'_n$  aumenta, já que a tensão normal total ( $\sigma_n$ ) não varia. No entanto, ao se continuar o deslocamento as poro-pressões são dissipadas e a condição residual é reestabelecida.

Estudos realizados por Lupini (1980) demonstraram que



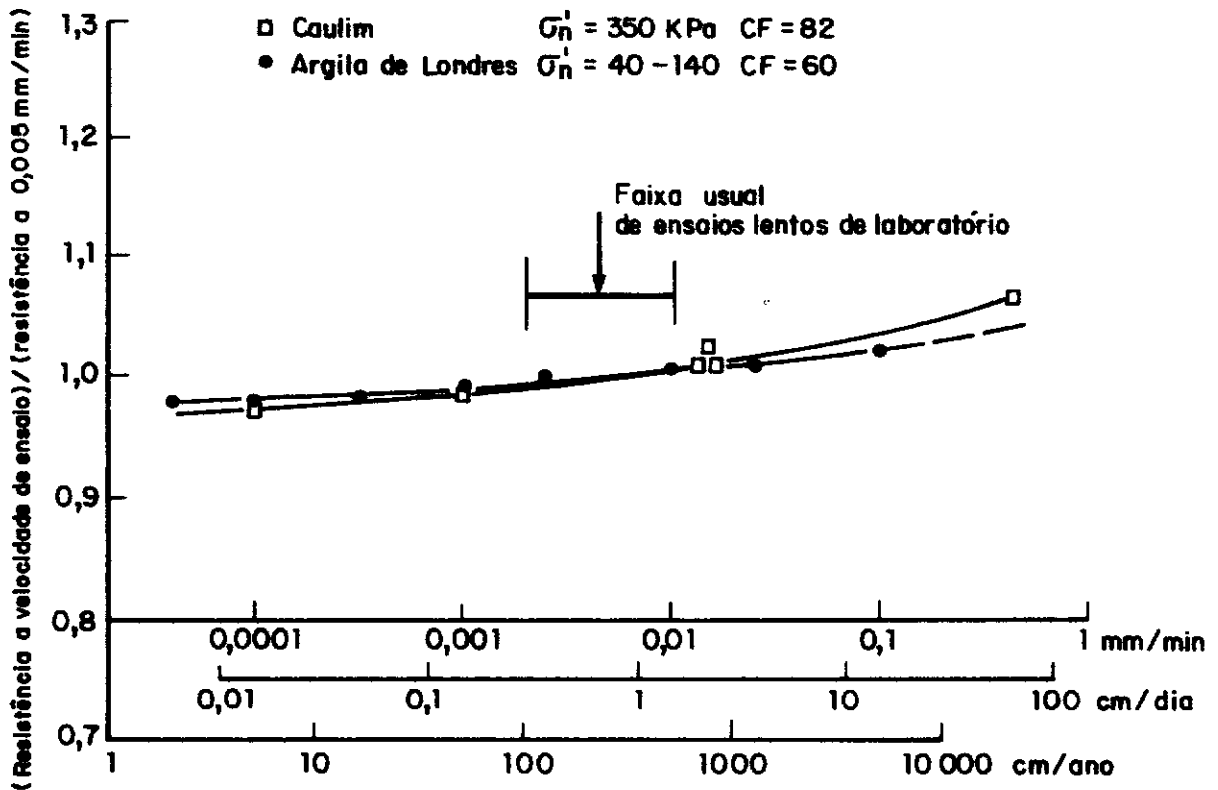


Fig. III.10 - VARIACÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL COM A VELOCIDADE DE ENSAIO.  
 (SKEMPTON, 1985)

velocidades inferiores a  $1^\circ/\text{min}$  ( $0,873 \text{ mm}/\text{min}$ ), em equipamentos de  $100 \text{ mm}$  de diâmetro, para solos argilosos em geral, os valores da resistência residual não são influenciados. Assim sendo a Universidade de Surrey (Clayton, 1989) utiliza a velocidade de  $0,048^\circ/\text{min}$  ( $0,036 \text{ mm}/\text{min}$ , em equipamentos de  $85 \text{ mm}$  de diâmetro), como velocidade recomendável de ensaio, estando esta a favor da segurança. Adotou-se no presente estudo a velocidade nominal do equipamento de  $0,048^\circ/\text{min}$ , correspondendo a velocidade real média de  $0,0498^\circ/\text{min}$  ( $0,0370 \text{ mm}/\text{min}$ ).

Uma rápida avaliação da sensibilidade à velocidade pode ser feita desligando-se a máquina, conforme mostra a figura III.9. Se a amostra preservar o torque aplicado, o solo é "insensível" e o resultado pode ser julgado satisfatório. Se houver redução apreciável no torque (considerou-se admissível 5%), esta é uma indicação que a velocidade de ensaio deve ser diminuída (uma hora é o bastante para esta verificação).

#### d) TEMPO ESTIMADO PARA CADA ESTÁGIO

Segundo Gibson e Henkel (1954) e Bishop e Henkel (1976), o tempo  $t$  necessário para 95% de dissipação de poro-pressão gerada, para uma amostra drenada nas duas faces extremas, é dada por:

$$t = \frac{20}{3} \frac{h_d^2}{c_v} \quad (\text{III.1})$$

onde  $h_d$  é a altura de drenagem.

Como no caso do equipamento de cisalhamento por torção de Bromhead, a altura ( $2 h_d$ ) da amostra é 5 mm, tomando-se o exemplo de Bromhead (1986), um  $c_v = 1 \text{ m}^2/\text{ano} = 3,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , que é um valor típico para argilas plásticas (a argila do Sarapuí - LL  $\cong$  130 % ; IP  $\cong$  60 % - tem  $c_v$  (n.a.)  $\cong$   $1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ), obtém-se  $t = 22 \text{ min}$ .

Por esta razão, o procedimento padrão para a medida de resistência residual requer que o torque transmitido através da amostra permaneça razoavelmente constante por cerca de meia hora. Como a dissipação de poro-pressão pode ser realizada durante o cisalhamento, o procedimento recomendado (Bromhead, 1986) é começar a cisalhar tão logo a carga normal seja aplicada.

Segundo Bromhead (1986), os estágios de carga subsequentes ao primeiro (no qual a superfície de cisalhamento é inicialmente formada) requerem cerca de uma hora para atingir a condição residual. Este tempo considera cerca de 1/2 hora para mobilização da tensão cisalhante e cerca de 1/2 hora para dissipação da poro-pressão, nem sempre verificado nos ensaios da presente pesquisa, obtendo-se a condição residual para certos estágios de carga apenas após 2 horas.

Para determinar o deslocamento necessário para se atingir a resistência residual, Bishop e outros (1971) recomendam plotar a curva tensão cisalhante versus o deslocamento, este último na escala log. Este procedimento entretanto, se mostrou desnecessário para o presente

estudo, tendo em vista que menores deslocamentos são necessários para se atingir a condição residual com o equipamento de Bromhead. Adicionalmente verificou-se que prolongando-se o ensaio até cerca de 27 horas, a variação do ângulo de atrito residual foi apenas de  $1/2^\circ$ ; com o conseqüente maior escape de material da célula de cisalhamento.

#### e) PROCEDIMENTO CORRETO PARA O DESCARREGAMENTO

Se após o final dos estágios de carga procede-se ao descarregamento, a energia armazenada no sistema de medição do torque causa uma perturbação na amostra, no sentido contrário ao cisalhamento, causando desalinhamento das partículas na superfície de cisalhamento (os mecanismos para este efeito não estão completamente compreendidos; Bromhead, 1986).

Assim, desejando-se refazer a medida da resistência residual do primeiro estágio de carga (no presente trabalho  $\sigma_n = 50$  kPa), como proposto por Bromhead (1986), é necessário aliviar o torque antes de descarregar a amostra. Com este procedimento algum distúrbio pode ainda ser introduzido pelo descarregamento, mas de magnitude tal que mais meia hora de ensaio consegue reestabelecer a condição residual drenada com boa acurácia (fig.III.9).

Dependendo da curvatura apresentada pela curva  $\tau_r/\sigma'_r$  versus  $\sigma'_n$  no trecho inicial (abaixo de  $\sigma'_n = 200$  kPa), o recarregamento poderá ser com o mesmo  $\sigma'_n$  do primeiro estágio (estágio de formação da superfície de

cisalhamento), caso esta curvatura não seja acentuada, conforme mostrado na figura III.11 (Bromhead, 1986). Caso esta curvatura seja acentuada, são necessários outros estágios de carga (fig.III.11). Como no presente trabalho a repetibilidade foi considerada um parâmetro importante de avaliação da qualidade do ensaio em multiestágio, todos estes retornaram ao carregamento inicial ( $\sigma_n = 50$  kPa).

#### f) CÁLCULOS

Como já estudado por Bishop e outros (1971) assume-se, para este tipo de ensaio, que a tensão cisalhante ( $\tau$ ) e a tensão normal ( $\sigma_n$ ) são distribuídas uniformemente no plano de cisalhamento.

- tensão normal ( $\sigma_n$ )

$$\sigma_n = \frac{P}{\pi(R^2 - r^2)}$$

onde:

P = força vertical sobre a amostra, isto é,  
10 vezes a carga do pendural mais o peso do  
top cap

R = raio externo da amostra

r = raio interno da amostra

- deslocamento linear médio ( $\bar{D}$ )

$$\bar{D} = \theta \bar{r}$$

onde:

$\theta$  = deslocamento angular (rad)

$\bar{r}$  = raio médio (mm)

sendo:

$$\bar{r} = \frac{R + r}{2}$$

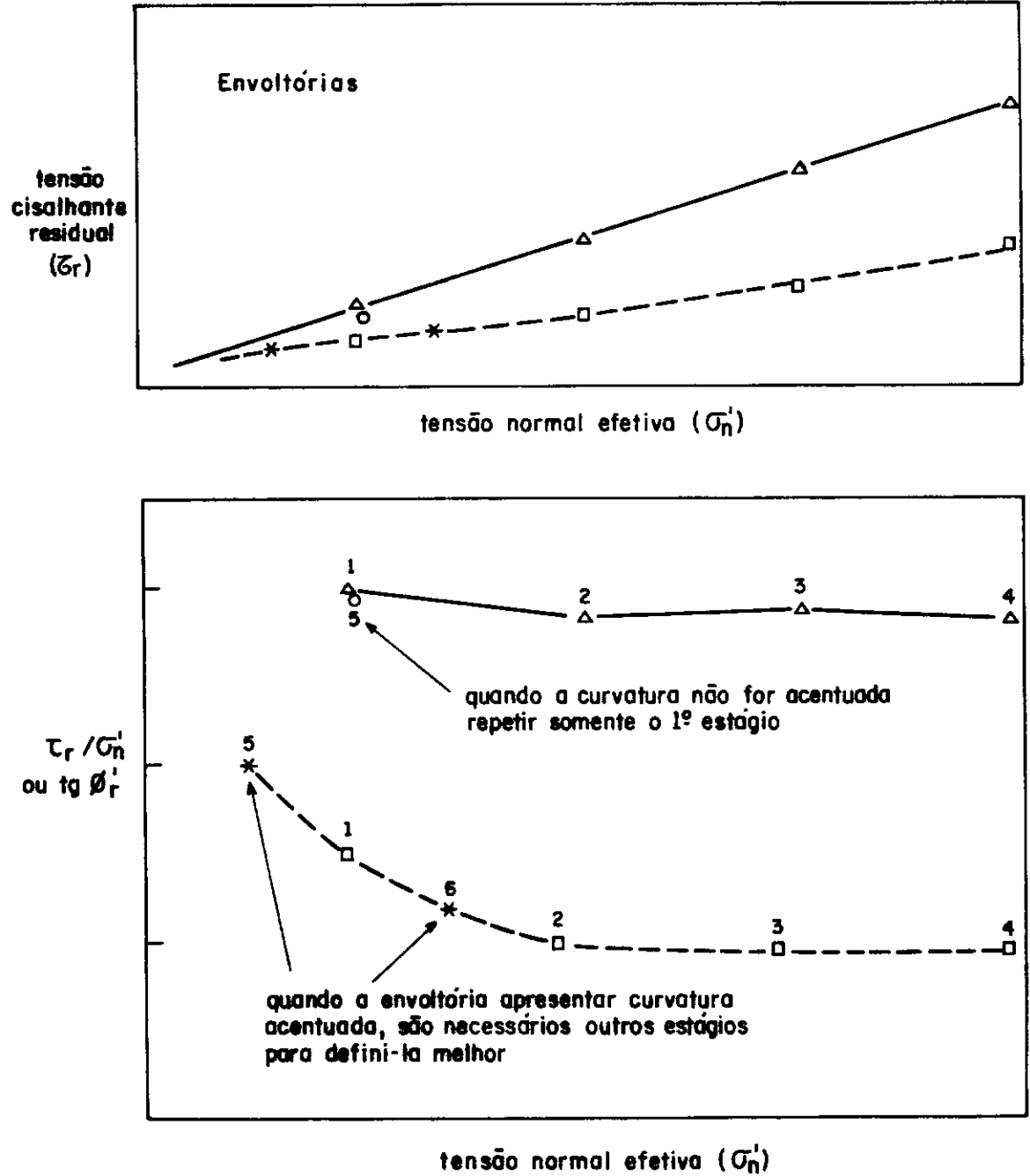


Fig. III.11 - CURVAS TÍPICAS DE RESISTÊNCIA RESIDUAL.  
(BROMHEAD, 1986)

- deslocamento linear médio corrigido ( $\bar{D}_c$ )

$$\bar{D}_c = \bar{D} - d$$

onde:

$d$  = correção devido à compressão dos anéis  
dinamométricos (mm)

sendo:

$$d = \frac{(A + B) F_e \bar{r}}{2 R_b}$$

onde:

$A$  = leitura do anel A (divisões)

$B$  = leitura do anel B (divisões)

$F_e$  = constante dos extensômetros (mm/div),  
admitida a mesma para os dois anéis

$R_b$  = raio do braço do torque (mm)

- torque (T)

$$T = \frac{(A \cdot F_a + B \cdot F_a) L}{2}$$

onde:

$T$  = torque (N.mm)

$F_a$  = constante dos anéis dinamométricos (N/div),  
admitida a mesma para os dois anéis

$L$  = comprimento efetivo do braço de torque (mm)

- tensão cisalhante  $\tau$  (kPa)

considerando-se  $\tau$  constante pode-se demonstrar  
que:

$$\tau = \frac{3 T}{2\pi(R^3 - r^3)}$$

$$\tau = \frac{3(A + B)L \cdot F_a}{4\pi(R^3 - r^3)} \cdot 10^3$$

### III.2.3 - Descrição da técnica de único estágio

A técnica de único estágio utiliza uma amostra para cada tensão normal aplicada. Seu procedimento segue as etapas a,b,c,f descritas no item anterior (III.2.2).

### III.2.4 - Ensaio preliminares para ajustes no equipamento

Tendo em vista proceder a ajustes no equipamento, foram realizados cerca de cinco ensaios preliminares com a técnica de multiestágio. O solo utilizado nesses ensaios foi um caulim com as seguintes características: LL = 30%, IP = 6% e fração argila = 10%.

O primeiro ensaio realizado resultou em deslocamentos e torques irregulares. Um exame do problema indicou que o fabricante havia montado o rolamento de esfera de contato angular de maneira invertida. O segundo ensaio resultou em torque medido de forma oscilante, conforme apresentado na figura III.12. Observou-se que a causa desta oscilação era o atrito desenvolvido entre a borda externa do anel drenante superior (figura III.8.c) com o disco inferior da célula. Resolveu-se então retirar 0,10 mm no raio externo do anel poroso superior. O ensaio III subsequente demonstrou uma melhoria substancial nos resultados, conforme visto na figura III.13. Foram entretanto observadas ainda algumas pequenas oscilações no torque medido e para  $\sigma_n = 50$  kPa observaram-se discrepâncias nos torques medidos no carregamento e recarregamento, conforme pode-se observar na figura III.13.b.



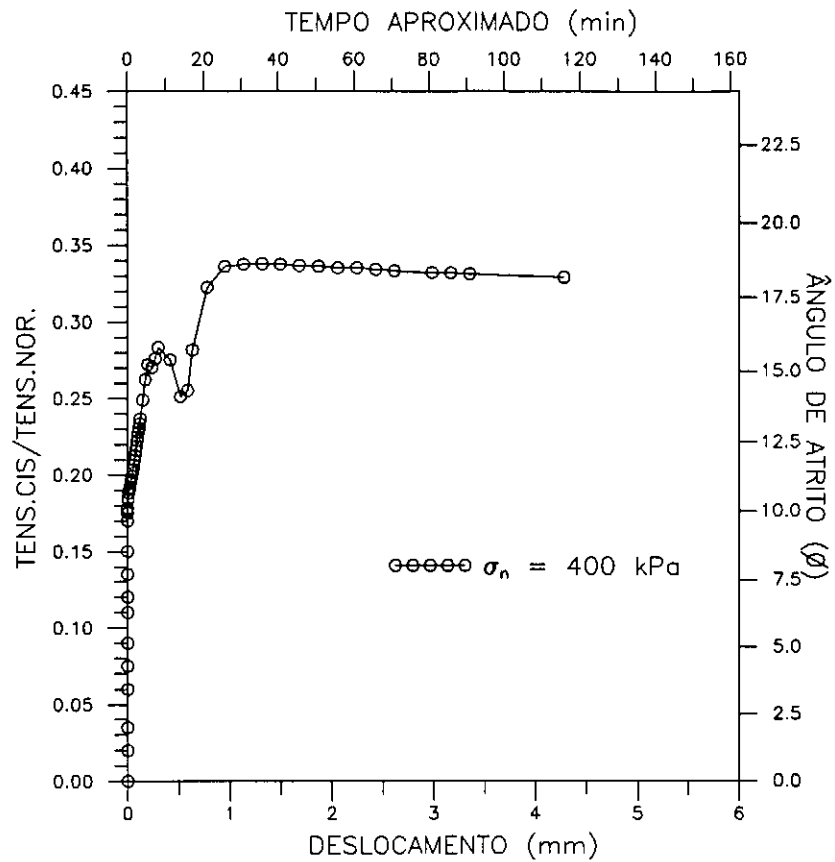
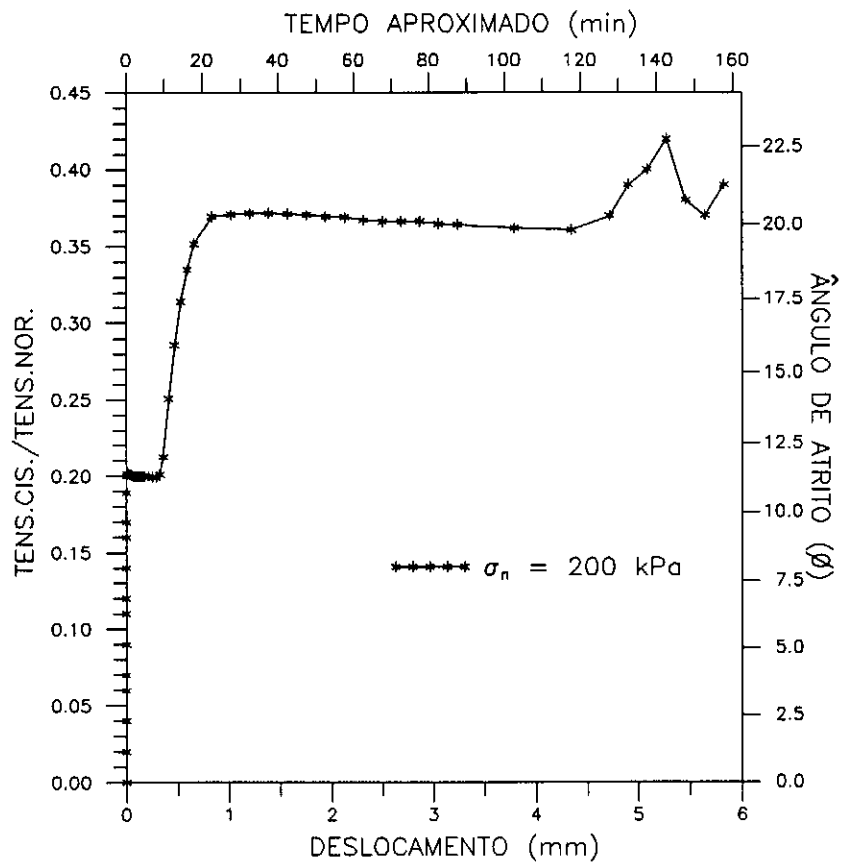
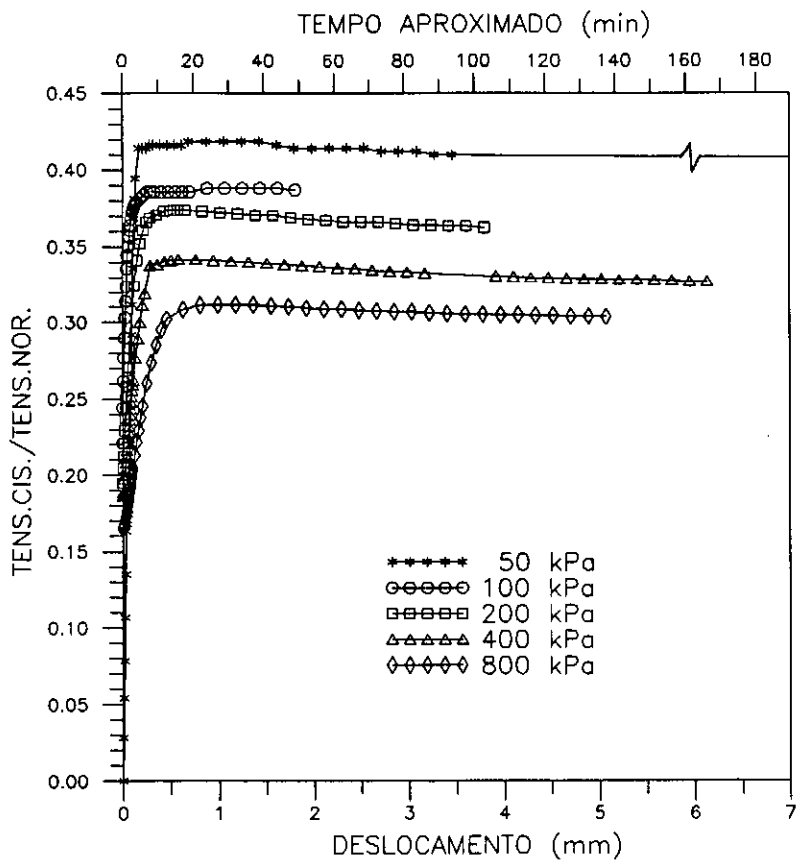
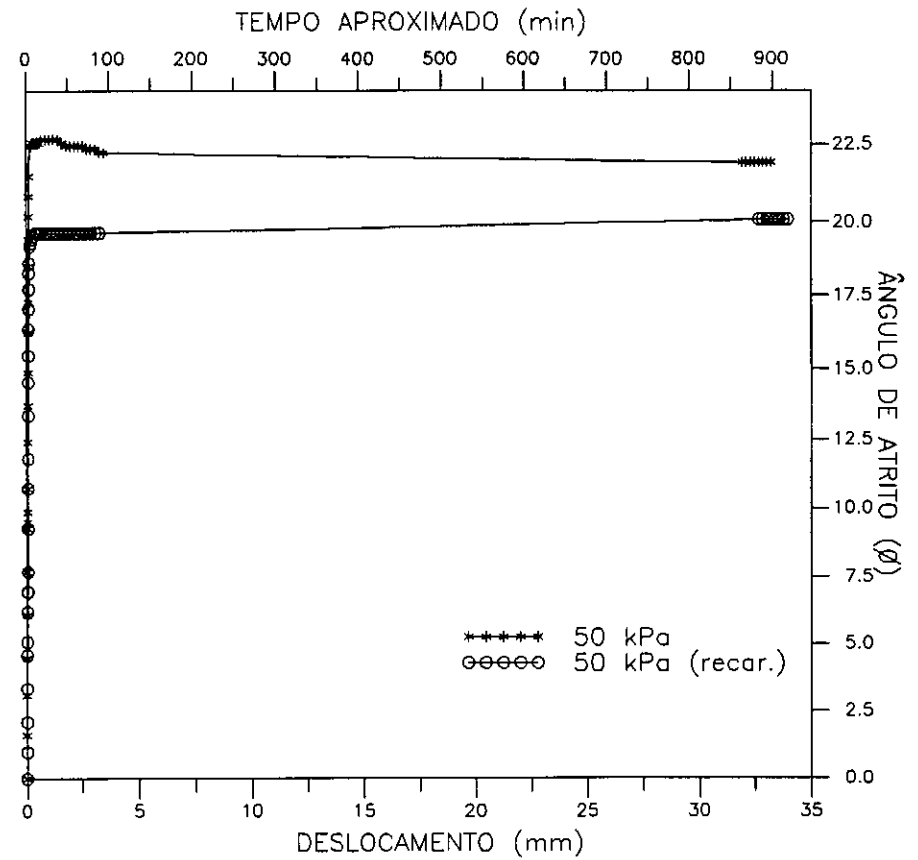


Fig.III.12 - ENSAIO II PRELIMINAR COM 100% DE CAULIM



a) carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.



b) carregamento e recarregamento a tensão normal de 50 kPa.

Fig.III.13 - ENSAIO III PRELIMINAR COM 100% DE CAULIM

Tendo em vista as considerações acima resolveu-se retirar ainda 0,05 mm do raio externo do anel poroso superior. Os resultados do ensaio IV são apresentados na figura III.14, onde se observa a melhoria nos resultados obtidos. O pequeno aumento de tensão apresentado na figura III.15 no recarregamento a  $\sigma_n = 50$  kPa era decorrente ainda de uma pequena folga entre o pino de centragem de aço e o encaixe do "top cap", procedeu-se então a um embuchamento do encaixe do "top cap", substituindo-se parte desta peça de bronze por latão (ver fig.III.8.c, detalhe a). Com essas alterações o equipamento passou a apresentar bons resultados, os quais serão apresentados no capítulo IV.

