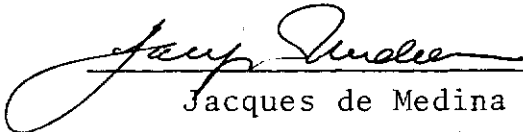


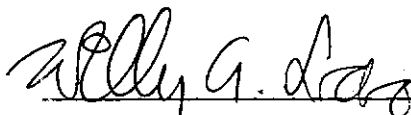
ENSAIOS TRIAXIAIS DINÂMICOS DE SOLOS ARGILOSOS

- *Margareth Svenson* -


TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:


Jacques de Medina
(orientador)


Willy A. Lacerda


Marcio Miranda Soares


Murillo Lopes de Souza

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 1980

Em memória a Gustavo, meu pai

A minha mãe pelo carinho e dedicação

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Jacques de Medina pela orientação e interesse demonstrado durante a pesquisa.
- Ao Engº Ernesto Preussler pela assistência e sugestões nos primeiros meses de trabalho.
- Ao Instituto de Pesquisas Rodoviárias, pelo patrocínio.
- Ao Engº Salomão Pinto, pela colaboração prestada nas coletas de amostras.
- Ao Engº Fernando Metello e à Eng^a Laura Maria Goretti da Motta pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho, incentivo e compreensão.
- Ao técnico Amauri Cavalcanti de Lima, pela participação eficiente nos trabalhos de laboratório.
- Aos técnicos do laboratório da área de Mecânica dos Solos, especialmente Imaculada, Sérgio e Álvaro pelo apoio e participação nos trabalhos de laboratório.
- À Sandra pela datilografia.
- Aos professores da área de Mecânica dos Solos pelo esclarecimento das dúvidas surgidas no decorrer deste trabalho.

SINOPSE

Ensaaios triaxiais dinâmicos drenados foram realizados em amostras compactadas não saturadas de quatro solos argilosos residuais provenientes de subleitos e camadas de reforço de subleito dos pavimentos das rodovias BR-040/RJ, BR-116/MG, e BR-277/PR.

Os ensaios realizados visaram a dois objetivos: estudar a influência das tensões aplicadas e condições de compactação no módulo resiliente, e verificar a influência da intensidade da tensão, da umidade de compactação, e do intervalo entre compactação e aplicação de carga (tixotropia) na correlação entre deformações permanentes e recuperáveis, e o número de aplicações de carga.

Relações bi-lineares e lineares foram obtidas entre o módulo resiliente e a tensão-desvio. Pouca influência tem a tensão confinante.

Expressões matemáticas foram estabelecidas entre as deformações axiais, permanente acumulada e recuperável, e o número de aplicações de carga. As do primeiro tipo permitem calcular a contribuição da camada na deformação permanente do pavimento (afundamento da trilha).

Encontrou-se uma relação entre a deformação axial permanente acumulada e o CBR, comum aos quatro solos ensaiados em diferentes condições de moldagem.

Esta pesquisa faz parte de um projeto amplo de es
tudo de mecânica dos pavimentos financiado pelo Instituto de
Pesquisas Rodoviárias, e que tem o apoio deste órgão para os
trabalhos de campo.

ABSTRACT

Drained triaxial dynamic test were performed with non saturated compacted samples of four clay residual soils form subgrade and improved subgrade layers. The soil samples were taken from pavements at federal highways BR-040/RJ, BR-116/MG, and BR-277/PR.

Testing aimed at two objectives: to study the effect of applied stresses and compaction conditions on the resilient modulus, and to verify the effects of stress magnitude, compaction moisture, and delay between compaction and testing (thixotropy), on the correlation between deformations - recoverable and permanent - and the number of load applications.

Bi-linear and linear correlations between resilient modulus and the deviator stress were obtained. Confining pressure has little influence on the modulus.

Mathematical expressions were established between permanent and resilient axial deformations and the number of load applications. Those referring to permanent cumulated deformations permit us to calculate the contribution of each layer to the total permanent deformation of the pavement structure (rutting at wheel paths).

A relation was found between the permanent axial deformation and the CBR value, which is common to the four soils tested at different compaction conditions.

This research is part of a project on mechanics of pavements sponsored by the Road Research Institute, which also gives the necessary support for all the field work.

vii
ÍNDICE

Dedicatória -----	i
Agradecimentos -----	ii
Sinopse -----	iii
Abstract -----	v
Índice -----	vii
I - INTRODUÇÃO -----	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	6
III- CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ESTUDADOS -----	28
IV - METODOLOGIA -----	33
4.1 - Preparação de amostras e processo de compactação	35
4.2 - Equipamento -----	39
4.3 - Método de ensaio para solos argilosos -----	42
V - ANÁLISE DOS RESULTADOS -----	46
5.1 - Efeito da intensidade da tensão -----	48
5.1.a - Efeito da intensidade da tensão (σ) no módulo resiliente -----	49
5.1.b - Efeito da intensidade da tensão-desvio na rela ção entre deformação axial permanente e defor mação axial recuperável e o número de aplica ções de carga -----	52
5.2 - Efeito da umidade e do peso específico aparente seco ao longo da curva de compactação -----	69
5.2.a - Módulo resiliente "versus" intensidade de ten são-desvio -----	69
5.2.b - Efeito da umidade na relação entre as defor mações axiais permanente e recuperável e o núme ro de aplicações de carga -----	80

5.3 - Efeito do método de compactação na relação entre o módulo resiliente e a intensidade da <u>ten</u> são-desvio -----	94
5.4 - Influência do intervalo entre aplicações de <u>car</u> ga na deformação axial permanente e na deforma <u>ç</u> ão axial recuperável -----	99
5.5 - Efeito do tempo de cura (tixotropia) na deforma <u>ç</u> ão axial permanente e deformação axial <u>recu</u> perável -----	106
VI - OUTRAS RELAÇÕES -----	114
6.1 - Relação entre a intensidade da tensão-desvio <u>re</u> petida e a deformação axial permanente <u>acumu</u> lada -----	114
6.2 - Variação da deformação axial permanente <u>acumu</u> lada com o índice CBR -----	123
VII- CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA -----	128
7.1 - Conclusões -----	128
7.2 - Sugestões de pesquisa -----	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	131

CAPÍTULO IINTRODUÇÃO

A maioria dos métodos de projetos de pavimentos flexíveis são baseados nas características dos solos e materiais obtidos de ensaios estáticos. Porém, na realidade, as várias camadas que compõem a estrutura de um pavimento são submetidas a tensões normais e cisalhantes repetidas, devido ao movimento do tráfego. Como resultado da ação dessas tensões repetidas ocorrem no pavimento deformações permanentes acumuladas e deformações recuperáveis, cujas grandezas dependem do número de solicitações.

Quando uma carga de veículo em movimento passa sobre um ponto da estrutura de um pavimento, as várias camadas são submetidas a variações de tensão similares às mostradas na figura 1.1 (11). A grande variação é na tensão normal horizontal pois tensões de tração atuam na base da camada mais rígida. Essas tensões transientes são sobrepostas à pressão devido ao peso das camadas superiores, sendo que a pequenas profundidades (camada de revestimento), esta é muito pequena, enquanto que as tensões transientes são elevadas.

Pode-se considerar que a ruptura de um pavimento se dá quando as deformações das camadas que o compõem são suficientemente grandes de modo a causar uma superfície irregular ou fissuras no material do revestimento. O modelo de ruptura que corresponde à excessiva deformação plástica tem sido aceito há muitos anos, porém é recente a preocupação com a possibilidade de fissuras nos pavimentos resultante de excessivas deformações

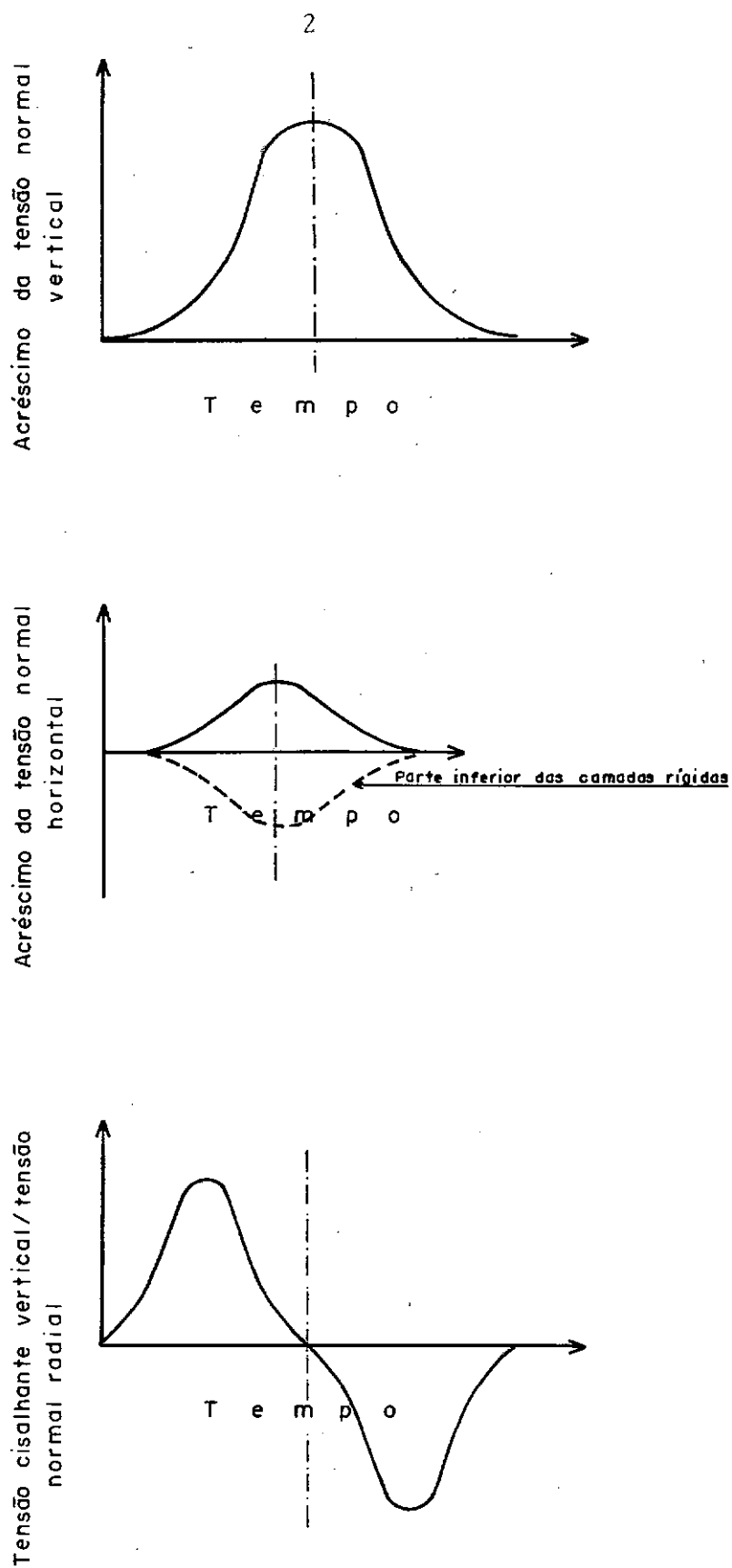


FIG. 1.1 - Variações das tensões de um elemento de um pavimento devido a passagem de uma carga móvel.

elásticas, muitas vezes até sem qualquer deformação plástica significativa.

Seed e outros (25) mencionam que Hveem, ao investigar rupturas de pavimentos flexíveis após um pequeno número de solicitações, verificou que, mesmo quando as camadas do pavimento eram adequadamente projetadas, em termos de deformação permanente, poderia haver ruptura por fadiga. A fadiga é causada pela ação de cargas repetidas em um prolongado período de tempo. Hveem mostrou que se fosse possível predizer a deflexão "elástica" do pavimento, este problema poderia ser evitado, mas para isto as propriedades elásticas dos solos deveriam ser determinadas. Para evitar confusão com o módulo de Young (E), determinado estaticamente, Hveem criou o termo "módulo resiliente" -(Mr).

A deformação permanente do pavimento é a combinação de dois diferentes mecanismos, ou seja, densificação (variação de volume) e deformações cisalhantes repetidas (deformação plástica sem variação de volume). Enquanto que a deformação permanente resultante da densificação do solo poder ser reduzida se obedecidas as especificações de compactação, a deformação cisalhante repetida (escoamento plástico) é um mecanismo que se admite no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Em vista da dificuldade de se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento sob a ação de cargas repetidas, estes são, na maioria das vezes, determinados estaticamente.

Com relação aos processos para minimizar ou estimar a deformação permanente no subleito de um pavimento, devido a um carregamento repetido (comumente denominado afundamento da

trilha de roda), até o presente momento somente duas abordagens foram feitas para examinar este tipo de deformação. A primeira abordagem é adotada no dimensionamento de pavimentos (4.5) considerados como uma estrutura de três camadas elásticas (revestimento de concreto asfáltico, base granular e subleito) e cujos índices de resistência dos solos podem ser definidos a partir do CBR. Deformações excessivas no subleito e na base granular, e fissuramento das camadas de misturas betuminosas são consideradas condições críticas de ruptura. Considera-se que o fissuramento na superfície pode ser evitado limitando-se as tensões e deformações de tração nesta camada, enquanto que a ruptura nas camadas granulares pode ser impedida limitando-se a deformação de compressão vertical nessas camadas a um valor tolerável associado a um número específico de aplicações de carga. A outra abordagem (1) envolve a estimativa do afundamento da trilha de roda que pode ocorrer na estrutura do pavimento, usando parâmetros dos materiais caracterizados em ensaios dinâmicos de laboratório com um processo de análise apropriado.

No desenvolvimento do projeto de pavimentos flexíveis é, portanto, de suma importância uma caracterização adequada dos materiais constituintes das várias camadas, no contexto em que cada uma delas se apresenta na estrutura. Esta caracterização em ensaios dinâmicos que melhor simulem o estado de tensões no campo, deve ser feita para a determinação de constantes elásticas (módulos resilientes) e tensões e deformações críticas, consoante um critério de ruptura. Para isto é de grande importância, a consideração das correlações determinadas a partir dos ensaios dinâmicos de laboratório. Estudou-se aqui, sob

esses aspectos, as características de deformação permanente e deformação recuperável de solos que compõem camadas de reforço e subleitos, como contribuição para atingir métodos mais racionais de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

CAPÍTULO IIREVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos investigadores pesquisaram em laboratório o comportamento de solos argilosos submetidos a um carregamento repetido em células triaxiais. Nestas investigações as tensões repetidas aplicadas em amostras de solo têm duração e frequência correspondentes às que ocorrem nos pavimentos.

A deformação total no ensaio de compressão triaxial de carga repetida, compreende dois tipos de deformação: deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r) sendo que para esta determina-se o módulo resiliente (M_r):

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

onde:

M_r = módulo de deformação resiliente, em kgf/cm^2

σ_d = tensão desvio aplicada repetidamente, em kgf/cm^2

ϵ_r = deformação específica axial recuperável correspondente a um número particular de repetições

Na figura 2.1 são mostrados alguns resultados determinados por Seed e outros (24) onde se mostra a deformação total, a deformação permanente, a deformação recuperável e o módulo resiliente em função do número de aplicações de carga.

Com base nestas pesquisas serão relacionados a seguir alguns fatores que possuem significativo efeito na deforma-

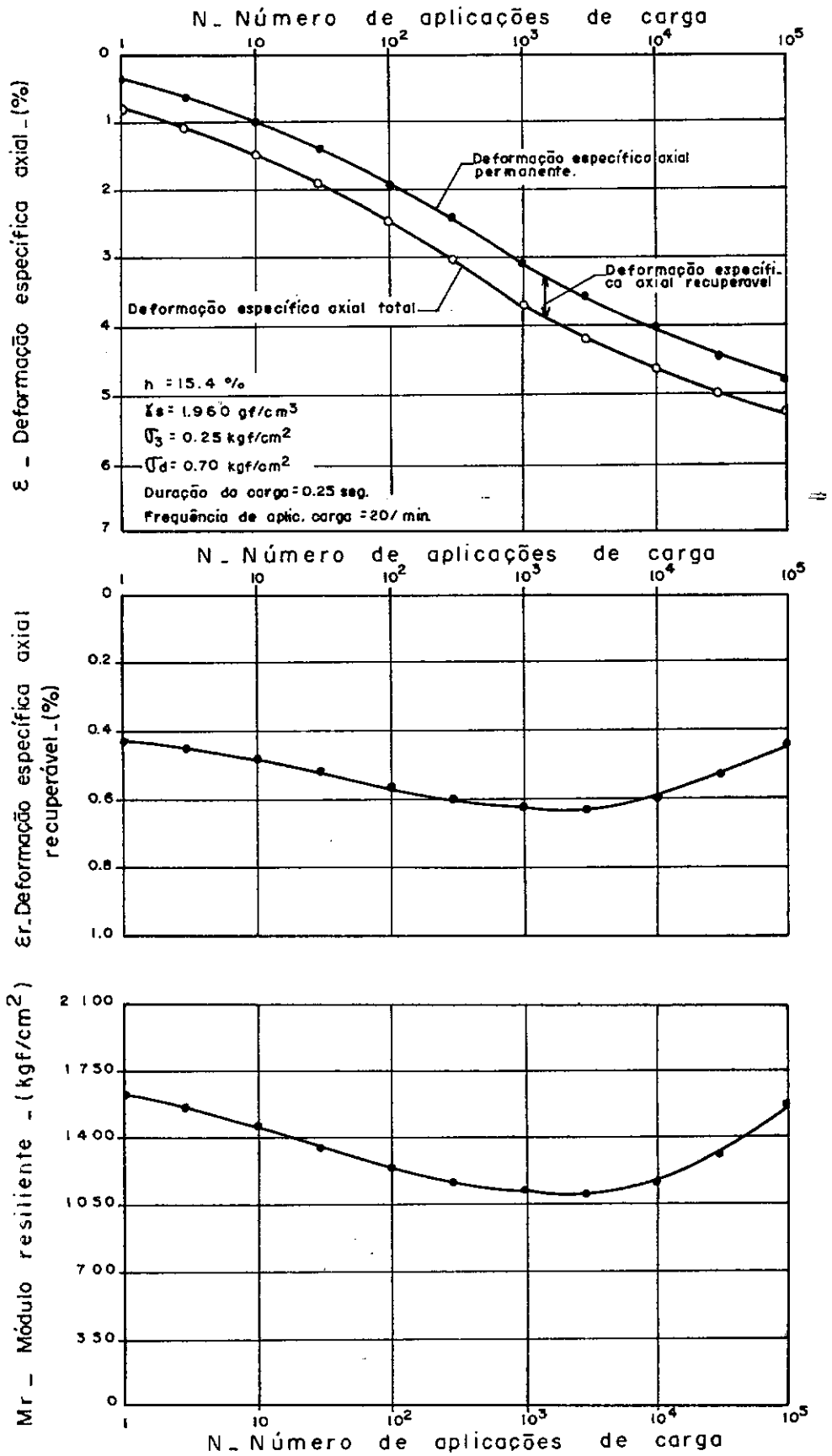


FIG. 2.1 - Resultados típicos de um ensaio de compressão triaxial de carga repetida com um solo do subleito da "AASHTO Road Test". (Seed e outros, 1962).

ção permanente (ou total) e deformação recuperável, e que, posteriormente (capítulo 5), serão analisados para outros tipos de argila estudadas nesta pesquisa.

2.1 - INTENSIDADE DE TENSÃO

Estudos realizados anteriormente por Seed e outros (23,24) e Kawakani (8) indicaram que para solos argilosos o efeito de tensões mais significativo é o da tensão-desvio axial aplicada à amostra de solo durante o ensaio, e que as características de deformação são pouco atingidas pela grandeza da tensão confinante.

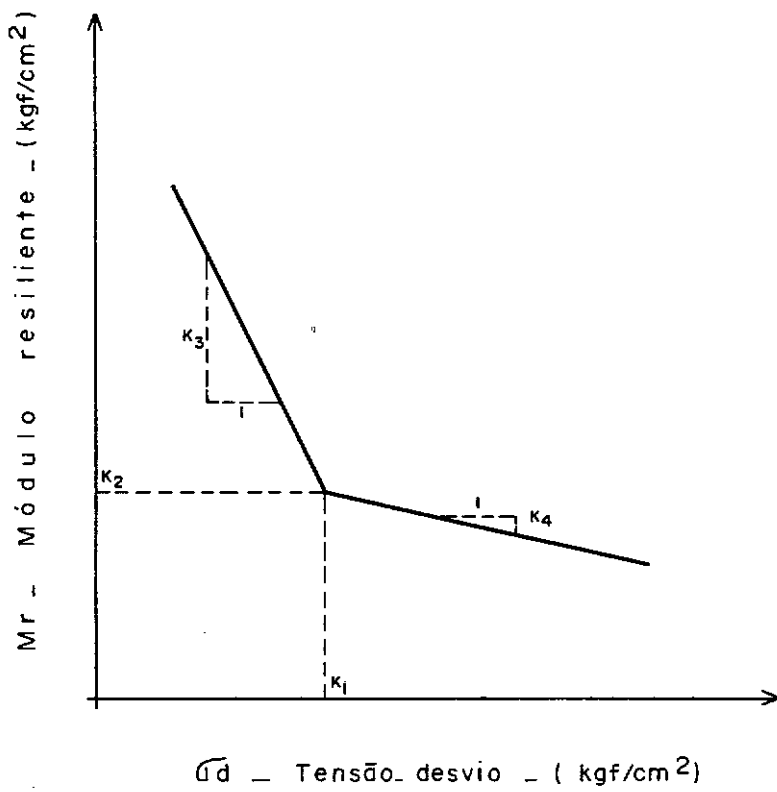
Para o relacionamento módulo resiliente "versus" intensidade de tensão-desvio, verificou-se (24) que para pequenos níveis de tensão, o módulo resiliente decrescia rapidamente com o acréscimo da tensão-desvio, contudo, acima de um determinado valor de tensão, este acréscimo tornava-se menos acentuado.

Baseando-se no trabalho de Duncan e outros, Hicks (7) utilizou um modelo elástico bi-linear para a determinação do módulo resiliente (M_r) em função da tensão-desvio, cujas equações são:

$$M_r = K_2 + K_3 [K_1 - (\sigma_1 - \sigma_3)] \text{ para } K_1 > (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.1)$$

$$M_r = K_2 + K_4 [(\sigma_1 - \sigma_3) - K_1] \text{ para } K_1 < (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.2)$$

A definição das constantes, ou seja, K_1 , K_2 , K_3 e K_4 para os valores medidos do módulo resiliente (M_r), de acordo com o modelo mencionado acima, é ilustrado na figura 2.2. Desta maneira o módulo resiliente é apenas uma função da tensão-desvio,



$$Mr = K_2 + K_3 [K_1 - (\sigma_1 - \sigma_3)] \quad \text{para } K_1 > (\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$Mr = K_2 + K_4 [(\sigma_1 - \sigma_3) - K_1] \quad \text{para } K_1 < (\sigma_1 - \sigma_3)$$

FIG. 2.2 - Modelo usado para solos argilosos. (Hicks_1970).

e o coeficiente de Poisson para o material argiloso é considerado constante.

Verificou-se também (24,25) que para a deformação axial recuperável em função do número de aplicações, havia um decréscimo da deformação com o aumento do número de aplicações de carga para um mesmo nível de tensão, na maioria dos casos; sendo que este decréscimo tornava-se menos pronunciado para tensões-desvios pequenas.

De acordo com vários Autores (19,20,21,24,25) a deformação axial total de amostras de solos argilosos, submetidas a tensões repetidas inferiores à tensão máxima de ruptura, aumenta com o número de aplicações de carga e é bastante influenciado pela intensidade da tensão-desvio (figura 2.1.a). Quanto maior a tensão-desvio mais significativo é o acrêscimo da deformação axial total.

Embora a deformação axial total de uma argila compactada, sob condições constantes, cresça continuamente com o aumento do número de aplicações de carga, observou-se (19) que esta deformação produzida pode variar muito dependendo de sua história de tensões, e, em geral, parece que um acrêscimo gradual na grandeza da tensão aplicada pode, causar menores deformações do que a aplicação direta de uma tensão mais elevada.

Seed e outros (20) realizaram estudos de solos argilosos parcialmente saturados em amostras submetidas a um carregamento repetido antes de serem levadas à ruptura em ensaios de resistência normal. Observou-se que a resistência dessas

amostras foram bem maiores do que as não submetidas a este carregamento repetido prévio, sendo porém pequenas as deformações. Desta maneira o acréscimo de resistência devido à aplicação de cargas repetidas pôde ser atribuído parcialmente ao acréscimo do peso específico aparente seco das amostras durante o ensaio. Este enrijecimento, segundo Seed (20), parece estar associado principalmente ao número de aplicações e à grandeza da tensão repetida aplicada, e o efeito do carregamento repetido nas características tensão-deformação depende do grau de saturação. A variação nestas características de deformação também está possivelmente associada a variações na distribuição de umidade e arranjo estrutural das partículas ou a um acréscimo da resistência à deformação causada pela tixotropia.

Na maioria dos estudos de amostras de solos argilosos submetidas a um carregamento repetido, nenhuma tentativa foi feita para separar a deformação axial permanente da deformação axial total, e nenhum relacionamento constitutivo da deformação com o número de aplicações foi desenvolvido. Porém, Monismith e outros (10), recentemente, desenvolveram uma relação da deformação axial permanente com o número de aplicações de carga, da forma:

$$\epsilon_p = K N^A$$

onde:

ϵ_p = deformação axial permanente acumulada

N = número de aplicações de carga

K, A = coeficientes determinados experimentalmente

Assim, a partir dos resultados dos ensaios que realizaram, os coeficientes K e A eram determinados pelo método dos mínimos qua

drados, dada a relação linear obtida em escala log-log.

A tabela 2.1 contém uma lista dos coeficientes para uma série de amostras de argila siltosa ensaiadas em várias umidades e pesos específicos aparentes secos a tensões-desvios variando de 0,21 a 1,4 kgf/cm², determinados por Monismith e outros (10). Segundo Monismith é possível que o coeficiente A dependa somente do tipo de solo enquanto K é função do nível de tensão, história de tensões, e condições de umidade, etc.

2.2 - UMIDADE DE COMPACTAÇÃO E PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO

Pesquisas realizadas pelo Professor Seed e seus colaboradores na Universidade da California, Berkeley (24) mostraram que a deformação resiliente de amostras de argila compactada a diferentes teores de umidade e mesmo peso específico aparente seco (obtido com diferentes energias de compactação), variam com o teor de umidade e com o método de compactação (amassamento e estático), essas variações sendo pequenas abaixo do teor ótimo e crescendo muito acima do ótimo. (Figura 2.3).

Em amostras de elevado grau de saturação pequenas variações de umidade e peso específico acarretam variações grandes na deformação resiliente ou recuperável e, conseqüentemente, no módulo resiliente. Isto decorre nas modificações da estrutura do solo. As amostras compactadas por amassamento apresentam deformações resilientes maiores do que as compactadas estaticamente, no ramo úmido da curva de compactação.

Quanto à deformação permanente, pode-se reportar aos resultados de ensaios dinâmicos obtidos por Monismith e ou

CONDIÇÕES DAS AMOSTRAS		TENSÃO-DESVIO REPETIDA (kgf/cm ²)	$\epsilon_p = K N^A$	
h (%)	γ_s (gf/cm ³)		$K \times 10^{-4}$	A
16,7	1,792	0,35	0,168	0,184
16,8	1,792	0,70	0,306	0,185
16,5	1,792	1,40	1,28	0,156
19,8	1,712	0,21	0,378	0,212
19,3	1,712	0,35	1,22	0,145
19,7	1,712	0,70	4,57	0,193
19,3	1,712	1,40	39,5	0,185
16,4	1,712	0,35	0,0467	0,332
16,5	1,712	0,70	0,746	0,163
16,1	1,712	1,40	1,73	0,154

TABELA 2.1 - Sumário dos coeficientes da relação entre deformação permanente e número de repetições para uma argila siltosa (LL= 35, IP= 15 - Monismith e outros - 1975).

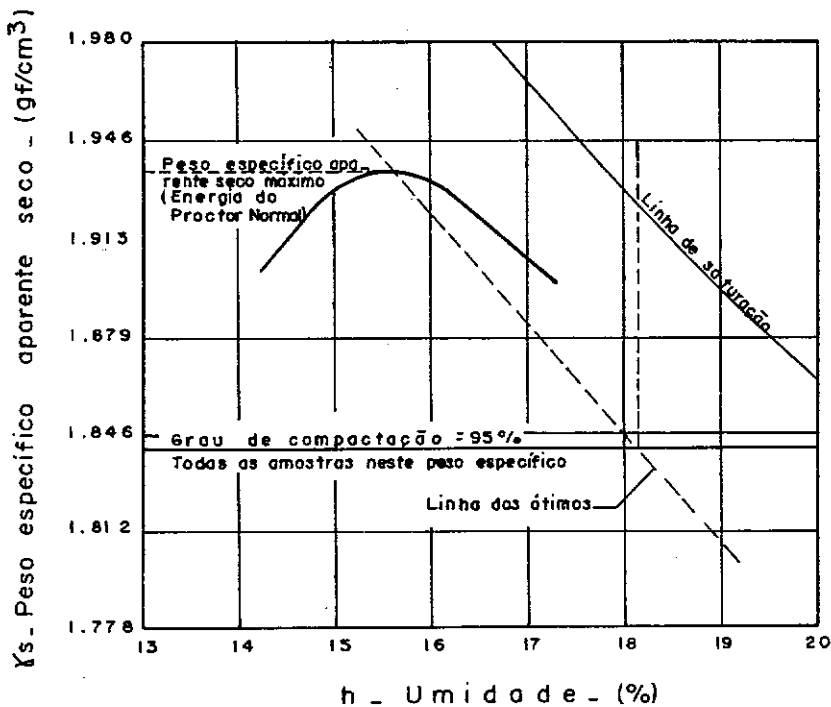
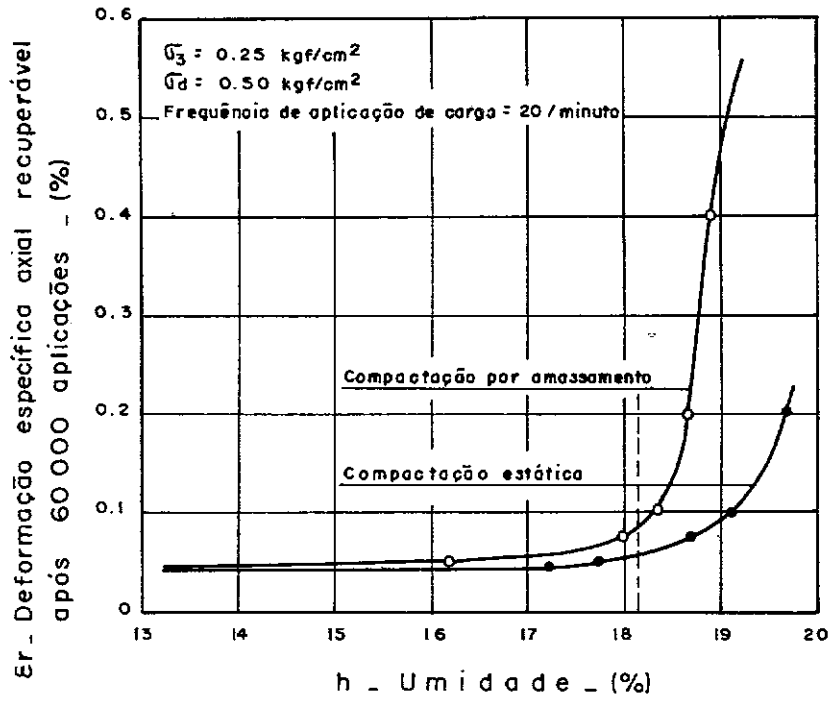


FIG. 2.3 - Efeito do método de compactação na resiliência - Solo do subleito da "AASHO Road Test". (Seed e outros - 1962).

tros (10) em amostras de argila siltosa compactada. Para o mesmo peso específico aparente seco e tensões-desvios repetidas iguais; obtiveram deformações permanentes tanto maiores quanto maior a umidade de compactação. Os coeficientes K e A, mencionados anteriormente, constam da tabela 2.1. Para as umidades de 19,7% e 16,5%, peso específico $1,712 \text{ gf/cm}^3$, e tensão-desvio de $0,70 \text{ kgf/cm}^2$, os coeficientes K são $4,57 \times 10^{-4}$ e $0,746 \times 10^{-4}$, e os coeficientes A são 0,103 e 0,163, respectivamente.

2.3 - MÉTODO DE COMPACTAÇÃO

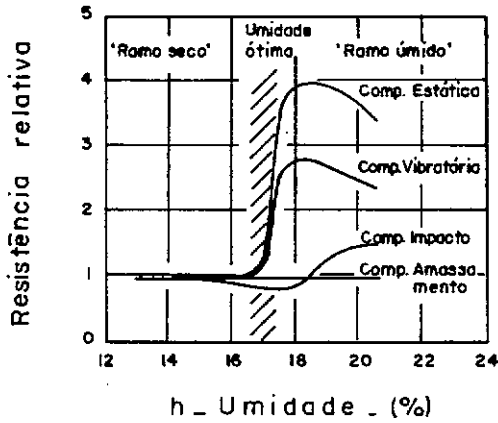
Pesquisas realizadas em solos coesivos (23) mostraram a influência dos diferentes métodos de compactação nas propriedades dos solos devido ao arranjo das partículas e o desenvolvimento da poro-pressão. A variação do arranjo das partículas para as diversas umidades e pesos específicos aparentes secos da curva de compactação, tende a produzir uma estrutura floculada das partículas no ramo seco e na estrutura dispersa no ramo úmido, ou seja, com o aumento da umidade há um acréscimo progressivo da orientação das partículas (aumento do grau de dispersão). Para amostras compactadas no ramo úmido da curva de compactação haverá um maior desenvolvimento de poro-pressão devido ao aumento do grau de dispersão.

As deformações induzidas durante a compactação são os principais responsáveis pela influência do método de compactação nas propriedades do solo (23). Nas amostras compactadas no ramo seco todos os métodos de compactação produzem deformações cisalhantes de pouca monta e, conseqüentemente, estruturas floculadas. No ramo úmido, porém, o método de compactação

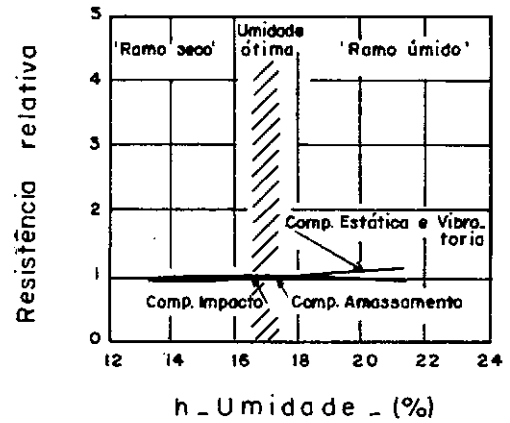
por amassamento ("kneading") causa maiores deformações cisalhantes (maior grau de dispersão) e maiores poro-pressões; a compactação por impacto causa deformações cisalhantes ligeiramente menores e poro-pressões menores do que as produzidas por amassamento.

No que diz respeito à resistência relativa do solo verificou-se (23) que para amostras de uma argila siltosa compactadas no ramo seco, o método de compactação tem pouco efeito na resistência do solo, porém, para amostras compactadas no ramo úmido a influência do método de compactação é considerável, para pequenos valores de deformação específica da ordem de 5%. Na figura 2.4 observa-se este efeito para quatro diferentes métodos de compactação; para as mesmas amostras compactadas no ramo úmido, as resistências determinadas a altas deformações específicas não são, apreciavelmente, afetadas pelo método de compactação. Estudos similares para a verificação da influência do método de compactação na estabilidade (Valor "R" do estabilômetro de Hveen) de solos argilosos foram também realizados por outros pesquisadores (15) e as observações feitas acima foram semelhantes.

Seed e Chan (23) pesquisaram, também, o efeito do método de compactação para outros tipos de argila, e verificaram que este efeito varia muito com o tipo de solo, como se pode ver na figura 2.5, onde os métodos de compactação estático e amassamento produzem efeitos bastantes pronunciados para pequenas deformações (figura 2.5.a) e efeito praticamente insignificante para grandes deformações, embora para o caso da argila altamente plástica efeitos semelhantes são verificados tanto para



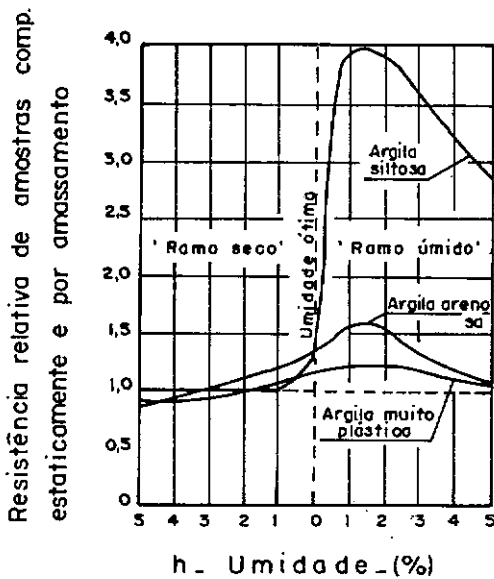
(a) - Baixas deformações



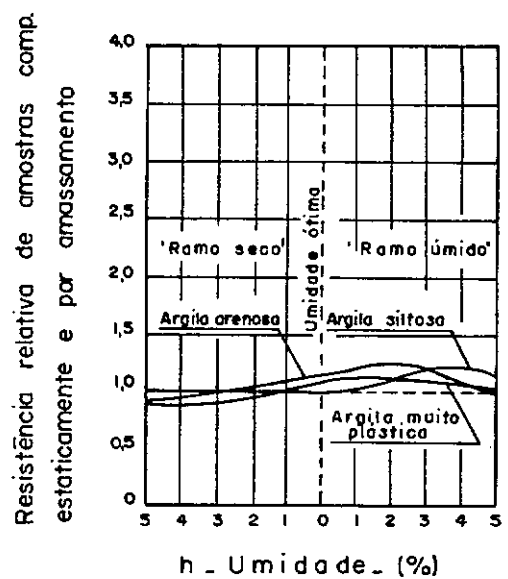
(b) - Altas deformações

FIG.2.4 - Influência do método de compactação na resistência de uma argila siltosa. (Seed e Chan - 1961).

Nota: Resistência relativa = resistência não drenada de uma amostra compactada por qualquer método de compactação / resistência de amostras de mesma umidade e mesmo peso específico preparadas por amassamento.



(a) - Baixas deformações



(b) - Altas deformações

FIG.2.5 - Influência do método de compactação na resistência de argilas siltosa, arenosa e muito plástica. (Seed e Chan - 1961).

pequenas quanto para grandes deformações.

Seed, Chan e Lee (24) estudaram as características resilientes de uma argila siltosa compactada por amassamento e estaticamente. Verificaram que para amostras compactadas em umidade inferior à ótima, as deformações resilientes dos ensaios triaxiais de cargas repetidas eram aproximadamente as mesmas, porém, no ramo úmido e mesmo peso específico aparente seco as deformações resilientes são muito diferentes (figura 2.3). Quanto à influência do método de compactação na relação entre o módulo resiliente e a intensidade da tensão-desvio, observaram que no grau de saturação de 95%, o módulo resiliente, na tensão-desvio de $0,21 \text{ kgf/cm}^2$ de amostras compactadas estaticamente foi quatro vezes maior do que o de amostras compactadas por amassamento; observaram ainda que à tensão-desvio de $2,2 \text{ kgf/cm}^2$ não se nota praticamente qualquer diferença nos módulos.

2.4 - TEMPO DE CURA (TIXOTROPIA)

Tem-se verificado que amostras de argila compactadas a graus de saturação grandes, por métodos de compactação que induzem tensões cisalhantes consideráveis, e deixadas a curar sem perda de umidade, apresentam um aumento da resistência ao cisalhamento, se comparadas a amostras que não ficaram em repouso antes de aplicadas as cargas (18). Este fenômeno é conhecido por tixotropia, e atribue-se a uma variação progressiva do arranjo das partículas de uma estrutura dispersa a outra mais floculada, sem variação da composição de solo (10).

Hipóteses têm sido apresentadas para explicar a causa do comportamento tixotrópico; uma delas (9) é de que a

energia interna e as condições de tensão (poro pressão) num solo tixotrópico, imediatamente após o amolgamento ou compactação, não são as de equilíbrio.

Vários fatores influenciam o comportamento tixotrópico. No caso de argilas compactadas (9,18) pode-se dizer que a estrutura inicial do solo e o método de compactação são fatores de grande importância.

Seed e Chan (24) estudaram o efeito do tempo de cura em amostras de argila siltosa compactadas por amassamento e submetidas, após períodos de cura diferentes, a um carregamento repetido. Conforme pode-se observar na figura 2.6.a, a deformação total diminui devido ao ganho de resistência tixotrópica, quando o período de cura aumenta. Quanto à deformação recuperável, em função do número de aplicações de carga (figura 2.6.b) o acréscimo do tempo de cura causou uma redução somente até um determinado número de aplicações (aproximadamente 40000) porém, para números de aplicações maiores a deformação recuperável não é tão afetada pelo acréscimo do tempo de cura observado antes da aplicação da tensão repetida. Isto é, provavelmente, devido ao fato de que as deformações induzidas pelo carregamento repetido progressivamente destroem, em grande parte, o ganho de resistência tixotrópica de amostras curadas. A figura 2.6.c mostra a relação entre o módulo resiliente e o número de aplicações de carga, para diversos tempos de cura após a compactação.

2.5 - INTERVALO ENTRE APLICAÇÕES DE CARGA

Pesquisas feitas (18) mostraram que solos argilosos compactados apresentam, frequentemente, um acréscimo de re-

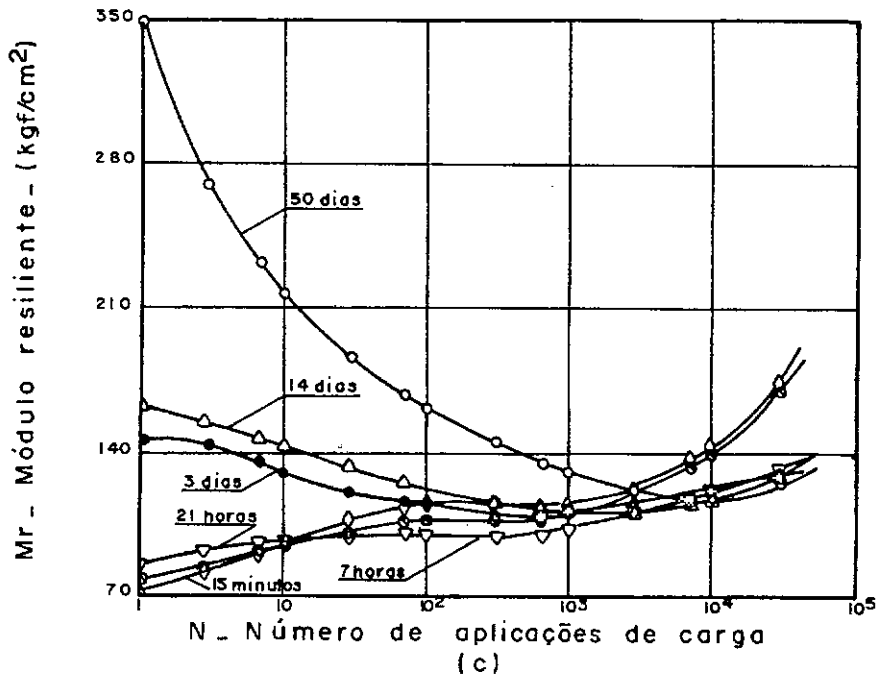
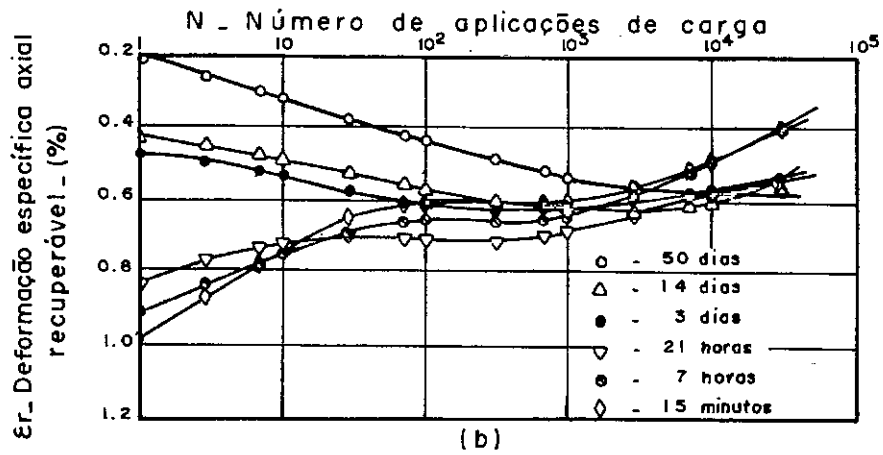
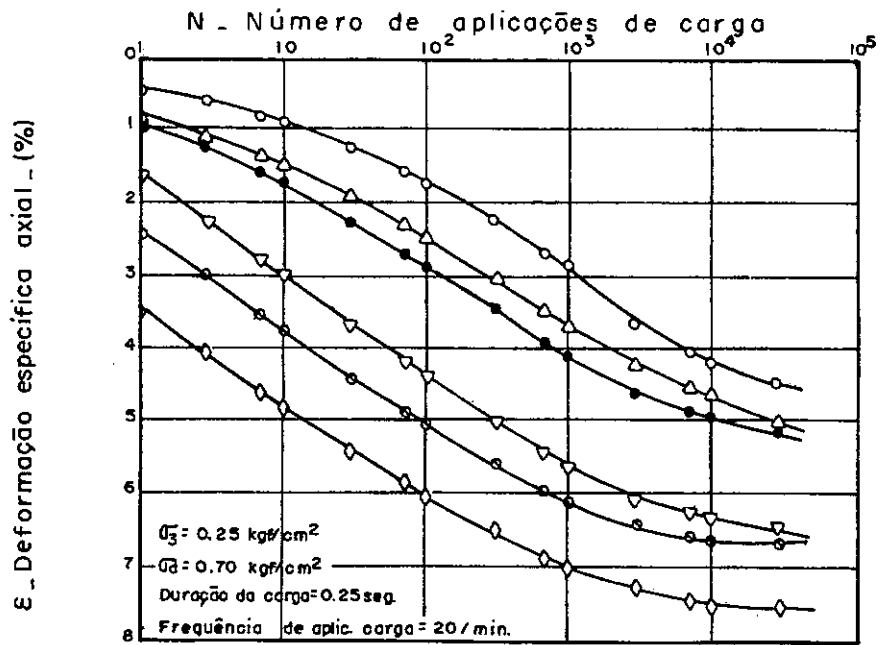


FIG. 2.6 - Efeito tixotrópico nas características resilientes. Solo do subleito da "AASHTO Road Test". (Seed e outros - 1962).

sistência com o tempo decorrido após a compactação. O fenômeno tem a ver com o efeito tixotrópico. sem variação de umidade, que pode ser bastante pronunciado quando o grau de saturação é alto.

Se o solo ensaiado dinamicamente for tixotrópico, seria de se esperar que o período de repouso entre aplicações de carga pudesse ter um efeito significativo na relação entre a deformação axial total e o número de aplicações de carga. Portanto, se os intervalos entre aplicações forem grande (baixa frequência) podem os solos tixotrópicos ganhar mais resistência do que ganhariam a intervalos de aplicações de carga pequenas (alta frequência) e, conseqüentemente sofrerem menores deformações.

Admitida a hipótese acima, Seed e Chan (19) realizaram ensaios de carga repetida em uma argila siltosa compactada. Neste estudo ensaiaram-se amostras de, aproximadamente, o mesmo peso específico aparente seco, porém com umidades diferentes, e com a mesma tensão repetida, mas a intervalos entre aplicações de carga variadas (frequências de 3 a 20 aplicações por minuto). Para as amostras de baixo grau de saturação, a variação do intervalo entre aplicações de carga não modificou as características da deformação axial. Porém, para a umidade correspondente à ótima de compactação uma ligeira influência na deformação axial, devido à variação do intervalo entre aplicações de carga, foi observada. Finalmente, para um grau de saturação elevado (95%) a influência da variação do intervalo entre aplicações de carga foi mais significativa; verificou-se que a in-

fluência do intervalo entre aplicações de carga dependia, também, do tempo de cura após a compactação das amostras.

As figuras 2.7 e 2.8 mostram os resultados determinados por Seed e Chan (19) para as condições de alto e baixo graus de saturações, respectivamente.

Seed e Chan (19) verificaram então que para amostras de argila siltosa com umidades abaixo da ótima e próxima a esta, grau de compactação de 95% do método AASHO modificado, e número de repetições de carga de no mínimo 100000, a deformação axial da amostra depende somente do número de aplicações de carga dentro de uma variação de frequência de 3 a 20 aplicações por minuto (duração de carga igual a 1,0 segundo); um número limitado de ensaios indicaram que esta conclusão é também válida para frequências menores que 1 aplicação por minuto.

2.6 - NÚMERO DE APLICAÇÕES DE CARGA

Cabe aqui salientar tão somente que Seed e Chan (24) verificaram que a deformação recuperável e o módulo resiliente de solo argiloso compactado e ensaiado a determinada tensão-desvio repetida, não se mantêm constante, mas varia consideravelmente com o número de aplicações de carga. A figura 2.1 ilustra este fato.

Nos ensaios realizados por Seed e Chan (24) parece que, em geral, as maiores deformações recuperáveis (figura 2.1.b) desenvolveram-se entre 1 e 5000 aplicações de carga. Em alguns casos, a deformação recuperável após 100000 aplicações de tensão foi somente de 30% do valor máximo desenvolvido entre 1

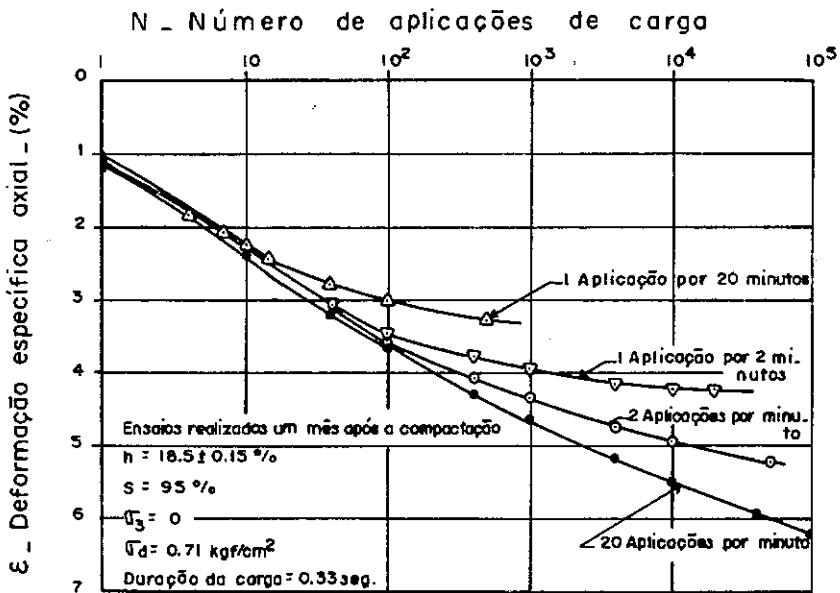


FIG. 2.7 - Efeito do intervalo entre aplicações de carga (frequência) na deformação de uma argila siltosa com alto grau de saturação. (Seed e Chan - 1958).

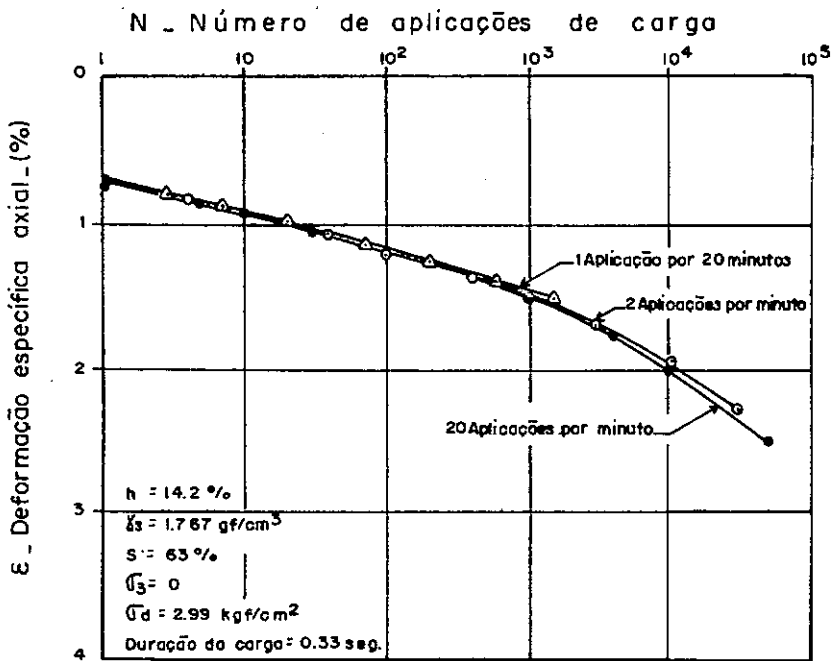


FIG. 2.8 - Efeito do intervalo entre aplicações de carga (frequência) na deformação de uma argila siltosa com baixo grau de saturação. (Seed e Chan - 1958).

e 1000 aplicações de tensão.