### III.2.5 - Um exemplo de procedimento inadequado de ensaio

Em um dos primeiros ensaios realizados logo após o ajuste do equipamento não se efetuou o completo desenroscamento do parafuso limitador de curso do braço de alavanca (n<sup>o</sup> 6 na fig.III.4). Assim sendo, após a aplicação do carregamento correspondente à formação da superfície de cisalhamento ( $\sigma_n = 50$  kPa) ocorreram recalques durante a noite, acarretando assim que o braço de alavanca se apoiasse no parafuso. Este fato causou um alívio de carga e conseqüente diminuição de tensão normal e da tensão cisalhante correspondente, conforme visto na figura III.16.a), além de perturbar a superfície de cisalhamento. Esta indicação foi confirmada quando procedeu-se ao recarregamento a  $\sigma_n = 50$  kPa, tendo em vista que as tensões cisalhantes obtidas não foram

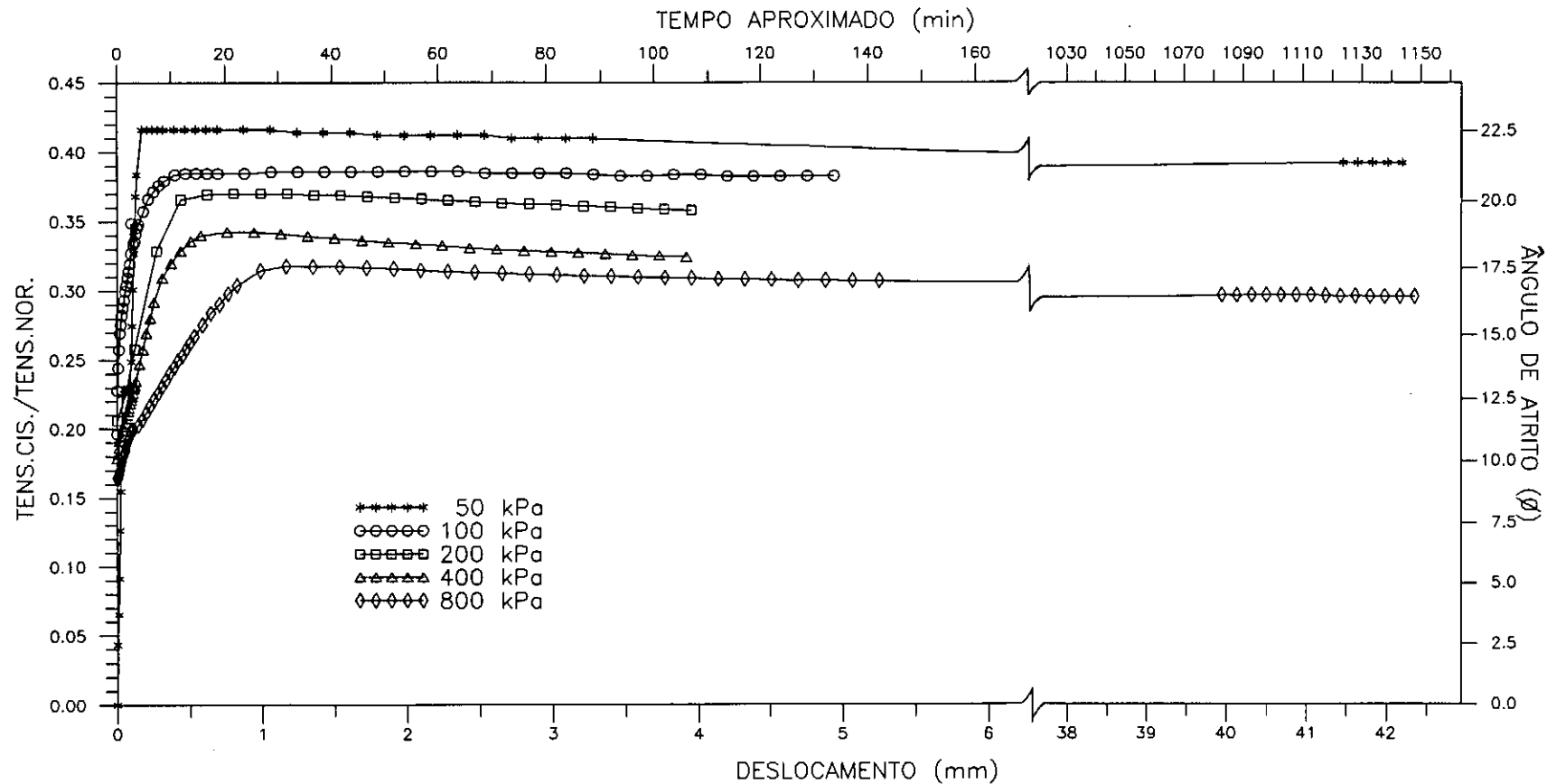
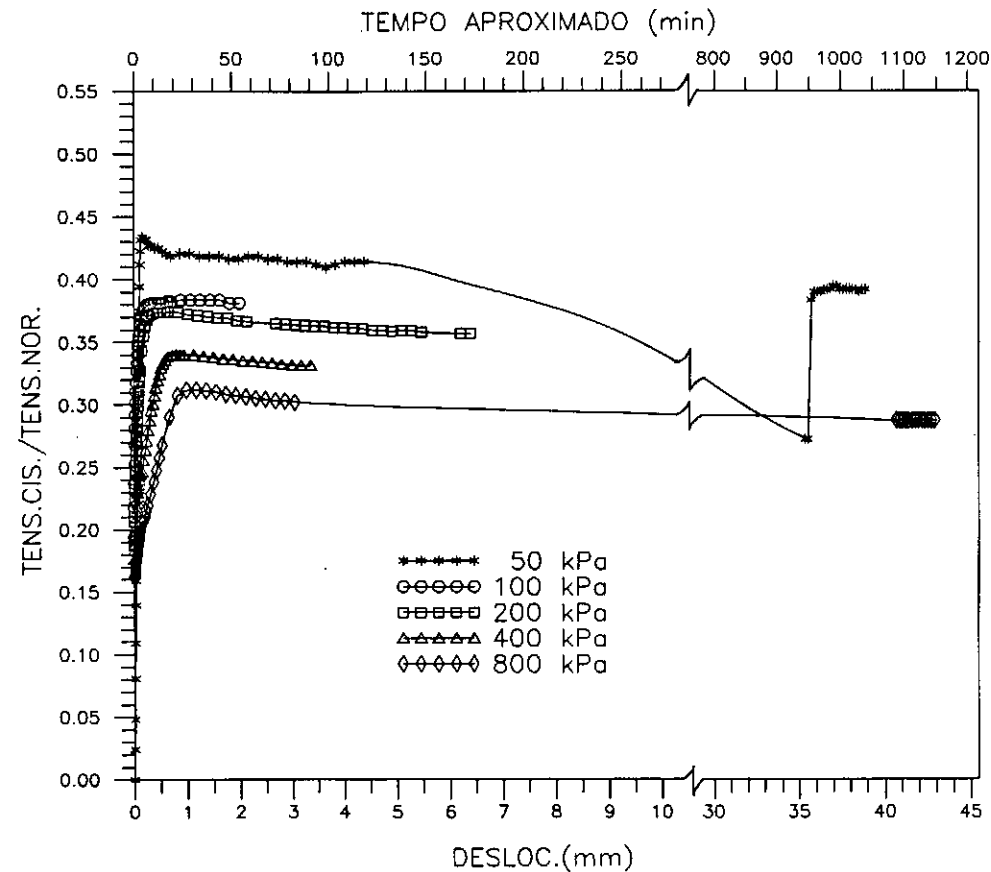
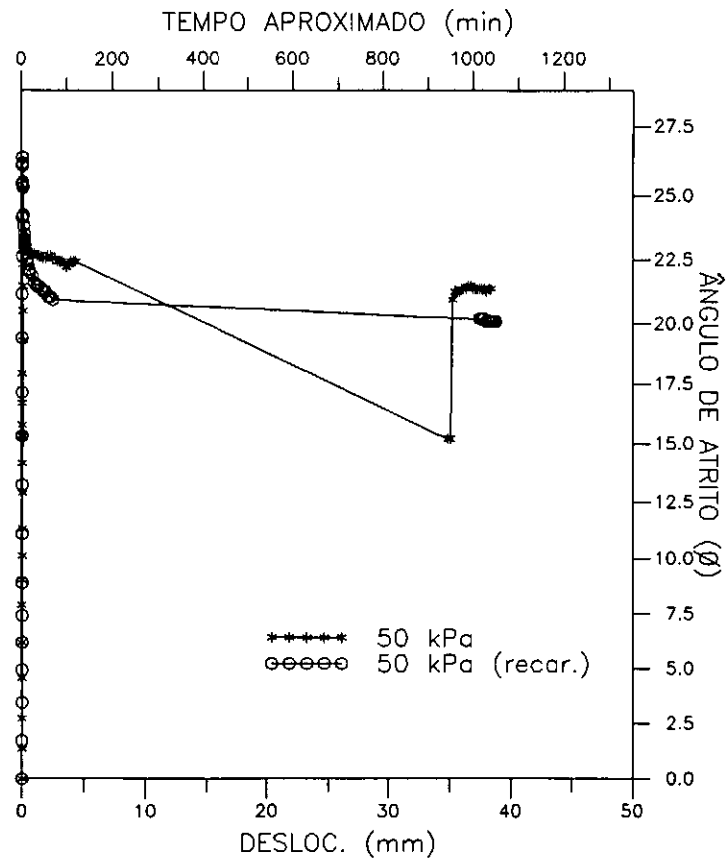


Fig.III.14 - ENSAIO IV PRELIMINAR COM 100% DE CAULIM - carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.





a) carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.



b) carregamento e recarregamento a tensão normal de 50 kPa.

Fig.III.16 - ENSAIOS COM 100% DE CAULIM -  
-procedimento inadequado.

concordantes, conforme visto na figura III.16.b. Este procedimento inadequado foi corrigido nos demais ensaios.

### III.3 - Descrição do equipamento de cisalhamento direto com interface polida

O equipamento de cisalhamento direto usado no presente trabalho é mostrado nas figuras III.17 e III.18. Como o programa de ensaios incluiu ensaios com reversão, o equipamento foi adaptado para este fim, visto que não veio da fábrica pronto para realizar reversões. Implementou-se também neste equipamento o sistema de aquisição de dados automatizado, mostrado na figura III.19.

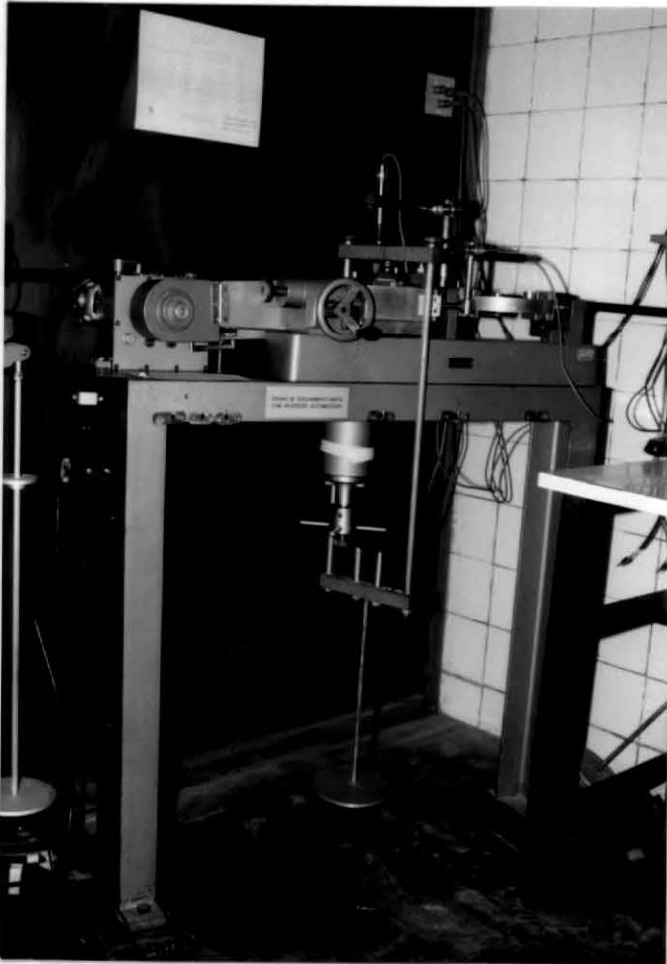


Fig. III.17 - Vista Frontal do Equipamento de Cisalhamento Direto com Reversão

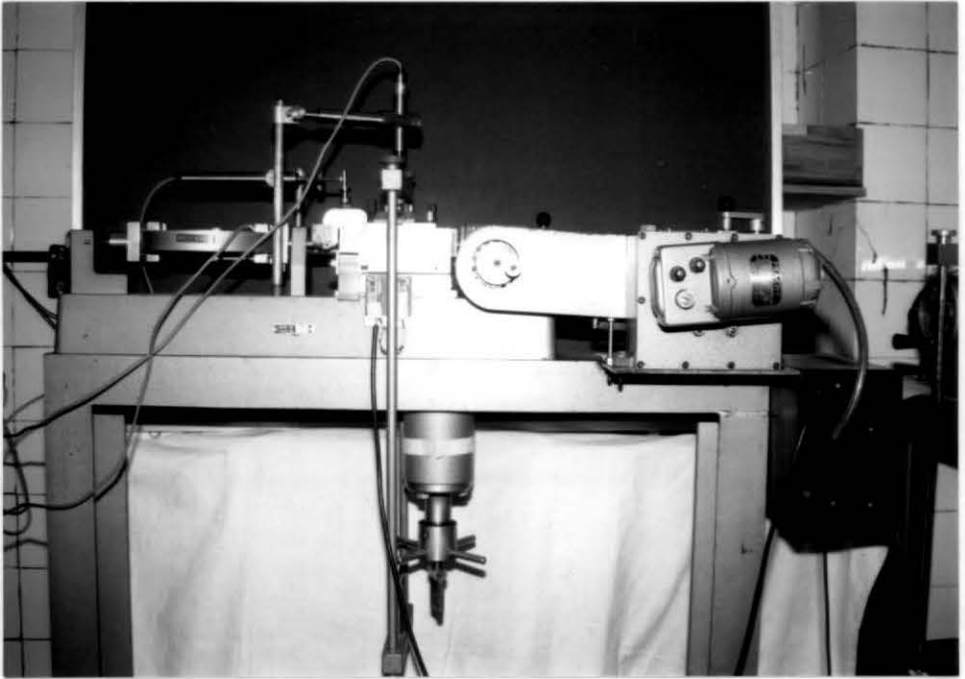


Fig. III.18 - Vista Posterior do Equipamento de Cisalhamento Direto com Reversão

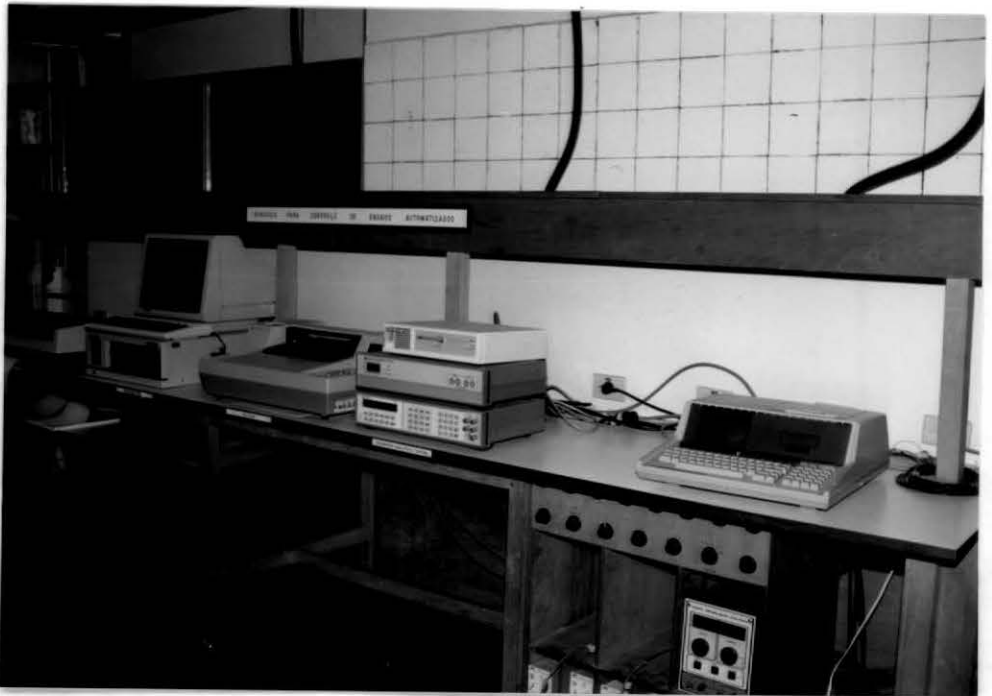


Fig. III.19 - Sistema Automatizado de Aquisição de Dados e de Controle de Ensaios



Como o equipamento de cisalhamento direto é de uso rotineiro nos laboratórios brasileiros e é descrito em detalhes por vários autores (e.g., Head, 1982, 1989), este não será detalhado no presente trabalho, sendo apresentado apenas de forma esquemática na figura III.20, na página seguinte.

Para a execução dos ensaios utilizou-se a caixa quadrada de 6 x 6 cm. A metade inferior da caixa foi preenchida com uma placa de aço polido, conforme mostrado na figura III.21. A localização do plano de cisalhamento não interfere na determinação de resistência residual (Chandler e Hardie, 1989).

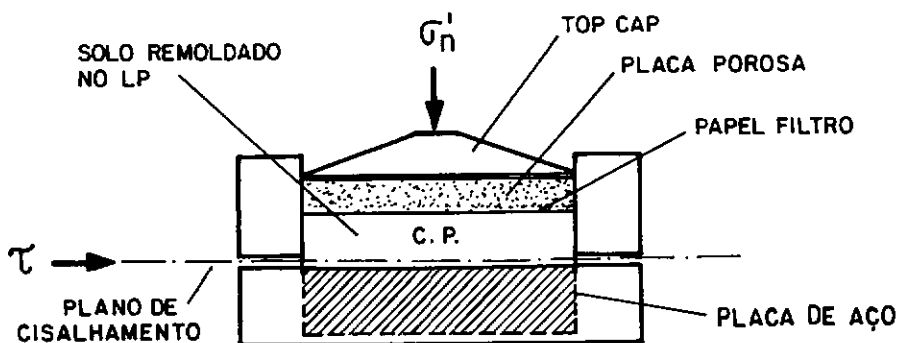


Fig. III.21- Representação Esquemática da Caixa de Cisalhamento Direto com Interface Polida.

### III.4 - Procedimento de ensaio

#### III.4.1 - Considerações preliminares

O desenvolvimento de estudos a respeito da resistência de contatos solo-rocha empregados, dentre

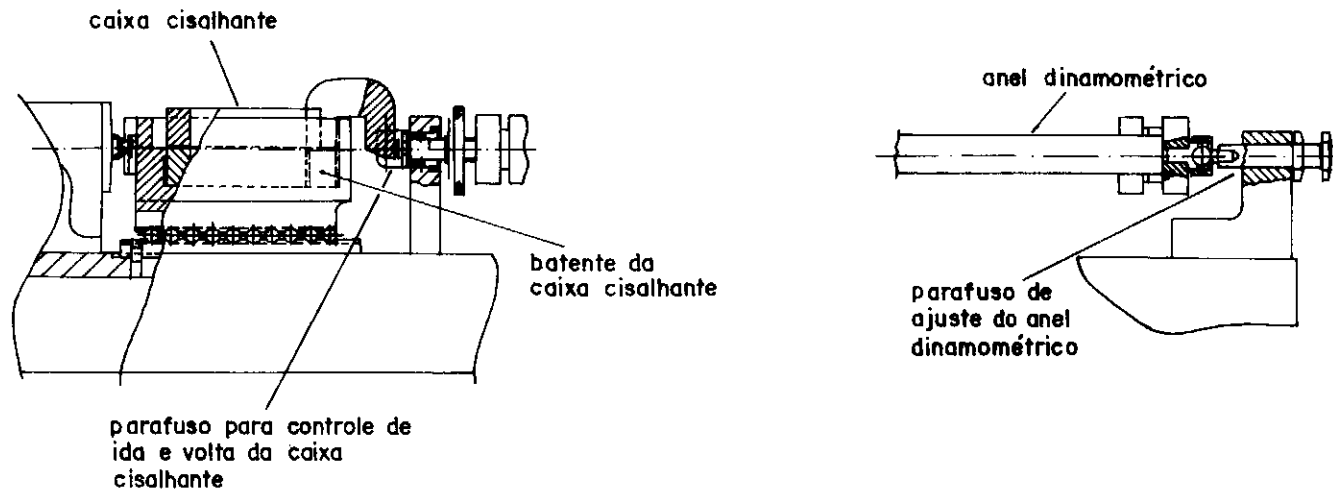
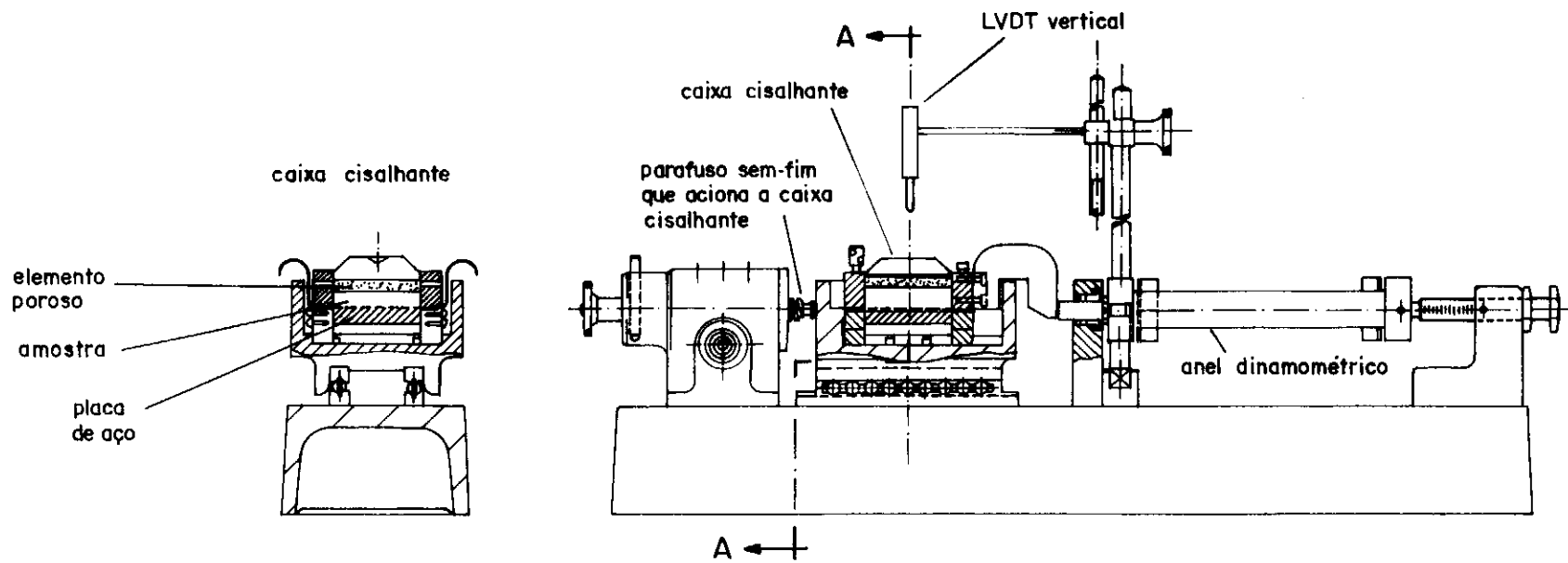


Fig. III. 20 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO COM REVERSÃO.

outros problemas geotécnicos, a análise de estabilidade de maciços rochosos com descontinuidades preenchidas por solos, coloca a resistência residual como um parâmetro de projeto de grande importância. Kanji (1970, 1972) comprovou a suposição de Patton (1968) de que a resistência de pico do solo para interface solo-rocha era inadequada como parâmetro de projeto.

Decorrente dos diversos tipos de ensaios realizados por Kanji (1974a, 1974b) e Kanji e Wolle (1977) com a caixa de cisalhamento direto, cujos resultados já foram mencionados no item II.2, surgiu o método de ensaio de cisalhamento direto com interface polida para a determinação da resistência residual. De acordo com as observações destes autores, a superfície lisa facilita a orientação de partículas lamelares próximas a ela (uma camada de cerca de 5 a 10  $\mu\text{m}$ ; Wolle, 1975).

#### III.4.2 - Descrição das etapas de ensaio

##### a) MOLDAGEM

Com a finalidade de comparar os resultados com os obtidos nos ensaios de cisalhamento por torção, os corpos de prova foram moldados no LP com água deionizada, utilizando moldadores que garantissem a altura de 10 mm para os ensaios iniciais e 5 mm para os subsequentes (nos ensaios convencionais os corpos de prova têm cerca de 20 mm de altura). A moldagem foi feita com o auxílio de uma espátula, tendo o cuidado de evitar a formação de

vazios no corpo de prova.

b) COLOCAÇÃO DO CORPO DE PROVA NA CAIXA DE CISALHAMENTO.

Com a caixa de cisalhamento montada (metade superior aparafusada à metade inferior), a metade inferior contendo a placa de aço polida, o moldador foi posicionado e, com o auxílio do soquete, a amostra foi introduzida na caixa.

c) COLOCAÇÃO DOS ELEMENTOS DRENANTES

Sendo o caulim um material siltoso, de grãos muito finos, antes da colocação da placa porosa superior, colocou-se um papel filtro Whatman n<sup>o</sup> 54 umidecido, para evitar a perda de solo para dentro da placa porosa. O papel filtro molhado molda-se à forma da superfície da placa porosa, não alterando a rugosidade da superfície de contato entre o solo e o elemento drenante (Kenney, 1967). Nos ensaios realizados por Chandler e Hardie (1989) as placas porosas foram colocadas diretamente em contato com o solo.

d) ADENSAMENTO

Como a fase de adensamento fez uso do sistema de aquisição automatizado, as curvas  $\delta \times \sqrt{t}$  foram plotadas simultaneamente à execução do ensaio. Notou-se que a fase de adensamento primário se dava em tempo relativamente pequeno (cerca de 5 min) devido à pequena altura dos

corpos de prova. Os corpos de prova foram inundados desde o início do adensamento.

e) VELOCIDADE DE CISALHAMENTO E DESLOCAMENTO PERMITIDO.

As amostras foram cisalhadas à velocidade nominal do equipamento de 0,0146 mm/min, correspondendo à velocidade real média de 0,0098 mm/min (o deslocamento relativo das metades da caixa foi obtido com uso de um transdutor resistivo de deslocamento). O deslocamento máximo permitido foi de aproximadamente 7 mm (Head, 1982) e a separação entre as metades da caixa de 0,5 mm.

Pretendeu-se utilizar a mesma velocidade dos ensaios de cisalhamento por torção (0,0370 mm/min), entretanto o presente ensaio de cisalhamento direto apresenta apenas uma camada drenante, sendo assim necessário diminuir a velocidade, a fim de permitir condições semelhantes de dissipação de poro-pressões entre os dois tipos de ensaios.

## CAPÍTULO IV

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

## IV.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de cisalhamento por torção e de cisalhamento direto com interface polida. Foram ensaiadas amostras de misturas caulim-bentonita com as porcentagens mostradas na tabela IV.1. Nesta tabela são também apresentados os valores de Limites de Atterberg, de fração argila e da densidade real dos grãos de cada mistura. Apresenta-se na figura IV.1 as curvas granulométricas das quatro misturas.

Tab. IV.1 - Misturas caulim-bentonita usadas nos ensaios

	Caulim (%) + Bentonita(%)			
	100 + 0	80 + 20	50 + 50	0 + 100
LL (%)	30	115	204	380
LP (%)	24	27	39	58
IP (%)	6	88	165	322
CF <sup>(1)</sup> (%)	10	20	38	70
G <sub>s</sub>	2,815	2,816	2,818	2,821

(1) - fração argila

Os ensaios realizados de cisalhamento por torção e de cisalhamento direto com interface polida incluíram técnicas de multiestágio e de único estágio, conforme apresentado na tabela IV.2, onde a quantidade de amostras ensaiadas é também indicada. Observa-se também nesta

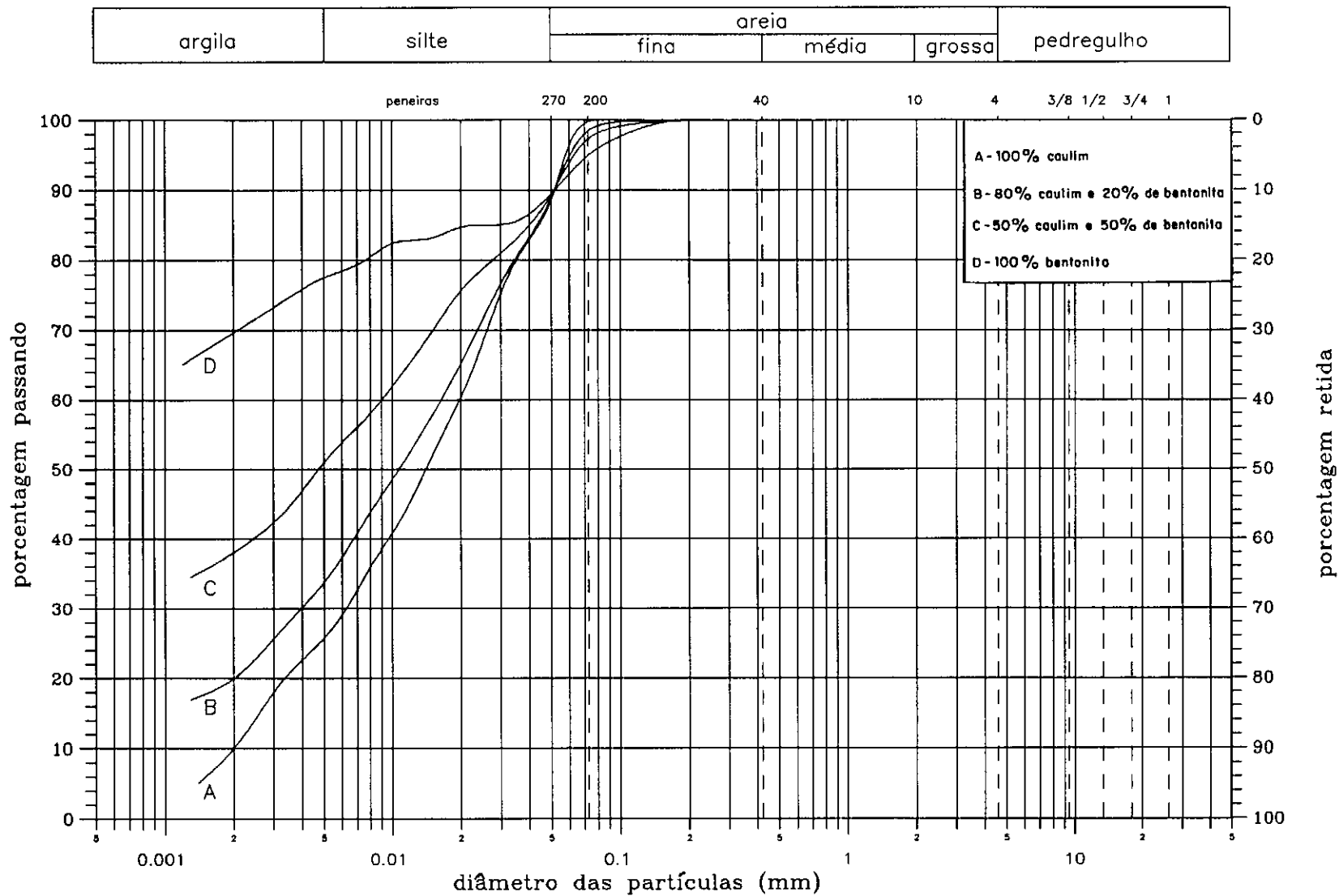


Fig. IV.1 - Curvas granulométricas das misturas caulim-bentonita

tabela que os ensaios de cisalhamento direto foram realizados somente nas amostras de caulim puro (100 % de caulim).