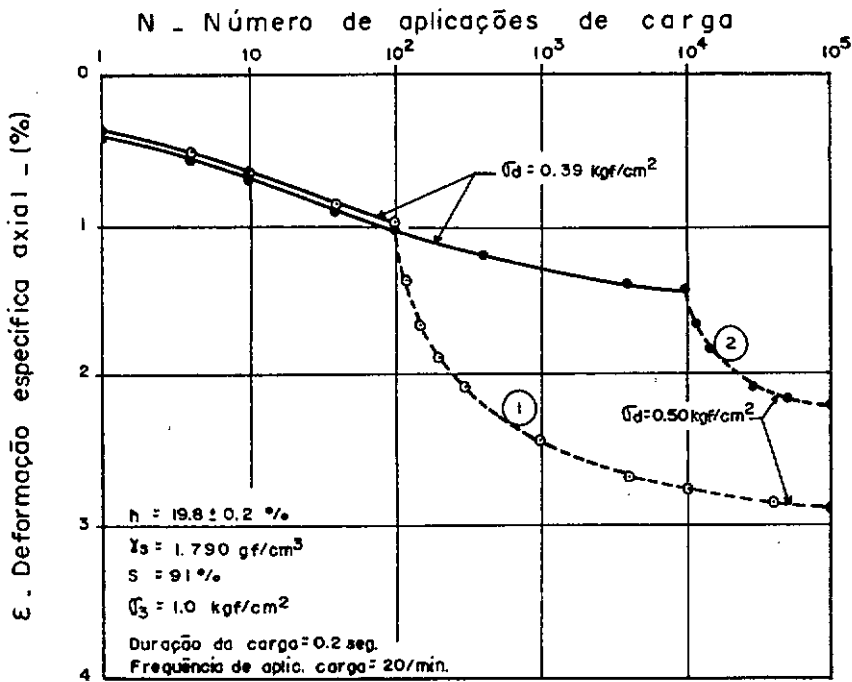
Raymond e outros (14) verificaram que o módulo resiliente decresce, inicialmente, com o número de repetições de carga, e, após 100000 aplicações mantem-se aproximadamente constante.

2.7 - HISTÓRIA DE TENSÕES

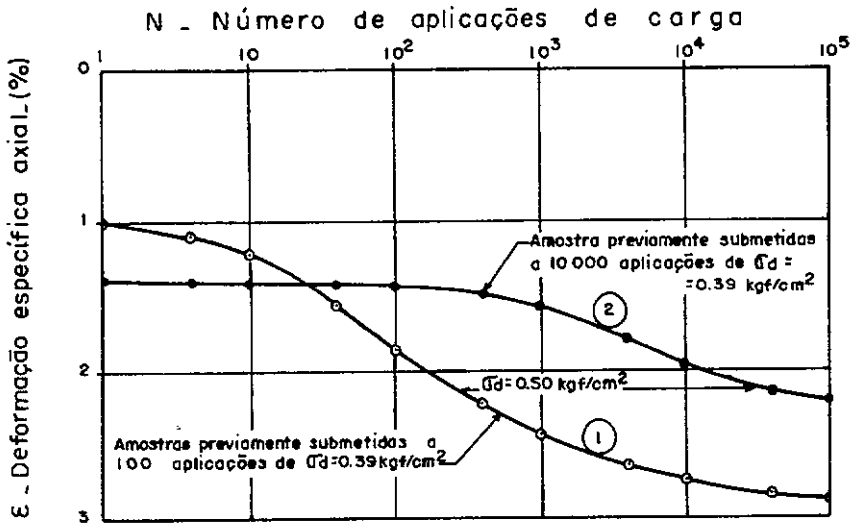
A deformação axial devido ao efeito combinado de tensões repetidas de diferentes grandezas é de suma importância, pois esta é a situação encontrada na prática. Em vista disto, Seed e Chan (19) estudaram o efeito da variação de tensão-desvio durante um carregamento repetido.

Do estudo realizado por Seed e Chan (19) a figura 2.9a mostra os resultados obtidos de uma série de ensaios de duas amostras idênticas de uma argila siltosa de grau de saturação de 91%. As amostras foram submetidas a uma tensão confinante de 1 kgf/cm^2 e a uma série de aplicações de tensão-desvio igual a $0,39 \text{ kgf/cm}^2$. Após 100 aplicações da tensão-desvio as duas amostras haviam-se deformado de aproximadamente 1%. Neste estágio, a tensão-desvio da amostra 1 foi aumentada para $0,5 \text{ kgf/cm}^2$; enquanto que a amostra 2 somente após 10000 aplicações da tensão-desvio de $0,39 \text{ kgf/cm}^2$ teve esta aumentada para $0,5 \text{ kgf/cm}^2$. Observa-se na figura 2.9a que a deformação axial da amostra 2 aumentou muito menos do que a da amostra 1, após o acréscimo dado à tensão-desvio.

A comparação da progressão da deformação axial sob a tensão-desvio de $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ das duas amostras está ilustrada



(a)



(b)

FIG. 2.9 - (a) - Efeito do acréscimo da tensão desvio (σ_d) durante um carregamento repetido.

(b) - Comparação das deformações das amostras sob o acréscimo da tensão desvio de 0.50 kgf/cm^2 . (Argila siltosa - Seed e Chan - 1958).

na figura 2.9.b. Observa-se que a amostra 1 se deformou continuamente sob a tensão repetida de $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ enquanto que a amostra 2 se deformou durante as 10000 primeiras aplicações, e após 100000 aplicações a deformação axial da amostras 2 foi menor da amostra 1.

Seed e Chan (19) mostraram com isto, que a aplicação de uma série de tensões repetidas de diferentes grandezas em amostras de argila compactada pode produzir um considerável efeito de enrijecimento. Conforme foi mencionado anteriormente no estudo do efeito da intensidade da tensão, o efeito do enrijecimento não é atribuído simplesmente a um acréscimo do peso específico aparente seco devido a um carregamento repetido, embora isto possa ser produzido em algumas amostras com baixo grau de saturação (20).

Nessa investigação (19) atribuiu-se o acréscimo de resistência à deformação, sob uma série de tensões repetidas, a um provável rearranjo estrutural das partículas. A aplicação da tensão repetida pode, por exemplo, expulsar a água adsorvida (água retida por forças físico-químicas) das partículas de argila, aumentar os pontos de contato e causar, assim, um acréscimo de resistência à deformação.

Segundo esses autores (19) dos resultados obtidos nesse estudo parece que o número de aplicações necessário para produzir qualquer efeito apreciável de enrijecimento é maior que 1000 e grandes variações nas características da deformação podem ser produzidas por um número de aplicações da ordem de 10000 a 100000.

2.8 - DURAÇÃO DA APLICAÇÃO DE CARGA

Pouca atenção tem sido dada à possível influência da duração da aplicação da carga no comportamento do solo. Nas rodovias essa duração não varia muito quando o tráfego flue sem grandes variações de velocidade. Nas áreas de estacionamento pode-se considerar o efeito predominante das cargas estáticas. Nas vias urbanas sinalizadas há grandes variações de velocidade.

Com o objetivo de investigar a deformação axial de amostras de solo compactados, quando submetidos a um carregamento dinâmico de diferentes intervalos entre aplicações de carga e diferentes durações de carga, Seed e Chan (22) observaram que tanto para areias quanto para argilas, o efeito da duração de carga depende do intervalo entre aplicações de carga.

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ESTUDADOS

Os materiais estudados nesta pesquisa de laboratório são quatro argilas de camadas de reforço e/ou subleito de pavimentos das rodovias BR-040/RJ (próximo a Três Rios), BR-116/MG (Km 282) e BR-277 (trecho Curitiba-Paranaguá).

Fez-se a amostragem nas rodovias e em jazidas ou com o objetivo de se estudar, em laboratório, o comportamento de amostras compactadas quando submetidas a um carregamento dinâmico. Os resultados dos ensaios dinâmicos realizados, serão apresentados no capítulo 5.

Após a secagem desses materiais ao tempo e o seu destorroamento, realizaram-se ensaios de caracterização física. Na tabela 3.1 encontram-se os resultados desses ensaios. Observa-se que o material de menor fração argilosa é a argila vermelha da rodovia BR-116/MG, e a de maior fração argilosa é a argila amarela da rodovia BR-040/RJ.

Objetivando uma melhor caracterização dos materiais utilizados neste estudo quanto à resistência ao cisalhamento, realizaram-se ensaios não adensados e não drenados (UU) na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo de cada curva de compactação obtida conforme a metodologia de ensaio descrita no capítulo 4. A tabela 3.2 apresenta os resultados desses ensaios, onde as argilas são referenciadas apenas pela sua coloração e localidade.

Realizaram-se, também, análises químicas, na Divisão de Pesquisas do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Os resultados dessas análises encontram-se na tabela 3.3.

DESCRIÇÃO	γ_g (gf/cm ³)	% em peso passando nas peneiras em mm				LL	LC	Compactação		CBR (%)	EA (%)	Classificação
		4,8	2,0	0,42	0,075	LP		Energia/Intermediária/normal*				IIRB
						IP		γ_s máx. (gf/cm ³)	h_{ot} (%)			
Argila amarela-Res.gnaisse Reforço,subleito-BR-040/RJ Três Rios	2,70	100	98	88	63	56 29 27	21	1,699	20,3	28	2	A-7 (16) CH
Argila vermelha-Res.gnais. Reforço,subleito-BR-040/RJ Três Rios*	2,71	100	98	85	57	43 24 19	14	1,754 *	17 *	12	4	A-7 (9) CL
Argila vermelha-Res.gnais. Subleito-BR-116/MG Muriaé*	2,73	100	99	78	54	47 32 15	27	1,774 *	17,7 *	16	7	A-7 (5) ML/CL
Argila vermelha-Res.arenita Reforço,subleito-BR-277/PR Curitiba-Paranaguá	2,65	100	90	64	53	45 25 20	32	1,762	15	14	12	A-7 (8) CL

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

DESCRIÇÃO	CONDIÇÕES DAS AMOSTRAS			* $\sigma_{dm\acute{a}x.}$ (kgf/cm ²)	c (kgf/cm ²)	ϕ (grau)
	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)			
Argila amarela-RJ	20,8	1,691	94	11,8	4,0	22
Argila vermelha-RJ	16,9	1,763	85	5,2	1,8	23
Argila vermelha-MG	14,4	1,808	77	5,6	1,7	27
Argila vermelha-PR	16,3	1,761	86	5,3	1,2	33

* $\sigma_3 = 0,21 \text{ kgf/cm}^2$

TABELA 3.2 - Características quanto à resistência ao cisalhamento

DESCRIÇÃO	Si O ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ki	Kr	pH	Matéria Orgânica (%)	Cloretos	Sulfatos
Argila amarela-RJ	37,4	33,15	9,0	1,91	1,44	5,20	0,28	ausência	ausência
Argila vermelha-RJ	37,26	30,60	11,70	2,07	1,66	5,20	0,08	ausência	ausência
Argila vermelha-MG	19,28	16,32	7,20	2,0	1,56	4,20	0,34	ausência	ausência
Argila vermelha-PR	39,62	33,15	8,40	2,03	1,74	4,0	0,62	traços	ausência

TABELA 3.3 - ANÁLISE QUÍMICA

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA

Desde que o principal objetivo desta pesquisa foi o de verificar as características de deformabilidade de solos argilosos compactados quando submetidos a cargas repetidas, semelhantemente ao que ocorre nas rodovias, foi preciso desenvolver procedimentos de compactação e preparação das amostras, e de ensaio triaxial dinâmico, que simulassem tanto quanto possível as condições de campo. Os fatores que afetam a deformabilidade dos solos argilosos estão comentados no Capítulo 5.

As várias camadas do pavimento estão submetidas a variações de tensões principais conforme indicado na figura 1.1. Porém as técnicas de ensaio existentes não são capazes de reproduzir este modelo exatamente. Há a dificuldade de aplicação simultânea de tensões normais e tensões cisalhantes no corpo-de-prova ensaiado; no ensaio triaxial dinâmico pode-se pulsionar as duas tensões normais, σ_1 e σ_3 , porém não se pode fazer o mesmo com as tensões cisalhantes. Outra dificuldade é a aplicação de tensões de tração, como as que ocorrem na parte inferior das camadas superiores mais rígidas, junto com as outras tensões, porém este problema sai fora dos objetivos deste estudo.

O pulsionamento das tensões verticais e horizontais, ambas principais, está representado na figura 4.1, sendo que estas tensões devem sobrepor-se às pressões decorrentes do material sobrejacente, ou seja, as pressões produzidas pelas

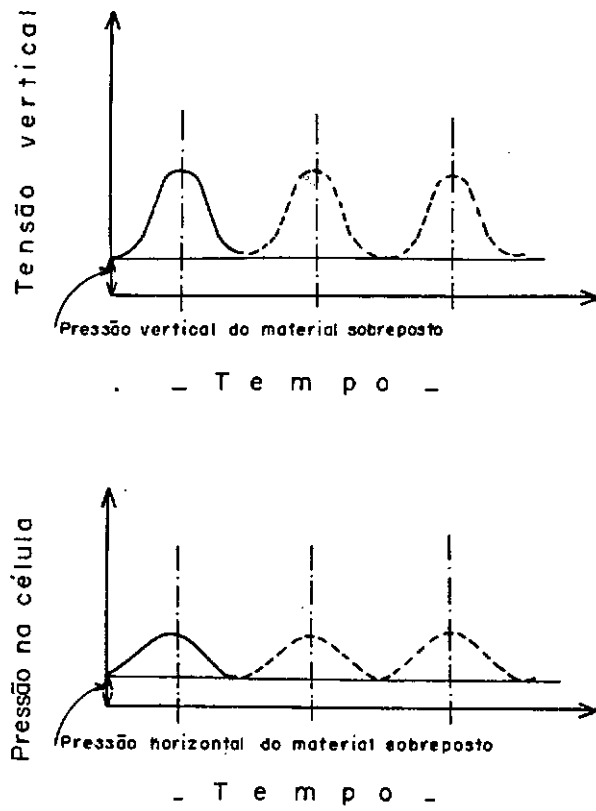
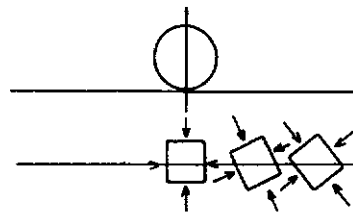
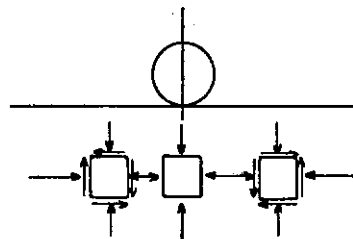


FIG. 4.1 - Regime de tensão para um ensaio triaxial de carga repetida.



(a) - O elemento onde atuam as tensões principais gira



(b) - Elemento sem rotação - inversão das tensões cisalhantes

FIG. 4.2 - Tensões "in situ" abaixo de uma carga móvel.

camadas superiores do pavimento. O elemento de solo submetido a tensões normais principais gira conforme sua distância horizontal da carga da roda, ou quando a carga em movimento passa (figura 4.2.a). Na realidade a amostra que representa um elemento de solo deveria ser submetida às condições indicadas na figura 4.2.b.; neste há tensões cisalhantes cujo sentido se inverte quando a carga se desloca e passa pelo ponto considerado. Somente para o ponto sob a carga as condições de tensão são as mesmas que no ensaio triaxial dinâmico.

Os ensaios triaxiais de carga repetida são realizados em vários laboratórios do modo pelo qual foram executados nesta pesquisa, ou seja, com variação de σ_1 , e mantendo-se o valor de σ_3 constante. Esta técnica, pela sua maior simplicidade, é aceita sem sérias restrições.

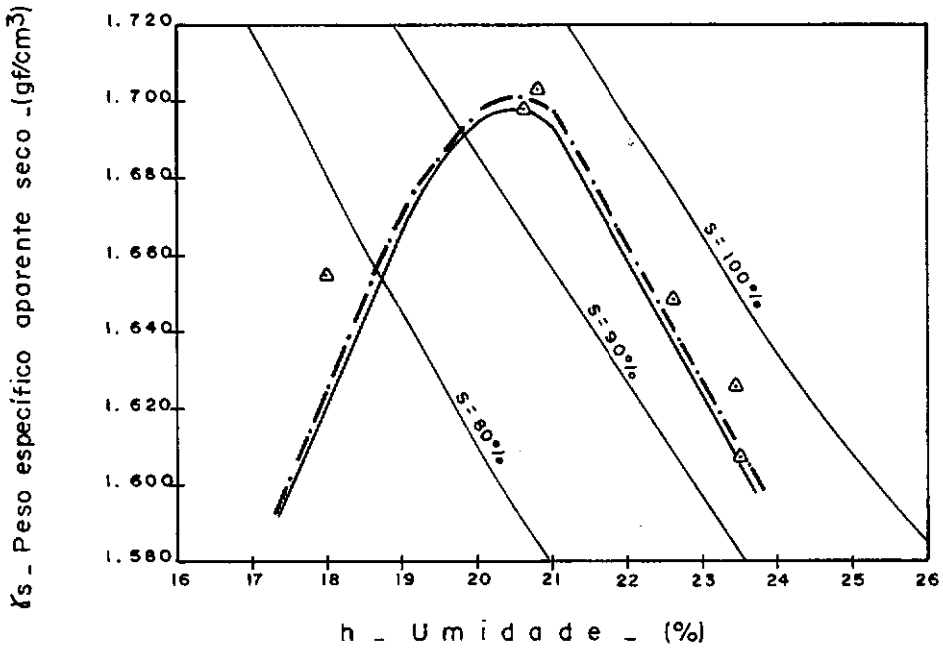
4.1 - PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E PROCESSO DE COMPACTAÇÃO

Obteve-se, inicialmente a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo de cada um dos solos estudados, da curva de compactação obtida aplicando-se a energia Proctor Inter. e Normal. A seguir, utilizando-se o equipamento reduzido de compactação do Eng^o Carlos de Souza Pinto (12), procurou-se moldar corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura de mesmo peso específico e umidade do ensaio de referência. Fixou-se em três o número de camadas na compactação e variou-se apenas o número de golpes por camada, conforme a tabela a seguir.

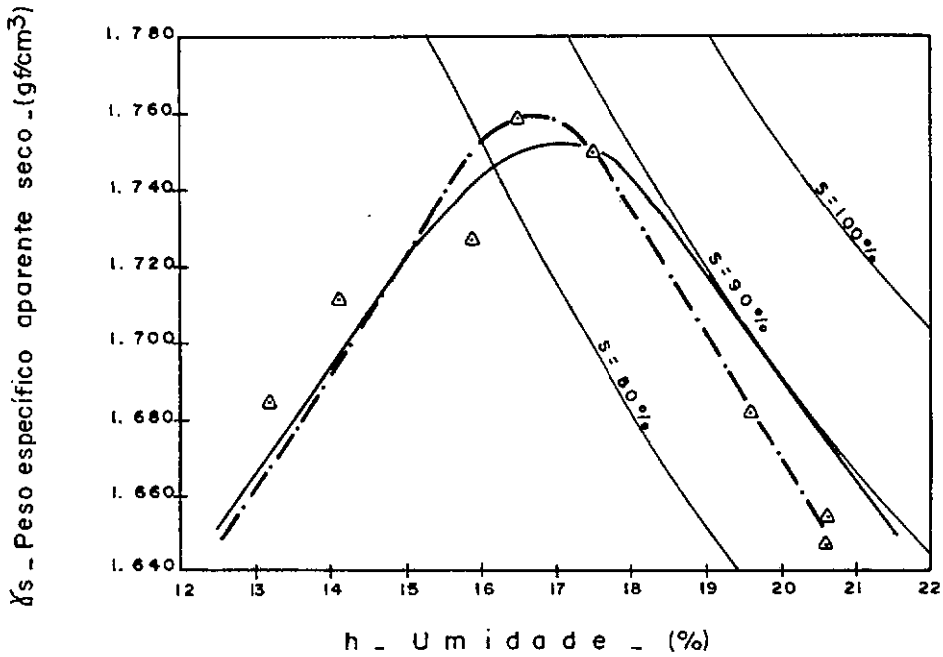
Descrição	Número de golpes por camada
Argila Amarela-RJ	27
Argila Vermelha-RJ	10
Argila Vermelha-MG	25
Argila Vermelha-PR	30

Fixou-se em $\pm 0,5\%$ a diferença máxima admissível entre a umidade ótima encontrada no ensaio de compactação Proctor Intermediária Normal, e a umidade determinada no ensaio de compactação utilizando o equipamento reduzido. Quanto à diferença entre os pesos específicos aparentes secos encontrados nos dois diferentes ensaios a tolerância foi de $0,03 \text{ gf/cm}^3$.

Com a determinação das umidades e dos pesos específicos aparentes secos de, pelo menos, cinco pontos da curva de compactação, traçava-se a curva de compactação correspondente à energia do Proctor Intermediária Normal utilizando o equipamento reduzido. Na figura 4.3 e 4 estão as curvas encontradas para os quatro solos estudados, e observa-se que a curva mais distante da do Proctor Intermediário foi a da argila vermelha-MG.



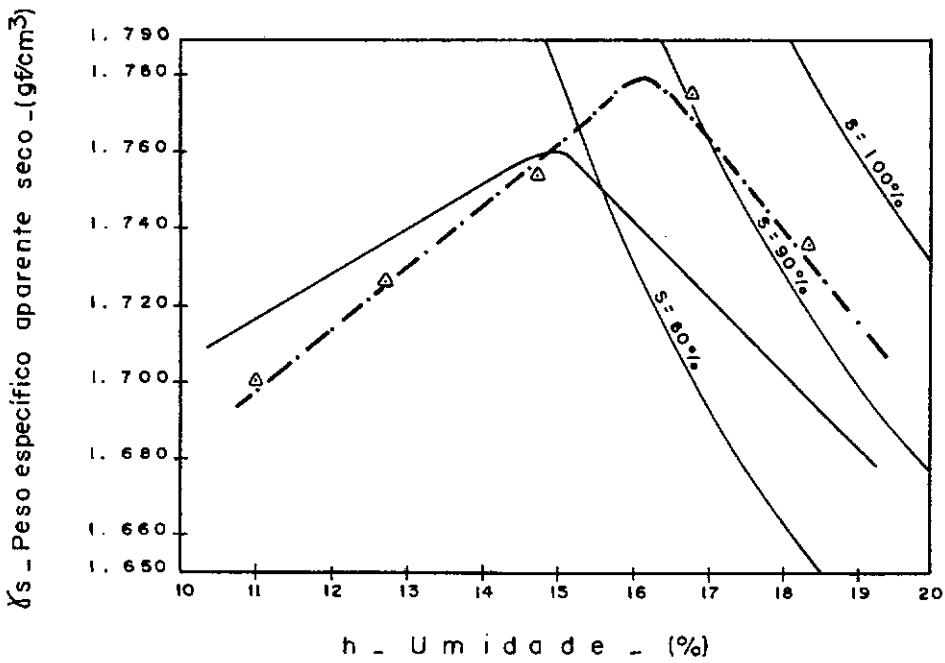
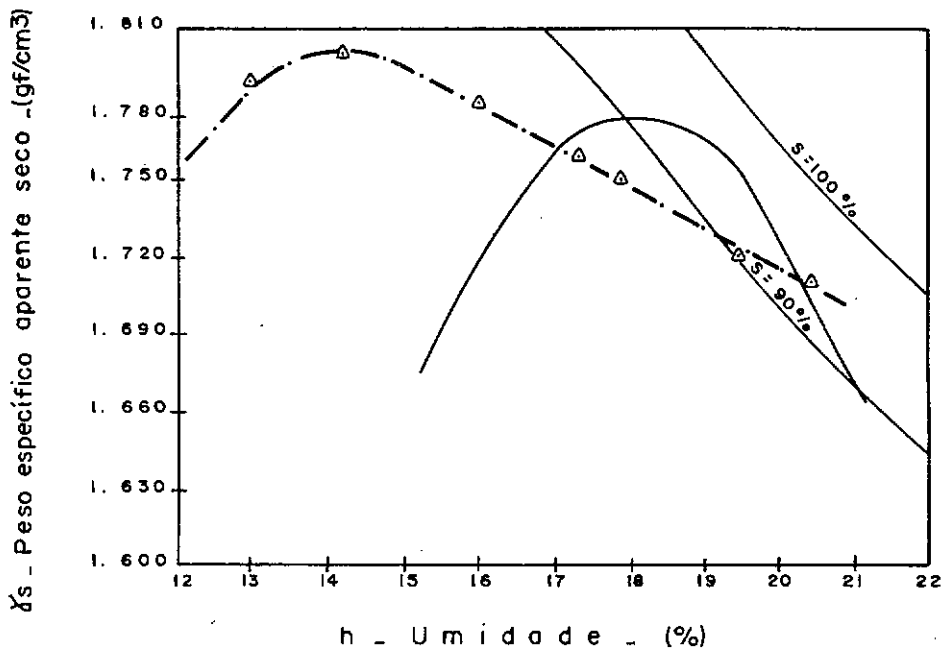
(a) - Argila amarela - RJ.



(b) - Argila vermelha - RJ.

--- Equipamento reduzido - Δ
 — Proctor Intermediário

FIG. 4.3 - Comparação entre as curvas de compactação obtidas do ensaio Proctor Inter. e Normal, e do ensaio utilizando o equipamento reduzido de compactação.



--- Equipamento reduzido Δ
 — Proctor Intermediária

FIG. 4.4 - Comparação entre as curvas de compactação obtidas do ensaio Proctor Inter. e Normal, e do ensaio utilizando o equipamento reduzido de compactação.

Na tabela abaixo estão os valores da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo dos quatro solos estudados, segundo o método de compactação que utiliza o equipamento reduzido (12).

Descrição	$h_{\text{ótimo}}$ (%)	$\gamma_{\text{smáximo}}$ (gf/cm ³)
Argila Amarela-RJ	20,6	1,700
Argila Vermelha-RJ	16,8	1,760
Argila Vermelha-MG	14,2	1,807
Argila Vermelha-PR	16,1	1,762

Conhecida a curva de compactação determinada com o equipamento reduzido a quantidade de solo necessário para a moldagem do corpo-de-prova com 196,35 cm³ de volume pode ser determinada. Foram mantidas as tolerâncias de 0,5% e 0,03 gf/cm³, respectivamente, para umidades e pesos específicos aparentes secos. Como a relação ideal entre a altura do corpo-de-prova e o diâmetro deveria ser de, aproximadamente, 2, devido ao tamanho da célula triaxial disponível e as condições necessárias para a fixação dos transdutores (item 4,2), estabeleceu-se que a diferença entre a altura desejada (10 cm) e a obtida não poderia ser superior a 0,2 cm.