Tab. IV.2 - Programação de ensaios

misturas caulim- bentonita em porcentagem	cisalhamento por torção		cisalhamento direto com interface polida	
	multi- estágio	único estágio	multi- estágio	único estágio
100 - 0	1	-	1	8
80 - 20	1	-	-	-
50 - 50	1	5	-	-
0 - 100	-	5	-	-

Obs: Os números indicam o número de amostras ensaiadas

#### IV.2 - Resultados dos ensaios de cisalhamento por torção utilizando a técnica de multiestágio

Todos os ensaios em multiestágio foram realizados sob os seguintes valores de tensões normais  $\sigma_n$ : 50, 100, 200, 400 e 800 kPa (e.g., Hutchinson e outros, 1979; Bromhead e Curtis, 1983; Hawkins e Privett, 1985; Skempton, 1985; Duarte, 1986). Após o último estágio ( $\sigma_n = 800$  kPa) cada amostra foi descarregada, sendo recarregada posteriormente sob a tensão normal do primeiro estágio ( $\sigma_n = 50$  kPa), conforme recomendação de Bromhead (1986), descrita no item III.2.2.

As figuras IV.2 e IV.3 apresentam os resultados dos ensaios com a amostra de caulim puro. Observa-se que as curvas normalizadas da figura IV.3,  $\tau/\sigma_n$  versus



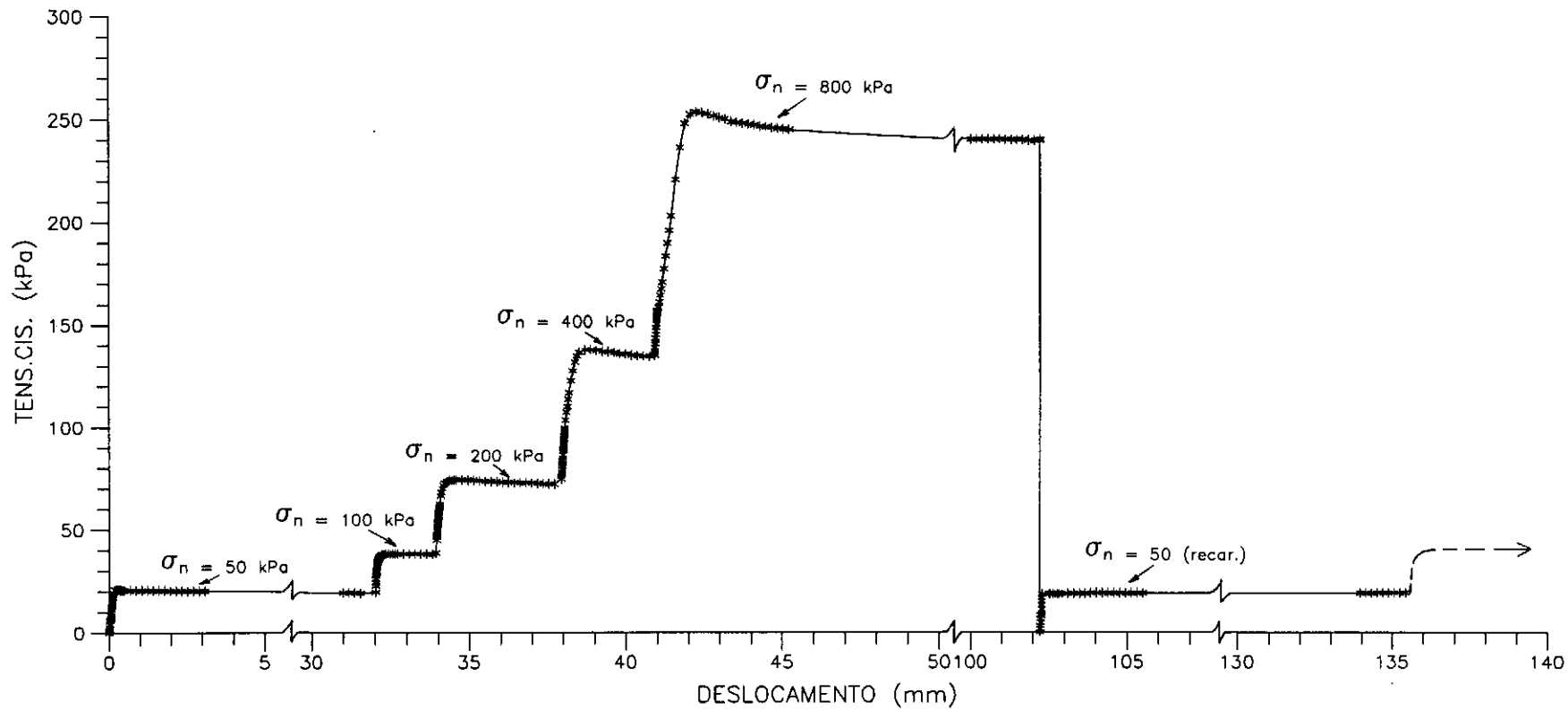
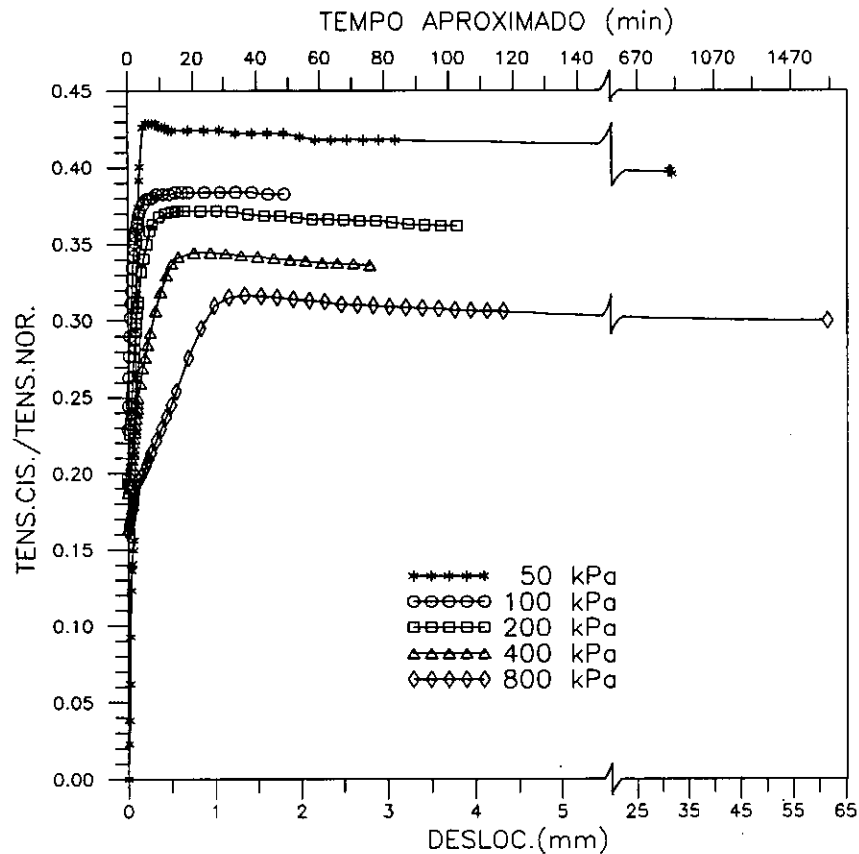
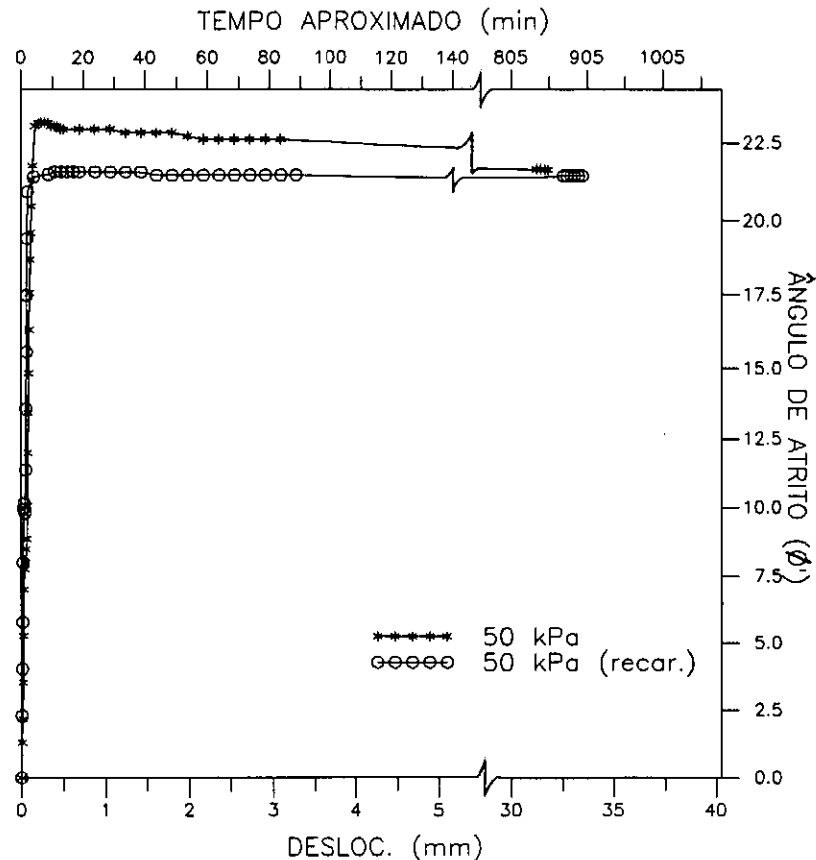


Fig. IV.2 - TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO - 100% caulim - F.A. = 10%  
(ESTÁGIOS DE 50,100,200,400 e 800 kPa)



a) carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.

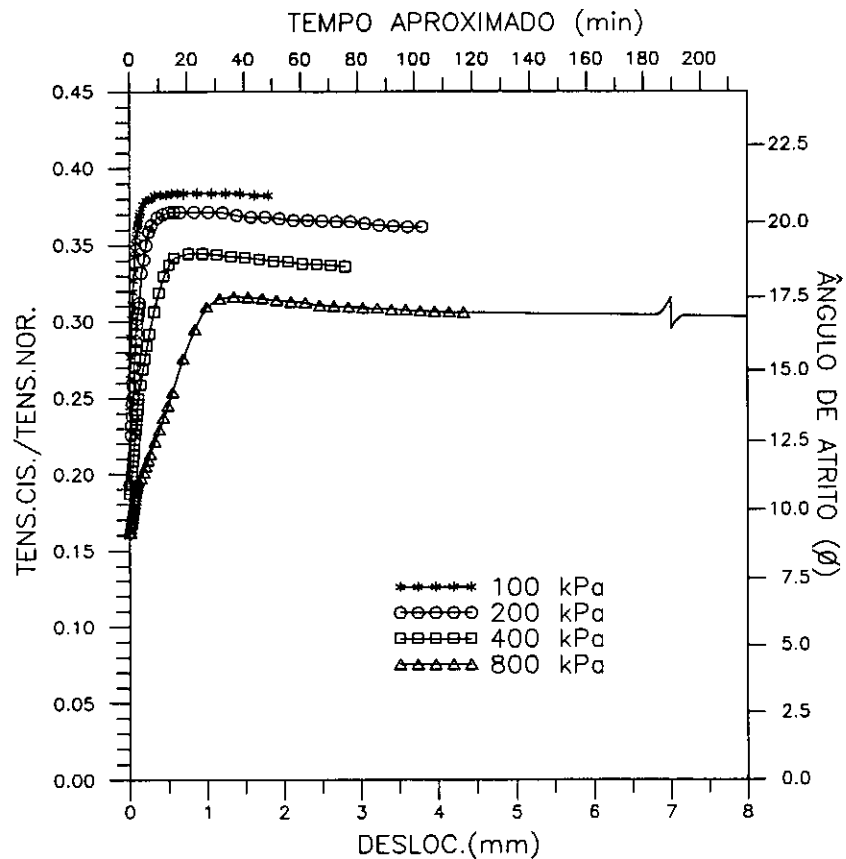


b) carregamento e recarregamento a tensão normal de 50 kPa.

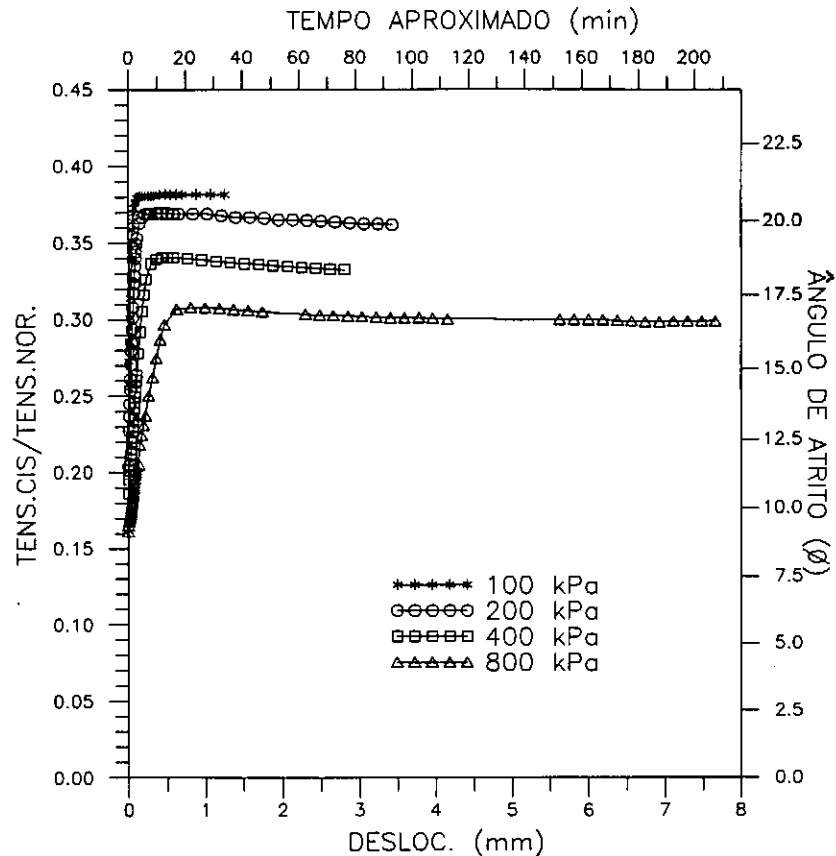
Fig.IV.3 - ENSAIOS COM 100% DE CAULIM - TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO

deslocamento, diferem das apresentadas por Skempton (1985), que utilizou  $\tau/\sigma'_n$  (tensão cisalhante / tensão normal efetiva), tendo em vista que no equipamento IC-NGI o adensamento das amostras foi realizado antes do cisalhamento. Os resultados do recarregamento a  $\sigma_n = 50$  kPa, mostrados nas figuras IV.2 e IV.3.b, indicam que a superfície de cisalhamento foi bem formada, tendo em vista que os últimos valores do carregamento e do recarregamento praticamente coincidiram.

Neste primeiro ensaio foram também realizados recarregamentos para  $\sigma_n$  de 100, 200, 400 e 800 kPa, conforme mostra a figura IV.4, onde observa-se repetibilidade dos valores medidos no carregamento, sendo estas comparações também apresentadas na tabela IV.3. Por ter-se atingido a condição residual usou-se nesta tabela  $\sigma'_n$  (tensão normal efetiva). Ainda, para o estágio correspondente a  $\sigma_n = 800$  kPa no carregamento (fig.IV.3.a) resolveu-se continuar o ensaio até cerca de 27 horas e meia (1650 minutos), observando-se uma queda em  $\phi'_r$  de menos de  $1/2^\circ$  e no recarregamento (fig.IV.4.b) continuou-se o ensaio até 3 horas e meia (210 minutos), ocorrendo uma queda de  $1/10^\circ$ . Conseqüentemente comprovou-se que leituras constantes durante 20 minutos (Bromhead, 1986) é um critério satisfatório (ver item III.2.2) para a determinação da resistência residual, ou seja, não há um benefício substancial em prosseguir o estágio de carga após esse critério ser atingido. Adotou-se no presente trabalho o critério de leituras constantes durante 20 minutos para a determinação de  $\phi'_r$ .



a) carregamento



b) recarregamento

Fig.IV.4 - ENSAIOS COM 100% DE CAULIM - TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO

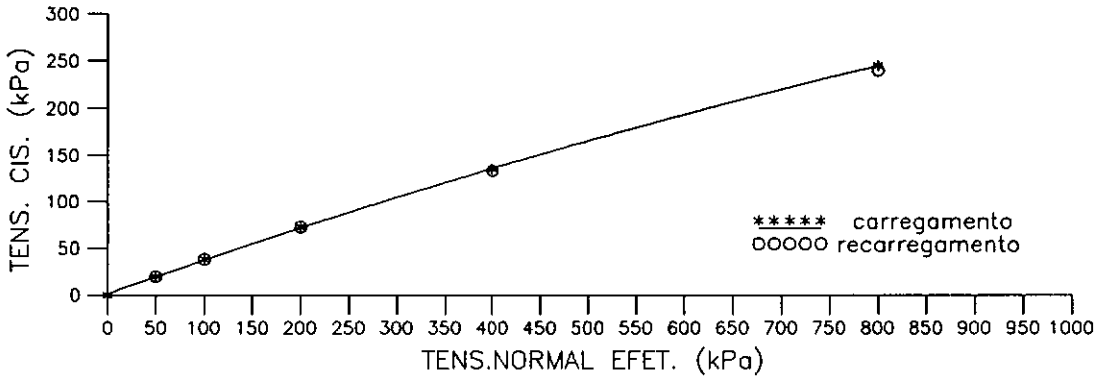
Tab. IV.3 - Comparação dos valores de  $\phi'_r$  para carregamento e recarregamento

Tensão normal $\sigma'_n$ (kPa)	Valores de $\phi'_r$	
	carregamento	recarregamento
50	21,7	21,5
100	21,0	20,9
200	19,9	19,9
400	18,6	18,4
800	17,0*	16,7*

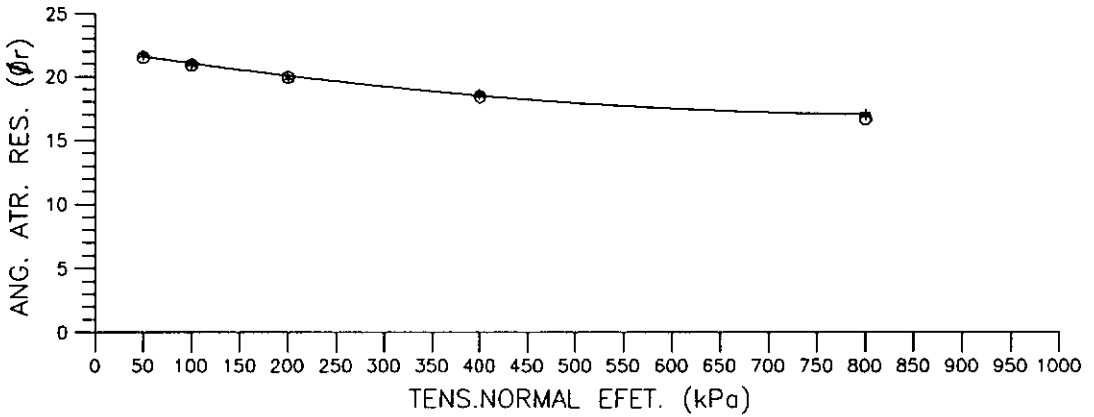
Obs : \* Estes valores correspondem também a leituras constantes de aproximadamente 20 minutos.

A envoltória residual completa e o gráfico  $\phi'_r$  versus  $\sigma'_n$  para o caulim puro são apresentados na figura IV.5, obtidos no carregamento e no recarregamento. Vários solos estudados na literatura (Lupini e outros, 1981) apresentam o formato das curvas mostrado nestes gráficos.

Os resultados do ensaio com a mistura 20% de bentonita e 80% de caulim são apresentados nas figuras IV.6 e IV.7. Mostra-se na figura IV.7.b a coincidência dos valores finais para  $\sigma'_n = 50$  kPa do carregamento e do recarregamento, verificando-se assim que a técnica de multiestágio para esta mistura é adequada. A envoltória residual completa e o gráfico  $\phi'_r$  versus  $\sigma'_n$  para a mistura 20% de bentonita e 80% de caulim são apresentados na figura IV.8, na qual observa-se que  $\phi'_r$  varia pouco com  $\sigma'_n$ . Nota-se nestes gráficos a coincidência dos pontos correspondentes a  $\sigma'_n = 50$  kPa do carregamento e do recarregamento.



a) ENVOLTÓRIA



b) ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL VERSUS TENSÃO NORMAL EFETIVA

Fig.IV.5 - ENSAIOS COM MISTURAS DE 100% DE CAULIM

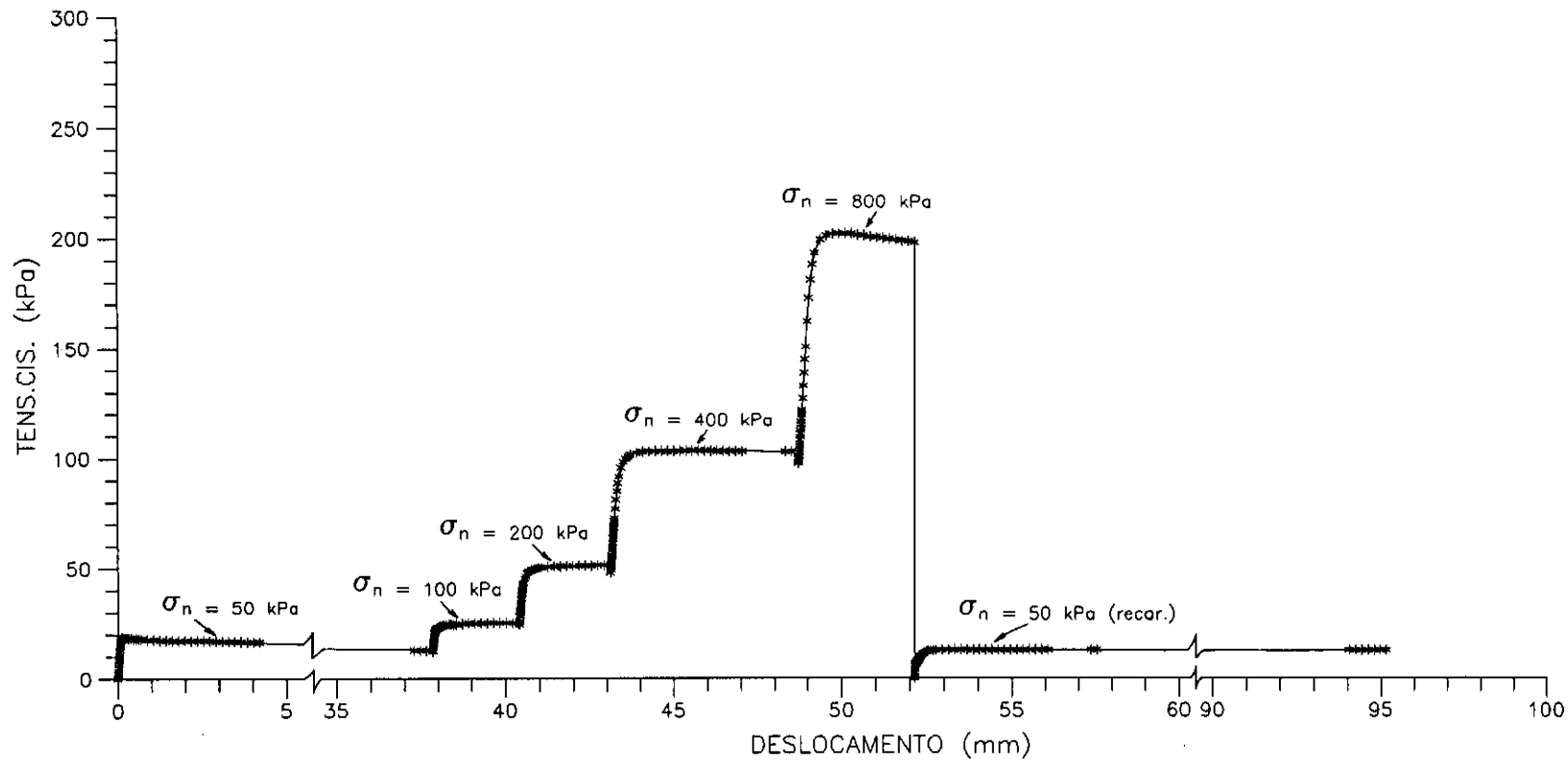
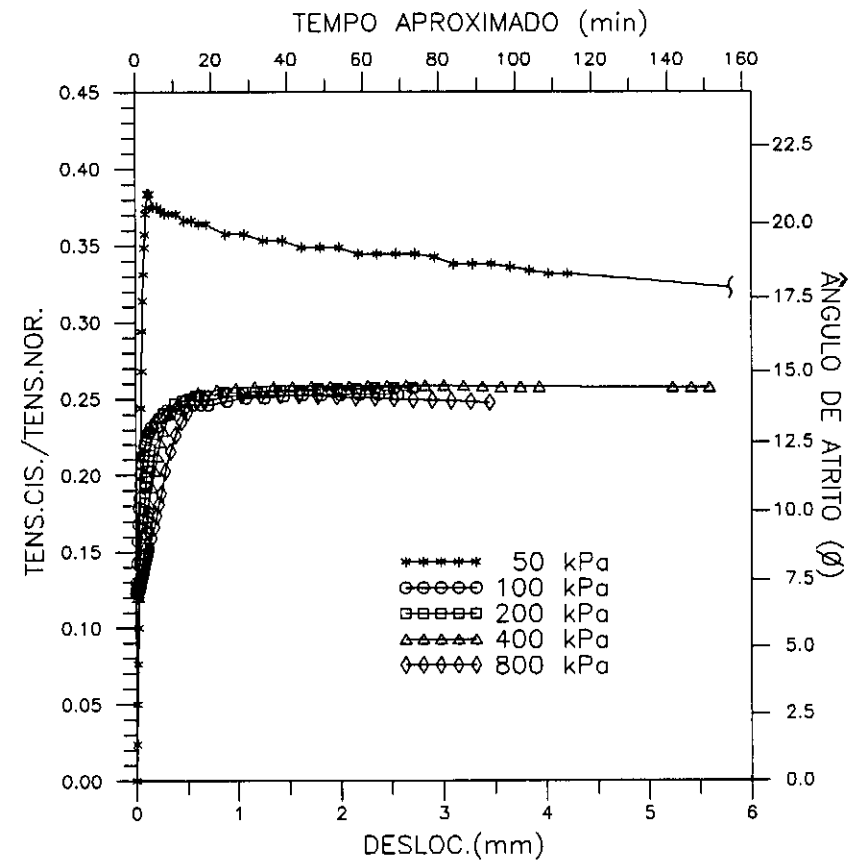
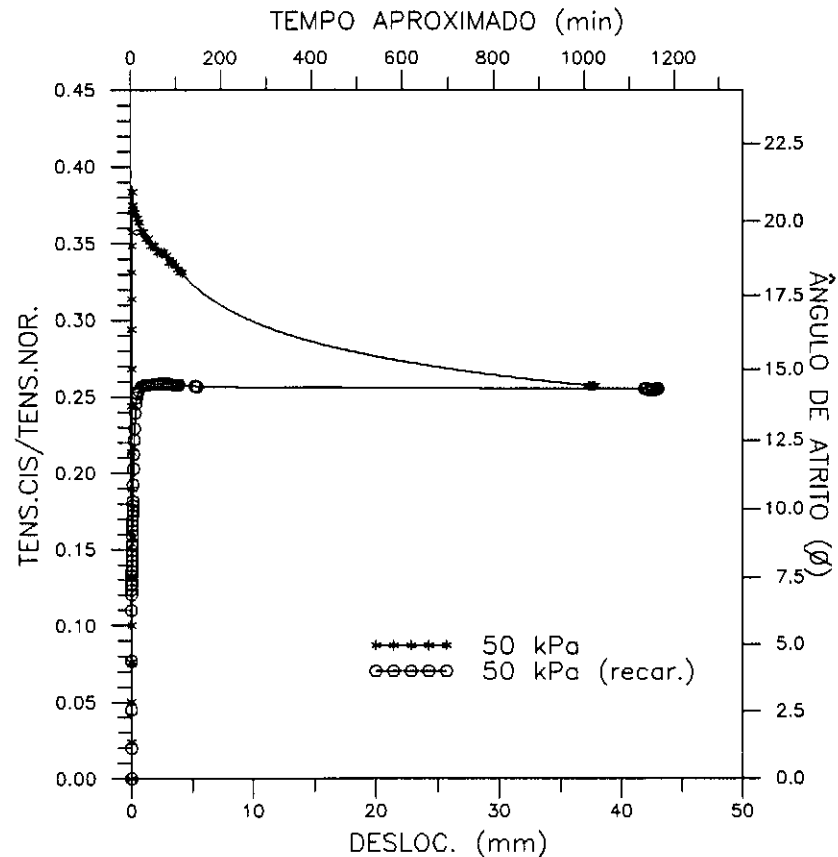


Fig. IV.6 - TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO - 80% caulim + 20% bentonita  
F.A.=20% - (ESTÁGIOS DE 50,100,200,400 e 800 kPa)



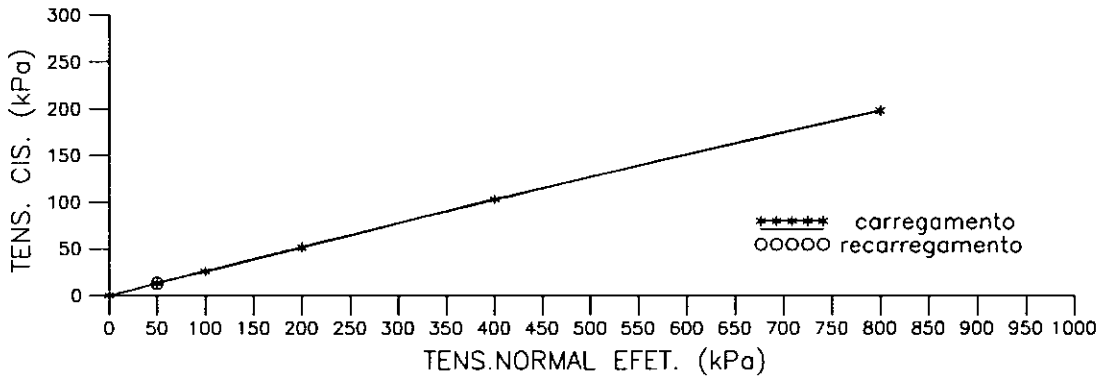
a) carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.