4.2 - EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado para o estudo das carac-

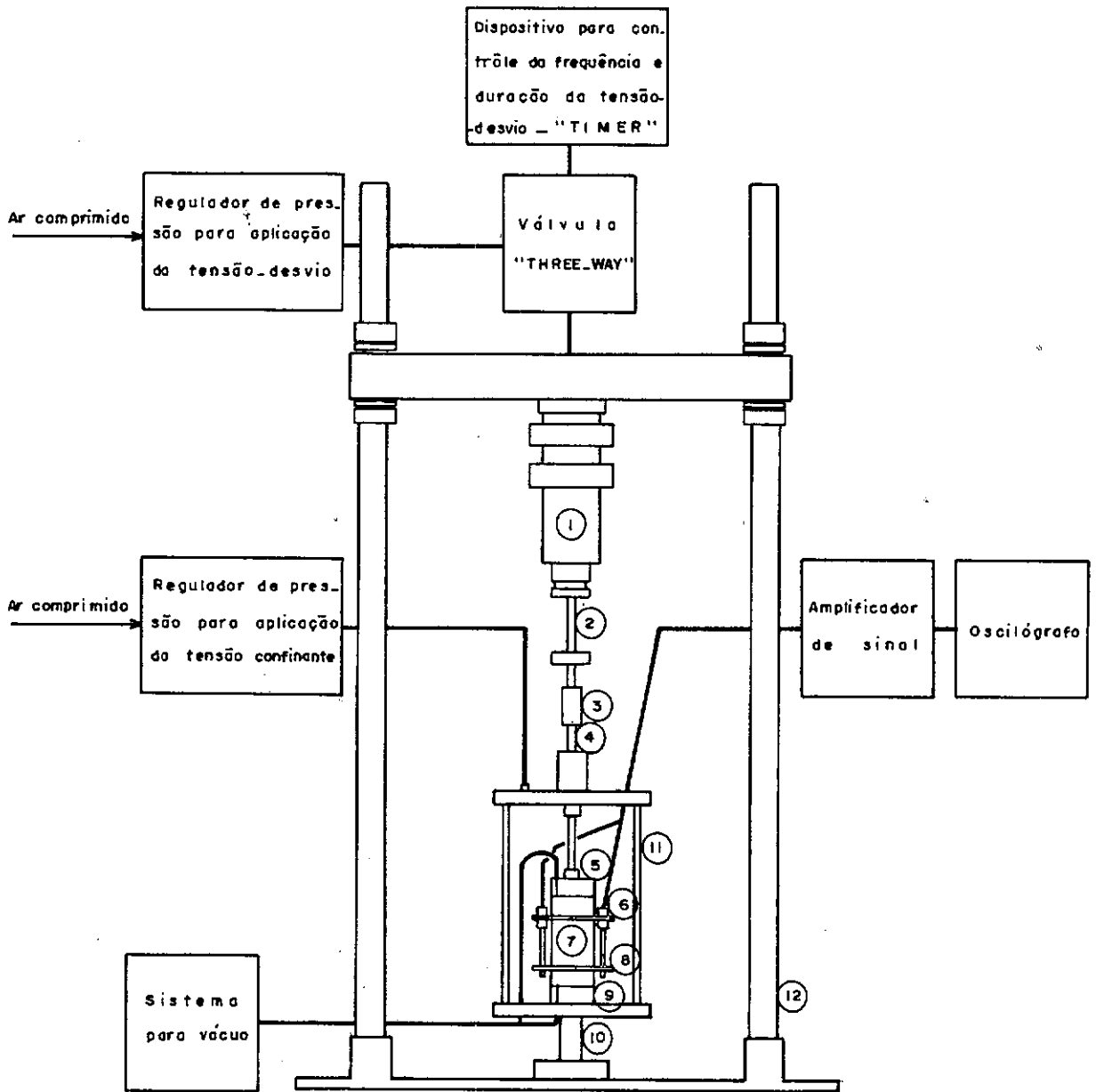
terísticas das deformações permanentes e recuperáveis é similar ao desenvolvido por Seed e Fead (21), e montado em 1977, na COPPE (13). Consiste de um sistema pneumático de carregamento que permite aplicar tensões repetidas em amostras de solo com durações de carga de, no mínimo, 0,14 segundo e intervalo entre aplicações de carga variado.

No esquema do equipamento mostrado na figura 4.5, as cargas são rapidamente aplicadas no topo da amostra na célula triaxial através do pistão ligado a um cilindro de pressão montado acima da célula triaxial. Este cilindro de pressão está conectado a uma válvula "three-way", que ao se abrir permite que o ar sob pressão seja transmitido através do cilindro para o pistão e, ao fechar-se, seja removido. O movimento da válvula para permitir a entrada ou saída do ar no cilindro é controlado pelo "timer" que por sua vez aciona o registro automático do número de aplicações de carga.

Um sistema de vácuo é ligado à base da célula triaxial com a finalidade de permitir a moldagem de solos arenosos e verificar a existência de furos na membrana que envolve a amostra de solo.

A pressão confinante desejada é aplicada na câmara triaxial onde está o corpo-de-prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, por um sistema de ar comprimido.

Para a medida das deformações permanentes e recuperáveis dois anéis são colocados ao redor do corpo-de-prova, estando cada um a 1/4 da altura do corpo-de-prova, a partir do



- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| ① Cilindro de pressão | ⑦ Amostra de solo |
| ② Pistão | ⑧ Alças para a fixação dos LVDTs |
| ③ Conexão | ⑨ Base |
| ④ Haste | ⑩ Suporte central |
| ⑤ Capêçote | ⑪ Célula triaxial |
| ⑥ LVDT | ⑫ Estrutura para suporte |

FIG.4.5_Esquema do equipamento para ensaios triaxiais de carga repetida.

topo e da base. Acoplados a estes aneis e diametralmente opostos, encontram-se dois transdutores mecano-eletromagnéticos do tipo LVDT ("linear variable differential transformer") que são ligados a um amplificador que, por sua vez, é ligado ao oscilógrafo. As deformações axiais durante o carregamento repetido são transformadas em um potencial elétrico, cujo valor é registrado no oscilógrafo. A fim de correlacionar as deformações com o valor registrado, faz-se necessária uma pré-calibração.

4.3 - MÉTODO DE ENSAIO PARA SOLOS ARGILOSOS

Com o objetivo de determinar as deformações axiais permanentes e recuperáveis de solos argilosos ou coesivos, adotou-se um método de ensaio baseado em trabalhos anteriores (27) que tratam da determinação do módulo resiliente em laboratório.

Após a preparação do corpo-de-prova, este era as sente numa base de 5 cm de diâmetro e sobre ele colocado o cabe çote ("top cap"). Como se pretendia a condição drenada, foram colocadas pedras porosas e papel-filtro tanto na parte superior quanto inferior. Logo após, a membrana era colocada ao redor do corpo-de-prova e presa nas extremidades para vedação.

O corpo-de-prova era submetido ao vácuo através de uma linha de vácuo conectada à base da célula triaxial, em co munição com as pedras porosas. Este procedimento foi utilizado a fim de detectar vazamentos devido a furos na membrana ou vedações mal feitas. Esta linha de vácuo era ligada a uma câma ra de borbulhamento para verificar se ainda havia ar. Após esta verificação, desligava-se o vácuo e os dois aneis metálicos (alças) com os transdutores LVDT previamente calibrados eram co

locados lateralmente no corpo-de-prova.

Durante o ensaio de compressão na condição drenada, o corpo-de-prova fica em contato com a atmosfera. A distância entre os anéis era medida e registrada e, a seguir, a célula triaxial fechada.

Escolhia-se o intervalo de tempo entre as aplicações de carga a ser utilizado no ensaio e aplicavam-se as tensões confinantes e de desvio.

Conforme veremos no capítulo 5 as características resilientes de solos argilosos compactados são ligeiramente afetados pela grandeza da tensão confinante. A pressão confinante usada deveria ser aproximadamente igual às tensões horizontais que ocorrem "in situ". Estas geralmente são da ordem de 0,07 a 0,35 kgf/cm². Por este motivo o valor médio de 0.21 kgf/cm² foi utilizado para todos os ensaios.

Para a determinação do módulo resiliente em função da intensidade da tensão-desvio, antes que se começasse a registrar as deformações recuperáveis, a amostra era submetida a 200 aplicações de carga para cada uma das seguintes tensões-desvios: 0,53; 0,70 e 1,05 kgf/cm². Este condicionamento era feito para eliminar imperfeições na moldagem e montagem nas partes superior e inferior do corpo-de-prova. A maior variação do módulo resiliente com o número de aplicações de carga, para cada um desses níveis de tensão, ocorre neste condicionamento.

Terminado o condicionamento, a amostra era subme-

tida a tensões variadas da seguinte maneira: a tensão confinante de $0,21 \text{ kgf/cm}^2$ era mantida e aplicavam-se 200 repetições para cada oito diferentes tensões- desvios ou seja: 0,21; 0,35; 0,53; 0,70; 1,05; 1,40; 1,58 e $2,10 \text{ kgf/cm}^2$. As leituras eram registradas após 200 aplicações de cada um desses níveis de tensão.

No caso do ensaio feito para se verificar a variação da deformação permanente e deformação recuperável com o número de aplicações de carga, somente um nível de tensão, previamente escolhido, era utilizado. Contudo a amostra não era condicionada pois havia interesse em se conhecer as deformações permanente e recuperável na primeira aplicação de carga. Neste tipo de ensaio o registrador (oscilógrafo) era mantido ligado durante as 100 primeiras aplicações. Até 1000 aplicações as leituras eram feitas a cada 100 aplicações e posteriormente de 1000 em 1000.

Após o término de cada ensaio, a pressão na câmara era reduzida para zero e a célula triaxial desmontada, e os aneis e os LVDTs removidos. As umidades dos corpos-de-prova eram também determinadas após o ensaio de carga repetida. Para os ensaios realizados até 100000 aplicações de carga a um mesmo nível de tensão, tentativas eram feitas para se determinar o acréscimo do peso específico aparente seco conhecendo-se: o peso de duas pastilhas retiradas das extremidades da amostra, o peso do volume deslocado de duas cápsulas cheias de mercúrio ao serem colocadas as pastilhas, e a umidade após o ensaio. Porém, devido à imprecisão inerente do método usual para a determinação do peso específico aparente seco muitas vezes não foi possível detectar

nenhum acréscimo, conforme veremos posteriormente.

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As diferentes variáveis que influenciam as características de deformações permanentes e recuperáveis, bem como o módulo resiliente de solos argilosos foram mencionados no capítulo 2. Dentro do plano experimental aqui realizado cada uma das variáveis foram levadas em consideração tanto pela determinação da sua influência nas características das deformações permanentes e recuperáveis e/ou do módulo resiliente, quanto fixando-se alguns parâmetros tais que o estudo de seu efeito pudesse ser eliminado. Essas variáveis serão aqui divididas em três classes baseadas no plano experimental realizado por Hicks (7) para material granular, que são:

- (1) - Fatores de carga - são aqueles que descrevem a maneira pelo qual a carga é aplicada ao material.
- (2) - Fatores estruturais - são aqueles que descrevem o arranjo estrutural das partículas.
- (3) - Fatores ambientais - são aqueles que descrevem as influências externas, outras que não de carga, e que podem conduzir a diferenças nas características das deformações permanentes e recuperáveis bem como no módulo resiliente.

Baseando-se na classificação acima, serão aqui relacionados os fatores considerados no estudo de laboratório des-

te capítulo para solos argilosos que são:

Fatores	Variáveis	Método de tratamento
Carga	- Intensidade de tensão-desvio	- fator principal
	- Tensão confinante	- fator secundário e fator fixado
	- Intervalo entre aplicações de carga	- fator principal
	- Duração da carga	- fator fixado
	- Número de aplicações de carga	- fator secundário
Estrutural	- Método de compactação	- fator principal
	- Tempo de cura	- fator principal
	- Peso específico aparente seco	- fator principal
Ambiental	- Umidade de compactação	- fator principal
	- Temperatura	- fator fixado

Os fatores principais são aqueles que foram especialmente estudados devido à significante influência nas características das deformações permanente e recuperável e/ou na relação entre o módulo resiliente "versus" tensão-desvio. O fator secundário é aquele que foi estudado apenas com o intuito de usá-lo no desenvolvimento dos procedimentos de ensaio para as investigações dos fatores principais.

Dentro deste plano experimental serão aqui analisados os resultados dos ensaios dinâmicos de laboratório das variáveis que influenciam as características das deformações permanentes e recuperáveis, e do módulo resiliente para solos argilosos.

5.1 - EFEITO DA INTENSIDADE DE TENSÃO

O subleito e a camada de reforço são submetidos a tensões relativamente pequenas se comparadas com a resistência ao cisalhamento dos solos que compõem estas camadas, porém, mesmo nestas condições particulares, os solos argilosos desenvolvem de formações permanentes e deformações recuperáveis que podem com-prometer a estrutura do pavimento.

Procurou-se ter uma noção do nível de tensão que ocorreria nas camadas do pavimento e no subleito, utilizando-se as espessuras reais do pavimento no trecho estudado da estrada BR-040 ou seja: revestimento de concreto asfáltico de 10 cm, base e sub-base de brita graduada de 36 cm total, reforço de argila amarela RJ, de 26 cm e subleito de argila vermelha. Para isto utilizou-se um programa de elementos finitos (FEPAVE 2). Este programa determina as tensões e deformações em qualquer sistema de camadas de um pavimento, cujos materiais apresentam elasticidade linear ou não-linear, sendo a carga considerada uniformemente distribuída numa área circular representando a área de contato do pneumático. Considerou-se uma variação de temperatura de 50 °C na superfície a 35 °C na interface revestimento-base. Desta maneira verificou-se a uma profundidade de 59 cm (reforço) uma tensão principal maior (σ_1) igual a 0,402 kgf/cm² e uma tensão principal menor (σ_3) igual a 0,131 kgf/cm², no centro da área carregada. Para a profundidade de 86 cm, que corresponde ao subleito, estas tensões foram 0,192 kgf/cm² e 0,021 kgf/cm², respectivamente.

Devido à dificuldade de leitura no registrador (os

cilógrafo) durante as realizações dos ensaios de carga repetida, valores relativamente elevados dos níveis de tensões a que estão submetidos subleitos e reforço dos pavimentos, foram aplicadas aos corpos-de-prova. Por este motivo os níveis de tensões utilizados foram baseados em pesquisas feitas anteriormente ou seja de acordo com a metodologia de ensaio descrita no capítulo 4.

Conforme foi mencionado no capítulo 4, para se investigar o efeito da intensidade de tensão dois tipos de ensaio foram realizados: o primeiro visa estudar o efeito da intensidade de tensão no módulo resiliante e o segundo no relacionamento de deformação axial permanente e deformação axial recuperável com o número de aplicações de carga. Desta maneira estes serão analisados neste item separadamente.

a- Efeito da intensidade de tensão (σ) no módulo resiliante

Investigações anteriores (8, 24, 25) indicaram que para solos argilosos o efeito de tensões mais significativo é o da tensão-desvio axial aplicada à amostra e que as propriedades resiliantes são pouco atingidas pela grandeza da tensão confinante. Procurando-se confirmar estas conclusões para os solos utilizados nesta pesquisa, realizaram-se ensaios triaxiais drenados de carga repetida para verificação do efeito da tensão-desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3) no módulo resiliante.

Conforme a metodologia de ensaio adotada no capítulo 4, para a determinação do módulo resiliante em solos argilosos, foram aplicadas tensões-desvios numa amostra de argila amarela RJ, para a umidade de 20,6% e peso específico aparente se-

co de $1,702 \text{ kgf/cm}^3$. Estas tensões-desvio foram da ordem de 2% a 12% da tensão-desvio máxima determinada em ensaios triaxiais não adensados e não drenados (UU) nas mesmas condições acima. A relação entre módulo resiliente (M_r) e a tensão-desvio (σ_d) pode ser vista na figura 5.1.1. onde se verifica que em níveis de tensão menores que $0,7 \text{ kgf/cm}^2$ há um decréscimo acentuado do módulo resiliente com o acréscimo da tensão-desvio, mas, a partir deste ponto, o decréscimo se torna menos pronunciado.

Devido à forma da curva encontrada ser semelhante ao modelo elástico bi-linear selecionado por Hicks (7) e citado no capítulo 2, os coeficientes K_1 , K_2 , K_3 e K_4 que compõem a equação já mencionada (cap. 2) foram aqui determinados, e seus valores são: 0,71; 5200; 26600 e -2000, respectivamente.

Para a verificação da variação do módulo resiliente com a pressão confinante, uma amostra de solo semelhante à utilizada para a determinação do módulo resiliente em função da tensão-desvio, foi ensaiada, mantendo-se constante a tensão-desvio de $1,05 \text{ kgf/cm}^2$ durante todo o ensaio e alterando-se a tensão confinante de 0,21 a $1,05 \text{ kgf/cm}^2$. A amostra foi condicionada de acordo com a metodologia de ensaio do capítulo 4 e as leituras foram registradas após 200 aplicações de cada tensão confinante (σ_3). Pode-se, portanto, verificar através da figura 5.1.1. que o efeito da tensão confinante (σ_3) no módulo resiliente (M_r) não é significativo, ou seja, houve somente um ligeiro acréscimo do módulo com o acréscimo da tensão confinante.

Analizando-se, portanto, o efeito que tem a

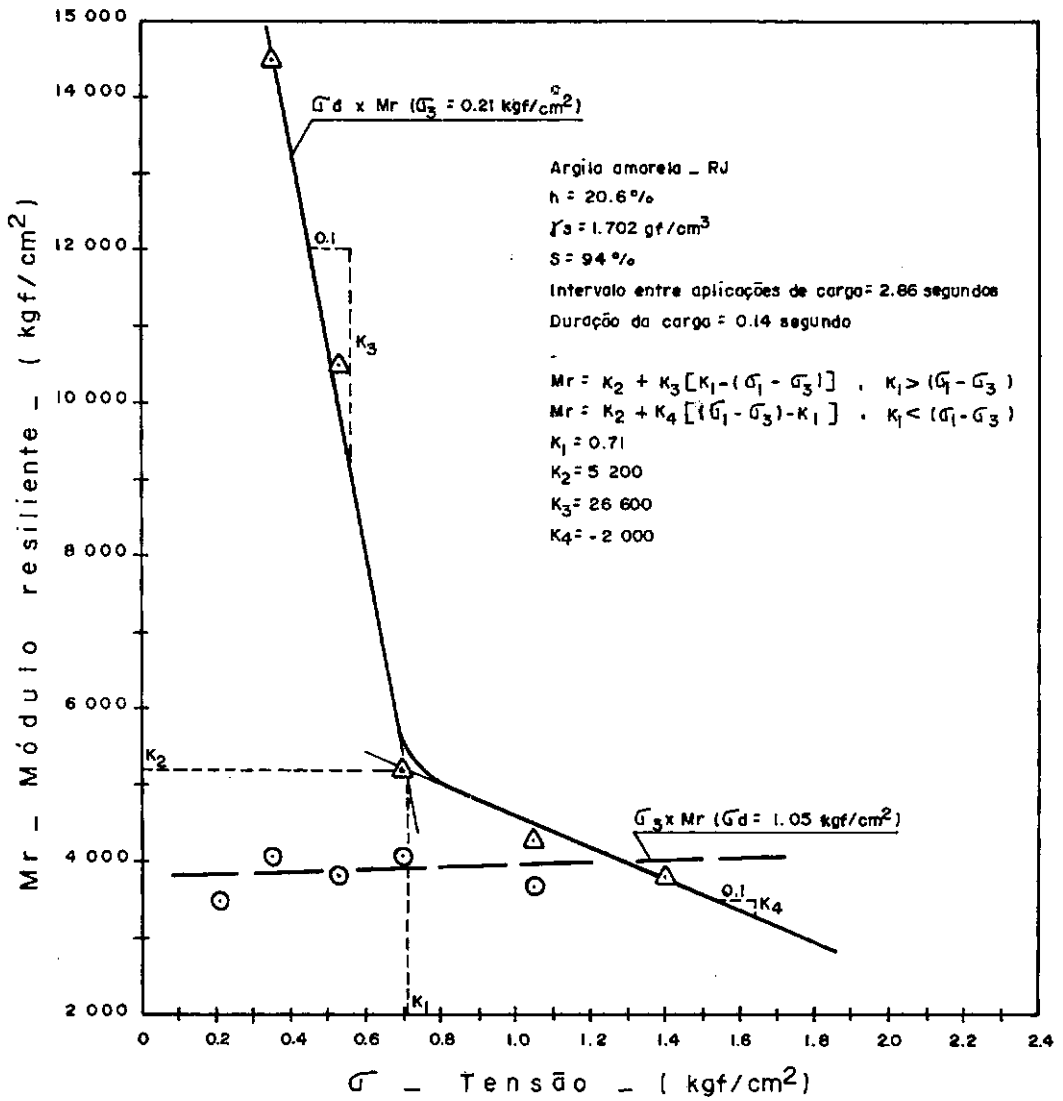


FIG.5.1.1- Efeito da tensão-desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3) no módulo resiliente (Mr).

tensão-desvio no módulo resiliente e da tensão confinante em termos percentuais, pode-se notar que houve um decréscimo do módulo de 62%, quando a tensão-desvio passou de $0,35 \text{ kgf/cm}^2$ a $0,70 \text{ kgf/cm}^2$, enquanto que para os mesmos valores de tensão confinante houve um acréscimo do módulo resiliente de, apenas, 1,5%. Verifica-se, também, a boa aproximação dos valores do módulo resiliente obtidas das curvas (M_r, σ_d) e (M_r, σ_3) , para $\sigma_d = 1,05$ e $\sigma_3 = 0,21 \text{ kgf/cm}^2$, respectivamente, como seria de se esperar, em que pese a dispersão dos ensaios; tem-se o módulo resiliente de cerca de 4100 kgf/cm^2 .

Devido à significativa variação do módulo resiliente com a tensão-desvio e pequena variação com a tensão confinante, pode-se admitir que o aumento da profundidade do elemento de solo abaixo da superfície do pavimento faz diminuir progressivamente a tensão-desvio correspondente a carga, e, desta maneira, se o solo fosse completamente homogêneo faria aumentar o módulo resiliente.

b- Efeito da intensidade da tensão-desvio na relação entre deformação axial permanente e deformação axial recuperável e o número de aplicações de carga.

Baseando-se nos resultados das investigações citados no capítulo 2, segundo os quais a deformação axial de amostras de solo argiloso, quando submetidas a tensões repetidas, torna-se maior com o acréscimo do número de aplicações de carga, realizaram-se ensaios de carga repetida em três argilas de diferentes características sob a tensão confinante constante de $0,21 \text{ kgf/cm}^2$ para três ou quatro tensões-desvios, constantes no decorrer de cada ensaio. Na realidade qualquer acréscimo da

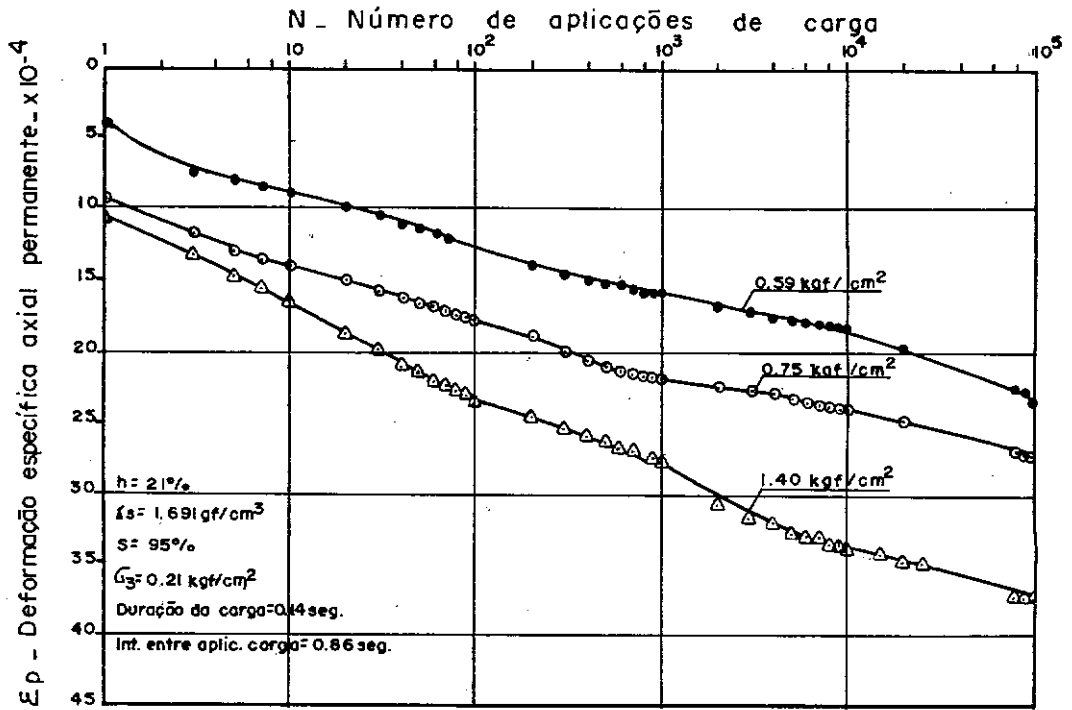
tensão normal vertical sobre um elemento de solo será acompanhada de um acréscimo simultâneo da tensão normal horizontal ou pressão lateral; assim sendo, uma condição de ensaio mais real seria obtida mantendo-se a relação entre a tensão principal maior (σ_1) e a tensão principal menor (σ_3) constante. Porém como foi visto que os solos argilosos ensaiados dinamicamente são essencialmente afetados pela tensão-desvio, e como torna-se bem mais complicado o ensaio com σ_3 variável e a análise correspondente, costuma-se manter constante a tensão confinante.

Com base nos resultados dos ensaios apresentados neste ítem, a relação da deformação axial permanente com o número de aplicações de carga proposto por Monismith (10) e citado no capítulo 2, será aqui estabelecida. Embora uma relação semelhante a esta não tenha sido estabelecida por Monismith e outros (10) para a deformação axial recuperável, este procedimento foi aqui desenvolvido devido à grande variação do módulo resiliente com o número de aplicações de carga bem como para permitir estimativa do módulo resiliente para qualquer valor do número de repetições e não apenas conforme descrito no capítulo 4. Fica, portanto, estabelecido os coeficientes K' e A' nesta nova relação. Como o módulo resiliente aumenta com o número de repetições de carga, e tendo em vista a dificuldade de se considerar a história de tensões que simule as condições de estrada, julga o Autor preferível, e a favor da segurança, ficar com módulos mais baixos, ou seja os obtidos a número de repetições relativamente pequenos (p. ex: 1000 repetições ao invés de 10000 repetições).

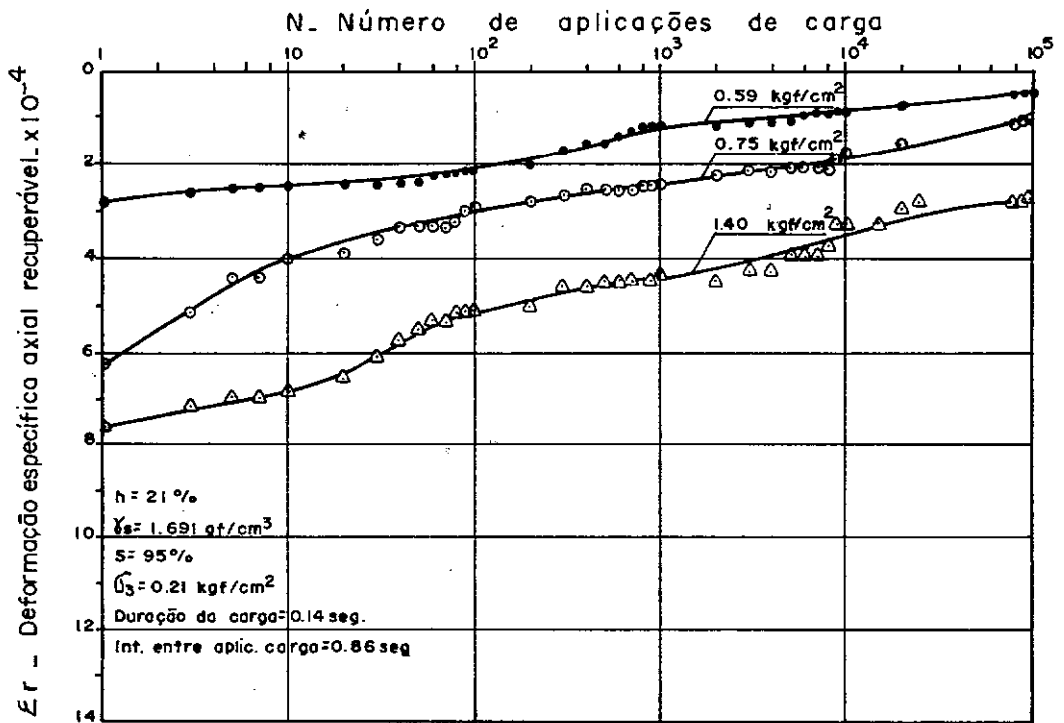
A fim de ilustrar a variação da deformação

axial permanente e da deformação axial recuperável, os resultados dos ensaios de carga repetida de três corpos-de-prova semelhantes ($h = 21\%$, $\gamma_s = 1,691 \text{ kgf/cm}^3$ e $S = 95\%$) da argila amarela-RJ, submetidos a três níveis de tensões constantes no decorrer de cada ensaio ($\sigma_d = 0,59$; $0,75$ e $1,40 \text{ kgf/cm}^2$), foram plotados numa escala semi-log. A figura 5.1.2 mostra os resultados desses ensaios, onde observa-se um acrêscimo da deformação axial permanente e um decrêscimo da deformação axial recuperável (acrêscimo do módulo resiliente) com o número de aplicações de carga. O maior nível de tensão-desvio aplicada ($1,40 \text{ kgf/cm}^2$) representa, para este caso, 88% da resistência determinada num ensaio triaxial normal (UU), para 6% de deformação específica. Ainda nessa figura verifica-se que, para a tensão-desvio de $1,40 \text{ kgf/cm}^2$, de 1 a 10^3 aplicações de carga o acrêscimo da deformação axial permanente foi de aproximadamente 160% e o dêcrescimo da deformação axial recuperável foi de 56%. De 1000 a 100000 aplicações de carga o acrêscimo da deformação axial permanente e o decrêscimo da deformação axial recuperável foram de 35% e 39%, respectivamente. Observa-se com isso que a maior variação tanto da deformação axial permanente quanto da deformação axial recuperável ocorre nas 1000 primeiras aplicações de carga e que após este número a variação se torna menos pronunciada.

A fim de verificar se as correlações entre deformações específicas axiais permanentes e o número de aplicações de carga obedecem razoavelmente à equação $\epsilon_p = KN^A$, apresentada no Cap. 2, os dados da figura 5.1.2 (a) foram marcados em escala log-log na figura 5.1.3 (a). A mesma verificação fez-se com as deformações axiais recuperáveis, e figuras 5.1.2 (b) e

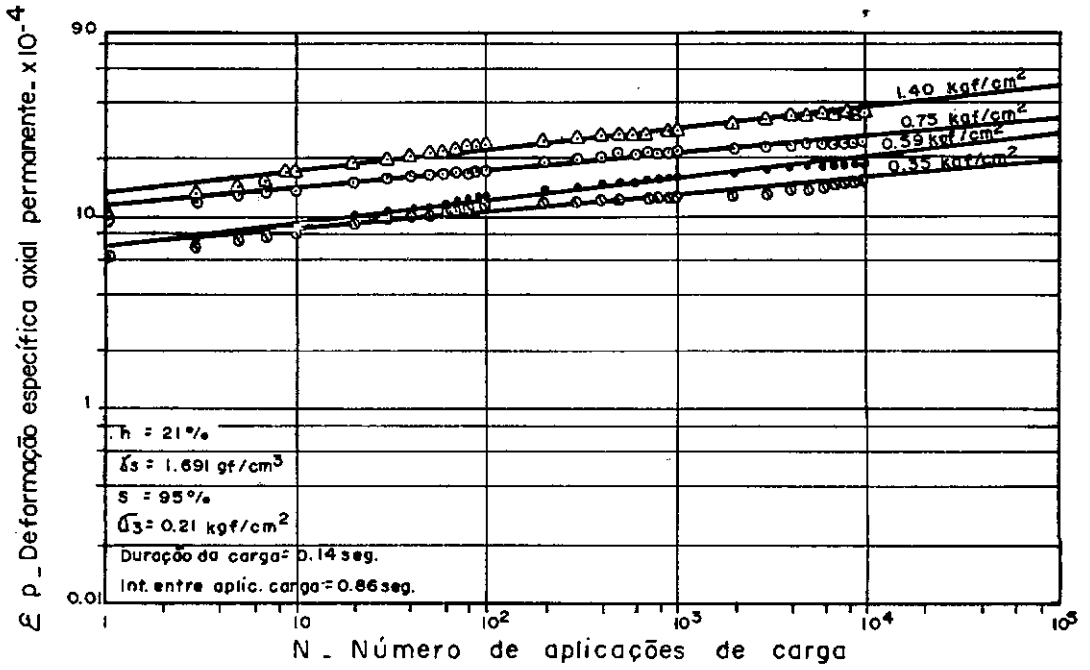


(a) - Deformação específica axial permanente (ε_p) "versus" número de aplicações de carga (N).

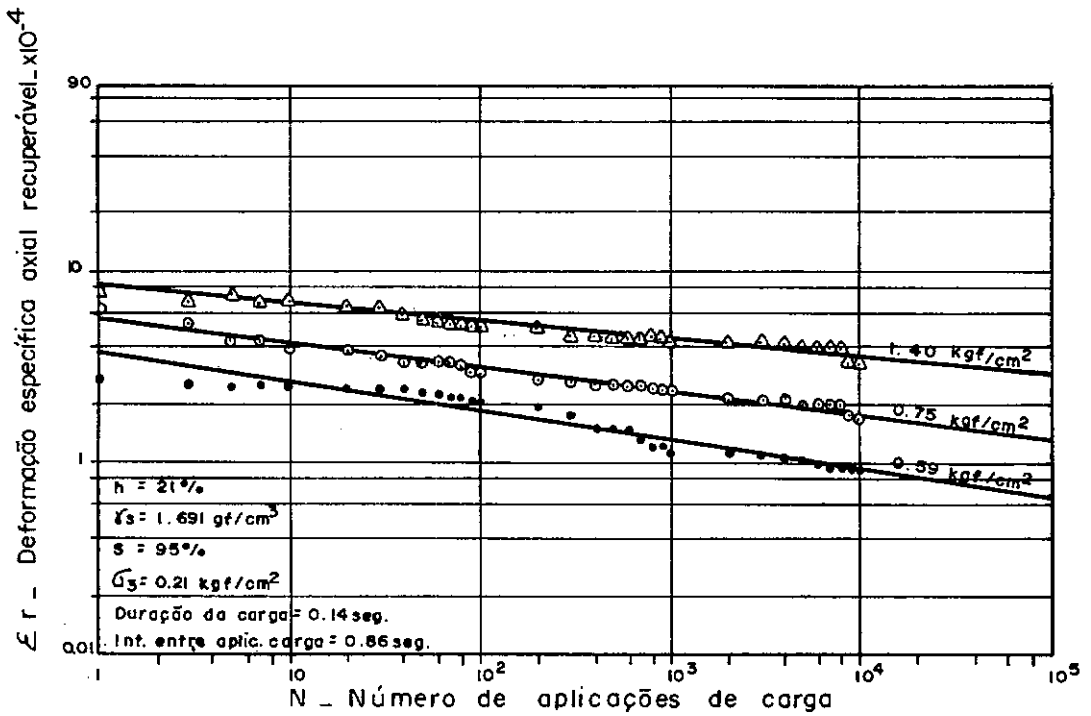


(b) - Deformação específica axial recuperável (ε_r) "versus" número de aplicações de carga (N)

FIG.5.1.2- Efeito da tensão-desvio ($\bar{\sigma}_d$) na deformação permanente (ε_p) e deformação recuperável (ε_r), Argila amarela - RJ.



(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).



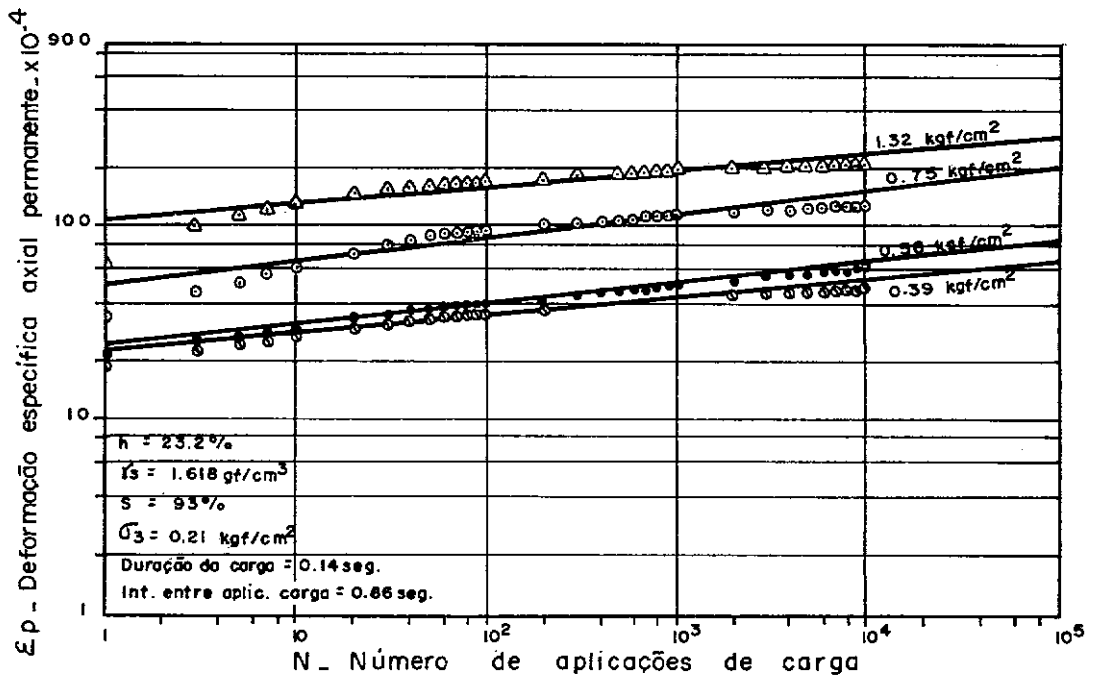
(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.1.3- Efeito da tensão-desvio ($\bar{\sigma}_d$) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r). Argila amarela - RJ.

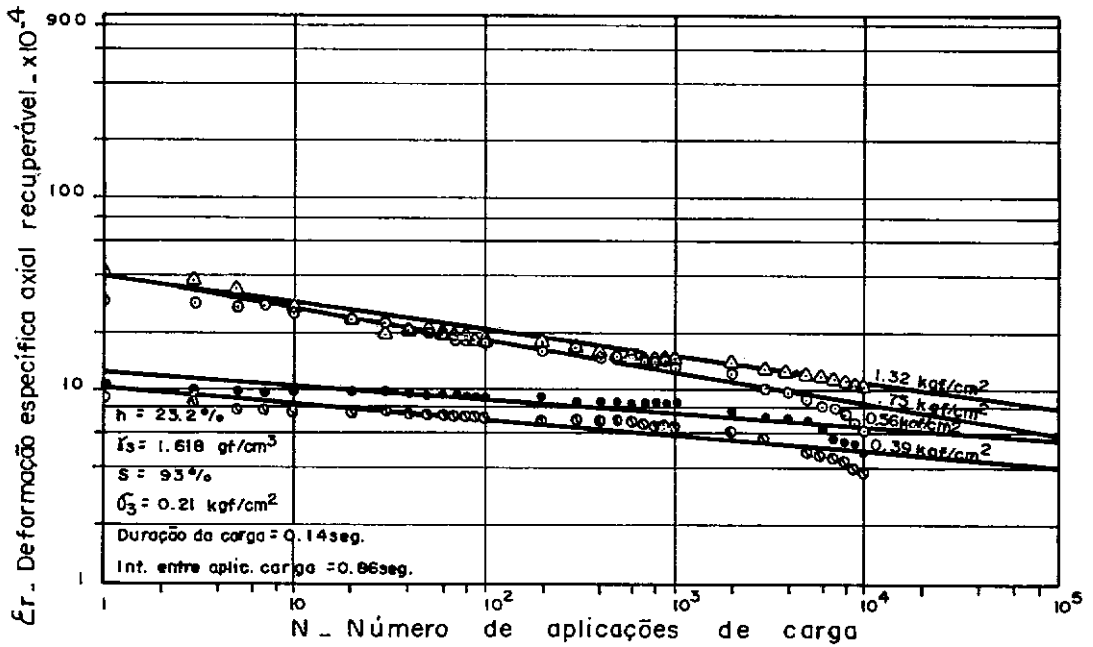
5.1.3 (b). A mesma correlação foi verificada para as demais argilas, conforme figuras 5.1.4, 5.1.5, e 5.1.6.

A tabela 5.1.1 contém uma lista de coeficientes determinadas para uma série de corpos-de-prova de argila amarela-RJ, argilas vermelhas-RJ e PR, ensaiada para várias tensões-desvios. Verifica-se que a correlação da deformação axial permanente e da deformação axial recuperável com o número de aplicações de carga expresso pela equação de forma potencial se ajusta razoavelmente bem aos dados experimentais (coeficiente de correlação elevado). Embora muitos dos ensaios tenham sido feitos até 100000 aplicações de carga, as equações foram determinadas para valores somente até 10000 aplicações. No caso da correlação entre a deformação axial permanente e o número de aplicações de carga os coeficientes determinados com 100000 e 10000 aplicações foram praticamente os mesmos, mas no caso da deformação axial recuperável, as leituras após 10000 aplicações tornaram-se, muitas vezes, impossíveis de obter com a necessária precisão, e acarretaram erros grandes na determinação dos coeficientes. Um exemplo típico desta dificuldade verificou-se com a argila amarela-RJ, na umidade de 21% e à tensão-desvio de $0,35 \text{ kgf/cm}^2$ (tabela 5.1.1 e figura 5.1.3), tendo sido impossível obter leituras após 100 aplicações de carga e consequentemente determinação dos coeficientes K' e A' .

O coeficiente K da argila amarela-RJ, na umidade igual a 21% (figura 5.1.3 e tabela 5.1.1) decresceu de aproximadamente 54% da tensão de $1,40$ para $0,35 \text{ kgf/cm}^2$. Quanto ao coeficiente A a maior diferença foi entre as tensões-desvios de $1,40$ e $0,35 \text{ kgf/cm}^2$, tendo havido um decréscimo de 75% da maior

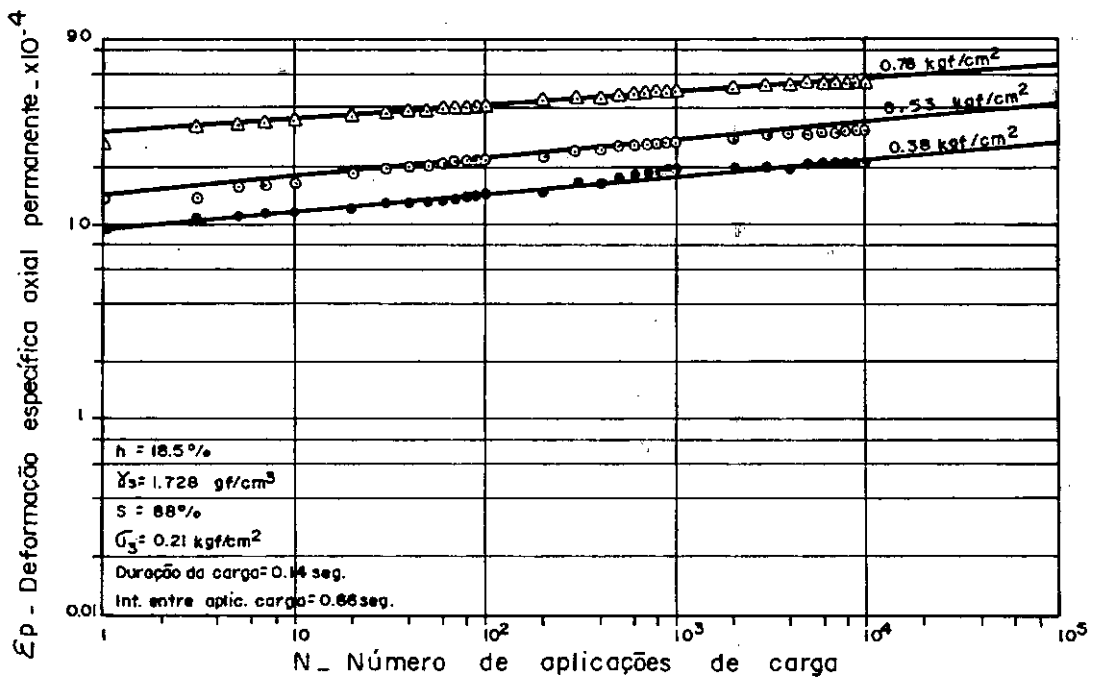


(a) - Deformação específica axial permanente (ε_p) "versus" número de aplicações de carga (N).

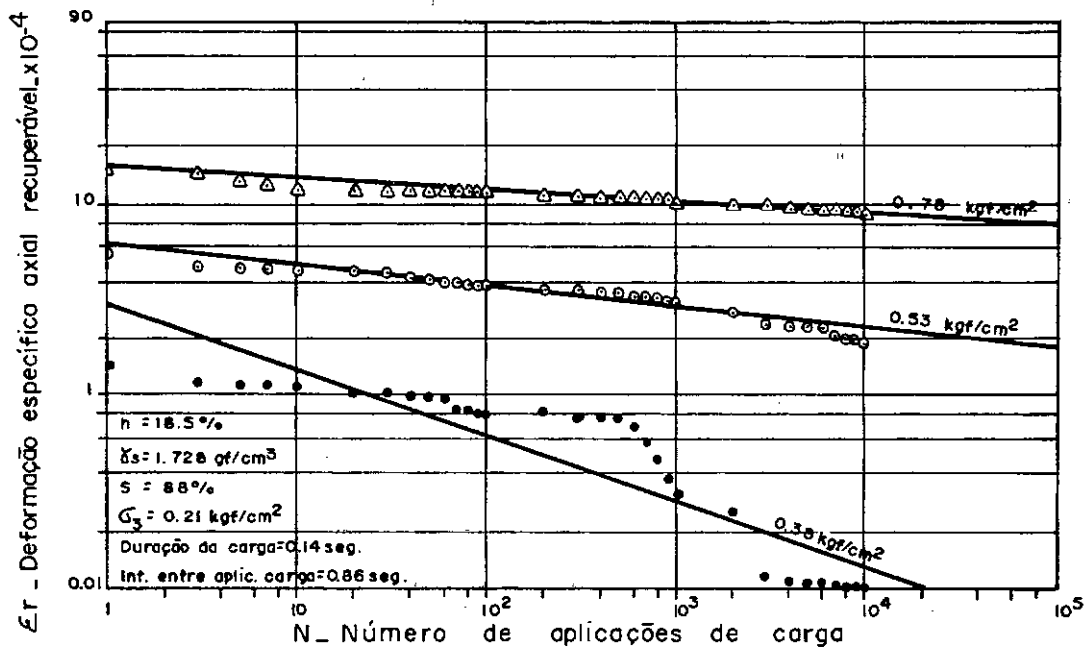


(b) - Deformação específica axial recuperável (ε_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.1.4 - Efeito da tensão-desvio (σ_d) na deformação permanente (ε_p) e deformação recuperável (ε_r). Argila amarela - RJ.

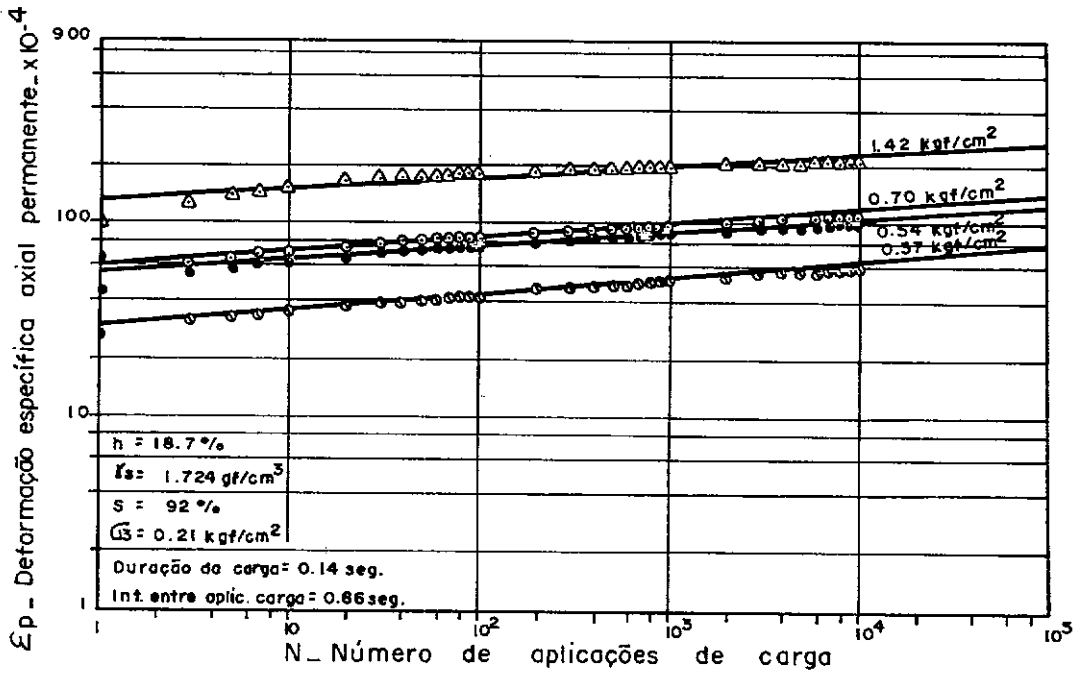


(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).

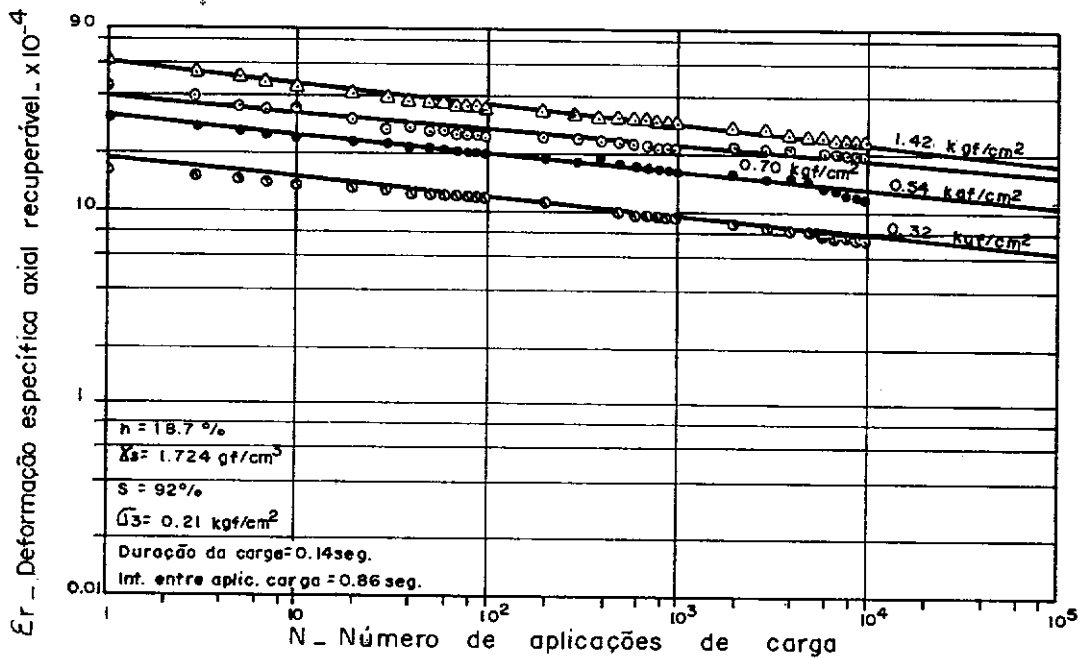


(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.1.5_ Efeito da tensão desvio (σ_d) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r). Argila vermelha RJ.



(a) - Deformação específica axial permanente (ε_p) "versus" número de aplicações de carga (N).



(b) - Deformação específica axial recuperável (ε_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.1.6_ Efeito da tensão-desvio (G_d) na deformação permanente (ε_p) e deformação recuperável (ε_r). Argila vermelha PR.