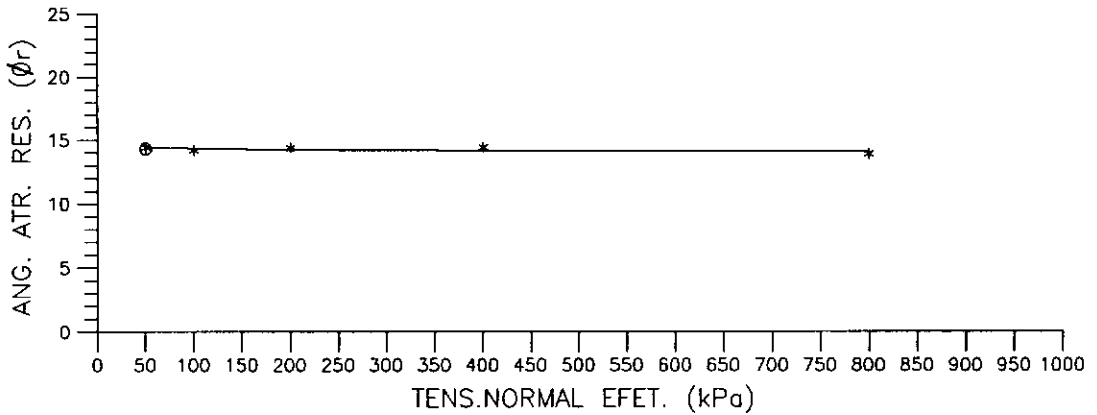
b) carregamento e recarregamento a tensão normal de 50 kPa.

Fig.IV.7 - ENSAIOS COM 80% DE CAULIM E 20% DE BENTONITA  
TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO





a) ENVOLTÓRIA



b) ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL VERSUS TENSÃO NORMAL EFETIVA

Fig.IV.8 - ENSAIOS COM MISTURAS DE 80% DE CAULIM E 20% DE BENTONITA

As figuras IV.9 e IV.10 apresentam os resultados do ensaio com 50% de bentonita e 50% de caulim. Comparando-se as figuras IV.2 e IV.9 observa-se no caso de caulim puro (fig.IV.2) picos nas curvas  $\tau$  versus deslocamento, enquanto que, no caso da mistura 50% de caulim - 50% de bentonita (fig.IV.9) as curvas não apresentam picos. Estes resultados não seguem o modelo esquemático de Skempton (1985), mostrado na figura II.8, para amostras indeformadas ensaiadas no equipamento IC-NGI no qual a amostra é adensada e depois cisalhada. Nota-se nos valores finais do gráfico da figura IV.10.a um aumento do  $\phi$  com o aumento de  $\sigma_n$ , resultados estes contrários aos obtidos com as misturas anteriores utilizando a técnica de multiestágio. Observa-se também, a não concordância dos valores finais de  $\phi'$  para  $\sigma_n = 50$  kPa do carregamento e do recarregamento, conforme mostra-se na figura IV.10.b. Anderson e Hammoud (1988) concluíram que a técnica de multiestágio não é adequada para solos com fração argila superior a 50% (solos de comportamento deslizante), conforme ilustrado na figura IV.11. No caso presente da mistura 50% caulim - 50% bentonita, cuja fração argila é de 38% (ver tabela IV.1), a técnica de multiestágio não se mostrou adequada. Assim sendo, a determinação do  $\phi'_r$  para esta mistura foi efetuada através da técnica de único estágio, cujos resultados são apresentados a seguir. Considerando-se os resultados e observações expostos acima, decidiu-se ensaiar a bentonita pura (100 % de bentonita) apenas com a técnica de único estágio.

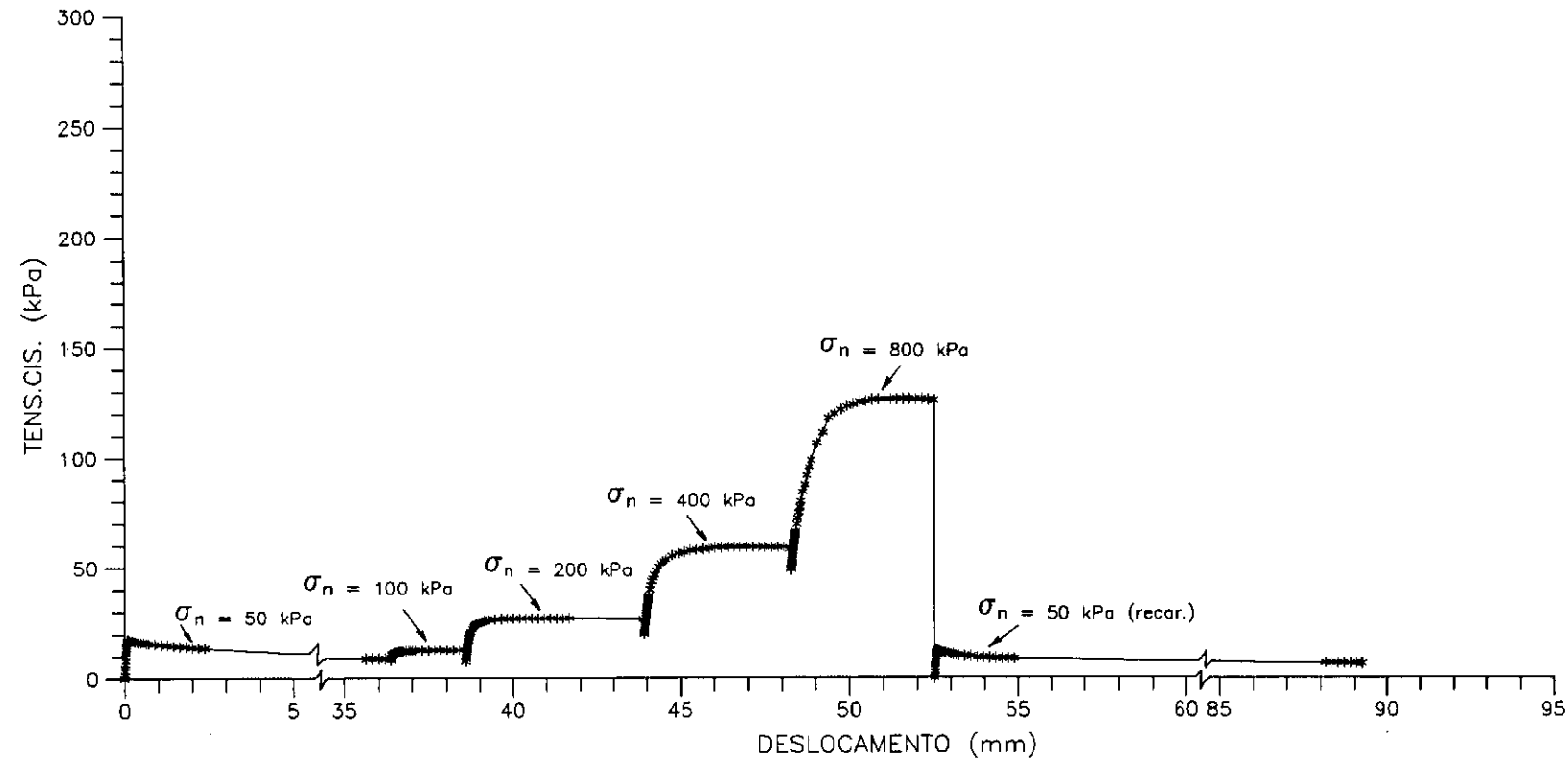
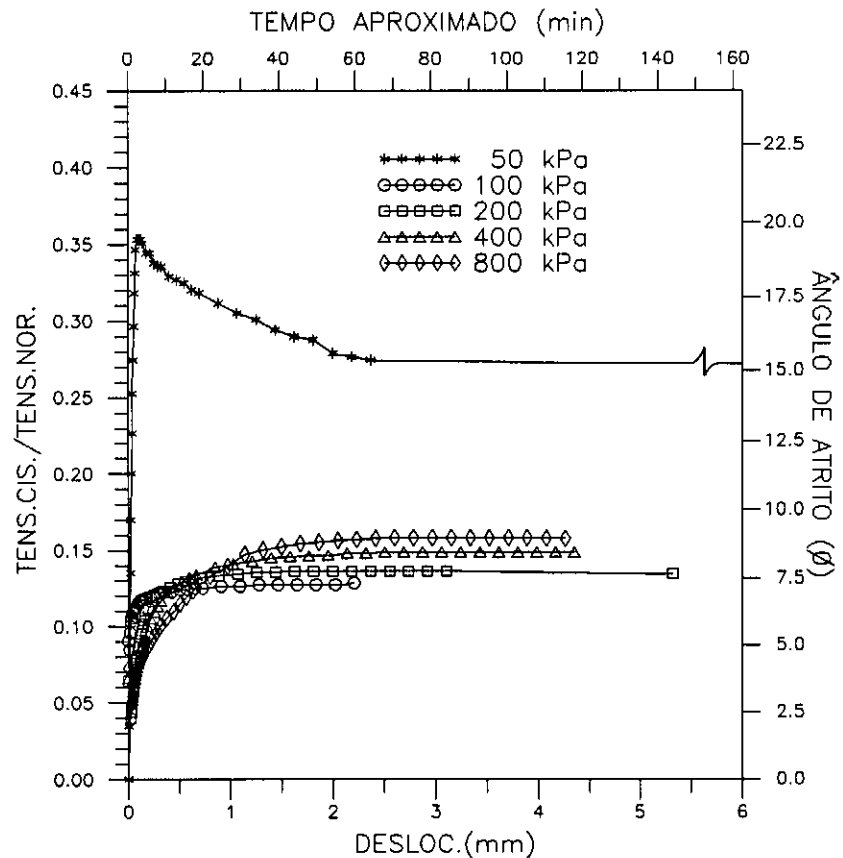
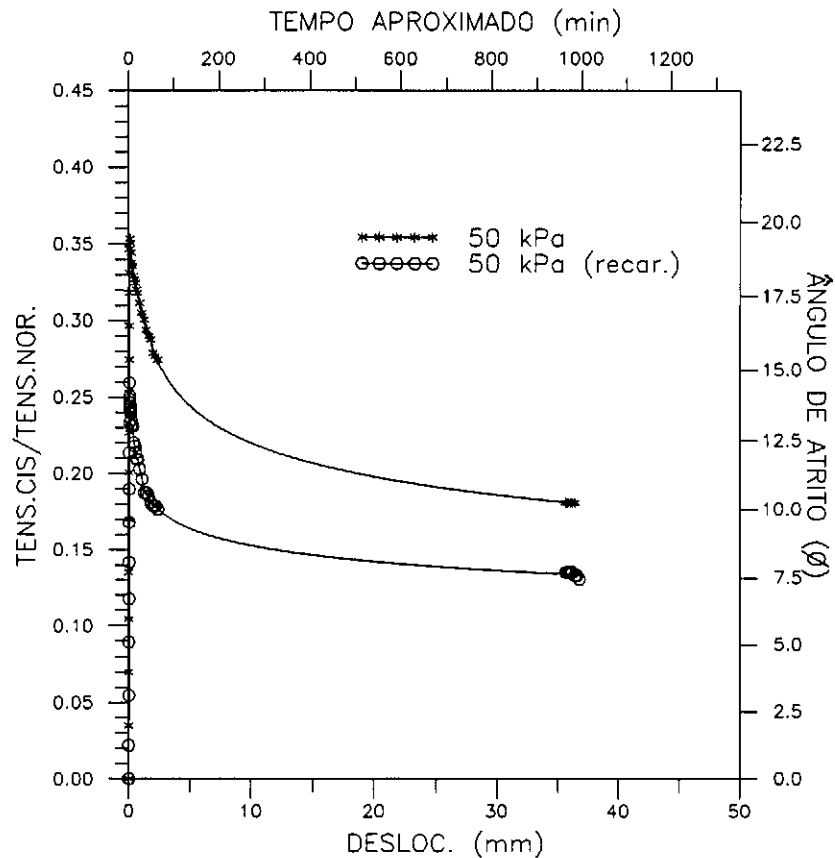


Fig. IV.9 - TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO - 50% caulim + 50% bentonita  
F.A.=38% - (ESTÁGIOS DE 50,100,200,400 e 800 kPa)



a) carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.



b) carregamento e descarregamento a tensão normal de 50 kPa.

Fig.IV.10 - ENSAIOS COM 50% DE CAULIM e 50% DE BENTONITA  
TÉCNICA DE MULTIESTÁGIO

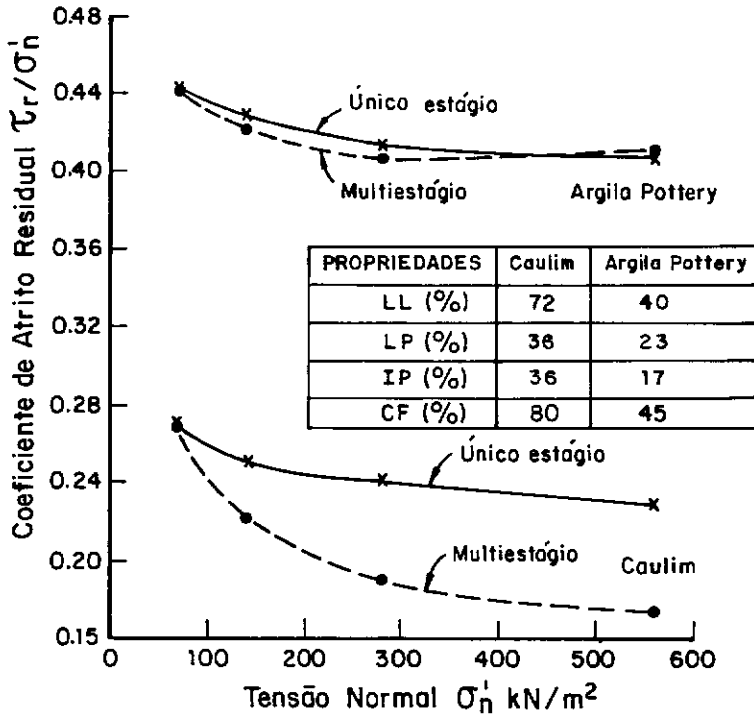
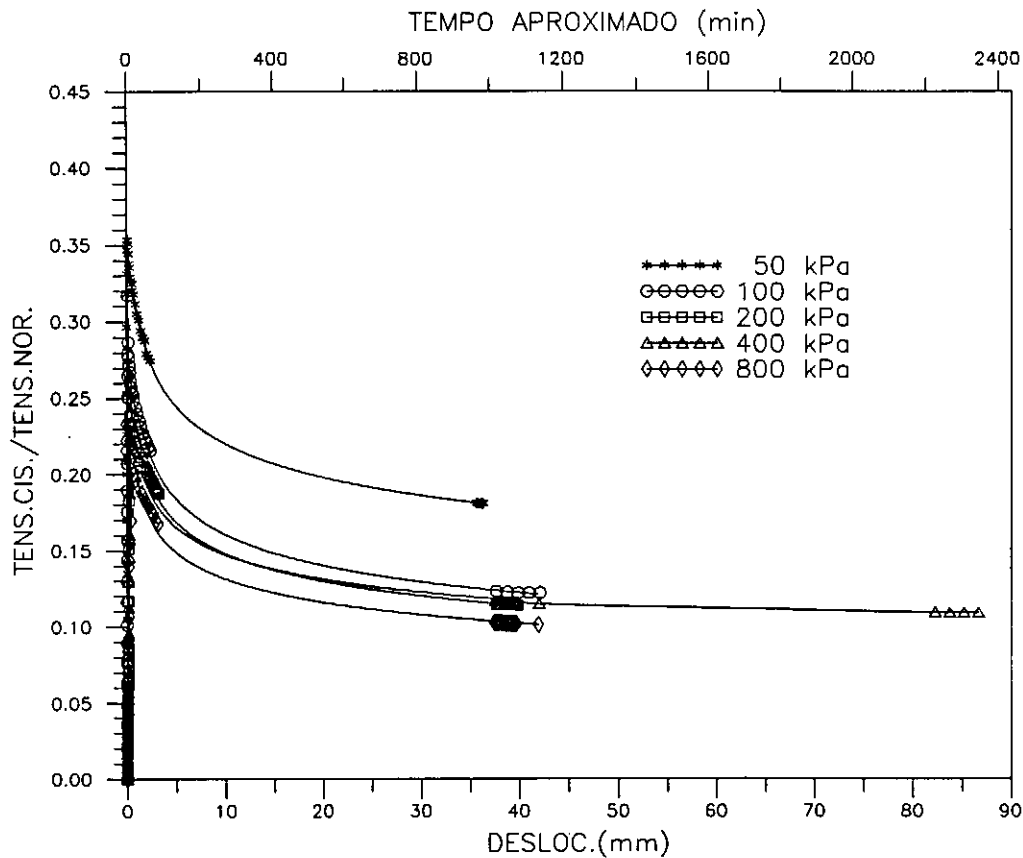


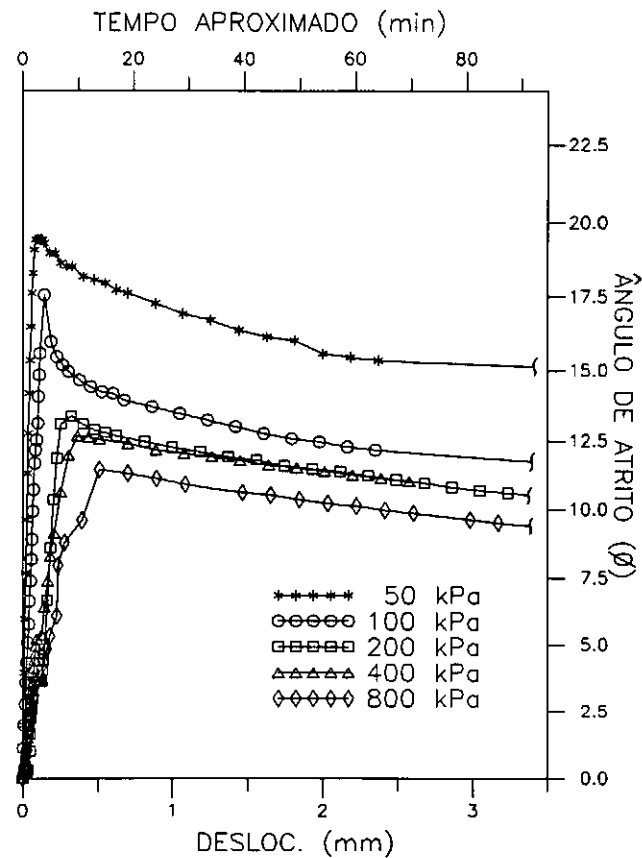
Fig. IV.11- Comparação de resultados de ensaios de cisalhamento por torção utilizando a técnica de único estágio e multiestágio (ANDERSON e HAMMOUD, 1988)

#### IV.3 - Resultados dos ensaios de cisalhamento por torção utilizando a técnica de único estágio

Os resultados dos ensaios utilizando a técnica de único estágio com a mistura 50% de bentonita - 50% de caulim são apresentados na figura IV.12. Cada ensaio foi realizado com uma amostra diferente e todos os ensaios apresentaram pico. Nos ensaios utilizando a técnica de único estágio, ao contrário dos ensaios utilizando a técnica de multiestágio, foram necessários grandes deslocamentos (aprox. 40 mm) para se atingir a resistência residual. A resistência residual em cada ensaio foi determinada através de leituras feitas após 16 horas do início de cada ensaio, efetuadas no dia seguinte, durante



a) carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.



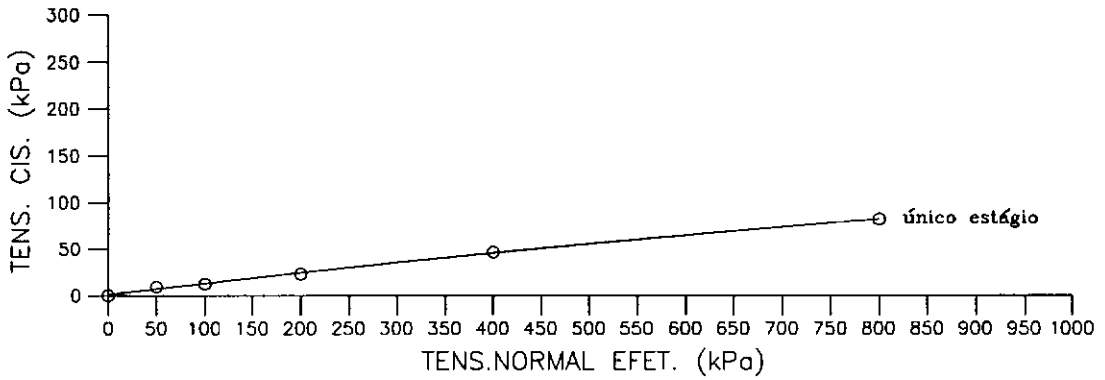
b) fase inicial da formação da superfície de cisalhamento.

Fig.IV.12 - ENSAIOS COM 50% DE CAULIM E 50% DE BENTONITA  
TÉCNICA DE ÚNICO ESTÁGIO

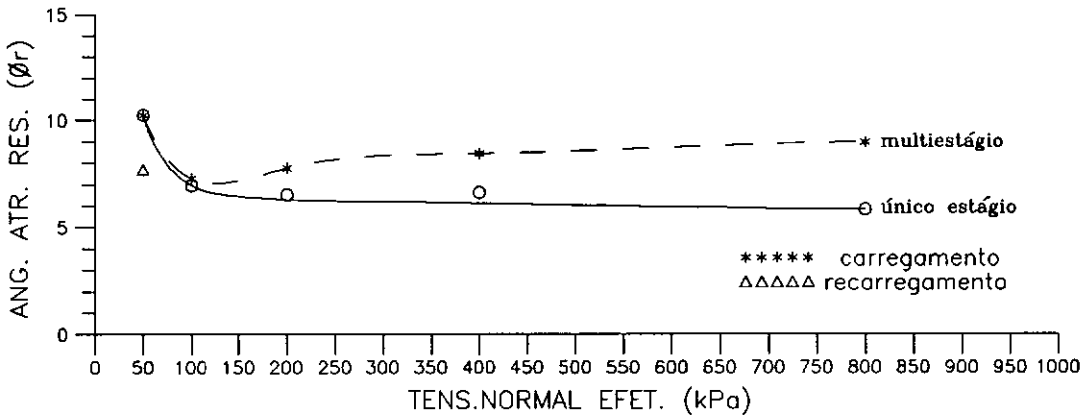
180 minutos em intervalos de 30 minutos, exceto o ensaio correspondente a  $\sigma_n = 50$  kPa, no qual as leituras foram feitas durante 30 minutos em intervalos de 5 minutos. Para a tensão normal  $\sigma_n = 400$  kPa o ensaio foi continuado por mais 24 horas observando-se uma queda desprezível no valor de  $\phi$ , confirmando a recomendação de Bromhead (1986), a qual estabelece que a leitura efetuada cerca de 16 horas após o início do ensaio é satisfatória. Na figura IV.12.b mostra-se a ampliação da parte inicial das curvas da figura IV.12.a observando-se que os deslocamentos para a mobilização da resistência de pico aumentam com o aumento de  $\sigma_n$ .

A envoltória residual completa e o gráfico  $\phi'_r$  versus  $\sigma'_n$  dos ensaios com a mistura 50% de bentonita e 50% de caulim são apresentados na figura IV.13. Os resultados do ensaio com a técnica de multiestágio são também apresentados no gráfico  $\phi'_r$  versus  $\sigma'_n$ , observando-se que esta técnica não é adequada para esta mistura, como exposto no item IV.2.

Os resultados com as amostras de bentonita pura são apresentados na figura IV.14. Observa-se na figura IV.14.a que os ensaios tiveram ao menos 17 horas de duração (correspondente à leitura do dia seguinte), como é o caso dos ensaios à  $\sigma_n = 100$  kPa e  $\sigma_n = 400$  kPa. O ensaio à  $\sigma_n = 50$  kPa teve a duração de cerca de 25 horas. Os ensaios relativos à  $\sigma_n = 200$  kPa e  $\sigma_n = 800$  kPa continuaram por mais 30 horas apresentando uma diminuição desprezível de  $\phi$  (inferior a  $1/2^0$ ).



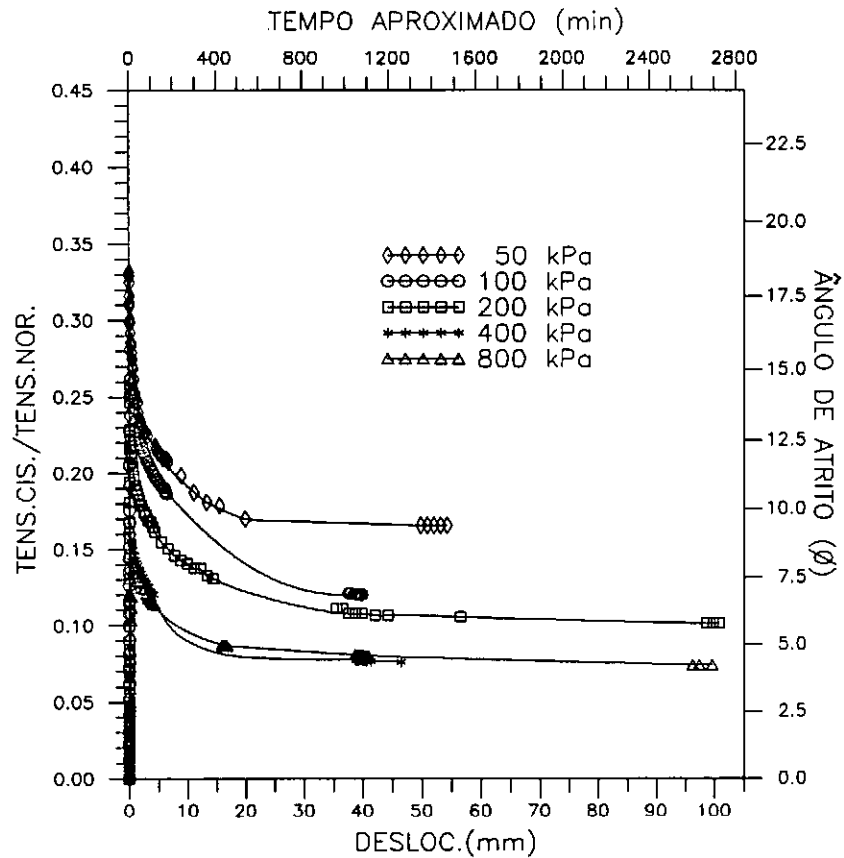
a) ENVOLTÓRIA



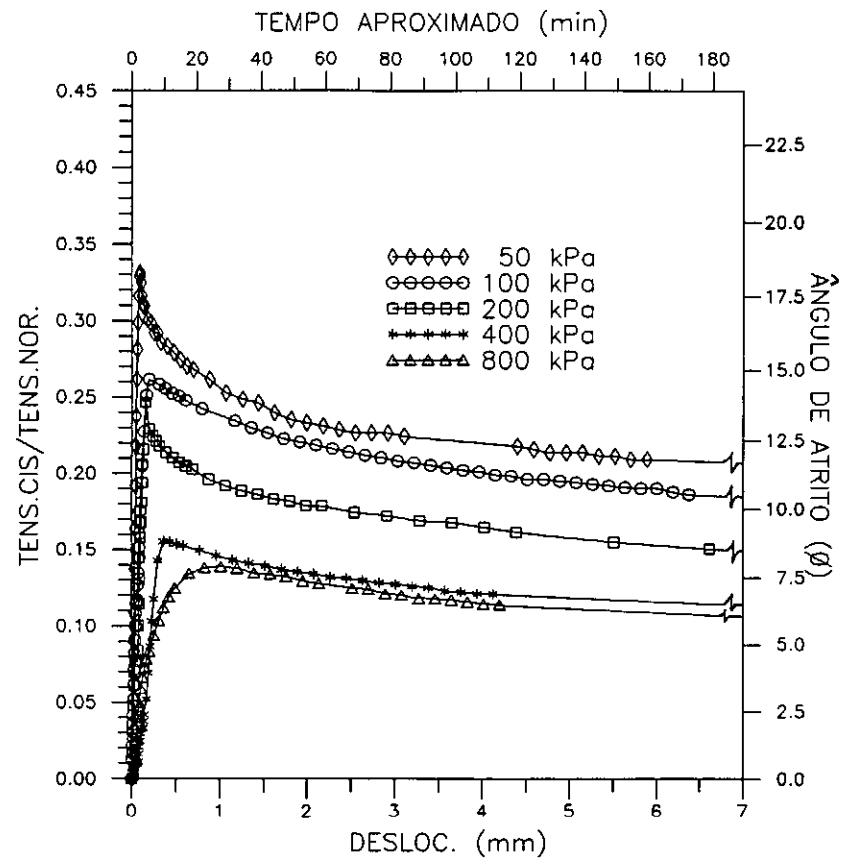
b) ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL VERSUS TENSÃO NORMAL EFETIVA

Fig.IV.13 - ENSAIOS COM MISTURAS DE 50% DE CAULIM E 50% DE BENTONITA





a) carregamentos a tensões normais de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.



b) fase inicial da formação da superfície de cisalhamento.