DESCRIÇÃO	Condições das amostras			σ_d (kgf/cm ²)	$\epsilon_p = K N^A$			$\epsilon_r = K' N^{A'}$		
	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)		K x 10 ⁻⁴	A	r	K' x 10 ⁻⁴	A'	r'
Argila amarela - RJ	21	1,691	95	1,40	12,9	0,112	0,98	7,9	-0,087	0,97
				0,75	11,5	0,086	0,98	5,5	-0,123	0,99
				0,59	7,1	0,111	0,98	3,7	-0,156	0,96
				0,35	7,0	0,084	0,96	-	-	-
	23,2	1,618	93	1,32	106,4	0,086	0,89	40	-0,138	0,99
				0,75	49,3	0,121	0,93	39,1	-0,168	0,96
				0,56	24,1	0,106	0,99	12,3	-0,072	0,87
				0,39	22,9	0,091	0,97	10,1	-0,081	0,90
Argila vermelha - RJ	18,5	1,728	88	0,78	29,9	0,072	0,99	14,6	-0,046	0,96
				0,53	14,1	0,094	0,98	6,2	-0,105	0,96
				0,38	9,6	0,092	0,99	3,0	-0,336	0,90
Argila vermelha - PR	18,7	1,724	92	1,42	132,8	0,055	0,91	57,2	-0,103	0,99
				0,70	59,9	0,066	0,95	38,0	-0,077	0,95
				0,54	55,2	0,067	0,96	31,0	-0,095	0,99
				0,37	29,1	0,088	0,99	17,8	-0,093	0,99

TABELA 5.1.1 - Sumário dos coeficientes da relação deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga

tensão para a menor; decréscimo semelhante, 77%, ocorreu entre as tensões 1,40 e 0,75 kgf/cm². Quanto aos coeficientes K' e A', houve um decréscimo de aproximadamente 53% em K' e um acréscimo de 179% em A', da tensão-desvio de 1,40 para 0,585 kgf/cm². Para melhor visualização do acréscimo ou decréscimo dos coeficientes K, A, K' e A', plotaram-se, para cada caso particular, os valores da tabela 5.1.1 num gráfico, indicando a variação desses coeficientes com a intensidade de tensão-desvio. Nas figuras 5.1.7, 8, 9 e 10 pode-se observar esta variação, embora não se tenha feito nenhuma tentativa para correlacionar estes coeficientes com a intensidade de tensão-desvio, devido ao insuficiente número de pontos. É possível que os expoentes A e A' dependam somente do tipo de solo enquanto que K e K' sejam funções das condições de umidade e do nível de tensão a que foram submetidas as amostras.

Comparando-se os coeficientes K e A da tabela 2.1, do capítulo 2, determinados por Monismith para uma argila siltosa, verifica-se que em condições de umidade semelhantes, o coeficiente K aumentou com o acréscimo da tensão repetida, enquanto que A não teve uma lei de variação definida contínua. Desta maneira, observa-se que as tendências encontradas por Monismith também foram verificadas nas correlações obtidas com as três argilas aqui estudadas.

Concluídos os ensaios levados até 100000 aplicações de carga, tentou-se determinar o possível acréscimo do peso específico aparente seco conforme a metodologia do capítulo 4, porém não se obteve variação do peso específico. Embora tenha se realizado os ensaios na condição drenada, e o tempo gasto para aplicar 100000 repetições de carga de duração de 0,14

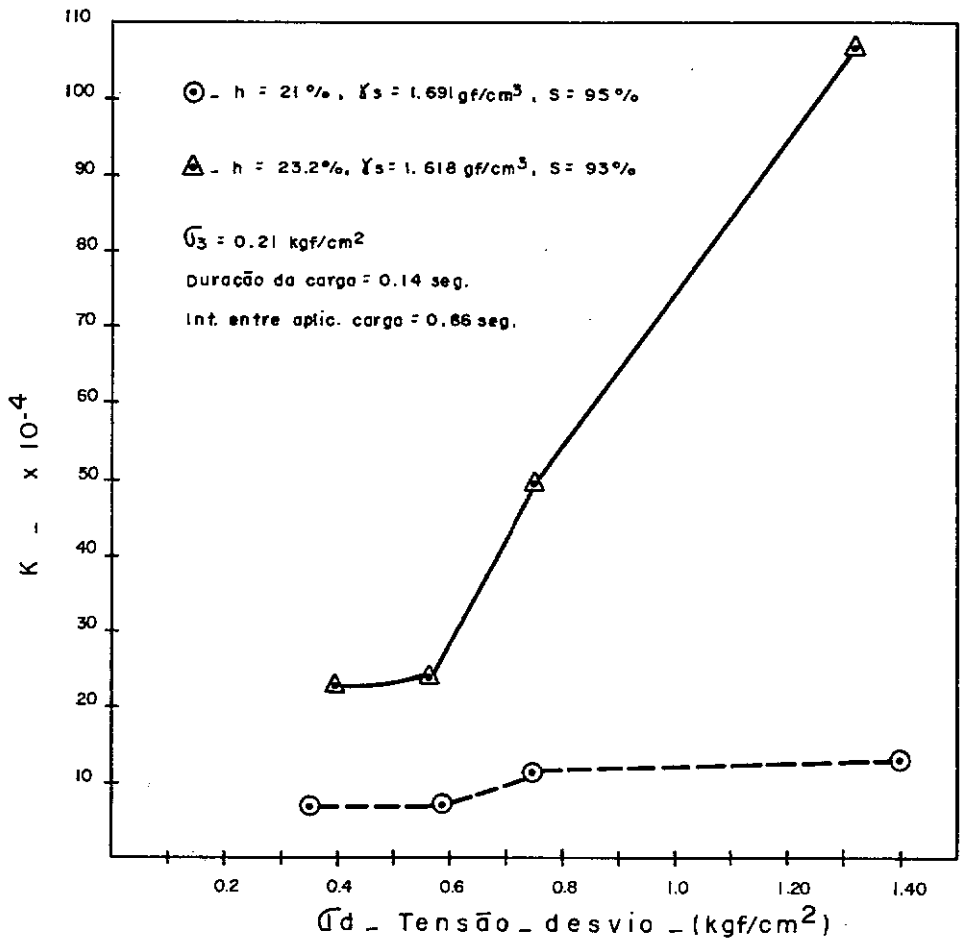
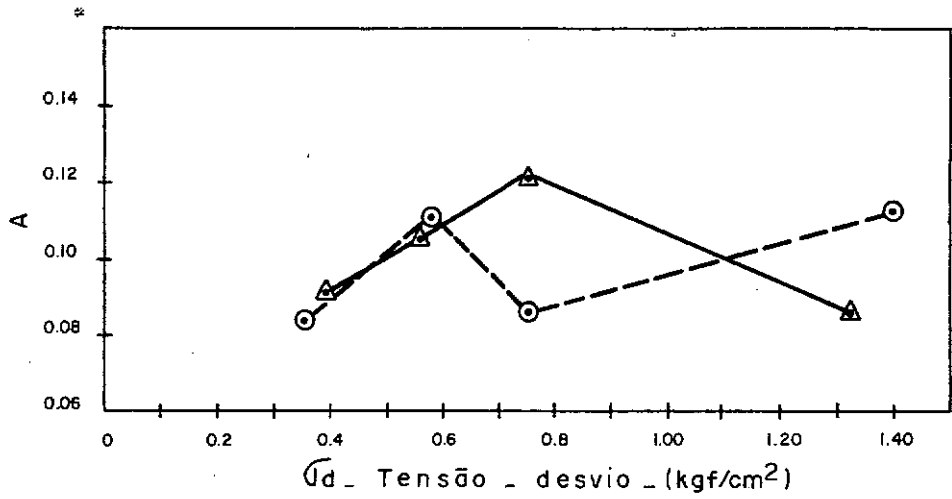


FIG.5.1.7 - Variação dos coeficientes K e A de $\epsilon_p = K N^A$ com a intensidade de tensão-desvio (σ_d), Argila amarela - RJ.

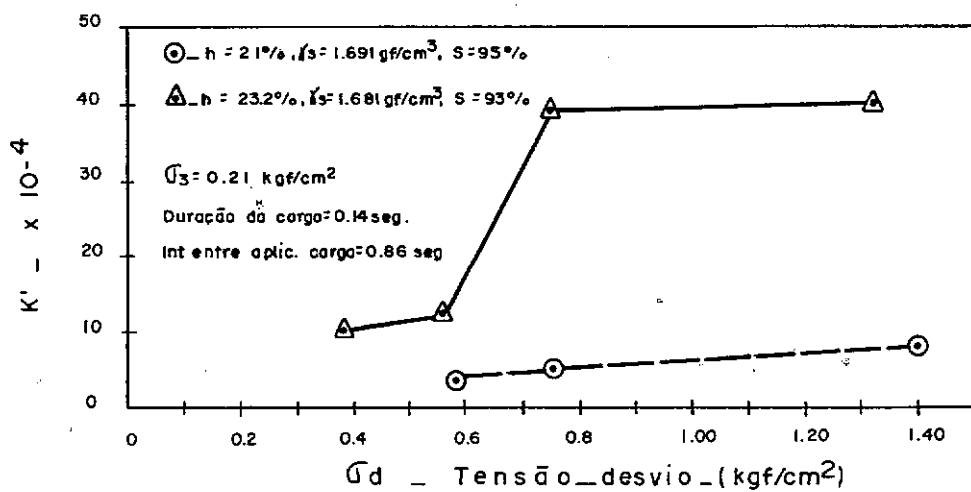
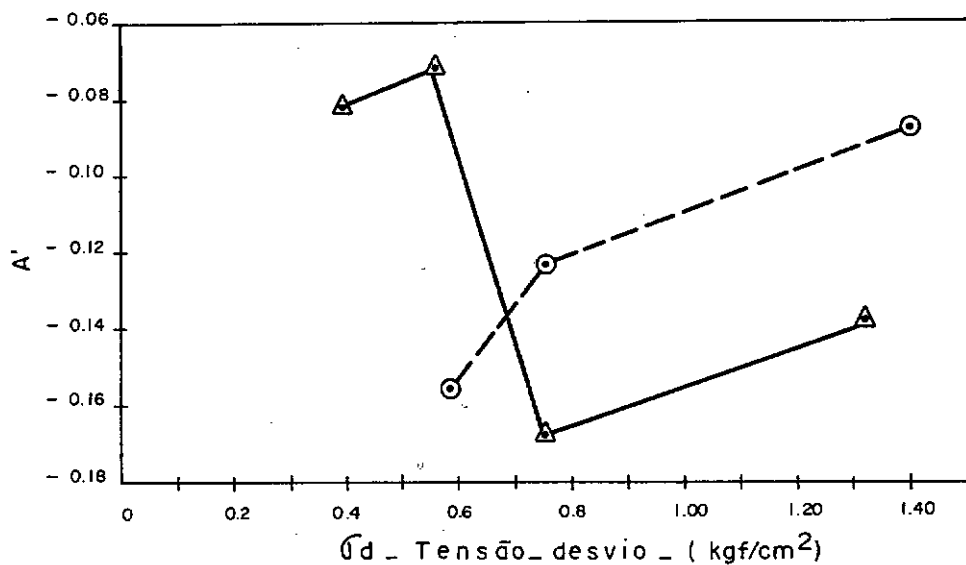


FIG.5.1.8 - Variação dos coeficientes K' e A' de $\epsilon_r = K'N^{A'}$ com a intensidade de tensão-desvio (σ_d). Argila amarela - RJ.

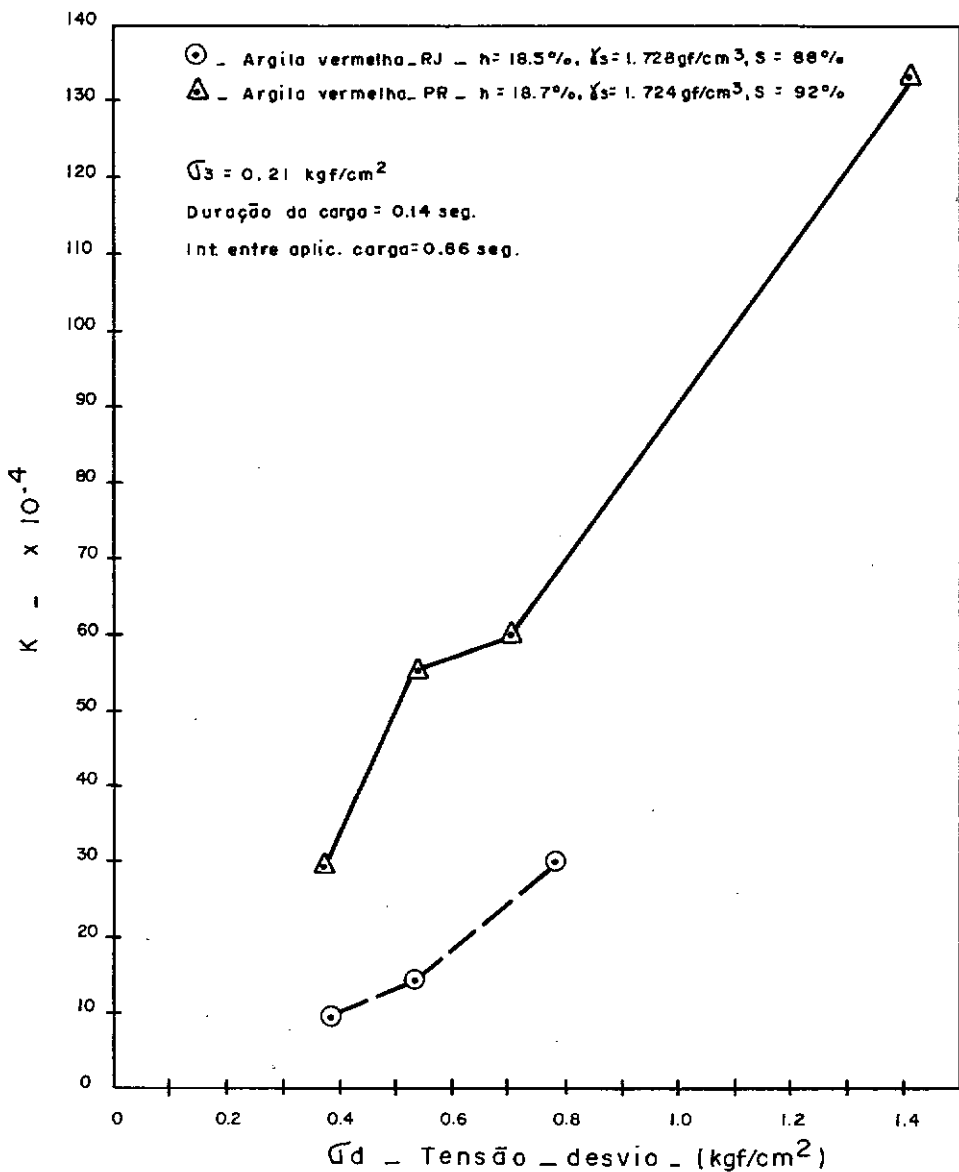
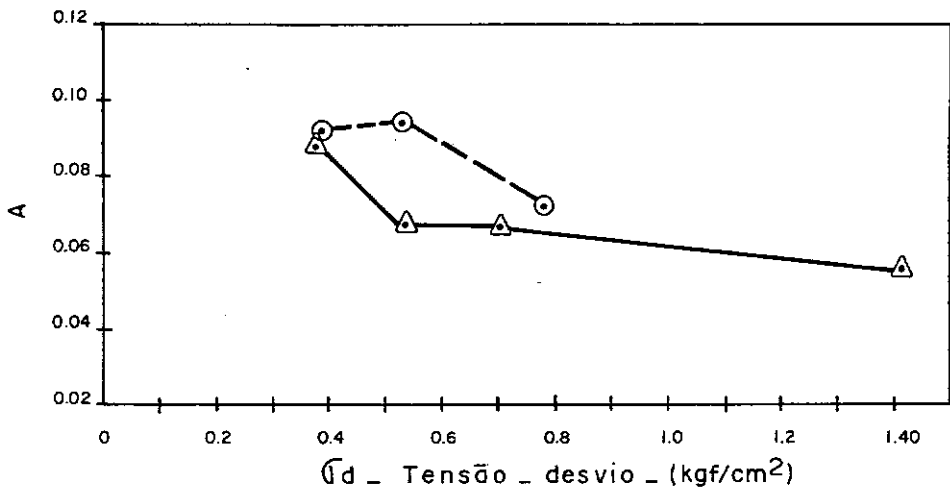


FIG.5.1.9 - Variação dos coeficientes K e A de $\epsilon_p = K N^A$ com a intensidade de tensão-desvio (σ_d). Argila vermelha - RJ e PR.

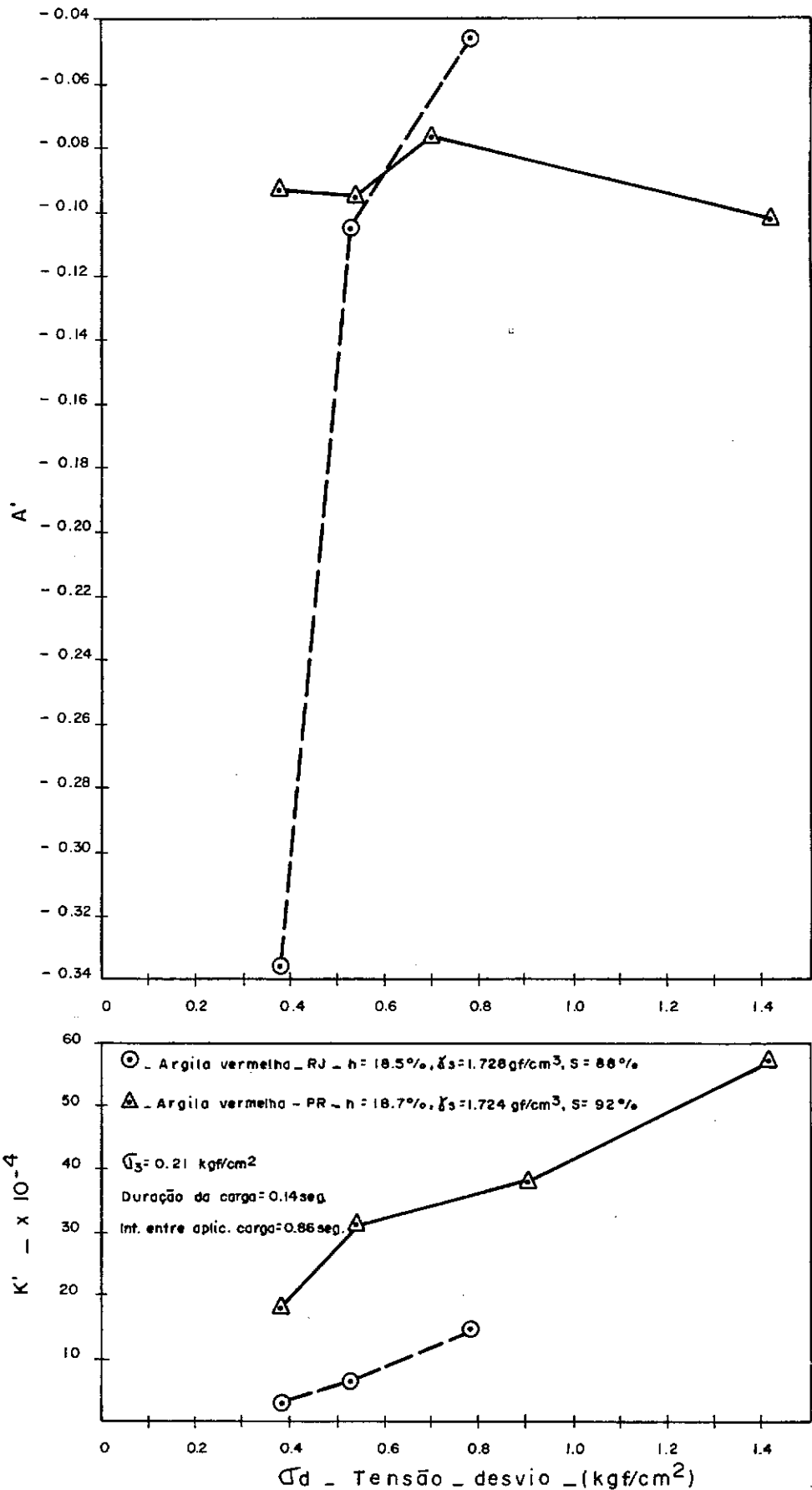


FIG. 5.1.10 - Variação dos coeficientes K' e A' de $\bar{\epsilon}_r = K' N A'$ com a intensidade de tensão-desvio ($\bar{\sigma}_d$), Argila vermelha - RJ e PR.

segundo com intervalos entre aplicações de carga de 0,86 segundo, tenha sido de 28 horas, não houve na grande maioria das vezes, uma perda significativa de umidade no decorrer dos ensaios. Devido à utilização das amostras para a determinação do peso específico aparente seco após o ensaio, não se pôde verificar o acréscimo da resistência à deformação em ensaio triaxial usual causado pelo carregamento repetido citado no capítulo 2, bem como para qual dos níveis de tensão repetida poderia ocorrer um decréscimo da resistência à deformação devido possivelmente à variação do peso específico aparente seco.

Paralelamente aos ensaios triaxiais drenados de carga repetida, realizaram-se ensaios triaxiais não adensados e não drenados (UU) em amostras de características semelhantes às dos ensaios de carga repetida, com o intuito de averiguar como as maiores tensões repetidas aplicadas nas amostras se situavam em relação à tensão-desvio máxima ou da tensão-desvio correspondente à uma deformação específica da ordem de 5%. A tabela 5.1.2 ilustra a relação entre a maior tensão aplicada no ensaio de carga repetida (σ_{dr}) e a tensão determinada no ensaio triaxial não adensado e não drenado (σ_{ds}) para uma tensão confinante de 0,21 kgf/cm². Verifica-se nessa tabela que a maior relação encontrada foi para a argila vermelha-PR ($\sigma_{dr}/\sigma_{ds} = 0,46$) isto é, a tensão repetida aplicada à amostra foi 46% da tensão-desvio de ruptura.

As relações da deformação axial permanente e da deformação axial recuperável com o número de aplicações de carga, expostas neste item, podem ser utilizadas razoavelmente

DESCRIÇÃO	Condições das amostras			σ_{dr} kgf/cm ²)	σ_{dr}/σ_{ds}
	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)		
Argila amarela - RJ	21,1	1,691	95	1,40	0,12
	23,4	1,619	94	1,32	0,31
Argila vermelha - RJ	18,4	1,744	91	0,78	0,21
Argila vermelha - PR	18,6	1,727	93	1,42	0,46

TABELA 5.1.2- Sumário da relação entre a tensão-desvio repetida (σ_{dr}) e a tensão-desvio máxima ou para uma deformação de 5% (σ_{ds})

bem para a estimativa da deformação permanente e deformação recuperável que ocorrem no subleito e na camada de reforço de um pavimento, constituídos de solos argilosos .

5.2 - EFEITO DA UMIDADE E DO PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO AO LONGO DA CURVA DE COMPACTAÇÃO

Com o propósito de estudar o efeito da umidade e do peso específico aparente seco nas características das deformações permanentes e recuperáveis, bem como no módulo resiliente, ensaios triaxiais drenados de carga repetida foram realizados de duas maneiras diferentes. Na primeira verificou-se este efeito na relação entre módulo resiliente e intensidade de tensão-desvio conforme a metodologia de ensaio apresentada no capítulo 4. Na segunda, determinaram-se as deformações axiais permanentes e recuperáveis em função do número de aplicações de carga, para um mesmo nível de tensão.

Neste estudo somente um esforço de compactação, pré-estabelecido inicialmente para cada argila, foi utilizado (capítulo 4). Portanto esta investigação abrange muito mais o efeito da umidade nas características das deformações permanente e recuperável, e no módulo resiliente do que propriamente o efeito do acréscimo do peso específico aparente seco decorrente de diversas energias de compactação.

a- Módulo resiliente "versus" intensidade de tensão-desvio.

Para investigar o efeito da umidade na relação entre o módulo resiliente e a intensidade de tensão-desvio, ensaios triaxiais drenados de carga repetida foram realizados na

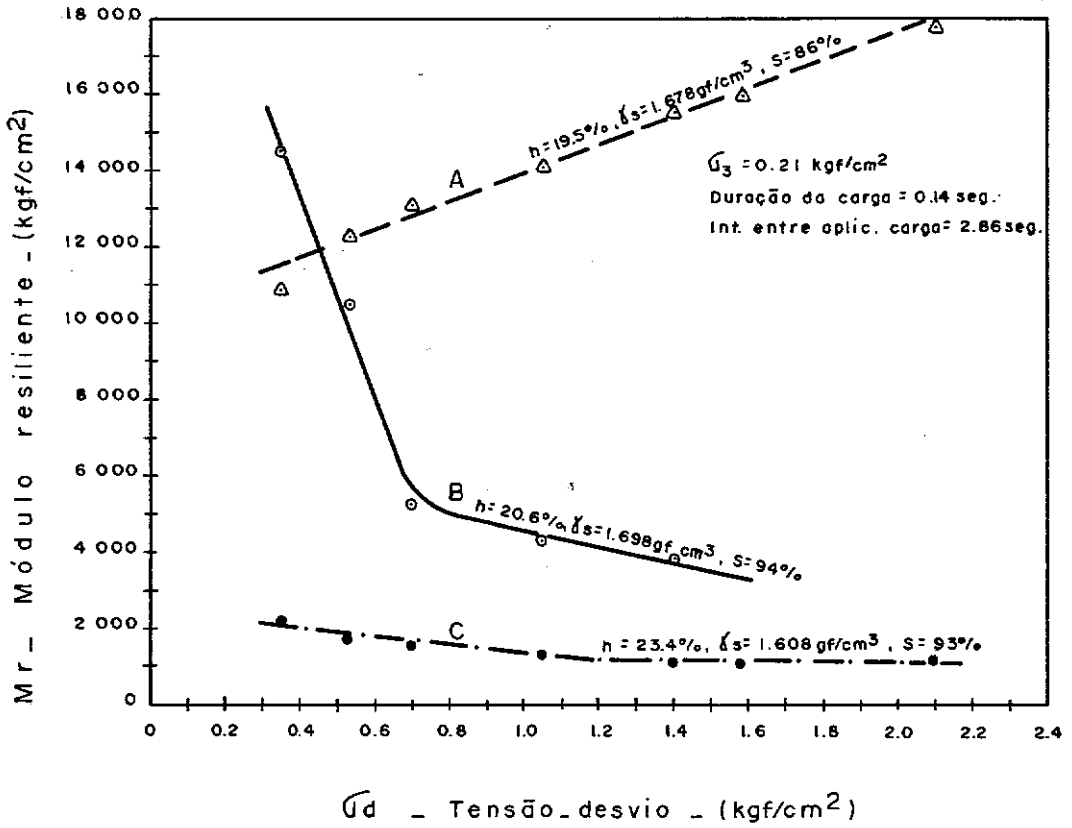
argila amarela-RJ e argilas vermelhas-RJ, MG e PR.

A forma de correlação usual, verificada por alguns pesquisadores (24,25), do módulo resiliente com a tensão-desvio nem sempre foi encontrada para os vários pontos da curva de compactação. Assim sendo, as constantes K_1 , K_2 , K_3 , e K_4 estabelecidas conforme o modelo selecionado no capítulo 2 não puderam ser determinadas para todos os casos.

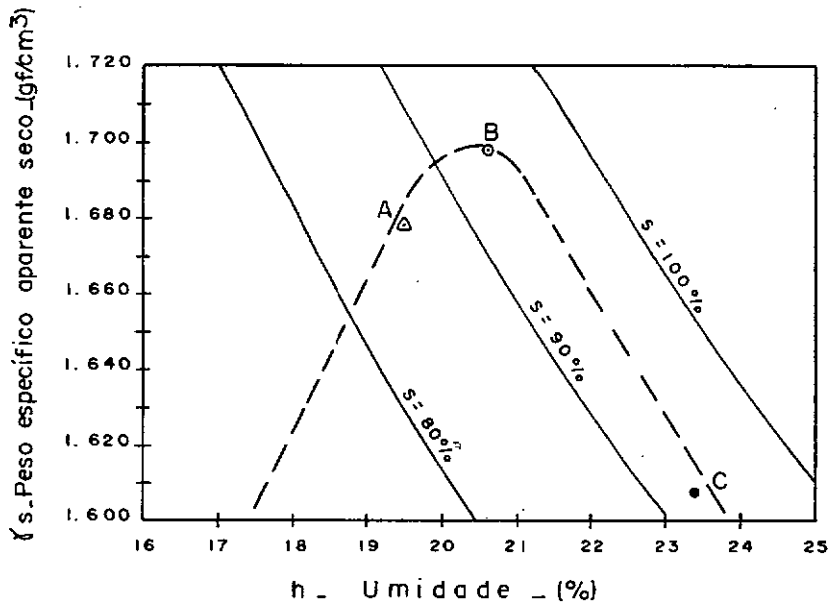
O efeito da umidade no módulo resiliente para a argila amarela-RJ, foi verificado para três diferentes pontos da curva de compactação, ou seja, no ramo seco ($w = 19,50\%$, $\gamma_s = 1,678 \text{ gf/cm}^3$, $S = 86\%$), na umidade ótima ($w = 20,6\%$, $\gamma_s = 1,698 \text{ gf/cm}^3$, $S = 94\%$) e no ramo úmido ($w = 23,4\%$, $\gamma_s = 1,608 \text{ gf/cm}^3$, $S = 93\%$). Conforme pode-se notar na figura 5.2.1, no ramo seco (Ponto A) o módulo resiliente cresce com a tensão-desvio, diferentemente do aspecto usual próximo ao ótimo (ponto B) onde há decréscimo grande com a tensão-desvio para valores baixos desta e pouca variação, decrescente, para tensões-desvio superior a $0,7 \text{ kgf/cm}^2$. No ramo úmido há pouca variação do módulo resiliente, com a tensão-desvio, decrescente até cerca de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ e, depois, constante, sendo o módulo bem menor que o obtido no ramo seco e no ótimo.

Para a argila vermelha-RJ, o comportamento bilinear típico manifesta-se nos três pontos das curvas de compactações, mas é quase imperceptível no ponto do ramo úmido (figura 5.2.2).

Procurou-se pormenorizar esse comportamento no caso do solo argiloso vermelho-MG, figura 5.2.3, com cinco pon-

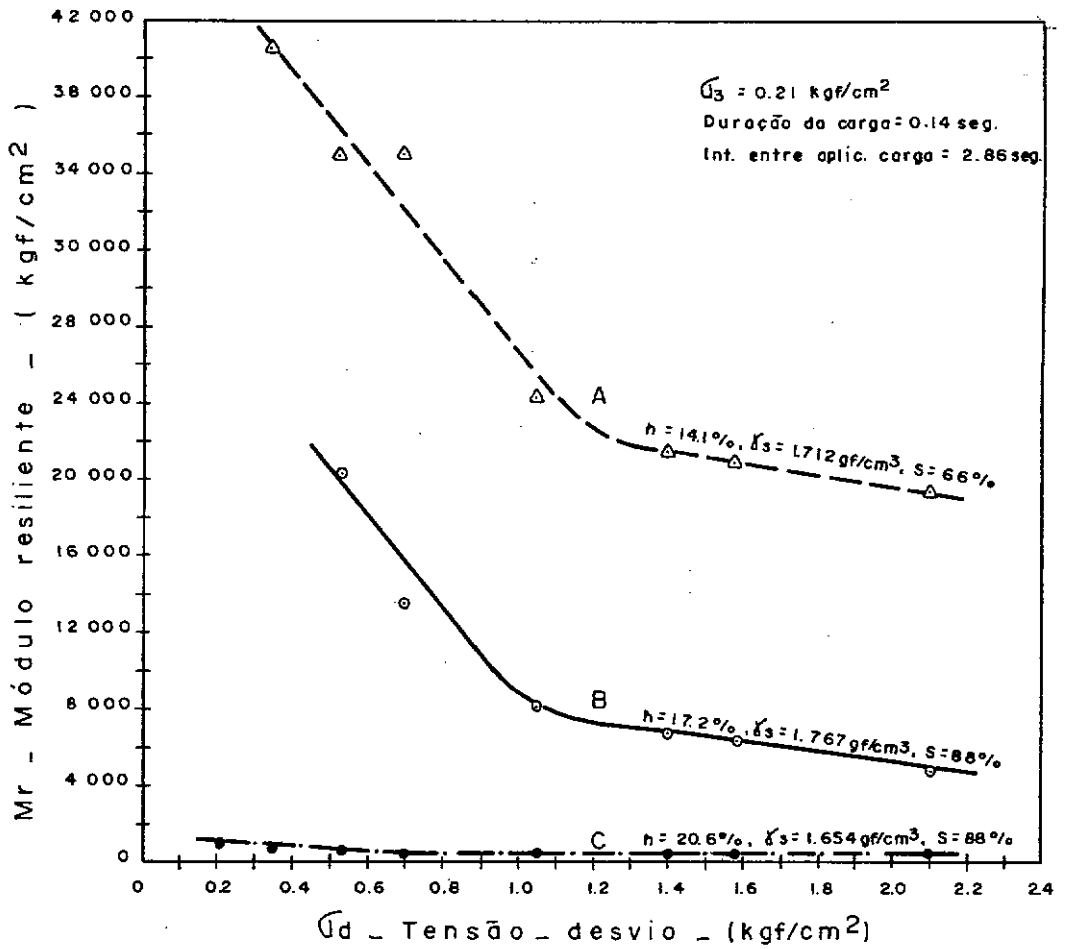


(a) - Módulo resiliente (M_r) "versus" tensão desvio (σ_d)

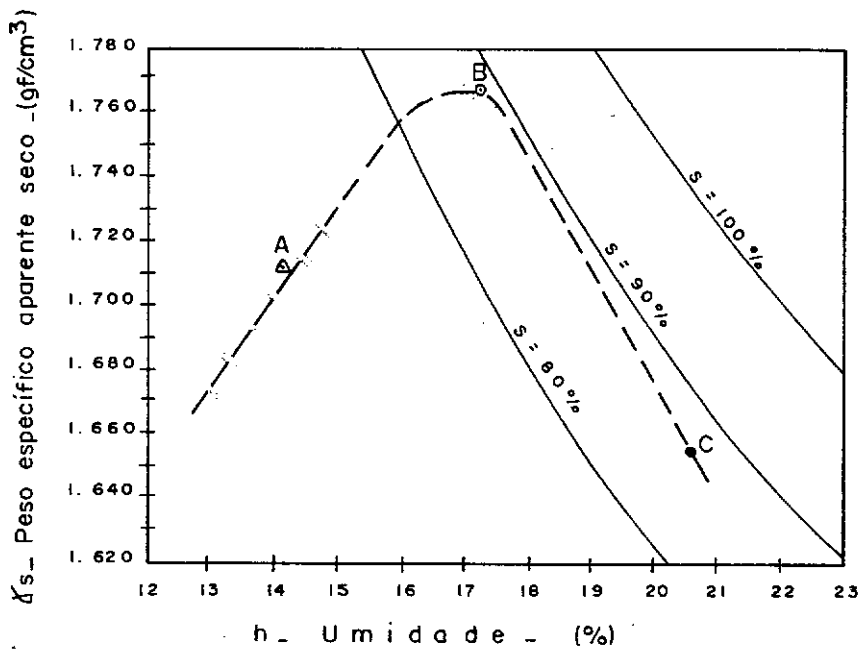


(b) - Condições de compactação

FIG.5.2.1 - Efeito da umidade (h) no relacionamento módulo resiliente (M_r) "versus" tensão desvio (σ_d). Argila amarela - RJ.

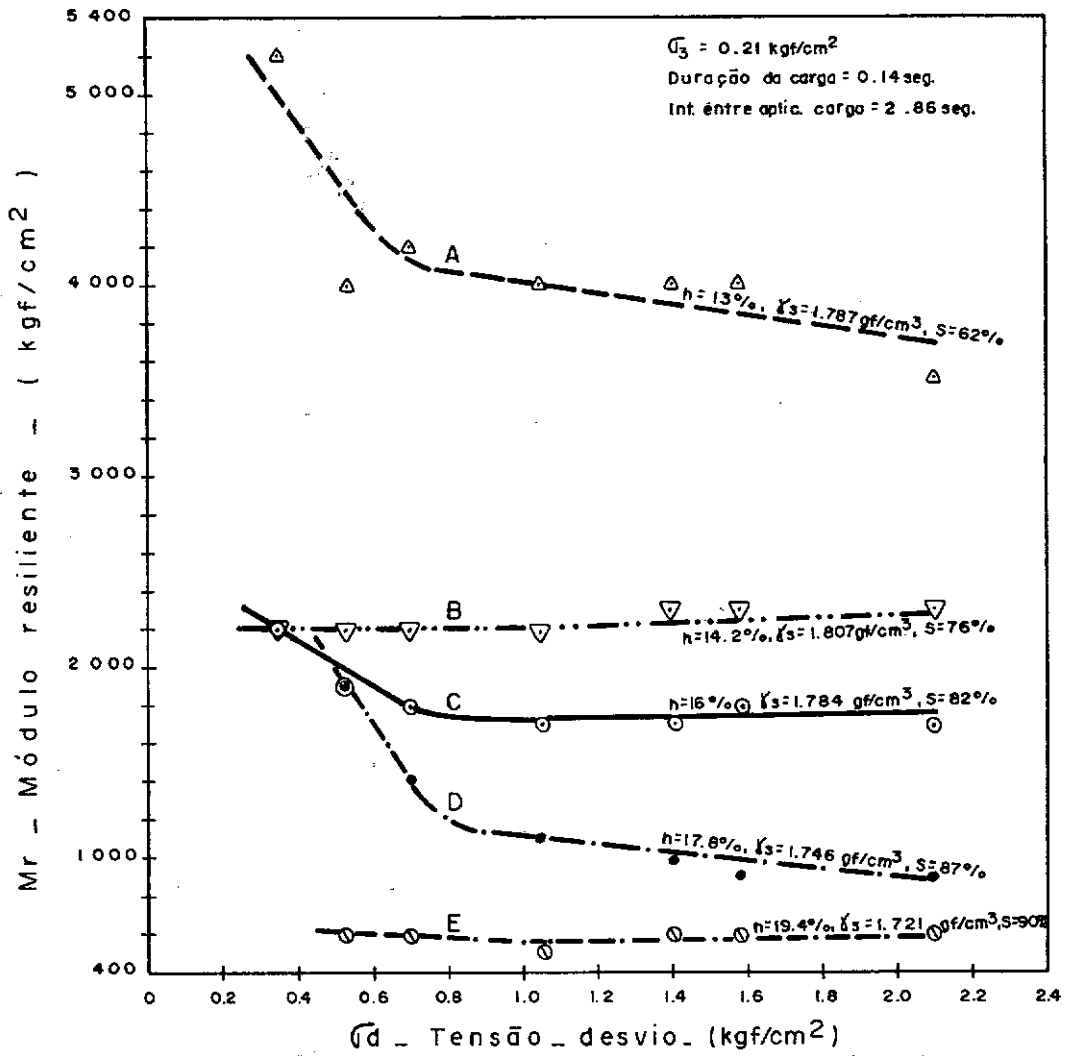


(a) - Módulo resiliente (M_r) "versus" tensão desvio (σ_d).

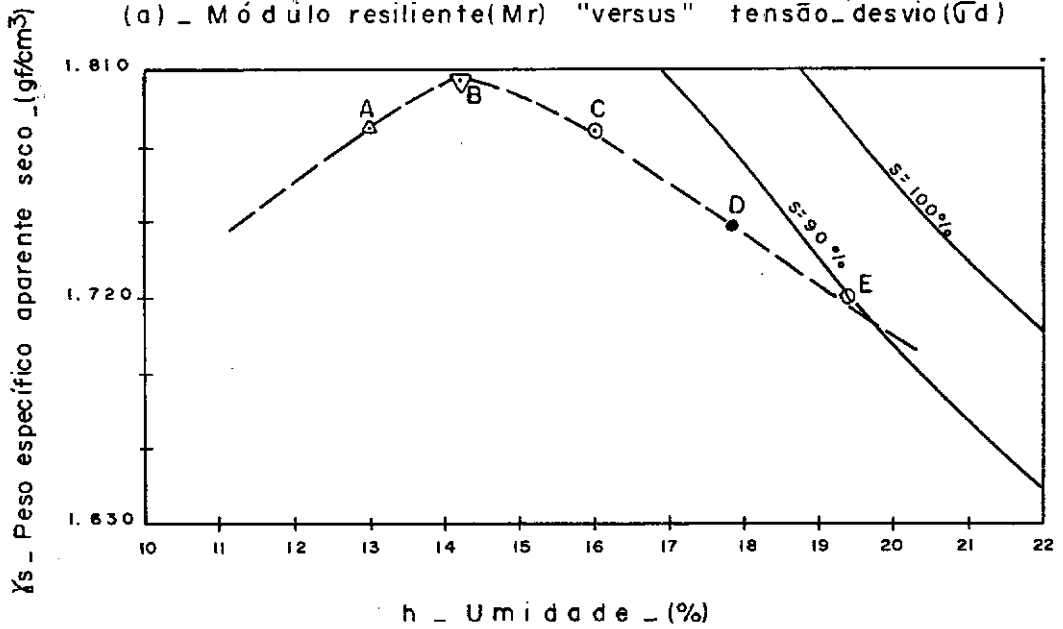


(b) - Condições de compactação

FIG. 5.2.2. Efeito da umidade (h) no relacionamento módulo resiliente (M_r) "versus" tensão desvio (σ_d). Argila vermelha - RJ.



(a) - Módulo resiliente (M_r) "versus" tensão desvio (σ_d)



(b) - Condições de compactação

FIG.5.23 - Efeito da umidade (h) no relacionamento módulo resiliente (M_r) "versus" tensão desvio (σ_d). Argila vermelha - MG.

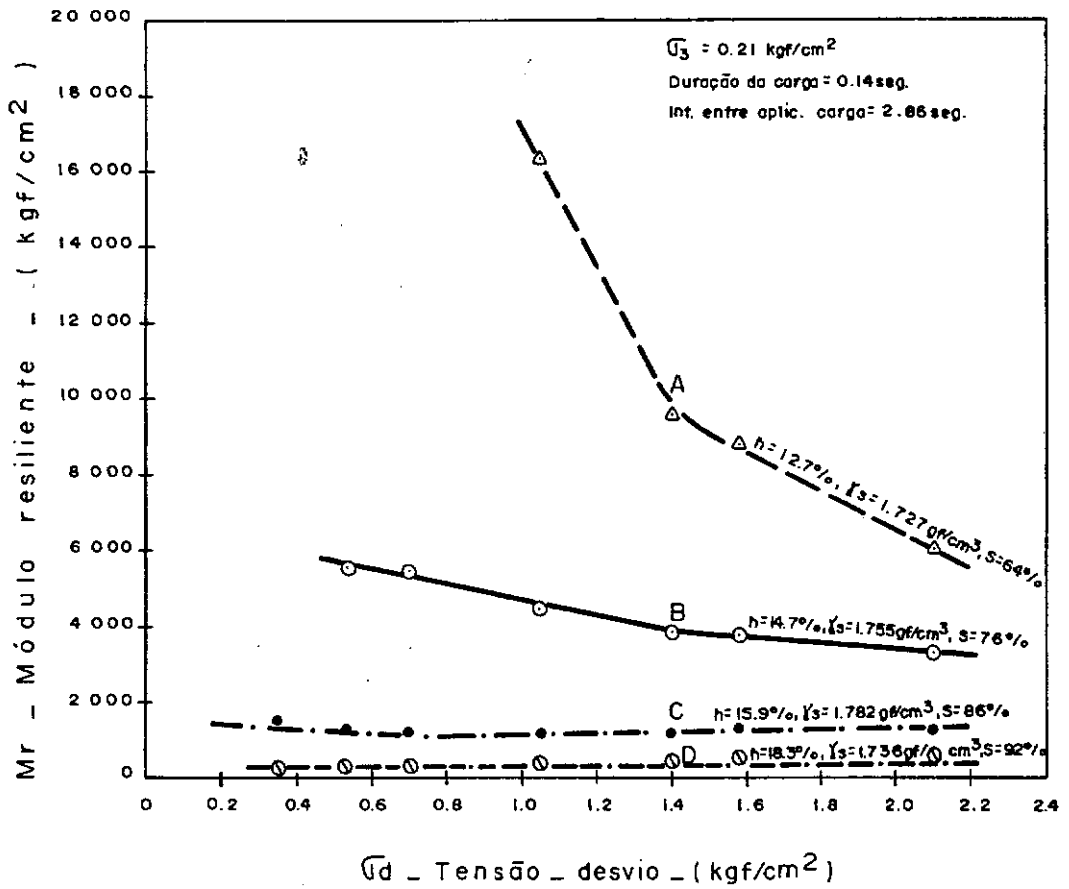
tos da curva de compactação. Três dos cinco pontos mostram o comportamento típico nitidamente. No teor ótimo e no ponto de maior umidade a bi-linearidade é quase imperceptível ou mesmo desprezível, e, para estes o módulo pouco varia com a tensão-desvio.

O solo argiloso vermelho do Paraná mostra a forma típica da linha Mr "versus" σ_d para os pontos no ramo seco; no ótimo e no ramo úmido pouco variam os módulos com a tensão-desvio (figura 5.2.4).

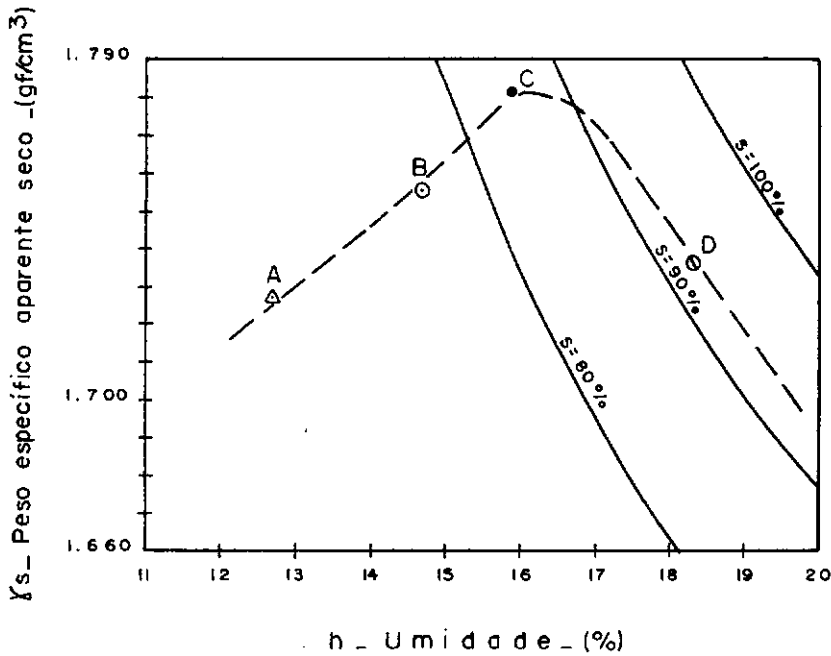
Analisando-se o decréscimo do módulo resiliente com o aumento de umidade para a tensão-desvio de 1 kgf/cm^2 , verifica-se que, para a argila amarela-RJ, a umidade de compactação ao variar de 19,5 para 23,5%, o módulo resiliente caiu de, aproximadamente, 14000 para 1400 kgf/cm^2 o que dá uma relação de 1/10. Para as argilas vermelhas-RJ, MG e PR, do ponto mais seco ao mais úmido ensaiado, estas relações foram de 1/3, 1/8 e 1/44, respectivamente.

Comparando-se o módulo resiliente das quatro argilas ensaiadas para a umidade ótima (ou próxima a esta) de suas respectivas curvas de compactação, e uma tensão-desvio de 1 kgf/cm^2 , observa-se que o maior módulo resiliente obtido das curvas traçadas foi de, aproximadamente, 8500 kgf/cm^2 para a argila vermelha-RJ. Para a argila amarela-RJ e argilas vermelhas-MG e PR os módulos obtidos foram de 4600, 2200 e 1200 kgf/cm^2 , respectivamente. Portanto, sob este aspecto analisado, a argila vermelha-PR foi a de características resilientes mais significativas; ou seja, a que apresentou maiores deformações resilientes.

A tabela 5.2.1 contém uma lista dos coeficien



(a) - Módulo resiliente (M_r) "versus" tensão-desvio (σ_d).



(b) - Condições de compactação

FIG.5.2.4 - Efeito da umidade (h) no relacionamento módulo resiliente (M_r) "versus" tensão-desvio (σ_d). Argila vermelha - PR.

tes K_1 , K_2 , K_3 e K_4 que se pôde determinar de acordo com o modelo selecionado anteriormente (capítulo 2), nas diversas condições de umidade e peso específico aparente seco da curva de compactação. Pode-se observar, nesta tabela, que não houve uma tendência geral de acréscimo ou decréscimo do coeficiente K_1 com o aumento da umidade; no entanto, o coeficiente K_2 sempre decresceu da condição mais seca para a condição mais úmida. Quanto aos coeficientes K_3 e K_4 que indicam as inclinações das retas, também não se depreende uma regra geral de acréscimo ou decréscimo com o aumento da umidade, porém observou-se que, na maioria das vezes, K_4 foi negativo e mostrou um decréscimo menos acentuado do módulo resiliente com o acréscimo da tensão (valor absoluto de K_4 menor que K_3). Para melhor visualização do acréscimo ou decréscimo dos coeficientes citados acima, plotou-se para as argilas vermelhas-MG e PR, a variação desses coeficientes com a umidade. Nas figuras 5.2.5 e 6 pode-se observar esta variação mas nenhuma tentativa foi feita para correlacionar estes coeficientes com a umidade devido a insuficiência de pontos.

O módulo resiliente de materiais granulares é expresso por uma equação potencial (7,25) que o correlaciona com a tensão confinante ou a soma das tensões principais. Tendo em vista a simplicidade tanto na determinação como na utilização desta equação, definiu-se esta equação potencial para solos argilosos, porém em relação à tensão-desvio. Para as mesmas condições utilizadas na determinação dos coeficientes K_1 , K_2 , K_3 e K_4 , foram definidos os coeficientes M e N da equação da forma:

$$M_r = M \sigma_d^N$$

DESCRIÇÃO	Condição	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
Argila amarela-RJ	B	20,6	1,698	94	0,71	5200	26600	-2000
	C	23,5	1,608	93	1,03	1200	1200	-70
Argila vermelha-RJ	A	14,1	1,712	66	1,19	22100	21860	-3033
	B	17,2	1,767	88	1,02	8000	21960	-3000
Argila vermelha-MG	A	13	1,787	62	0,64	4100	2860	-316
	C	16	1,784	82	0,73	1720	1140	8
	D	17,8	1,746	87	0,78	1150	2860	-162
Argila vermelha-PR	A	12,7	1,727	64	1,40	6600	19140	-5190
	B	14,7	1,755	76	1,40	3900	2040	-880
	C	15,9	1,782	86	0,70	1200	860	107

Nota: $Mr = K_2 + K_3 \{K_1 - (\sigma_1 - \sigma_3)\}$; para $(\sigma_1 - \sigma_3) < K_1$

$Mr = K_2 + K_4 \{(\sigma_1 - \sigma_3) - K_1\}$; para $(\sigma_1 - \sigma_3) > K_1$

TABELA 5.2.1 - Sumário dos coeficientes da relação módulo resiliente (Mr) "versus" intensidade de tensão-desvio (σ_d), para diversas unidades.