Fig.IV.14 - ENSAIOS COM 100% DE BENTONITA - TÉCNICA DE ÚNICO ESTÁGIO

A figura IV.14.b mostra os mesmos resultados ampliados para a faixa de pequenos deslocamentos, podendo-se observar que, a exemplo da mistura anterior (50% de bentonita e 50% de caulim), são necessários maiores deslocamentos para a mobilização da tensão de pico com o aumento de  $\sigma_n$ .

As figuras IV.15 e IV.16 ilustram a repetibilidade dos ensaios em amostras diferentes de bentonita pura para valores de  $\sigma_n = 100$  kPa e  $\sigma_n = 200$  kPa, respectivamente. Estes ensaios foram prolongados até 47 e 65 horas, respectivamente. Ambos apresentaram quedas desprezíveis de  $\phi$  após 40 horas de ensaio.

A envoltória residual completa e o gráfico  $\phi'_r$  versus  $\sigma'_n$  dos ensaios com bentonita pura são apresentados na figura IV.17.

#### IV.4 - Análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento por torção

A figura IV.18 e a tabela IV.4 sumarizam os resultados dos ensaios de cisalhamento por torção realizados. Observa-se que, a menos da mistura 80-20, cuja diminuição de  $\phi'_r$  com o aumento de  $\sigma'_n$  é de menos de  $1^\circ$ , caracterizando uma envoltória linear, as três outras envoltórias são curvilíneas. Lupini (1980) encontrou para vários solos envoltórias lineares (inclusive dentro da faixa de valores de  $\phi'_r$  obtidos no presente trabalho).

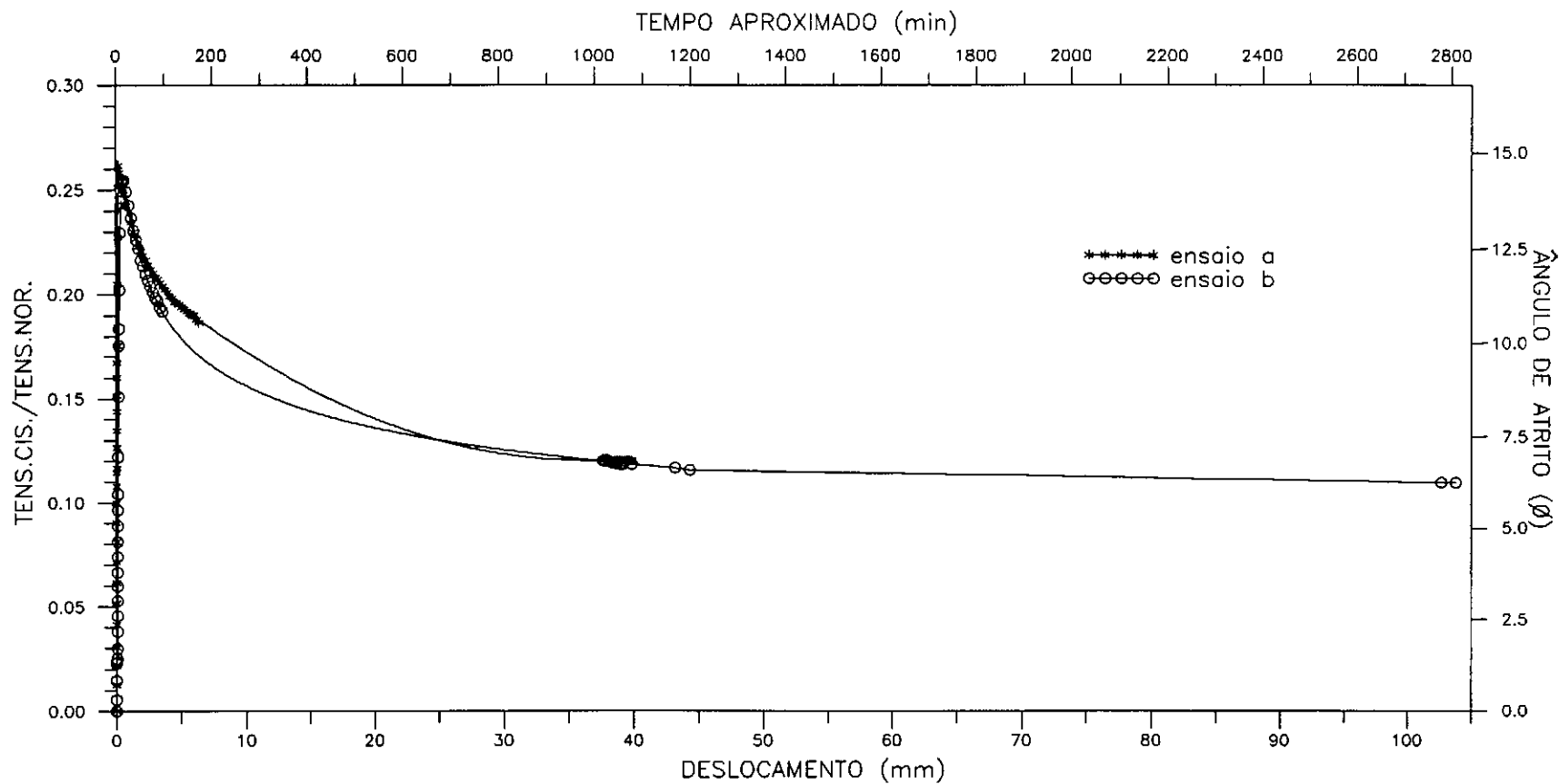


Fig.IV.15 - ENSAIOS COM 100% DE BENTONITA - TÉCNICA DE ÚNICO ESTÁGIO  
TENSÃO NORMAL DE 100 kPa

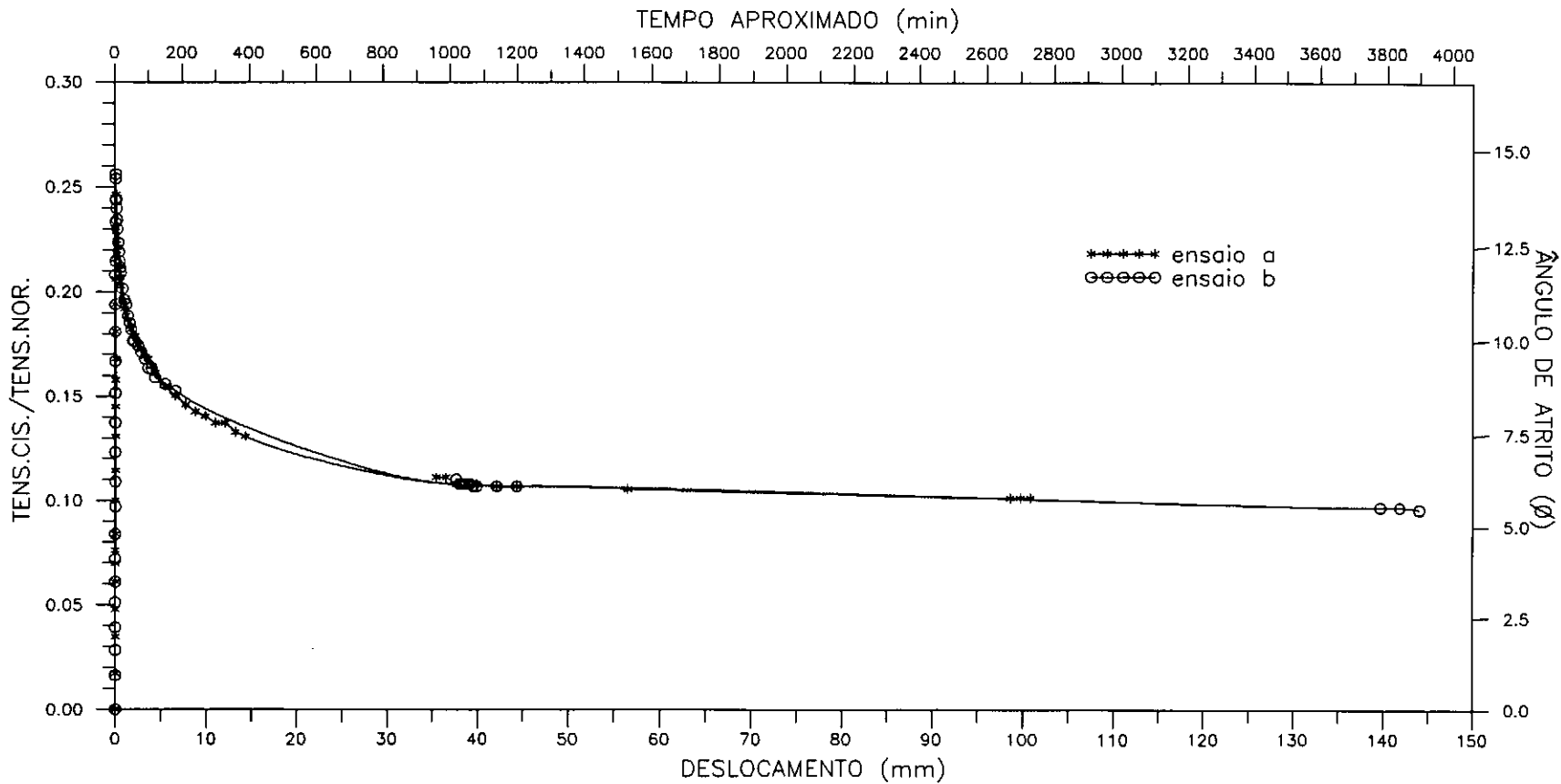
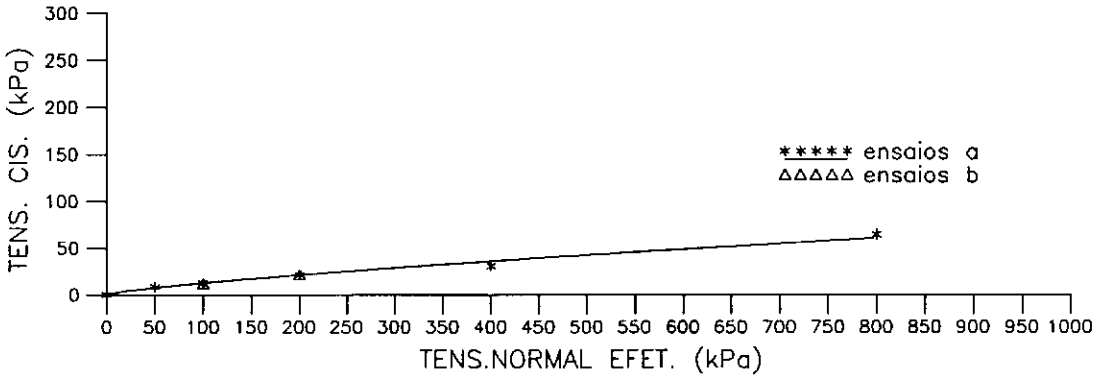
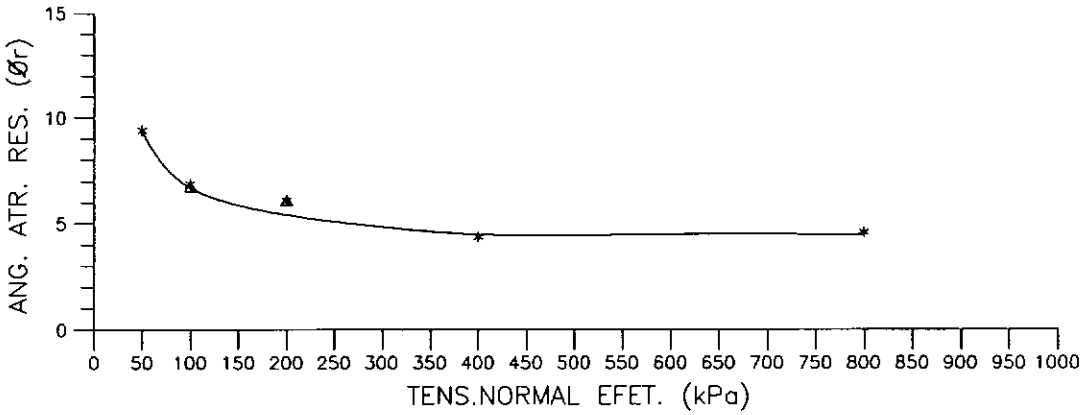
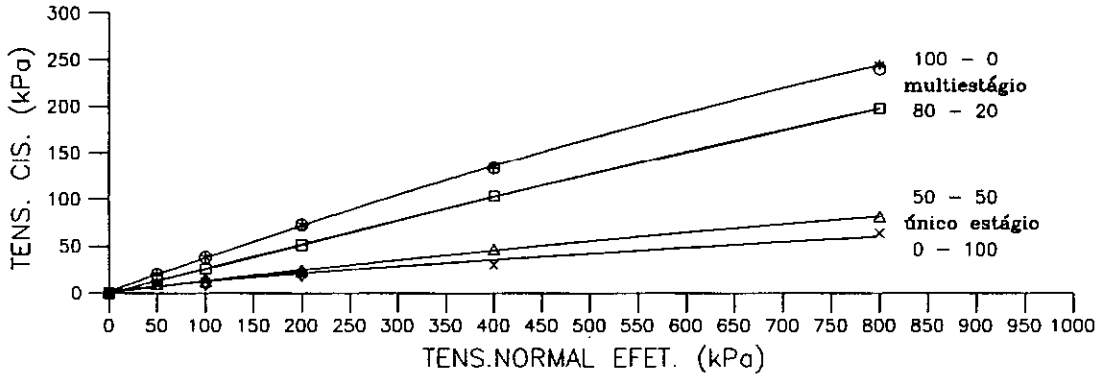


Fig.IV.16 - ENSAIOS COM 100% DE BENTONITA - TÉCNICA DE ÚNICO ESTÁGIO  
TENSÃO NORMAL DE 200 kPa



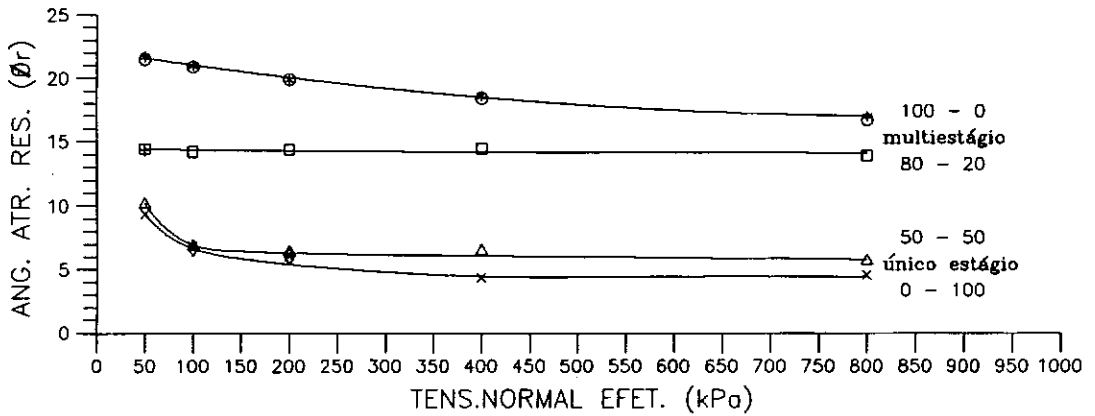
a) ENVOLTÓRIA

b) ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL VERSUS  
TENSÃO NORMAL EFETIVAFig.IV.17 - ENSAIOS COM MISTURAS DE 100%  
DE BENTONITA



### a) ENVOLTÓRIAS

\*\*\*\*\* 100% caulim (car.)      ○○○○○○ 100% caulim (recar.)  
 □□□□□ 80% caulim + 20% bentonita (car.)      ++++++ 80% caulim + 20% bentonita (recar.)  
 ▲▲▲▲▲ 50% caulim + 50% bentonita      ○○○○○○ 100% bentonita (ensaio b)  
 ××××× 100% bentonita (ensaio a)



### b) ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL VERSUS TENSÃO NORMAL EFETIVA

Fig.IV.18 - ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TORÇÃO EM MISTURAS CAULIM-BENTONITA

Tab IV.4 - Ensaio de cisalhamento por torção (Bromhead)

		Caulim (%) + Bentonita(%)			
		100 + 0 <sup>(1)</sup>	80 + 20 <sup>(1)</sup>	50 + 50 <sup>(2)</sup>	0 + 100 <sup>(2)</sup>
		$\phi'_r$ (graus)			
$\sigma'_n$ (kPa)	50	21,6	14,4	10,3	9,4
	100	21,0	14,2	7,0	6,9
	200	19,9	14,4	6,5	6,1
	400	18,5	14,5	6,6	4,4
	800	16,9	13,9	5,8	4,6

Nota : (1) ensaios com a técnica de multiestágio  
 (2) ensaios com a técnica de único estágio

Maksimovic (1989) propôs uma expressão para descrever a não linearidade da envoltória residual através de uma equação hiperbólica. Entretanto, está fora do escopo do presente trabalho a utilização de uma equação deste tipo.

Tomando-se na tabela IV.4 os valores de  $\phi'_r$  para  $\sigma'_n = 400$  kPa e representando-os versus a fração argila obtém-se o gráfico da figura IV.19 no qual são apresentados os trechos turbulento, transicional e deslizante propostos por Lupini e outros (1981). A curva obtida no presente trabalho tem formato semelhante à de Lupini e outros (1981) mostrada anteriormente (figura II.9). Entretanto, as faixas de comportamento diferem por se tratar o presente caso de misturas silte-bentonita e o de Lupini e outros (1981) de misturas areia-bentonita.

Representando-se na figura IV.20 os valores de  $\phi'_r$  correspondentes à  $\sigma'_n = 100$  kPa (ver tabela IV.4) versus a

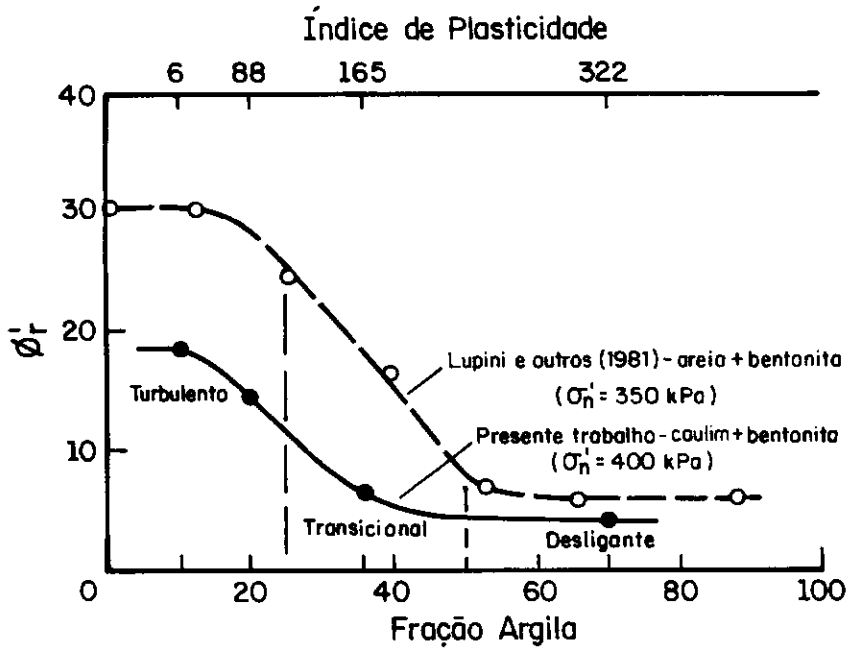


Fig. IV.19 - CORRELAÇÃO ENTRE ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL, FRAÇÃO ARGILA E ÍNDICE DE PLASTICIDADE.

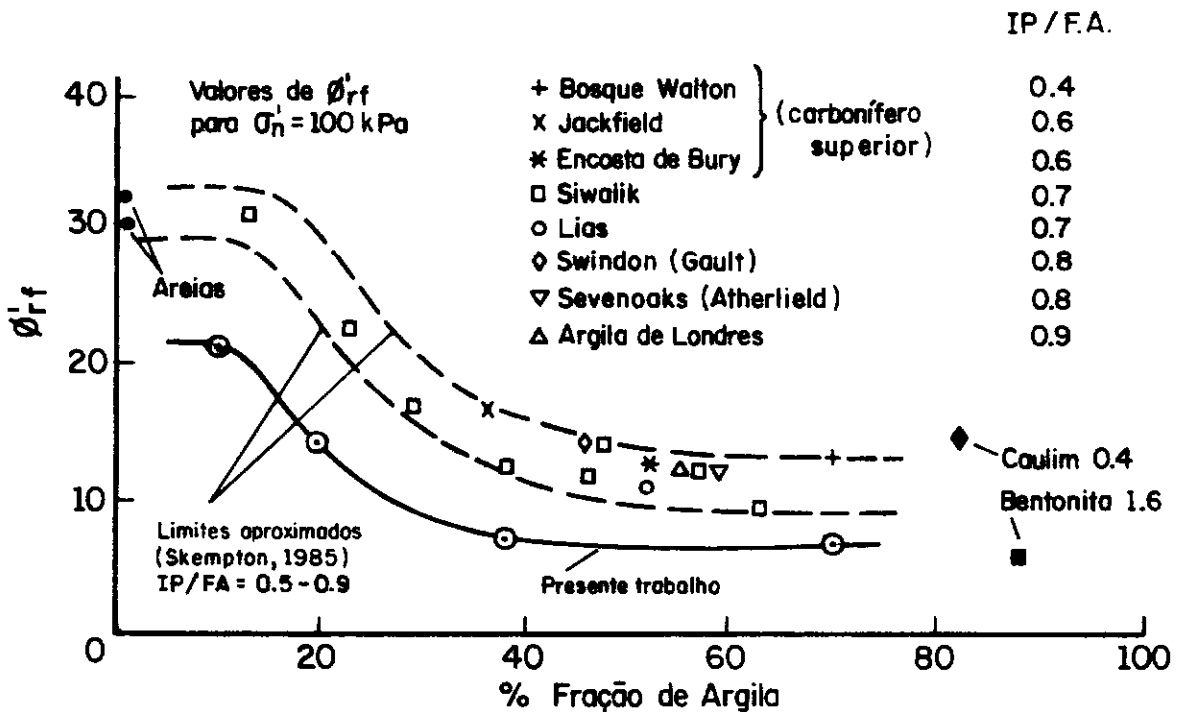


Fig. IV.20 - RESISTÊNCIA RESIDUAL DE CAMPO E ENSAIOS DE CISALHAMENTO POR TORÇÃO EM AREIA, CAULIM E BENTONITA.



fração argila obtém-se uma curva de formato semelhante a curva proposta por Skempton (1985).

Tomando-se na tabela IV.1 os valores de LL, IP e CF (no caso do presente trabalho  $CF = \overline{CF}$  para as quatro misturas, já que a porcentagem passante na peneira 40 de cada mistura é 100%) e aplicando a relação II.1 proposta por Collota e outros (1989) obtém-se os valores de CALIP apresentados na tabela IV.5, os quais estão relacionados com os valores de  $\phi'_r$  da tabela IV.4. Cada  $\phi'_r$  mostrado na tabela IV.5 corresponde à faixa de  $\sigma'_n$  de 100 a 400 kPa, visto que Collota e outros (1989) utilizaram resultados de ensaios a tensões normais efetivas de 100 a 500 kPa. No gráfico proposto por estes autores, mostrados na figura IV.21, apresenta-se os valores obtidos no presente trabalho (faixas A, B, C e D). Observa-se que os dados da presente pesquisa situam-se relativamente próximos da curva proposta por Collota e outros.

Tab. IV.5 - Relação entre  $\phi'_r$  e CALIP

CALIP	0,18	40,48	486,06	5995,64
$\phi'_r$ (graus)	21,0 a 18,5	14,2 a 14,5	7,0 a 6,6	6,9 a 4,4
faixa (fig. IV.21)	A	B	C	D

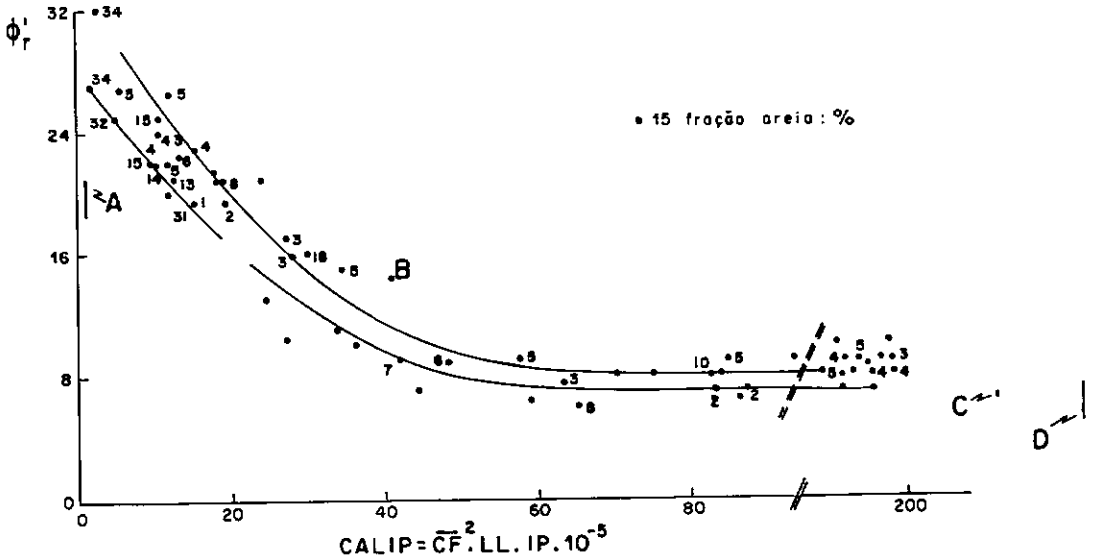


Fig. IV.21 - RELAÇÃO  $\phi_r' = f(CALIP)$  APLICADA AOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO POR TORÇÃO TIPO BROMHEAD (COLLOTTA E OUTROS, 1989)

A aplicação da equação apresentada na figura II.3 limita-se a solos argilosos (Kanji e Wolle, 1977); assim sendo, no presente trabalho adequa-se à mistura de 50% de caulim e 50% de bentonita e à bentonita pura. Observou-se que os valores calculados, segundo esta equação, de  $\phi_r'$  de  $4,8^{\circ}$  e  $3,6^{\circ}$ , respectivamente, se aproximaram dos valores obtidos nos ensaios a  $\sigma_n = 800$  kPa de  $5,8^{\circ}$  e  $4,6^{\circ}$ , respectivamente.

#### IV.5 - Resultados e análise dos ensaios de cisalhamento direto com interface polida

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com interface polida em amostras de caulim puro. Foi ensaiado apenas o caulim tendo em vista que o objetivo principal deste estudo dizia respeito à utilização do equipamento de Bromhead (1979). Por outro lado o ensaio de cisalhamento

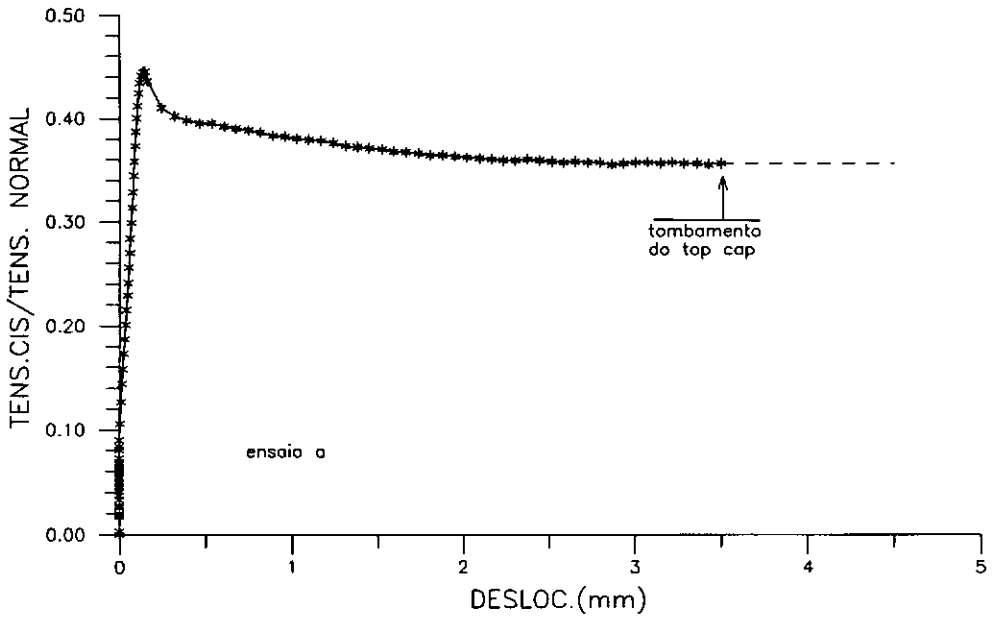
com interface polida já foi estudado no país (Duarte, 1986), o que não é o caso do equipamento de Bromhead.

Foram realizados preliminarmente ensaios de cisalhamento direto com reversão com superfície de cisalhamento formada durante o ensaio e ensaios de cisalhamento com interface polida utilizando a técnica de multiestágio, não se obtendo bons resultados.

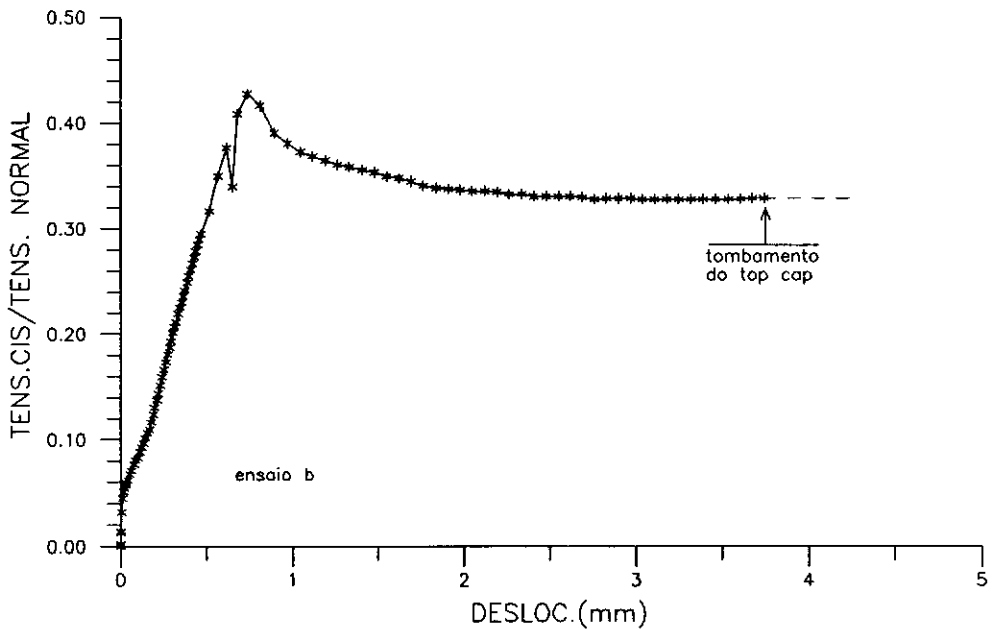
Os níveis de tensões utilizados nos ensaios de cisalhamento com interface polida, bem como a preparação das amostras (item III.4.2), foram os mesmos dos ensaios com o equipamento de Bromhead.

Inicialmente foram realizados três ensaios com amostras com altura inicial (antes do adensamento)  $h_1 = 10$  mm. Observou-se tombamento acentuado do "top cap", com conseqüente aumento da tensão cisalhante. As curvas  $\tau/\sigma'_n$  versus deslocamento destes ensaios são apresentadas nas figuras IV.22 e IV.23. Cabe ressaltar que foi possível definir um trecho de resistência residual constante antes do tombamento do "top-cap".

Os três ensaios subsequentes foram realizados em amostras com altura  $h_1 = 5$  mm (antes do adensamento), realizando reversões, sem descarregamento até o final do ensaio. As figuras IV.24 e IV.25 mostram o primeiro curso destes ensaios, do qual foi obtido o valor de  $\phi'_r$ , conforme recomenda a técnica deste tipo de ensaio (Kanji,

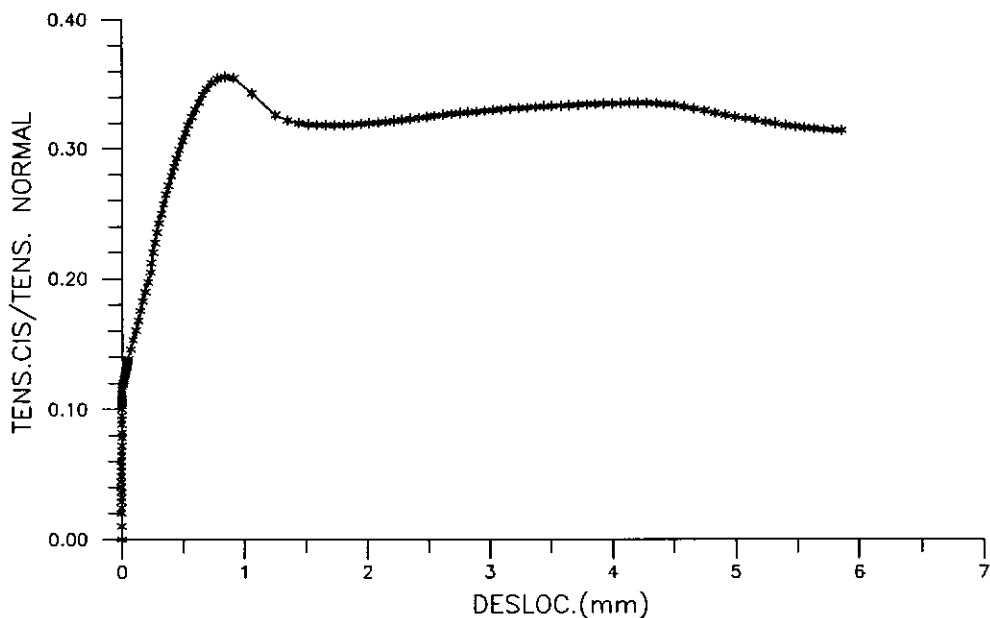


a) tensão normal = 50 kPa  
(h=10 mm) - sem reversão



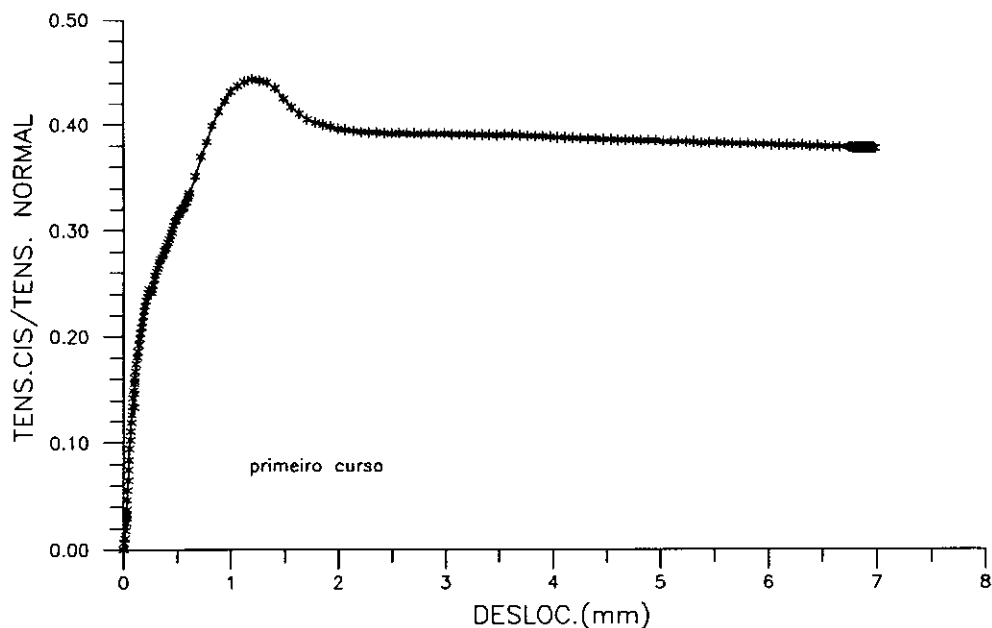
b) tensão normal = 50 kPa  
(h=10 mm) - sem reversão

Fig.IV.22 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO COM INTERFACE POLIDA - 100% DE CAULIM



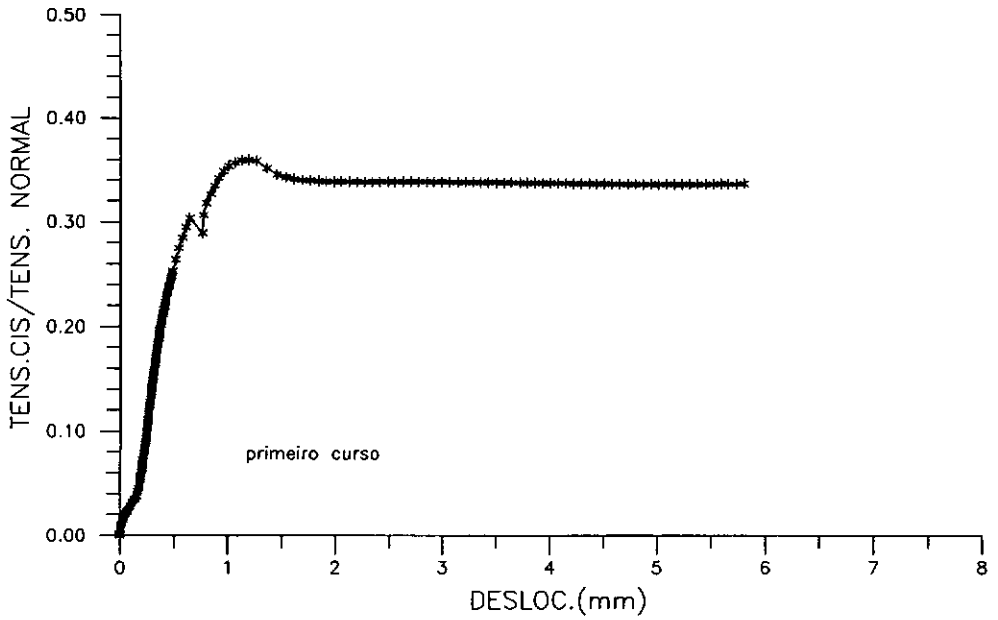
a) tensão normal = 800 kPa  
(h=10 mm) - sem reversão

Fig.IV.23 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO COM INTERFACE POLIDA - 100% DE CAULIM

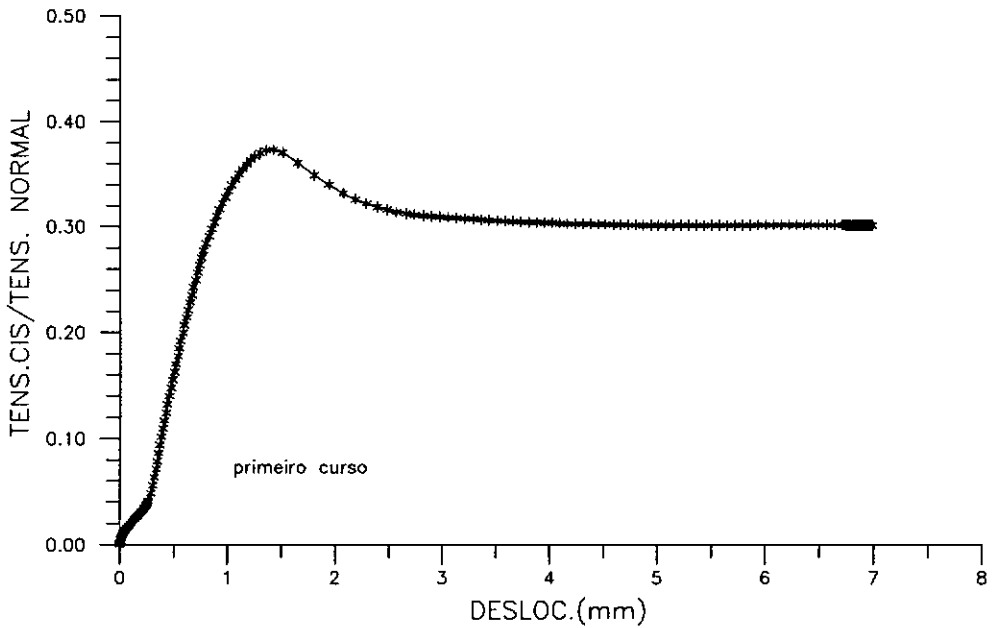


a) tensão normal = 100 kPa  
(h=5 mm) - com reversão

Fig.IV.24 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO COM INTERFACE POLIDA - 100% DE CAULIM



a) tensão normal = 400 kPa  
(h=5 mm) - com reversão



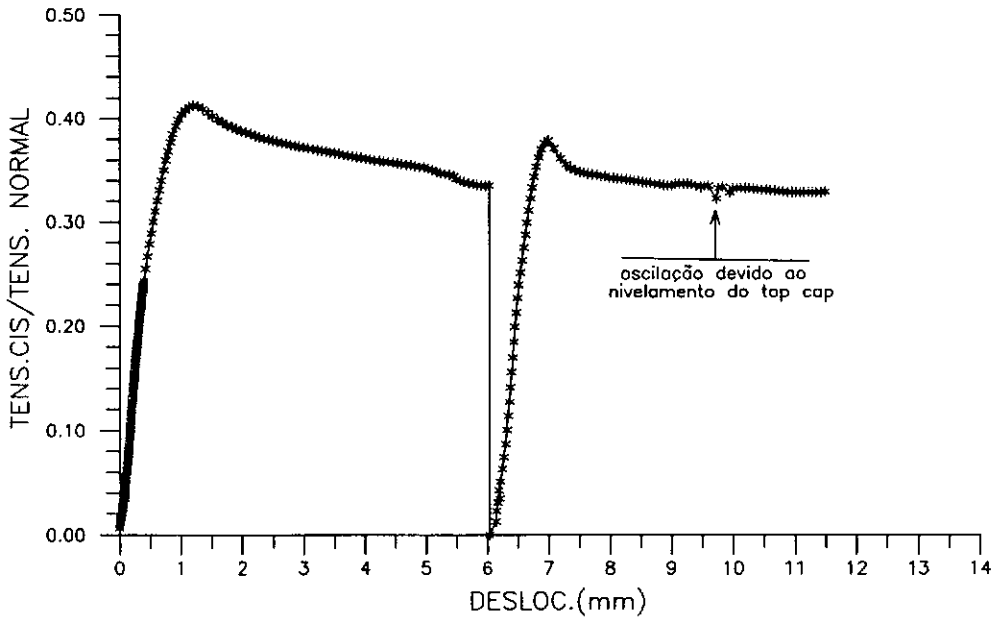
b) tensão normal = 800 kPa  
(h=5 mm) - com reversão

Fig.IV.25 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO COM INTERFACE POLIDA - 100% DE CAULIM

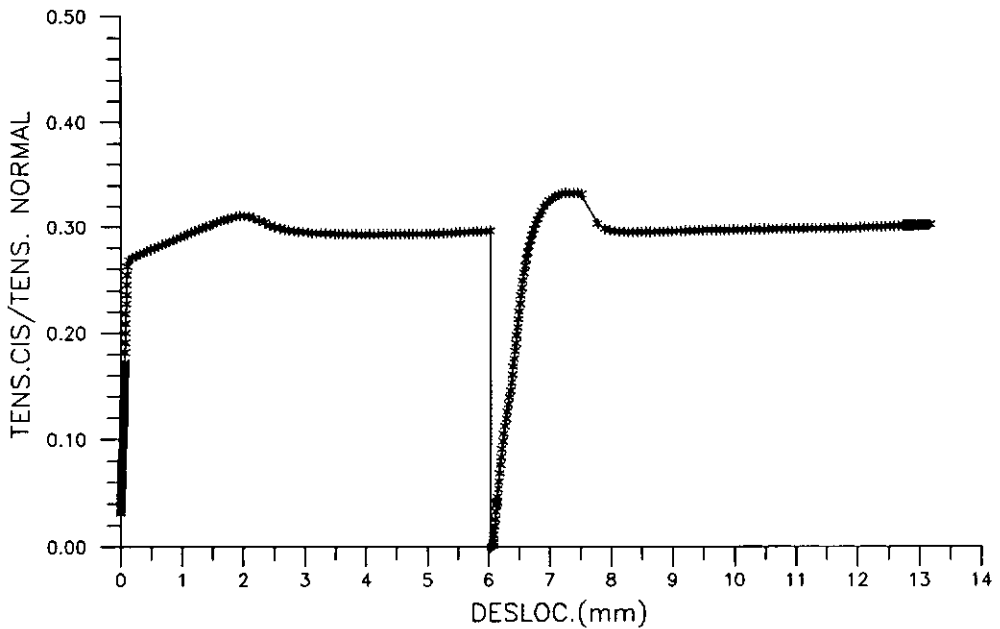
1974a; Kanji e Wolle, 1977). No Apêndice B estão mostrados todos os cursos realizados nestes três ensaios, confirmando o que relata Skempton (1985), quanto a problemas com este ensaio a partir do segundo curso; a tensão cisalhante cai, recuperando, no entanto, para maiores deslocamentos, o valor atingido no primeiro curso.

A técnica de descarregamento da amostra durante as reversões (Skempton, 1985) para minimizar este efeito citado acima foi utilizada em dois ensaios, mostrando-se eficaz. As curvas  $\tau/\sigma'_n$  versus deslocamento destes ensaios são mostradas na figura IV.26. Nota-se que na figura IV.26.a, no segundo curso, ao se observar o início do tombamento do "top cap", procurou-se nivelá-lo, que a princípio poderia causar perturbações na amostra, obtendo-se efeito benéfico.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento com interface polida são mostrados na tabela IV.6. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto com interface polida e dos ensaios de cisalhamento por torção são comparados na figura IV.27. Apesar desta comparação ser limitada, os resultados dos primeiros podem ser considerados satisfatórios.



a) tensão normal = 400 kPa  
(h=5 mm) - descarregamento na reversão.



b) tensão normal = 800 kPa  
(h=5 mm) - descarregamento na reversão

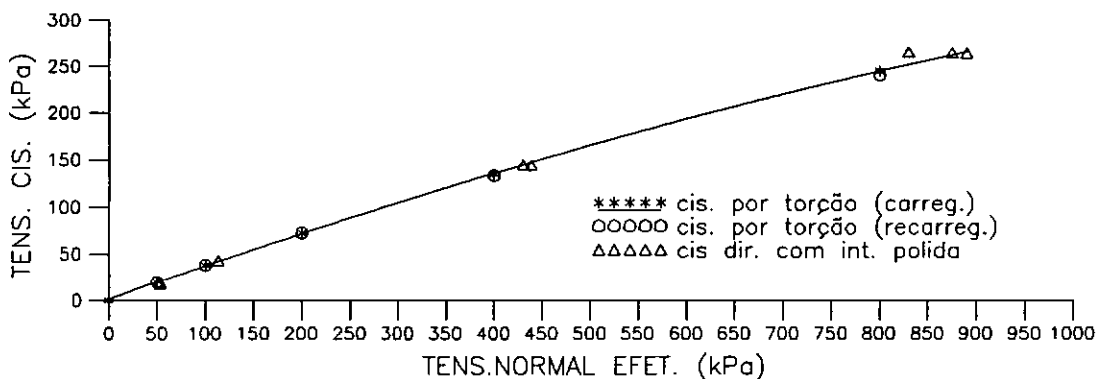
Fig.IV.26 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO COM INTERFACE POLIDA - 100% DE CAULIM



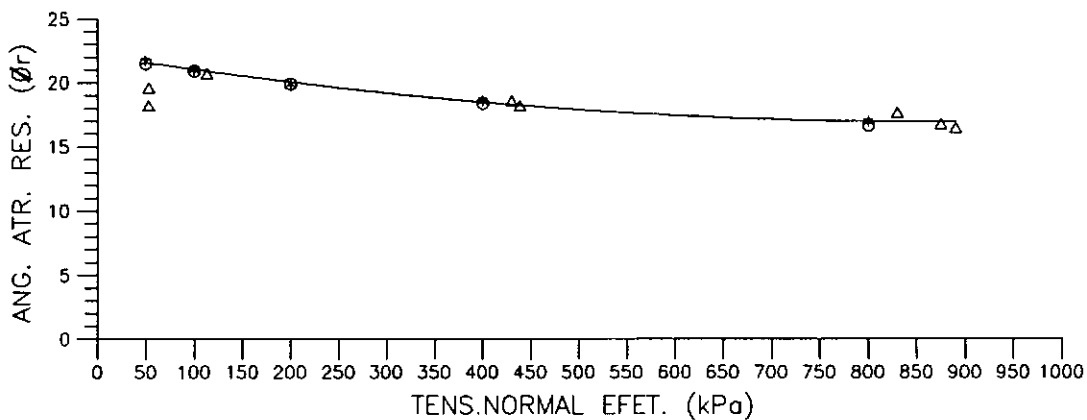
Tab. IV.6 - Resultados obtidos dos ensaios de cis. direto com interface polida (100% de caulim) - técnica de único estágio

$\sigma'_n$ (kPa)	$\phi'_r$ (graus)		
	s/ reversões	s/ descarregamento nas reversões	c/ descarregamento nas reversões
53	19,6* 18,2*	-	-
113	-	20,7	-
430	-	18,6	-
439	-	-	18,2
830	17,7	-	-
875	-	16,8	-
890	-	-	16,5

\* Valores obtidos antes do tombamento do "top cap"



## a) ENVOLTÓRIA



## b) ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL VERSUS TENSÃO NORMAL EFETIVA

Fig.IV.27 - ENSAIOS COM 100% DE CAULIM  
COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE  
CIS. POR TORÇÃO E CIS. DIRETO

## CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

## V.1 - Conclusões

O objetivo de se ganhar experiência com o equipamento de cisalhamento por torção tipo Bromhead foi atingido, permitindo assim a elaboração de um manual de utilização. Cabe mencionar que o equipamento já se encontra em funcionamento, fazendo parte do programa de ensaios da tese em andamento de Silveira (1992).

A envoltória residual completa de misturas caulim-bentonita ensaiadas no presente trabalho nas quais a técnica de multiestágio foi adequada pode ser obtida no equipamento de cisalhamento por torção tipo Bromhead em ensaios com dois dias de duração. Nas misturas argilosas, onde a técnica de único estágio se fez necessária, a obtenção da envoltória residual completa com cinco pontos pode ser obtida em sete dias de ensaio. Assim sendo confirmou-se a praticidade deste equipamento tanto para fins acadêmicos como para fins comerciais.

A técnica de multiestágio para solos de comportamento turbulento utilizando o equipamento de cisalhamento por torção apresentou bons resultados, otimizando a obtenção de envoltórias residuais completas, e assim possibilitando a rápida utilização em projetos. A unicidade da curva  $\tau/\sigma'_n$  versus  $\sigma'_n$ , fazendo uso da técnica de multiestágio, foi

comprovada no presente trabalho. Entretanto para a medida da resistência residual, no recarregamento, a tensões inferiores a que a amostra tenha sido submetida, recomenda-se descarregar totalmente a amostra, devido à energia armazenada no sistema de medição de torque, antes do recarregamento.

A técnica de único estágio foi utilizada para solos argilosos no equipamento de cisalhamento por torção. Esta técnica, apesar de demandar mais tempo que a técnica de multiestágio, apresenta as seguintes vantagens comparada com a técnica de único estágio do ensaio de cisalhamento direto: moldagem dos corpos de prova e inexistência de problemas como tombamento do top cap e possível atrito metal-metal mesmo com grandes deslocamentos.

Não foi conclusiva qual a técnica mais adequada (multiestágio ou único estágio) para solos de comportamento transicional, visto que foram ensaiadas no presente trabalho misturas silte-argila.

O equipamento de cisalhamento direto com a técnica de reversões apresenta dificuldades inerentes, já estudadas por vários autores. Entretanto a técnica de interface polida mostrou-se como uma alternativa eficaz para obtenção da envoltória de resistência residual, comparável esta última com a obtenção destes parâmetros residuais utilizando o equipamento de cisalhamento por torção tipo Bromhead. Assim sendo concluiu-se que ambos os equipamentos podem ter uso corrente no Brasil,

salientando-se porém, que o equipamento de cisalhamento por torção demanda menos tempo de ensaio.

Obtiveram-se boas correlações de parâmetros com a resistência residual ( $\phi'_r$  versus CF,  $\phi'_r$  versus IP,  $\phi'_r$  versus CALIP) nas misturas, incentivando assim o estudo futuro destas correlações para solos naturais.

## V.2 - Sugestões para pesquisas futuras

São as seguintes as sugestões para pesquisas futuras:

a) Estudar a linearidade e a não linearidade das envoltórias residuais das misturas ensaiadas no presente trabalho. Sugere-se ainda estudar a adequação da expressão proposta por Maksimovic (1989) nas envoltórias não lineares.

b) Estudo da influência da velocidade de cisalhamento na resistência residual de vários solos brasileiros, citando-se por exemplo a argila do Sarapuí de interesse atual em várias pesquisas realizadas na COPPE.

c) Estudo de casos de escorregamentos onde a resistência residual pode ter sido atingida, incluindo análises mineralógicas no programa de ensaios. Assim procedendo poder-se-ia estabelecer correlações entre parâmetros, adequados a solos brasileiros, especialmente os solos residuais de basalto e granito-gnaise.

d) Estudar o caso de solos levados à condição residual no equipamento de cisalhamento por torção e desligar a máquina permitindo o "creep" sob a ação dos anéis dinamométricos tensionados.

e) Estudo do mecanismo de solos que apresentam comportamento transicional. Segundo Skempton (1985) a velocidade de cisalhamento tem influência acentuada nestes solos.

f) Automatização do ensaio de cisalhamento por torção tipo Bromhead para ensaios de duração prolongada e/ou variação de velocidade.

g) Amplo programa de ensaios a nível nacional em amostras indeformadas, remoldadas e reconstituídas usando o equipamento de cisalhamento direto com reversão, o equipamento de cisalhamento por torção tipo Bromhead e o equipamento de cisalhamento por torção tipo IC-NGI (para amostras indeformadas).

h) Estudo da relação  $\phi'_r$  versus deslocamento e  $\phi'$  versus deformação associado ao grau de orientação das partículas, relacionando-o com o seu passado histórico e geológico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAYI, J.T., BOYCE, J.R., e ROGERS, C.D.F., (1989), "Modified Bromhead Ring Shear Apparatus", Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials, GTJODJ, vol. 12, No. 2, p. 171-173.
- ANDERSON, W.F. e HAMMOUD, F., (1988), "Effect of Testing Procedure in Ring Shear Tests", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, vol. 11, No. 3, p. 204-207.
- BISHOP, A.W. e HENKEL, D.J., (1976), "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Edward Arnold (Publishers) Ltd, 2nd. ed. 1962.
- BISHOP, A.W., GREEN, G.E., GARGA, V.K., ANDRESEN, A. e BROWN, J.D., (1971), "A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength", Géotechnique, vol. 21, No. 4, p. 273-328.
- \*BJERRUM, L., (1967), "Progressive Failure in Slopes of Overconsolidated Plastic Clay and Clay Shales", The Third Terzaghi Lecture, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, SM5, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, p. 139-187.
- \*BJERRUM, L. e SIMMONS, N.E., (1960), "Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clays", Proc. Shear Strength of Cohesive Soils Conf. Colorado: Am. Soc. Civ. Engrs., p. 711-726.
- BJERRUM, L. e LANDVA, A., (1966), "Direct Simple-Shear Tests on a Norwegian Quick Clay", Géotechnique, vol. 16,

---

\* - trabalhos citados por autores diversos, isto é, não consultados.

No. 1, p. 1-20.

BLONDEAU, F e JOSSEAUME, H., (1976), "Mesure de la Résistance au Cisaillement Résiduelle en Laboratoire", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Stabilité des Talus, Ministère de L'Équipement, numéro spécial II, p. 90-106.

BROMHEAD, E.N., (1979), "A Simple Ring Shear Apparatus", Ground Engineering, vol. 12, No. 5, p. 40-44.