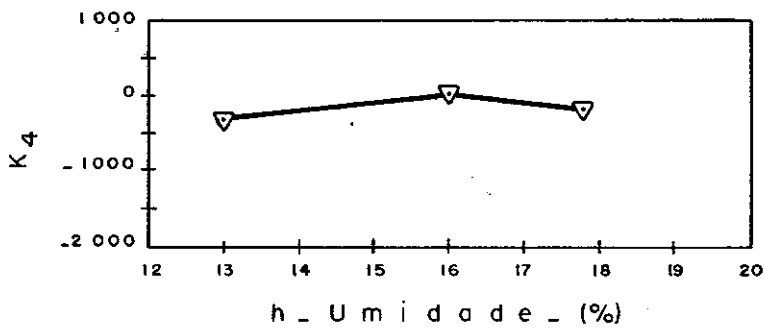
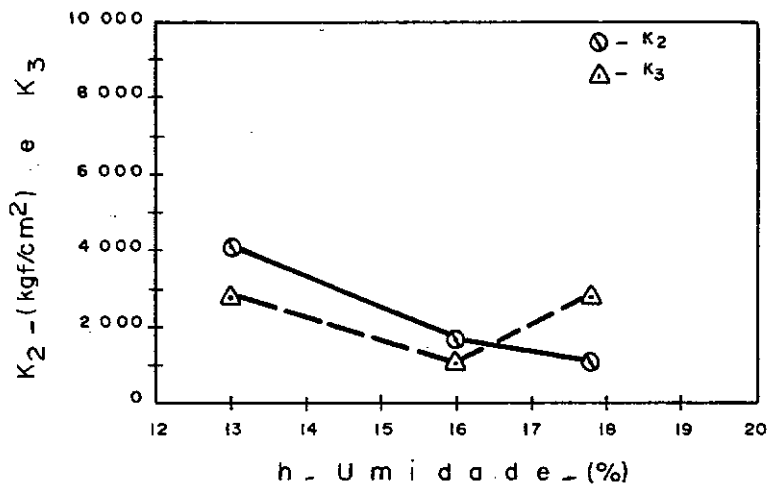
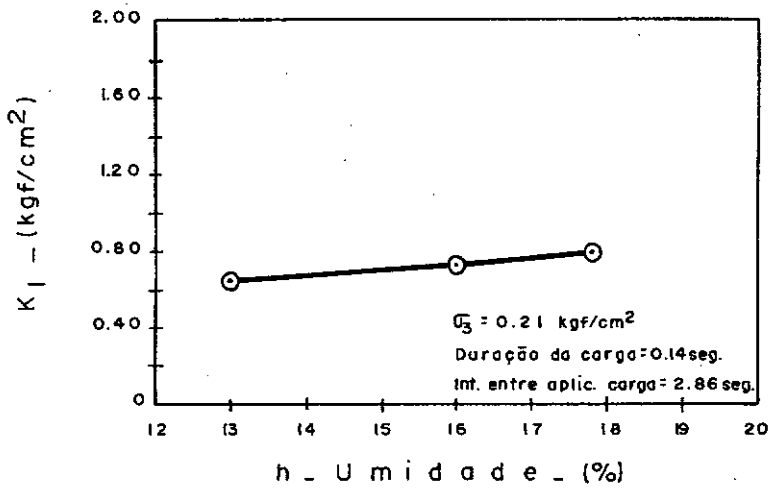


FIG.5.2.5 - Variação dos coeficientes K_1 , K_2 , K_3 e K_4 de $M_r = f(\bar{\sigma}d)$ com a umidade (h). Argila vermelha - MG.

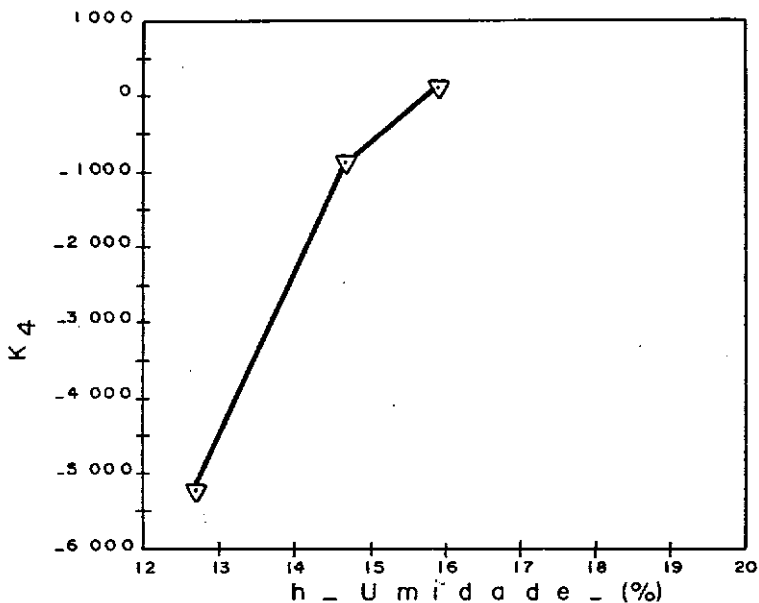
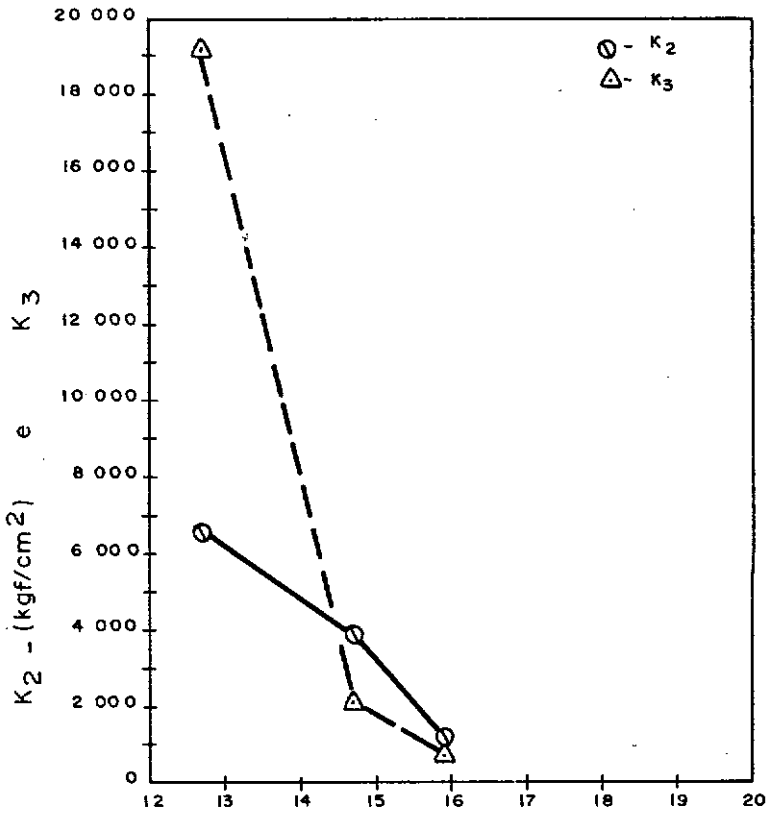
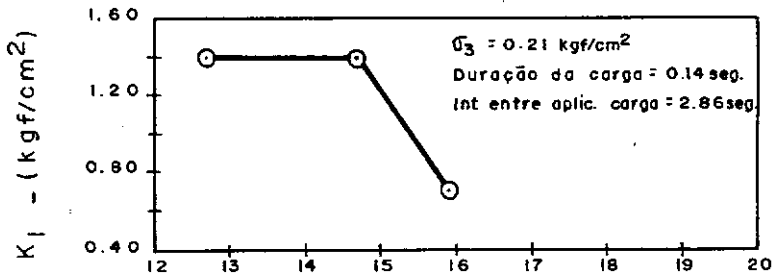


FIG.5.2.6 - Variação dos coeficientes K_1 , K_2 , K_3 e K_4 de $M_r = f(\sigma_d)$ com a umidade (h). Argila vermelha - PR.

onde:

M_r = módulo resiliente, kgf/cm^2

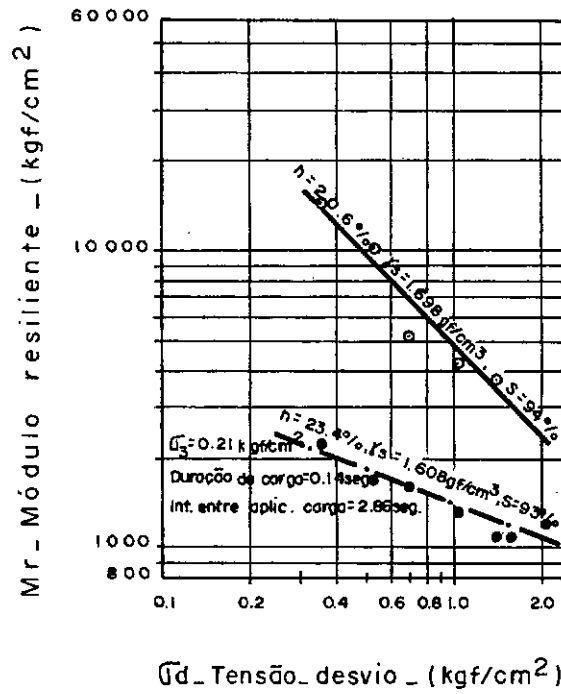
σ_d = tensão-desvio repetida, kgf/cm^2

M e N = coeficientes determinados experimentalmente, adimensionais.

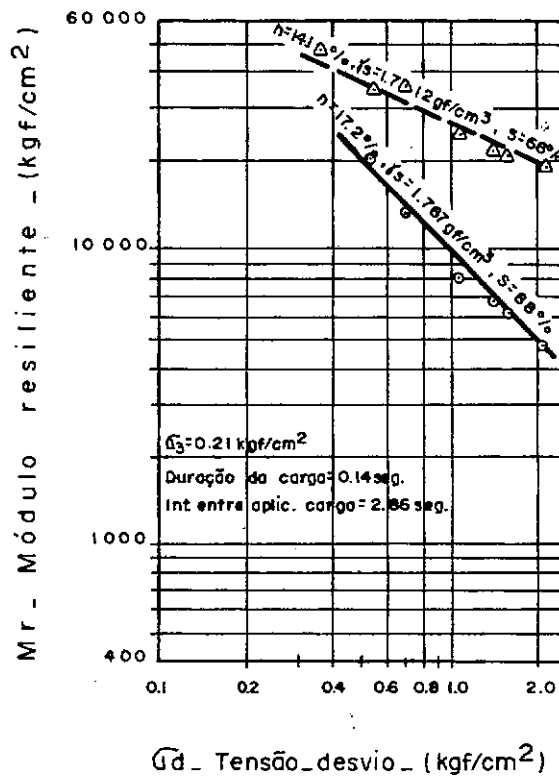
Nas figuras 5.2.7 e 8 tem-se, o módulo resiliente "versus" intensidade de tensão-desvio plotado na escala log-log. Observa-se que houve sempre um decréscimo do módulo resiliente com o acréscimo da tensão-desvio. Talvez por ser pequeno o número de pontos para o cálculo dos coeficientes M e N pelo método dos mínimos quadrados, nem sempre se obteve boa correlação, conforme se verifica na tabela 5.2.2. Observa-se, também, que o coeficiente M sempre diminuiu da condição mais seca para a mais úmida, enquanto que para o coeficiente N não houve uma tendência geral de acréscimo ou decréscimo com o aumento da umidade porém, este sempre foi negativo indicando assim um aumento do módulo resiliente com o decréscimo da tensão-desvio. Analisando-se estes coeficientes é possível que o expoente N dependa somente do tipo de solo enquanto que M seja função do teor de umidade da amostra. Na figura 5.2.9 estão plotadas as variações dos coeficientes M e N com o acréscimo de umidade, para as argilas vermelhas-MG e PR.

b- Efeito da umidade na relação entre as deformações axiais permanentes e recuperáveis e o número de aplicações de carga.

Com o objetivo de verificar o efeito da umidade na deformação axial permanente e na deformação axial recuperável

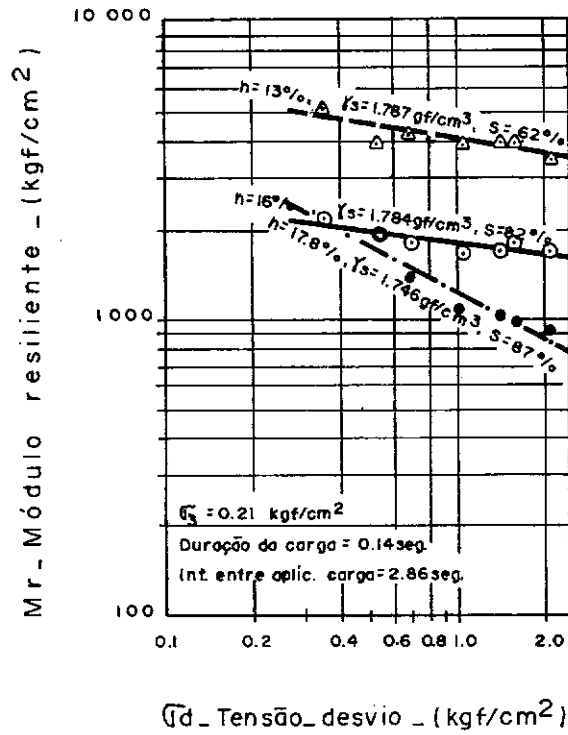


(a) - Módulo resiliente (Mr) "versus" tensão-desvio (σ_d), Argila amarela - RJ.

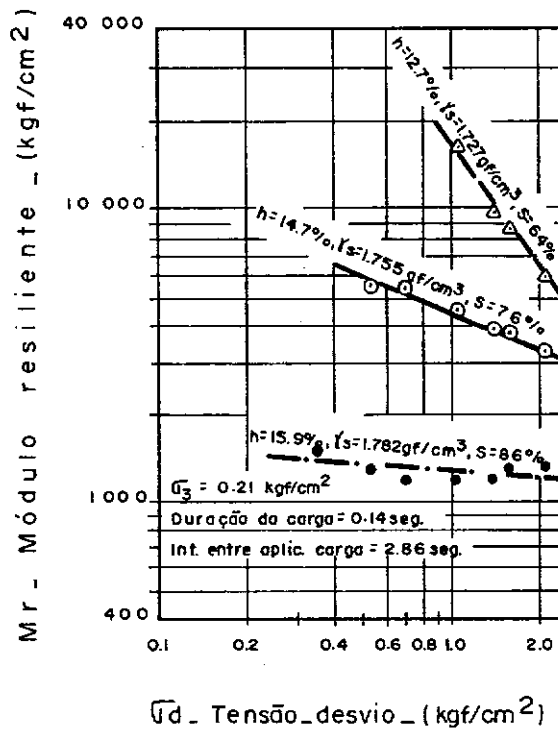


(b) - Módulo resiliente (Mr) "versus" tensão-desvio (σ_d), Argila vermelha - RJ.

FIG.5.2.7 - Efeito da umidade (h) no relacionamento módulo resiliente (Mr) "versus" tensão-desvio (σ_d).



(a) - Módulo resiliente(Mr) "versus" tensão-desvio(σ_d). Argila vermelha - MG.



(b) - Módulo resiliente(Mr) "versus" tensão-desvio(σ_d) Argila vermelha - PR.

FIG.5.2.8 - Efeito da umidade(h) no relacionamento módulo resiliente(Mr) "versus" tensão-desvio(σ_d).

DESCRIÇÃO	Condição	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)	$M_r = M \sigma_d^N$		
					M	N	r
Argila amarela-RJ	B	20,6	1,698	94	4720	-1,025	0,96
	C	23,5	1,608	93	1380	-0,383	0,95
Argila vermelha-RJ	A	14,1	1,712	66	26360	-0,457	0,97
	B	17,2	1,767	88	9680	-1,004	0,99
Argila vermelha-MG	A	13,0	1,787	62	4100	-0,153	0,83
	C	16,0	1,784	82	1800	-0,123	0,85
	D	17,8	1,746	87	1200	-0,522	0,96
Argila vermelha-PR	A	12,7	1,727	64	16700	-1,422	0,99
	B	14,7	1,755	76	4500	-0,392	0,98
	C	15,9	1,782	86	1276	-0,064	0,51

TABELA 5.2.2. - Sumário dos coeficientes M e N da relação $M_r = M \sigma_d^N$, para diversas unidades de compactação

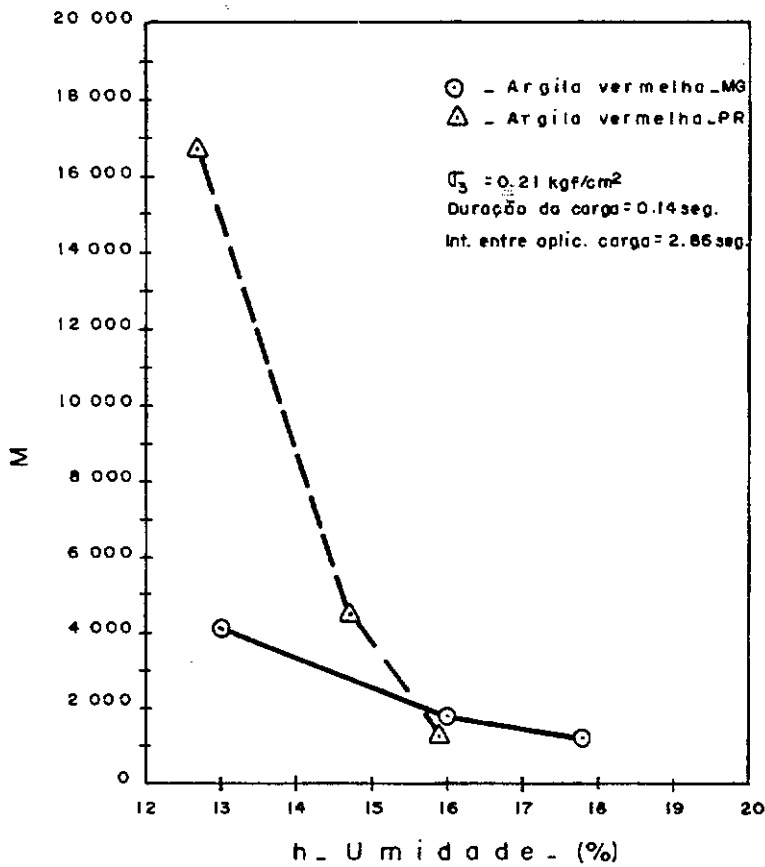
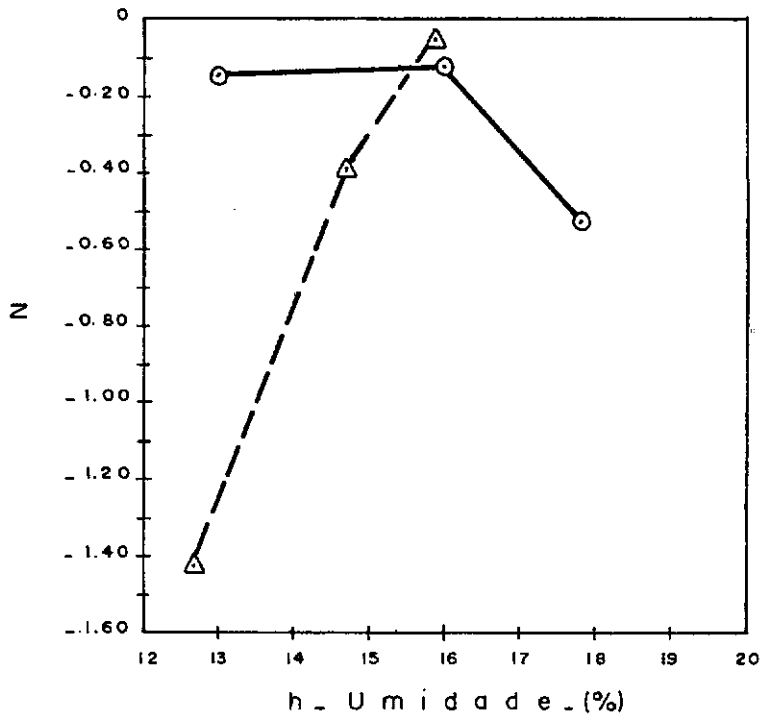


FIG.5.2.9 - Variação dos coeficientes M e N da relação $M_r = M \bar{\sigma}_d^N$ com a umidade (h).

vel, realizaram-se ensaios de carga repetida em amostras das argilas vermelhas-RJ e MG e argila amarela-RJ, mantendo-se constante, no decorrer de todos os ensaios, o nível de tensão, intervalo entre aplicações de carga e duração da carga.

Na figura 5.2.10, plotaram-se, numa escala semi-log, os resultados dos ensaios de duas amostras de umidade (h) 17 e 18,9%, pesos específicos aparentes secos (γ_s) 1,781 e 1,717 gf/cm^3 e graus de saturação (S) 88 e 89%, da argila vermelha-RJ, submetidas a uma tensão-desvio de 0,76 kgf/cm^2 e tensão confinante igual a 0,21 kgf/cm^2 . Nesta figura observa-se que as razões das deformações permanentes e recuperáveis, correspondentes à primeira aplicação de carga, e umidades de 17% e 18,9%, são, respectivamente, 1/3,7 e 1/4,1. O acréscimo da deformação axial permanente de 1 a 10^3 aplicações de carga foi de aproximadamente 178% tanto para a umidade de 17% como para a de 18,9%. A deformação axial recuperável apresentou decréscimos, de 1 a 10^3 aplicações, de 70% e 38%, respectivamente, para as umidades de 18,9% e 17%. Para 10^5 aplicações de carga, o aumento da umidade de 17% para 18,9% acarretou uma razão de deformação permanente de 1/3,8 e de deformação recuperável de 1/23.

Para se verificar a influência da umidade nos coeficientes K, A, K' e A' da relação do item anterior 5.1, entre deformações axiais permanente e recuperável com o número de aplicações de carga, os elementos da figura 5.2.10, foram plotados em escala log-log na figura 5.2.11. A correlação linear pode ser usada razoavelmente bem. Observa-se este mesmo tipo de correlação nas figuras 5.2.12 e 13, para as argilas amarela-RJ vermelha-MG

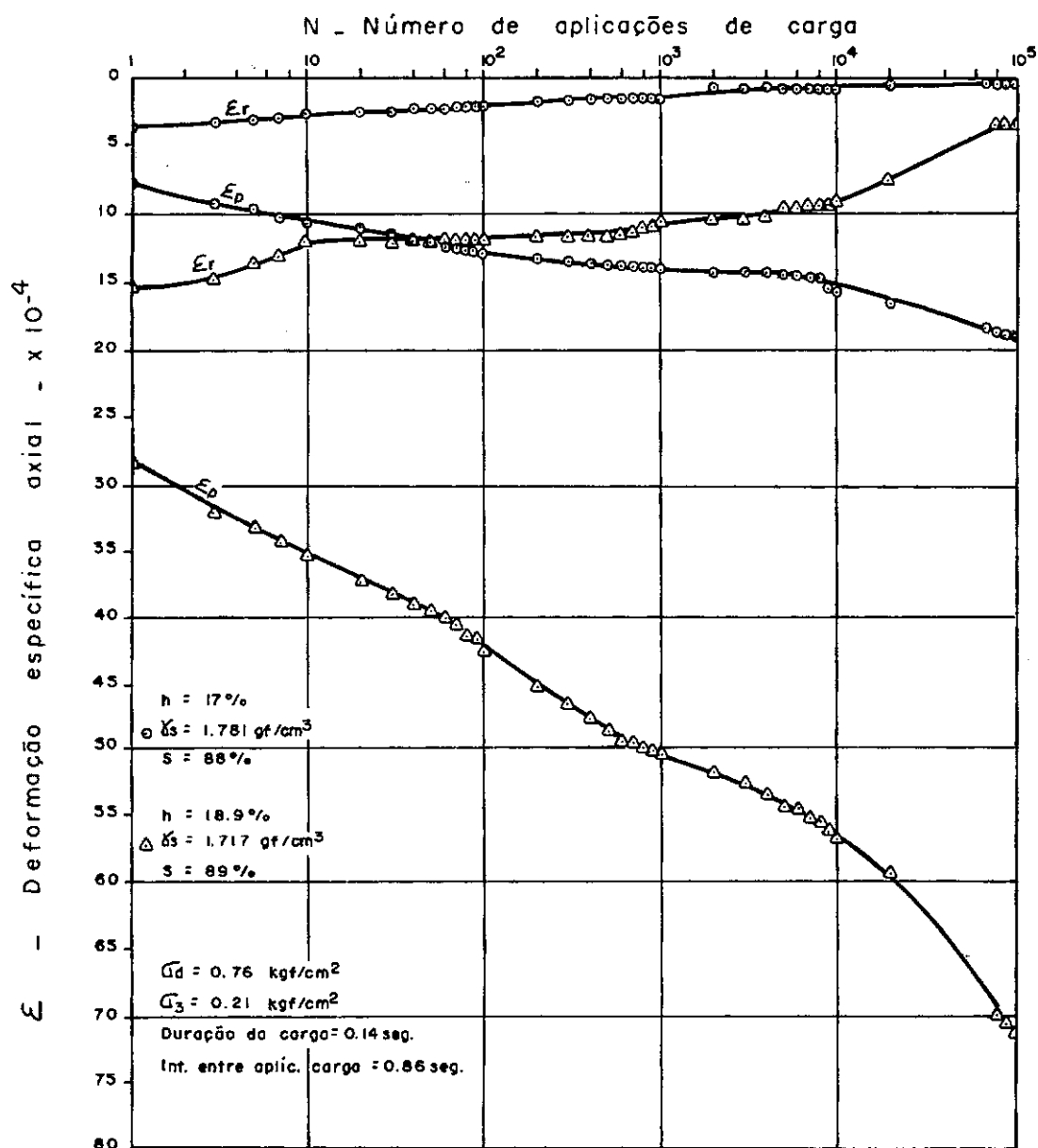
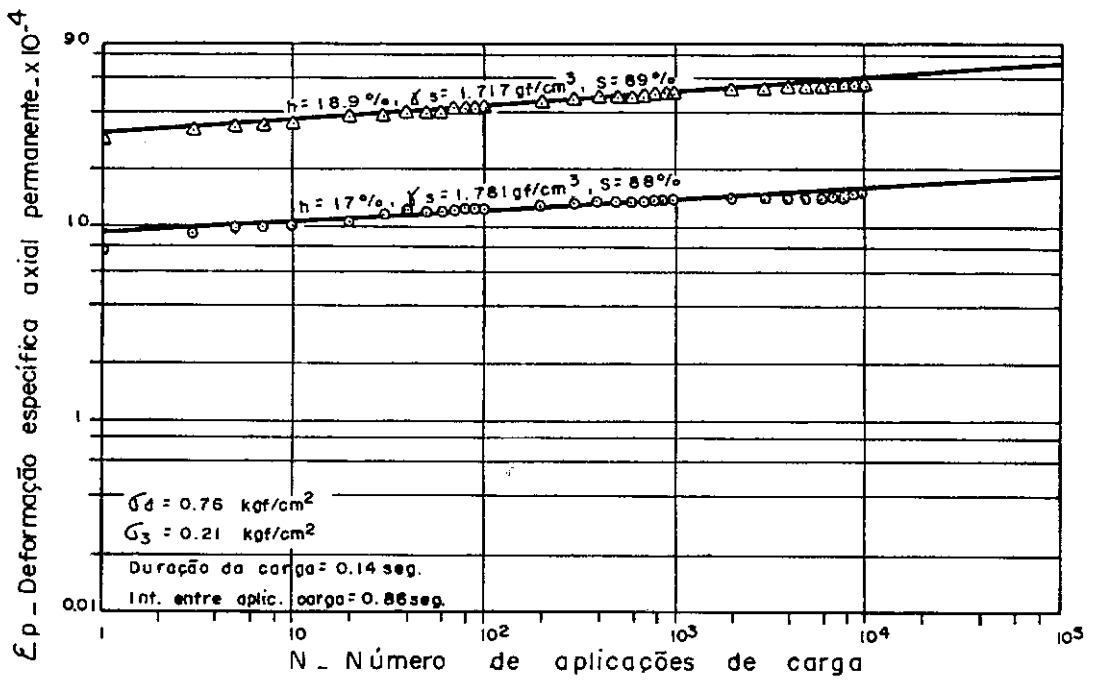