BROMHEAD, E.N. e CURTIS, R.D., (1983), "A Comparison of Alternative Methods of Measuring the Residual Strength of London Clay", Ground Engineering, vol. 16, No 4, p. 39-41.

BROMHEAD, E.N., (1986), "The Stability Slopes", Surrey University Press, London.

BROMHEAD, E.N. e DIXON, N., (1986), "The Field Residual Strength of London Clay and its Correlation with Laboratory Measurements, Especially Ring-Shear Tests", Géotechnique, vol. 36, No. 3, p. 449-452.

\*BROOKER, E.W., (1964), "The Influence of Stress History on Certain Properties of Remolded Cohesive Soils", Ph.D. thesis, University of Illinois, p. 216.

\*BROOKER, E.W. e IRELAND, H.O., (1965), "Earth Pressures at Rest Related to Stress History", Can. Geot., Jnl. 2, No. 1, p. 1-15.

\*BUCHER, F., (1975), "Die Restscherfestigkeit natürlicher Boden, ihre Einflussgrößen und Beziehungen als Ergebnis experimenteller Untersuchungen", Report No. 103. Zurich: Institutes für Grundbau und Bodenmechanik Eidgenössische Technische Hochschule.

CAMPOS, T.M.P., (1974), "Resistência ao Cisalhamento de



Solos Residuais Micáceos", Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC/RJ.

\*CASAGRANDE, A. e HIRSCHFELD, R.C., (1960), "Stress-Deformation and Strength Characteristics of a Clay Compacted to a Constant Dry Unit Weight", American Society of Civil Engineers Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado, 1960, p. 359-417.

CESP, (1986), "Método de Ensaio MSL-16. Ensaio de Cisalhamento Direto em Solos por Torção - 'Ring Shear'", Companhia Energética de São Paulo, Laboratório Central de Engenharia Civil.

CHANDLER, R.J., (1966), "The Measurement of Residual Strength in Triaxial Compression", Géotechnique, vol. 16, No. 3, p. 181-186.

\*CHANDLER, R.J., (1969), "The Effect of Weathering on the Shear Strength Properties of Keuper Marl", Géotechnique, vol. 19, No. 3, p. 321-324.

\*CHANDLER, R.J., PACHAKIS, M., MERCER, J., e WRIGHT, J., (1973), "Four Long Term Failures of Embankments Founded on Landslips", Q.J.Eng.Geol., London, 6, p. 405-422.

CHANDLER, R.J. e HARDIE, T.N., (1989), "Thin-sample Technique of Residual Strength Measurement", Géotechnique, vol. 39, No. 3, p. 527-531.

CLAYTON, C.R., (1989), "The Ring Shear Test", University of Surrey, comunicação pessoal - Manual do ensaio (utilizado nos cursos de ensaio de laboratório).

COLLOTTA, T., CANTONI, R., PAVESI, U., RUBERL, E. e MORETTI, P.C., (1989), "A Correlation Between Residual

Friction Angle, Gradation and the Index Properties of Cohesive Soils", *Géotechnique*, vol. 39, No. 2, p. 343-346.

\*COOLING, L.F. e SMITH, D.B., (1935), "The Shearing Resistance of Soils", *Jnl. Instn. Civ. Engrs.*, 3, p. 333-343.

\*COOLING, L.F. e SMITH, D.B., (1936), "The Shearing Resistance of Soils", *Proc. 1 st Int. Conf. Soil Mech.*, Harvard, 1, p. 37-41.

\*DEERE, D.U., (1967), "Shale Mylonites - Their Origin and Engineering Properties", *Ass. Eng. Geol., Nat. Meeting*, Dallas, Texas.

\*DEERE, D.U., (1974), comunicação pessoal a Mithcell (1976).  
DUARTE, J.M.G., (1986), "Um Estudo Geotécnico Sobre o Solo da Formação Guabirotuba, com Ênfase na Determinação da Resistência Residual", Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

\*FLEISCHER, S., (1972), "Scherbruch und Schergleitfestigkeit von Bindigen Erdstoffen", *Neue Bergbautechnik* 2, No. 2, p. 98-99. Freiburg: Mining Academy.

GIBO, S., EGASHIRA, K. e OHTSUBO, M., (1987), "Residual Strength of Smectite-Dominated Soils from the Kamenose Landslide in Japan", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 24, p. 456-462.

GIBSON, R.E. and D.J. HENKEL, (1954), "Influence of Duration of Tests at Constant Rate of Strain on Measured Drained Strength", *Géotechnique*, vol. 4, p. 6-15.

\*GRUNER, H.E. e HAEFELI, R., (1934), "Beitrag zur Untersuchung des Physikalischen und Statischen

Verhaltens Roharenter Boden [Contribution to the Investigation of the Physical and Static Behaviour of Cohesive Soils]", Schweiz. Bauztg, 103, p. 171-174 e p. 185-188.

\*HAEFELI, R., (1938), "Mechanische Eigenschaften von Lockergesteinen", Schweiz. Bauztg, 111, p. 299-303 e p. 321-325.

\*HAWKINS, A.B. e PRIVETT, K.D., (1981), "A Building Site on Cambered Ground at Radstock, Avon", Q.J.Eng.Geol., London, 14, p. 151-167.

HAWKINS, A.B. e PRIVETT, K.D., (1985), "Measurement and Use of Residual Shear Strength of Cohesive Soils", Ground Engineering, vol. 18, No. 8, p. 22-29.

HEAD, K.H., (1982), "Manual of Soil Laboratory Testing", Pentech Press, London, vol. 2.

HEAD, K.H., (1989), "Soil Technicians' Handbook", Pentech Press, London.

\*HERRMANN, H.G. e WOLFSKILL, L.A., (1966), "Residual Shear Strength of Weak Shales", Technical Report, No. 3-699, Engineering Properties of Nuclear Craters, Report 5. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

\*HOLT, J.K., (1962), "The Soils of Hong Kong's Coastal Waters", Symp., Hong Kong Joint Group Committee, p. 33-51. Hong Kong: Inst. Civ., Mech. and Elect. Engrs.

\*HUTCHINSON, J.N., BROMHEAD, E.N. e LUPINI, J.F., (1979), "Additional Observations on the Coastal Landslides of Folkestone Warren", Q. Jl. Eng. Geot. in press.

\*HVORSLEV, M.J., (1936), "A Ring Shearing Apparatus for the

Determination of the Shearing Resistance and Plastic Flow of Soils", Proc. 1 st Int. Conf. Soil Mech., Boston 2, p. 125-129.

\*HVORSLEV, M.J., (1937), "Uber die Festigkeitseigenschaften gestorter bindiger Boden [On the Strength Properties of Remoulded Cohesive Soils]", p. 159. Thesis, Published by Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, Ingeniorvidenskabelige Skriffter, Series A, No. 45, Copenhagen. Translated June 1969 by USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

\*HVORSLEV, M.J., (1939), "Torsion Shear Tests and Their Place in the Determination of the Shearing Resistance of Soils", Proc. Am. Soc. Test. Mater. 39, p. 999-1022.

\*HVORSLEV, M.J., (1960), "Physical Components of Shear Strength of Saturated Clays", Proc. Res. Conf. Shear Strength Cohesive Soils, Boulder, p. 169-273. American Society of Civil Engineers.

\*HVORSLEV, M.J. e KAUFMAN, R.J., (1952), "Torsion Shear Apparatus and Testing Procedures", Bull, No. 38, Vicksburg, Mississippi: USAE Waterways Experiment Station.

\*INGOLD, T.S., (1975), "Discussion in: Proc. Symp. Engineering Behaviour of Glacial Materials", Midland Soil Mech. and Foundn. Engng. Soc., p. 246-249.

\*KANJI, M.A., (1970), "Shear Strength Along Soil Rock Interfaces", M.Sc. Thesis, University of Illinois, Urbana, p. 69.

\*KANJI, M.A., (1972), "Resistência ao Cisalhamento Direto de Contactos Solo-Rocha", in Portuguese, Doctoral

Dissertation, Universidade de São Paulo, p. 139 .

KANJI, M.A., (1974a), "Unconventional Laboratory Tests for the Determination of the Shear Strength of Soil-Rock Contacts", Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech. Denver (Colorado), VII A, p. 241-247.

KANJI, M.A., (1974b), "The Relationship Between Drained Friction Angles and Atterberg Limits of Natural Soils", Géotechnique, vol. 24, No. 3, p. 671-674.

KANJI, M.A. e WOLLE, C.M., (1977), "Residual Strength - New Testing and Microstructure", Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", vol. 1, p. 153-154.

\*KENNEY, T.C., (1959), "Discussion on Geotechnical Properties of Glacial Lake Clays", Jnl Am. Soc. Civ. Engrs., vol. 85, SM3, Part 1, p. 67-79.

KENNEY, T.C., (1967), "The Influence of Mineral Composition on the Residual Strength of Natural Soils", Proceedings of the Geotechnical Conference, Oslo, vol. 1, p. 123-129.

KENNEY, T.C., (1977), "Residual Strengths of Mineral Mixtures", Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", vol. 1, p. 155-160.

\*LA GATTA, D.P., (1970), "Residual Strength of Clays and Clay-Shales by Rotation Shear Tests", Harvard Soil Mechanics Series, No. 86, Cambridge, Massachusetts: Harvard University.

\*LITTLETON, I., (1976), "An Experimental Study of the Adhesion between Clay and Steel", J. Terramech. 13, No. 3, p. 141-152.

- LUPINI, J.F., (1980), "The Residual Strength of Soils", Ph.D. Thesis, University of London.
- LUPINI, J.F., SKINNER, A.E. e VAUGHAN, P.R., (1981), "The Drained Residual Strength of Cohesive Soils", *Géotechnique*, vol. 31, No. 2, p. 181-213.
- MAKSIMOVIC, M., (1989), "On the Residual Shearing Strength of Clays", *Géotechnique*, vol. 39, No. 2, p. 347-351.
- \*MARSH, A.D., (1972), "Determination of Residual Shear Strength of Clay by a Modified Shear Box Method", TRRL Report LR 515, Department of the Environment, Department of Transport, Crowthorne, Berks.
- \*MITCHELL, N.W.R., (1965), "Direct Shear Tests on Thin Samples of Remolded Shales from Bighorn Mountains, Wyoming", MS thesis, University of Illinois, p. 49.
- MITCHELL, J.K., (1976), "Fundamentals of Soil Behavior", John Wiley & Sons, Inc.
- \*PATTON, F.D., (1968), "The Determination of Shear Strength of Rock Masses", paper presented to the Terrametric Course on Measurement Systems for Control of Construction and Mining, Denver, Col. p. 37.
- \*PETLEY, D.J., (1966), "The Shear Strength of Soils at Large Strains", Ph.D. thesis, University of London.
- \*RAMIAH, B.K., DAYALU, N.K. e PURUSHOTHAMARAJ, P., (1970), "Influence of Chemicals on Residual Strength of Silty Clay", *Soils and Foundation* 10, p. 25-36.
- \*ROSCOE, K.H., (1953), "An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples", Proc. 3rd. Int. Conf. Soil Mech., Zurich 1, p. 186-191.
- SERAPHIM, L.A., (1974), "Algumas Observações Geotécnicas de um Corte de Solo Residual da Guanabara", Tese de

Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC/RJ.

- \*SEYČEK, J., (1978), "Residual Shear Strength of Soils", Bull Int. Ass. Engng. Geol. 17, p. 73-75.
- SILVEIRA, G.C., (1992), "Características Geomecânicas dos Solos Residuais e Coluvionares do Escorregamento na Estrada do Soberbo-RJ", Tese de Mestrado em andamento, COPPE/UFRJ.
- SKEMPTON, A.W., (1964), "Long-Term Stability of Clay Slopes", Fourth Rankine Lecture, Géotechnique, vol. 14, No. 2, p. 77-101.
- SKEMPTON, A.W., (1970), "First Time Slides in Over-Consolidated Clays", Géotechnique, vol. 20, No. 3, p. 320-324
- SKEMPTON, A.W., (1985), "Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory", Géotechnique, vol. 35, No. 1, p. 3-18.
- \*SKEMPTON, A.W. e PETLEY, D.J., (1967), "The Strength Along Structural Discontinuities in Stiff Clays", Proceeding of Geotechnical Conference, Oslo 2, p. 29-46. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute.
- \*SKINNER, A.E., (1969), "A Note on the Influence of Interparticle Friction on the Shearing Strength of a Random Assembly of Spherical Particles", Géotechnique, vol. 19, No. 1, p. 150-157.
- \*TIEDEMANN, B., (1937), "Über die Schubfestigkeit bindiger Boden", Bautechnik 15, No. 30 e 33, p. 400-403, p. 433-435.
- TOWNSEND, F.C. e GILBERT, P.A., (1973), "Tests to Measure Residual Strengths of Some Clay Shales", Géotechnique, vol. 23, No. 1, p. 267-271.

- \*TULINOV,R. e MOLOKOV,I., (1971), "Role of Joint Filling Material in Shear Strength of Rocks", Int. Soc. Rock Mech., Symposium on Rock Fracture, Nancy, vol. 2, p. 13.
- \*VAUGHAN,P.R. e WALBANCKE,H.J., (1975), "The Stability of Cut and Fill Slopes in Boulder Clay", Proceeding of Symposium on Engineering Behaviour of Glacial Materials, p. 209-219. Birmingham: Midland Society Soil Mechanics.
- \*VAUGHAN,P.R., HIGHT,D.W., SODHA,V.G. e WALBANCKE,H.J., (1978), "Factors Controlling the Stability of Clay Fills in Britain", Clay Fills, p.203-217. London: Intitution of Civil Engineers.
- VOIGHT,B., (1973), "Correlation between Atterberg Plasticity Limits and Residual Shear Strength of Natural Soils", Géotechnique, vol. 23, No. 1, p. 265-267.
- \*WOLLE,C., (1975), "Resistência de Contatos Solo-Rocha", Seminário, Escola Politécnica, USP, p. 38.
- WOOD,D.M, (1990), "Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics", Cambridge University Press.
- WYKEHAM FARRANCE ENGINEERING LIMITED, (1987), "WF 25850 - The Bromhead Ring Shear Test",



## APÊNDICE A

**MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO  
POR TORÇÃO TIPO BROMHEAD (1979)**

Para o amplo entendimento do exposto a seguir aconselha-se ler o capítulo III do presente trabalho. A moldagem do corpo de prova não é descrita neste apêndice por ser parte do capítulo III.

Este manual baseou-se no manual do fabricante, em Clayton (1989) e na experiência da autora da presente tese. Descreve-se a seguir as etapas para utilização do equipamento de cisalhamento por torção desenvolvido por Bromhead (1979).

**A.1 - NIVELAMENTO DO EQUIPAMENTO**

Após a montagem do equipamento procede-se o nivelamento deste, o qual deverá estar assentado sobre suporte com tampo vazado, para permitir o acesso ao contrapeso (5)\*.

Com o auxílio de um nível de bolha nivela-se o equipamento longitudinalmente e transversalmente tomando-se como referência a face superior do equipamento.

---

\* - Os números entre parênteses referem-se aos números das peças apresentados nas figuras III.4 a III.6.

## A.2 - PREPARAÇÃO DOS PESOS

As tensões normais a serem aplicadas às amostras devem levar em conta a limitação do equipamento de  $\sigma_n = 1000$  kPa. Verificou-se tombamento da máquina ao se ultrapassar este limite.

Procede-se a pesagem das cargas, as quais são provenientes dos cálculos indicados no capítulo III do presente trabalho. Nos ensaios em multiestágio aconselha-se a arrumação prévia dos pesos de maneira a evitar o tombamento dos mesmos na seqüência de carregamento.

## A.3 - LUBRIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Para o correto funcionamento do equipamento deve-se verificar previamente o nível de óleo (25) e as lubrificações do parafuso sem-fim (22) e da engrenagem tipo coroa (21).

## A.4 - ZERAGEM DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Esta etapa deve ser executada com bastante cuidado, dispensando-se a ela o tempo que for necessário.

### A.4.1 - Posicionamento das peças para a zeragem do sistema de medição

Começa-se a zeragem do sistema de medição apoiando-se

a canga de carregamento (7) nos pinos de repouso da canga (10).

Limpa-se a base rotativa (27) para evitar que detritos se localizem entre esta e a célula de cisalhamento.

Com auxílio dos parafusos para elevação do disco inferior (35) assenta-se a parte inferior da célula de cisalhamento (33). Se as hastes transmissoras de torque (13) estiverem posicionadas dificultando esta etapa, procede-se à liberação dos garfos dos anéis dinamométricos (11) através das travas de desengaste rápido (15). As porcas recartilhadas (36) são então firmemente aparafusadas.

A seguir coloca-se o anel de aço polido (fabricado na oficina do laboratório de geotecnia da COPPE), ocupando a cavidade do disco inferior destinada ao solo (34), estando a cavidade, por sua vez, livre de detritos. Este anel, como não está incluído nos acessórios do equipamento, deve ser confeccionado de maneira a ficar nivelado com o disco inferior. O anel usado no presente trabalho mostra-se na figura A.1 (diâmetro interno =  $d_i + 0,05$  mm; diâmetro externo =  $d_e - 0,05$  mm).

A seguir coloca-se a parte superior da célula de cisalhamento (fig. III.8.a à III.8.c), incluindo a esfera de aço no encaixe do pino centralizador (40). Aconselha-se verificar antes da colocação da parte superior da célula,

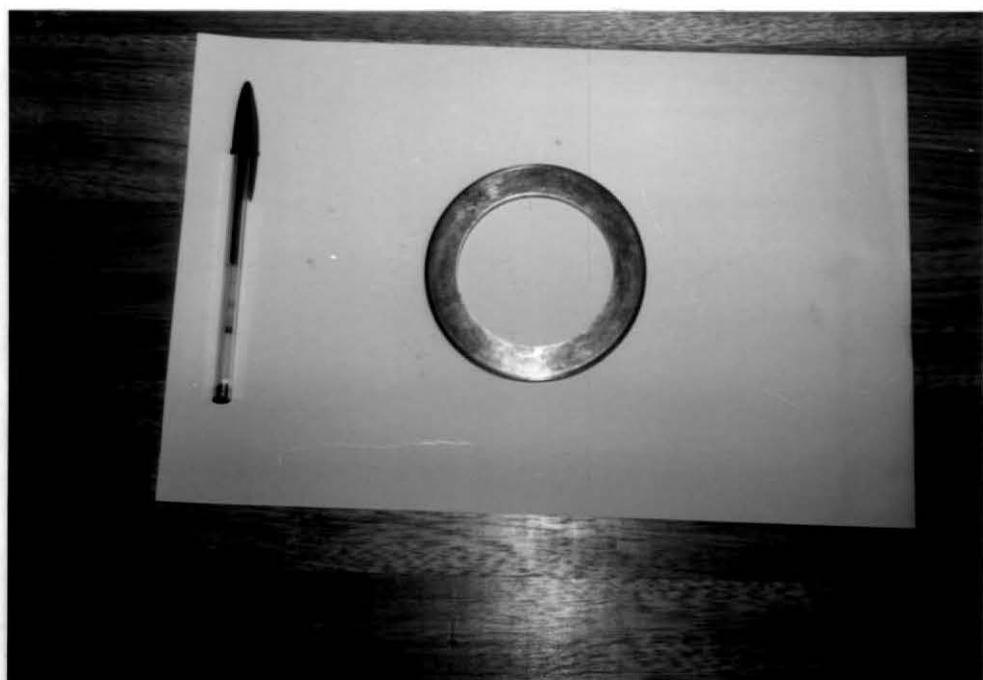


Fig. A.1 - Anel de Aço para Zeragem  
do Sistema de Medição

se o orifício (fig. III.8.c detalhe A) para a saída de ar do top cap está desobstruído (verificou-se no presente trabalho que a obstrução do mesmo forma um "colchão de ar" entre o topo do pino de centragem (28) e o encaixe de top cap (38), quando se processa a lubrificação destes contatos).

Coloca-se a canga de carregamento (7) na posição vertical, posicionando o parafuso de ajuste da canga (8) sobre o pino centralizador (40). Nesta etapa deve-se ter o cuidado de não danificar o extensômetro vertical (42); para isso eleva-se manualmente a haste do mesmo e auxilia-se a movimentação da canga conduzindo o braço de

alavanca (3). Em seguida centraliza-se o extensômetro vertical sobre o parafuso de ajuste da canga (8).

#### A.4.2 - Procedimento para zeragem do sistema de medição

O procedimento a seguir deve ser executado meticulosamente.

Ajusta-se simultaneamente a canga de carregamento (7), girando-se o parafuso de ajuste da canga (8), e o braço de alavanca (3), movimentando-se o contrapeso (5). O posicionamento do braço de alavanca na horizontal é facilitado fixando-se um nível de bolha na extremidade do mesmo, após a demarcação do seu eixo. A ajustagem do parafuso de ajuste de canga (8) é feita de maneira a não se transmitir carga do sistema canga-braço de alavanca-pendural à célula de cisalhamento (fig. III.8.a à III.8.c); para isso o parafuso de ajuste da canga é movimentado até que se apoie levemente sobre o pino centralizador (40). A porca de ajuste da canga (9) é então movimentada para garantir a posição do parafuso de ajuste da canga.

Com o mesmo cuidado a respeito do extensômetro vertical (42), mencionado no item A.4.1, retorna-se a canga para os pinos de repouso (10).

A seguir posiciona-se as hastes transmissoras de torque (13) a  $90^\circ$  do braço do torque (39), fazendo uso de um esquadro, demarcando-se os eixos dos garfos (11) e

do braço de torque (39). Para facilitar este posicionamento aciona-se o acoplamento das engrenagens (19). Finaliza-se este posicionamento ajustando as quatro travas de desengate rápido (15) e, posteriormente, libera-se o acoplamento das engrenagens.

#### A.5 - RETIRADA DA CELULA DE CISALHAMENTO

Concluída a zeragem do sistema de medição pode-se retirar a célula de cisalhamento para se proceder a moldagem do corpo de prova.

Cabe mencionar que o fabricante recomenda liberar as travas de desengate rápido e movimentar os garfos para a retirada da célula de cisalhamento. Entretanto o procedimento descrito a seguir mostrou-se mais prático.

Para se retirar a parte superior da célula (fig. III.8.a à III.8.c) recomenda-se movimentar a célula de cisalhamento no sentido anti-horário, com auxílio do volante manual (20), afastando assim o braço de torque das hastas transmissoras. Como se faz necessário a retirada das porcas recartilhadas (36) para a elevação da parte inferior da célula, movimenta-se a base rotativa (27), com auxílio do volante manual (sentido horário ou anti-horário), para possibilitar o manuseio dos porcas recartilhadas. A parte inferior da célula é então retirada utilizando os parafusos para elevação (35). Retira-se então o anel de aço polido (fig. A.1) da cavidade do disco inferior (34).

## A.6 - COLOCAÇÃO DA CÉLULA DE CISALHAMENTO CONTENDO A AMOSTRA

Após a moldagem do corpo de prova lubrifica-se adequadamente o pino de centragem (28), o orifício central do disco inferior (33) e o encaixe central do top cap (38).

Como os garfos (11) já se encontram adequadamente posicionados e a canga apoiada nos pinos de repouso (10), resultante da etapa de zeragem do sistema de medição, a colocação da célula de cisalhamento contendo a amostra de solo é facilitada. A parte inferior da célula (fig. III.8.c) é encaixada na base rotativa (27) utilizando os parafusos para elevação (35) e fixada com as porcas recartilhadas (36). A parte superior (fig. III.8.c) é encaixada no pino de centragem (28) apoiando-se sobre a parte inferior da célula.

## A.7 - COLOCAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE CARGA

A canga de carregamento (7), que se encontra apoiada nos pinos de repouso (10), é levada para a posição ajustada na etapa de zeragem do sistema de medição.

Nesta etapa aconselha-se evitar impactos no sistema auxiliando a movimentação da carga segurando-se o braço de alavanca (3) e elevando a haste do extensômetro vertical (42). Assim procedendo o parafuso de ajuste da canga (8) ficará localizado entre o extensômetro vertical e a esfera

de aço, que por sua vez se encontra no centro do pino centralizador (40) da parte superior da célula de cisalhamento.

#### A.8 - CARREGAMENTO INICIAL E FORMAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE CISALHAMENTO

Com o sistema de transmissão de carga devidamente posicionado, procede-se à primeira leitura do extensômetro vertical (42).

Neste momento deve-se verificar se o parafuso limitador do curso do braço de alavanca (6) encontra-se próximo à base do equipamento, para permitir a livre movimentação do braço de alavanca (3) ao ser colocada a carga posteriormente.

Coloca-se cuidadosamente no pendural de carga (4), evitando impactos, o primeiro peso, correspondente à primeira tensão normal. Caso tenha-se programado executar a fase de adensamento antes da fase do cisalhamento, procede-se a leituras somente no extensômetro vertical (42) em intervalos de tempo previamente definidos.

Desengrena-se o equipamento liberando a acoplamento das engrenagens (19). A seguir, utilizando o volante manual (20), posiciona-se o braço de torque (39) de modo que seus encaixes fiquem em contato com as hastes transmissoras de torque (13).



Procede-se a seguir à formação da superfície de cisalhamento. Continuando-se com o equipamento desen-  
grenado gira-se o volante manual (20) uma revolução. Se  
houver pouco escape de solo da célula de cisalhamento  
pode-se girar mais duas revoluções.

Ao final destas rotações do volante manual, para se  
assegurar que o sistema de medição de torque não armazena  
energia devido a esta rotação imposta, alivia-se o sistema  
movimentando o volante manual no sentido anti-horário até  
que as hastes transmissoras de torque fiquem ligeiramente  
afastadas dos encaixes do braço de torque.

A seguir enche-se com água deionizada o recipiente de  
acrílico (31) inundando completamente a célula de  
cisalhamento.

#### A.9 - AJUSTE DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE TORQUE

O posicionamento dos garfos a  $90^\circ$  do eixo do braço de  
torque mantido pelas travas de desengate rápido, conforme  
recomendado na etapa de zeragem do sistema de medição,  
facilita o ajuste do sistema de transmissão do torque.

A etapa de ajuste do sistema de transmissão de torque  
tem como objetivo que ambos os extensômetros dos anéis  
dinamométricos (fig III.7) iniciem as leituras simulta-  
neamente quando o ensaio de cisalhamento for iniciado.  
Para tal ambas as hastes transmissoras de torque (13)  
necessitam entrar em contato com os encaixes do braço

de torque (39) simultaneamente.

As hastes se aproximam ou se afastam dos encaixes do braço de torque ao se girar as hastes e as porcas recartilhadas das extremidades das hastes. O autor do presente trabalho denomina a movimentação das hastes de "ajuste fino" e a movimentação das porcas recartilhadas de "ajuste grosso". O orifício das hastes facilitam o ajuste fino, usando um pino ou um prego para a movimentação destas.

Dependendo da experiência e habilidade do operador esta tarefa pode ser um pouco penosa, visto que a cada movimento nas hastes e nas porcas recartilhadas necessita-se observar ambos os extensômetros, garantindo que saiam do "zero" ao mesmo tempo.

Finalmente o ajuste deve ser checado aproximando-se as hastes (13), com o auxílio do volante manual (20), dos encaixes do braço de torque (39), verificando-se se ao leve contato ambos os extensômetros (fig. III.7) começam a se movimentar simultaneamente.

Concluída esta etapa, gira-se o volante manual no sentido anti-horário afastando as hastes, já ajustadas, do braço de torque. A seguir, gira-se o acoplamento das engrenagens (19), procurando seu encaixe sempre no sentido anti-horário.

#### A.10 - SELEÇÃO DA VELOCIDADE

A escolha da velocidade a ser adotada no ensaio é proveniente dos cálculos descritos no capítulo III.

Uma vez selecionada esta velocidade determina-se o par de engrenagens (17) e a posição da alavanca de mudança (16). O posicionamento da alavanca de mudança é facilitado por leves movimentos de vai-vem no volante manual (20).

#### A.11 - INÍCIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO

Inicia-se o movimento de rotação da base rotativa da célula (27) acionando no painel de controle (26) o botão de energização e em seguida o botão para acionamento do sistema de rotação. Entretanto o ensaio de cisalhamento se inicia quando os extensômetros dos anéis dinamométricos (fig. III.7) abandonam o "zero", ou seja, quando as hastes transmissoras de torque entram em contato com os encaixes do braço de torque. Assim sendo, dependendo de quanto as hastes estejam afastadas do braço de torque e da velocidade selecionada, o início do ensaio pode se dar em tempo prolongado.

Para se evitar esse transtorno (demora no início do ensaio) e para não se alterar a zeragem do equipamento e o ajuste do sistema de transmissão de torque, a autora do presente trabalho sugere desligar o botão para acionamento do sistema de rotação e aproximar o braço de torque (39) através do par de engrenagens (17) que podem ser

manuseadas retirando-se as porcas que fixam as mesmas, requerendo esta operação uma certa habilidade. Neste procedimento deve-se ter o cuidado de, ao se aproximar o máximo possível o braço de torque (39) das hastes (13), as hastes não fiquem em contato com os encaixes do braço de torque, sob o prejuízo de armazenarem energia no sistema de medição antes do início do ensaio de cisalhamento.

A seguir pressiona-se o botão para acionamento do sistema de rotação (26). O ensaio de cisalhamento é iniciado assim que os extensômetros dos anéis dinamométricos (fig. III.7) abandonem o "zero", instante em que o cronômetro é acionado.

#### A.12 - PROCEDIMENTO PARA O PRIMEIRO ESTÁGIO DE CARGA

Recomenda-se que as leituras nos dois extensômetros dos anéis dinamométricos e no extensômetro vertical sejam feitas na seguinte sequência: a cada 15 segundos até 5 minutos, a cada 1 minuto até 10 minutos, a cada 2 minutos até 20 minutos, seguindo o procedimento usual dos ensaios de adensamento, visto que o adensamento processa-se simultaneamente ao cisalhamento (Bromhead, 1986). A partir dos 20 minutos os intervalos de tempo devem ser escolhidos com bom senso considerando-se que o cisalhamento passa a ter maior importância.

Neste primeiro estágio (primeiro carregamento), ou seja, estágio de formação da superfície de cisalhamento recomenda-se (Clayton, 1989) começar o ensaio por volta

das 16 horas, observar as primeiras leituras e depois deixar a amostra cisalhando durante a noite, sem ser necessário fazer leituras neste período. Na manhã seguinte, aproximadamente entre 8:00 e 9:00 h, transcorridas 16 a 17 horas de ensaio, volta-se a fazer leituras de 5 em 5 minutos até que se observe leituras constantes do torque durante 20 a 30 minutos. Se tratar-se de ensaios utilizando a técnica de multiestágio o próximo estágio pode então ser iniciado (ver item A.13). Se a técnica utilizada for a de único estágio, o ensaio está finalizado, podendo ser descarregado (ver item A.14).

#### A.13 - PROCEDIMENTO PARA A TÉCNICA EM MULTIESTÁGIO

Antes da próxima carga ser colocada no pendural (4), ou seja, antes do próximo estágio de carga, eleva-se o parafuso limitador do curso do braço de alavanca (6) até que este entre em contato com o braço de alavanca (3). Deve-se ter o cuidado em não elevar o braço de alavanca, o que pode provocar um descarregamento na amostra. Para facilitar este controle observa-se os extensômetros dos anéis dinamométricos (fig. III.7).

Procede-se a seguir à colocação do peso relativo ao estágio que se deseja ensaiar.

Em seguida libera-se o braço de alavanca (3) abaixando o parafuso limitador de curso (6), acionando-se o cronômetro simultaneamente. Para assegurar o livre curso do braço de alavanca aconselha-se baixar o parafuso

limitador de curso até a base do equipamento.

Repete-se o procedimento de leituras descrito no primeiro parágrafo do item A.12. Entretanto nestes estágios (a partir do 2º estágio) a amostra não é cisalhada até o dia seguinte. As leituras com intervalo de tempo de 5 em 5 minutos são feitas continuamente até que se observe leituras constantes do torque durante 20 a 30 minutos.

#### A.14 - PROCEDIMENTO CORRETO PARA O DESCARREGAMENTO

Após o último estágio de carga desliga-se o botão de acionamento do sistema de rotação (26). Para a verificação da sensibilidade à velocidade, continua-se realizando leituras por mais uma hora aproximadamente (admite-se queda na leitura dos extensômetros dos anéis dinamométricos (fig. III.7) até cerca de 5% da leitura feita logo após desligado o botão de acionamento do sistema de rotação).

O descarregamento da amostra não pode ser executado imediatamente após o final do ensaio, para evitar perturbações na superfície de cisalhamento da amostra.

Recomenda-se antes do descarregamento aliviar o torque procedendo da seguinte maneira: libera-se o acoplamento das engrenagens (19) (como o sistema apresenta uma certa dificuldade à liberação do acoplamento das engrenagens, sugere-se uma pequena movimentação do

volante manual no sentido horário) e movimenta-se o volante manual (20) no sentido anti-horário até que o braço de torque (39) se afaste das hastes transmissoras de torque (13). A seguir descarrega-se totalmente a amostra.

#### **A.15 - REPETICAO DOS ESTAGIOS DE CARGA - TECNICA EM MULTIESTAGIO**

Nos ensaios utilizando a técnica em multiestágio recomenda-se recarregar a amostra à tensão normal do primeiro estágio, sendo necessário proceder às seguintes etapas já descritas anteriormente: ajuste do sistema de transmissão de torque, início do ensaio de cisalhamento e procedimento para a técnica em multiestágio (itens A.9, A.11 e A.13).

Se a tensão cisalhante final do primeiro estágio obtida no recarregamento for aproximadamente a mesma obtida no carregamento dá-se o ensaio como terminado. Caso haja diferença acentuada nos valores finais (superior a 5%) recomenda-se recarregar às tensões normais subseqüentes. Se a diferença permanecer ou aumentar, ou variar aleatoriamente, deve-se repetir o ensaio.

#### **A.16 - ESTAGIOS ADICIONAIS**

Com os resultados obtidos nos estágios de carga estabelecidos no programa de ensaios plota-se, além da

envoltória, a curva  $\tau_r/\sigma'_n$  versus  $\sigma'_n$ . Caso o trecho em curva se mostrar não muito bem definido recomenda-se executar outros estágios de carga para definir melhor esta curva.

#### A.17 - ANEXOS

Fazem parte deste manual as figuras III.4 a III.6 do item III.1.2 ("Lay-out") e as figuras III.7 a III.8.c do item III.1.3 ("Partes Constitutivas") do capítulo III.



## APÊNDICE B

**ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO SEM  
DESCARREGAMENTO NAS REVERSÕES**

As curvas  $\tau/\sigma'_n$  versus deslocamento dos ensaios de cisalhamento sem descarregamento nas reversões são apresentadas nas figuras B.1, B.2 e B.3, onde são mostrados todos os cursos realizados nestes três ensaios. O primeiro curso de cada um destes ensaios foi apresentado nas figuras IV.24, IV.25.a e IV.25.b do capítulo IV, respectivamente.

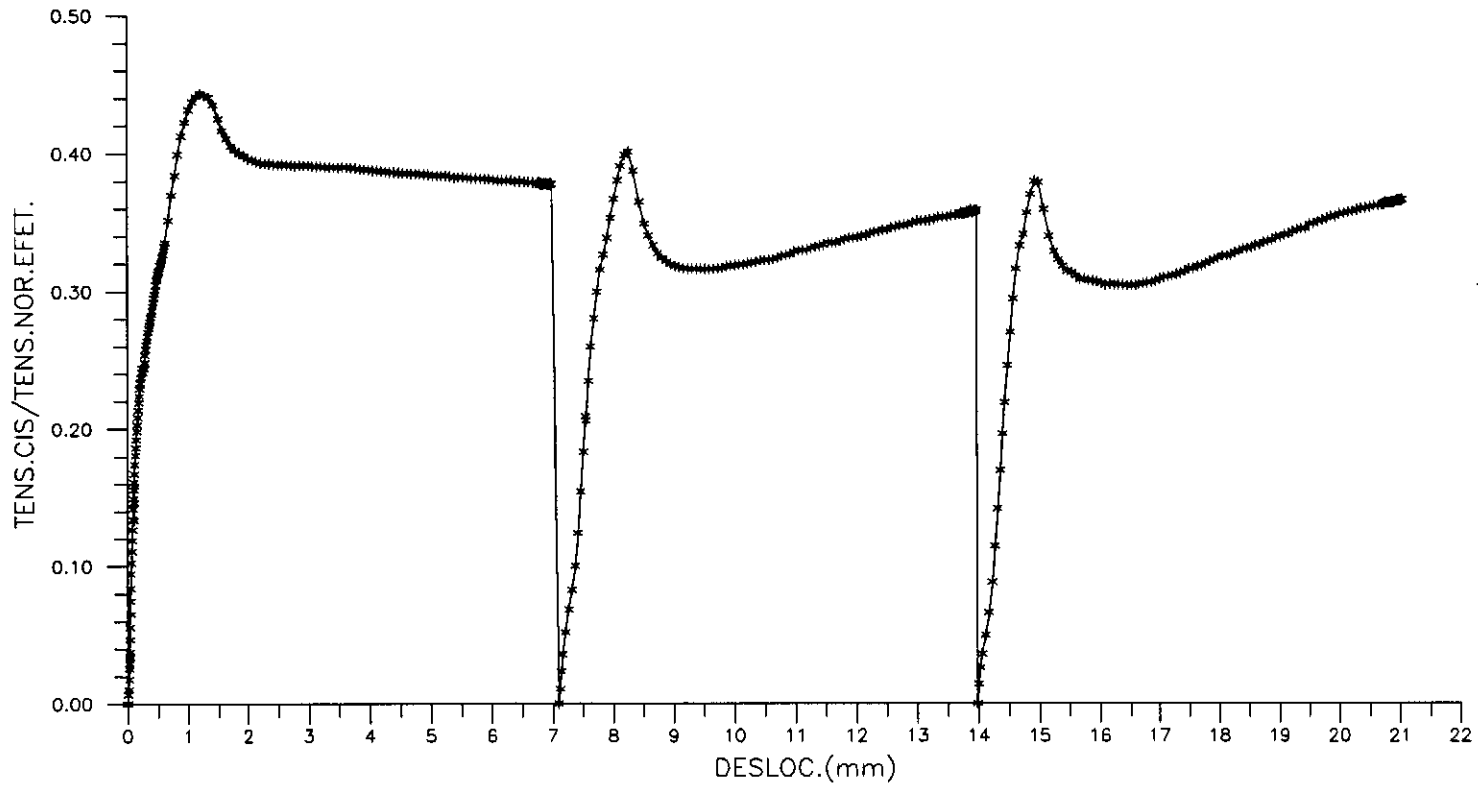


Fig.B.1 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO COM REVERSÃO  
 tensão normal = 100 kPa

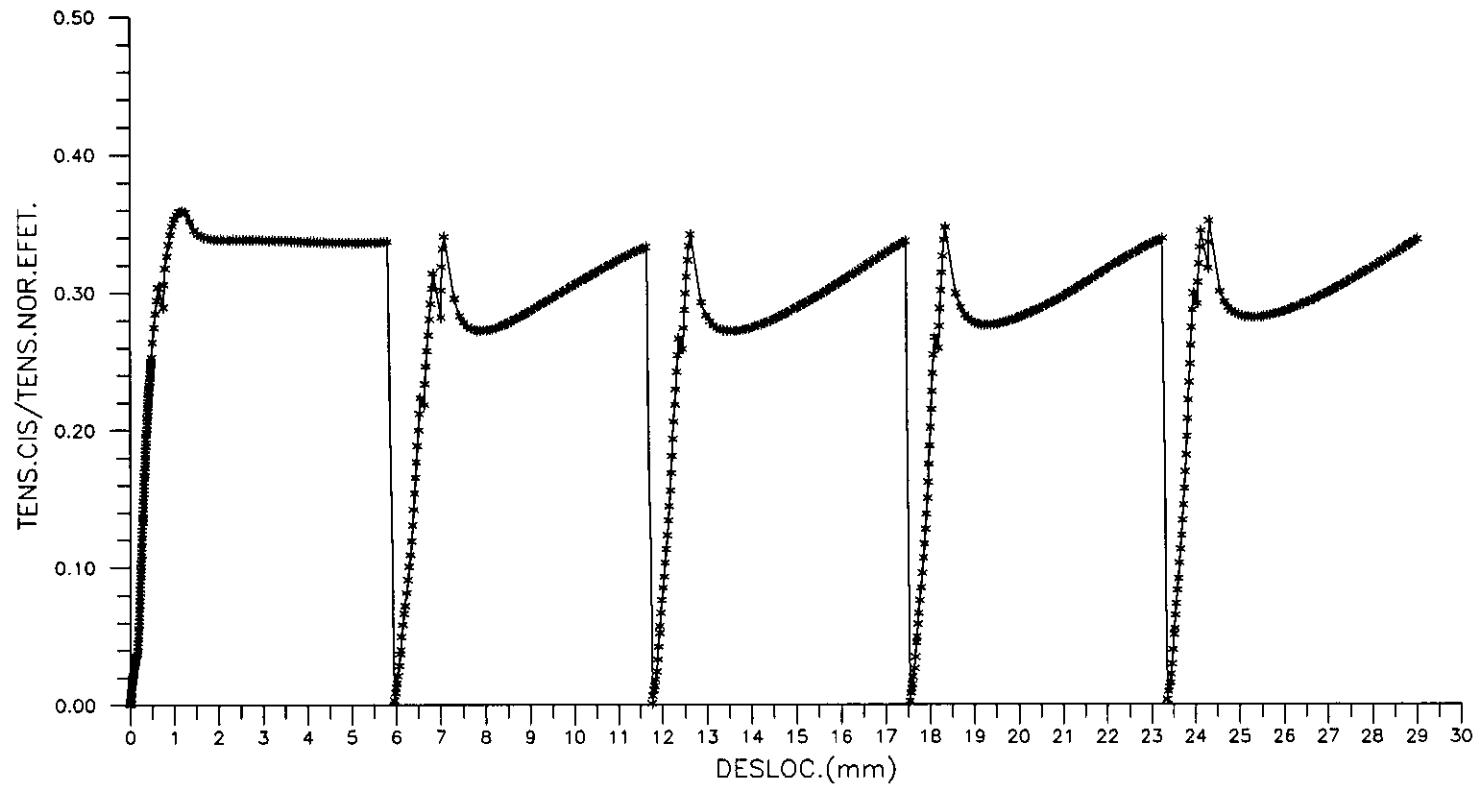


Fig.B.2 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO COM REVERSÃO  
tensão normal = 400 kPa

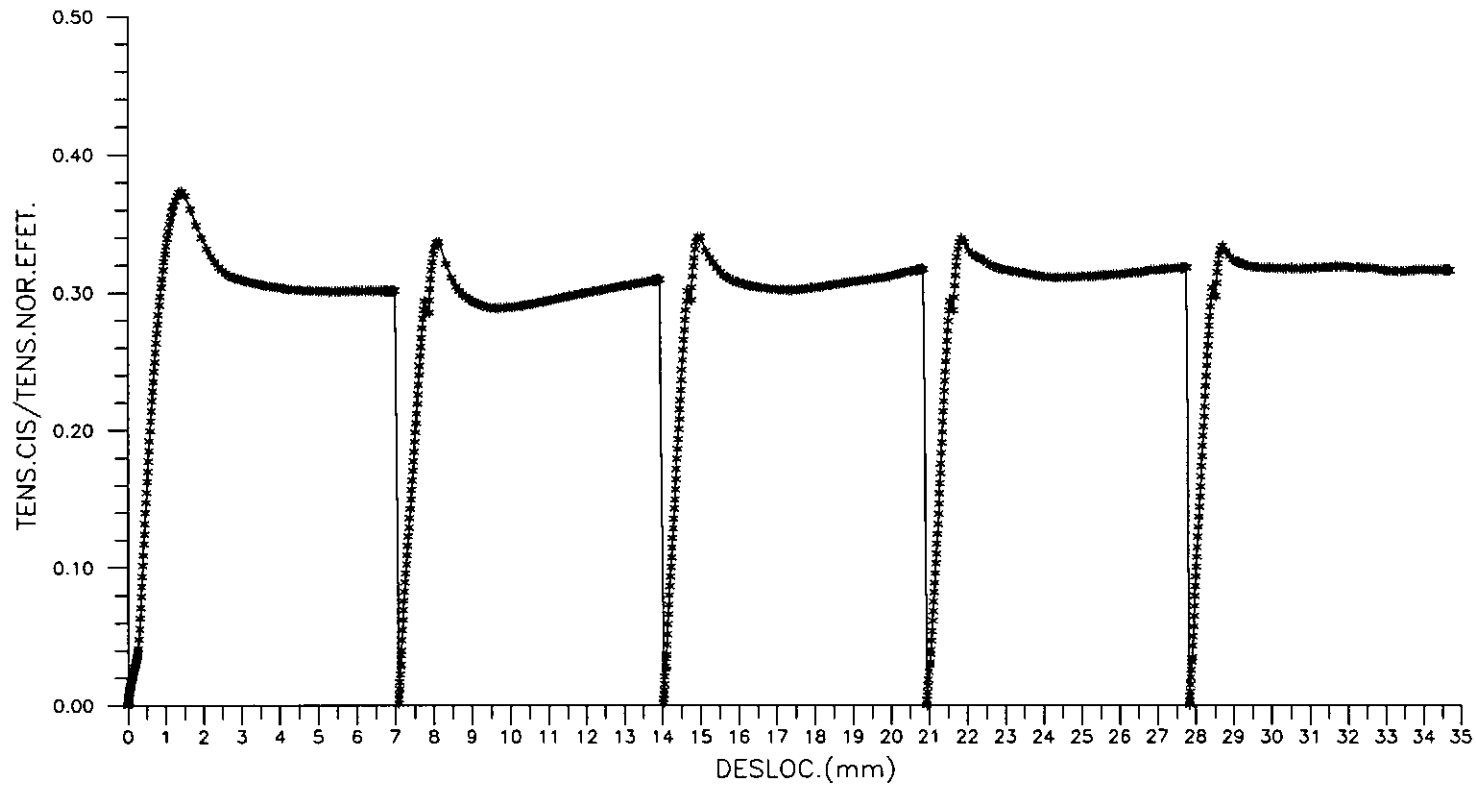


Fig.B.3 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO COM REVERSÃO  
 tensão normal = 800 kPa

## APÊNDICE C

## CALIBRAÇÕES

As calibrações dos anéis dinamométricos do equipamento de cisalhamento por torção tipo Bromhead foram realizadas com três seqüências carregamento-descarregamento para cada anel fazendo-se leituras nos extensômetros de sensibilidade 0,002 mm. Nas figuras C.1 e C.2 mostra-se uma das curvas de calibração do anel A e do anel B, respectivamente. Conferiu-se a constante de 0,050 Kgf/divisão para ambos os anéis.

As calibrações dos instrumentos medidores do equipamento de cisalhamento direto fizeram uso do sistema de aquisição de dados mostrado na figura III.19 do capítulo III.

Com o auxílio de um micrômetro foram realizadas três calibrações de alongamento-encurtamento nas hastes dos dois transdutores resistivos de deslocamento que se destinavam a medir os deslocamentos horizontal e vertical. Foram realizadas três seqüências de carregamento-descarregamento no anel dinamométrico instrumentado com transdutor resistivo de deslocamento fazendo-se leituras a cada 10 Kgf aproximadamente até 160 Kgf, considerando-se a capacidade do anel de 200 Kgf. As constantes calculadas foram as seguintes:  $7,04 \times 10^{-2} \text{ mV/mm.V}_{\text{ent}}$  para o transdutor de deslocamento horizontal;  $47,00 \times 10^{-2} \text{ mV/mm.V}_{\text{ent}}$  para o transdutor de deslocamento vertical; e  $0,11 \times 10^{-2} \text{ mV/N.V}_{\text{ent}}$  para o anel dinamométrico. Nas figuras C.3, C.4 e C.5 mostra-se uma das curvas de calibração de cada instrumento, na ordem que foram citados.

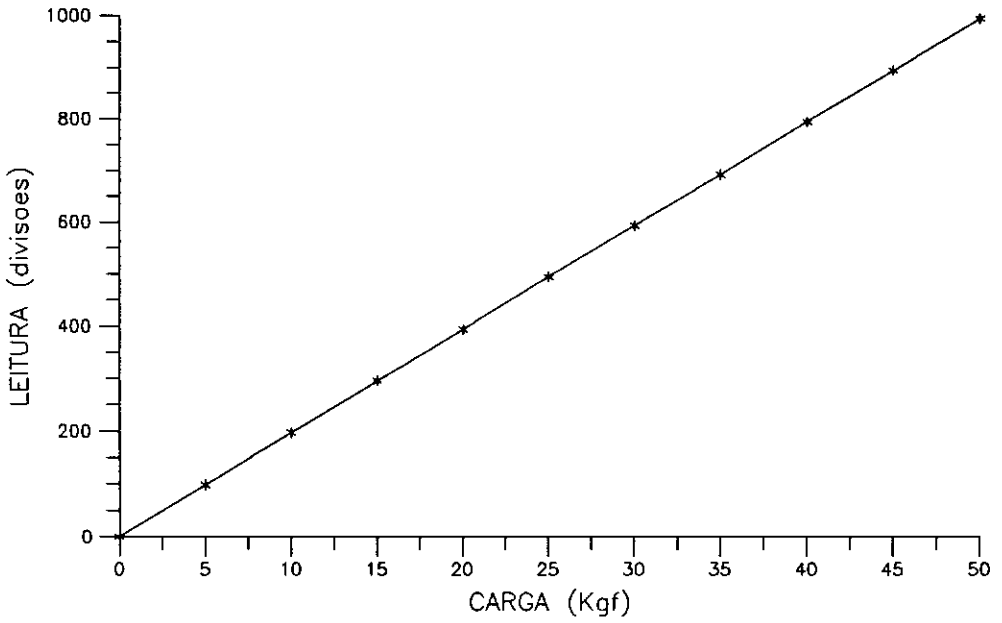


Fig.C.1 - CALIBRAÇÃO DO ANEL DINAMÉTRICO A

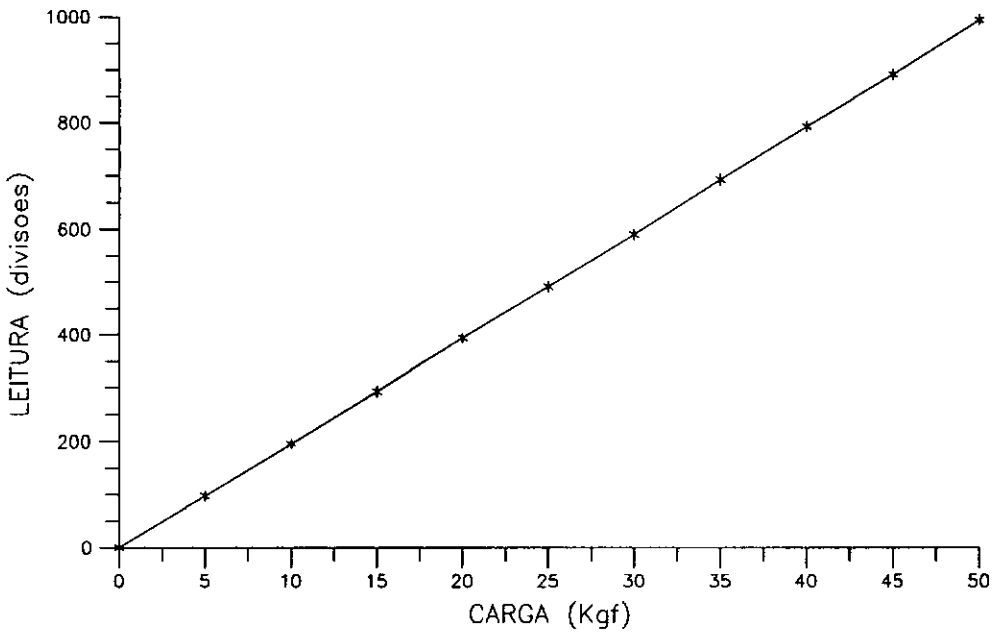


Fig.C.2 - CALIBRAÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO B

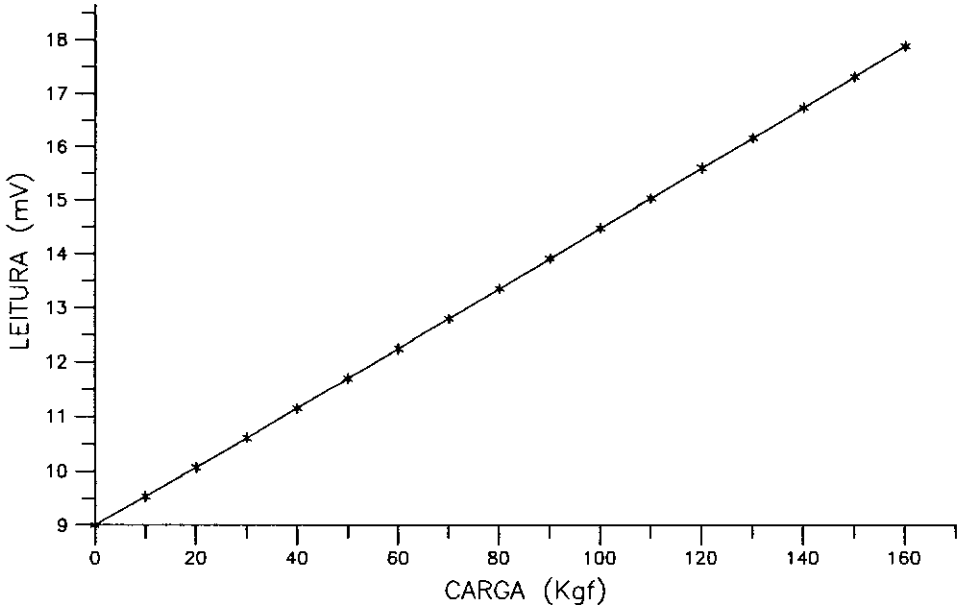


Fig.C.3 - CALIBRAÇÃO DO ANEL DINAMÉTRICO INSTRUMENTADO COM TRANSDUTOR RESISTIVO DE DESLOCAMENTO

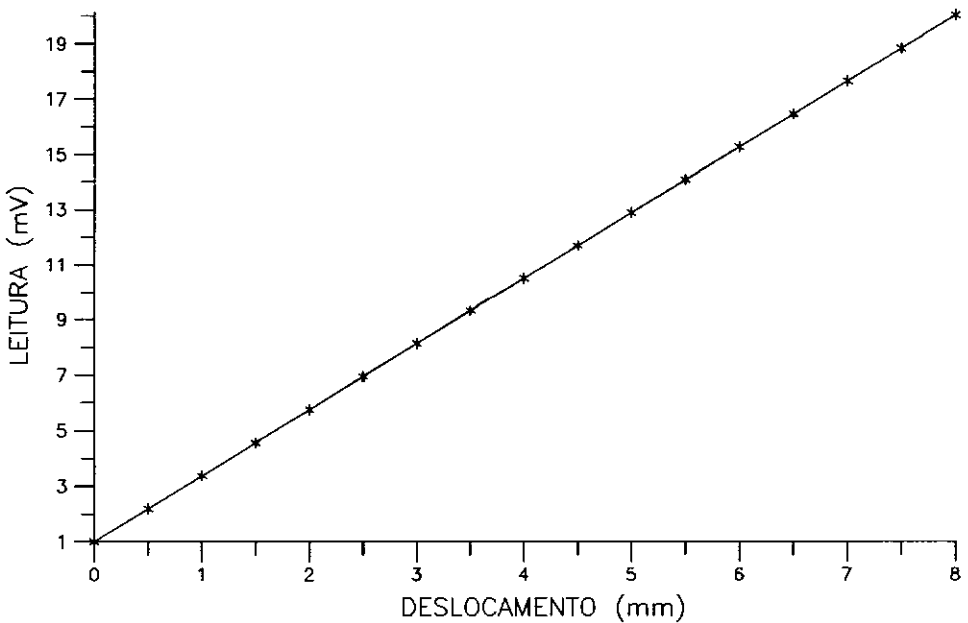


Fig.C.4 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR RESISTIVO DE DESLOCAMENTO VERTICAL

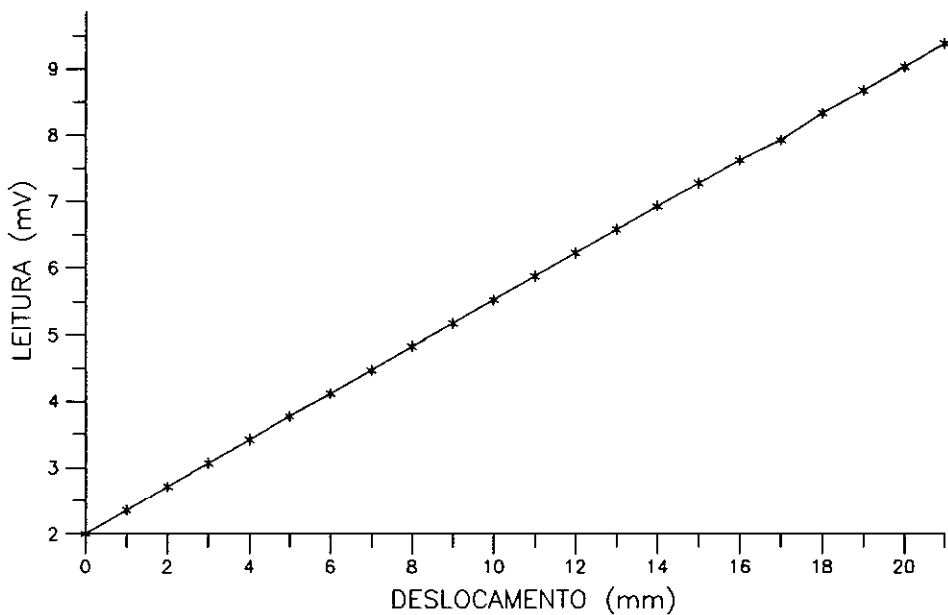


Fig.C.5 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR RESISTIVO DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL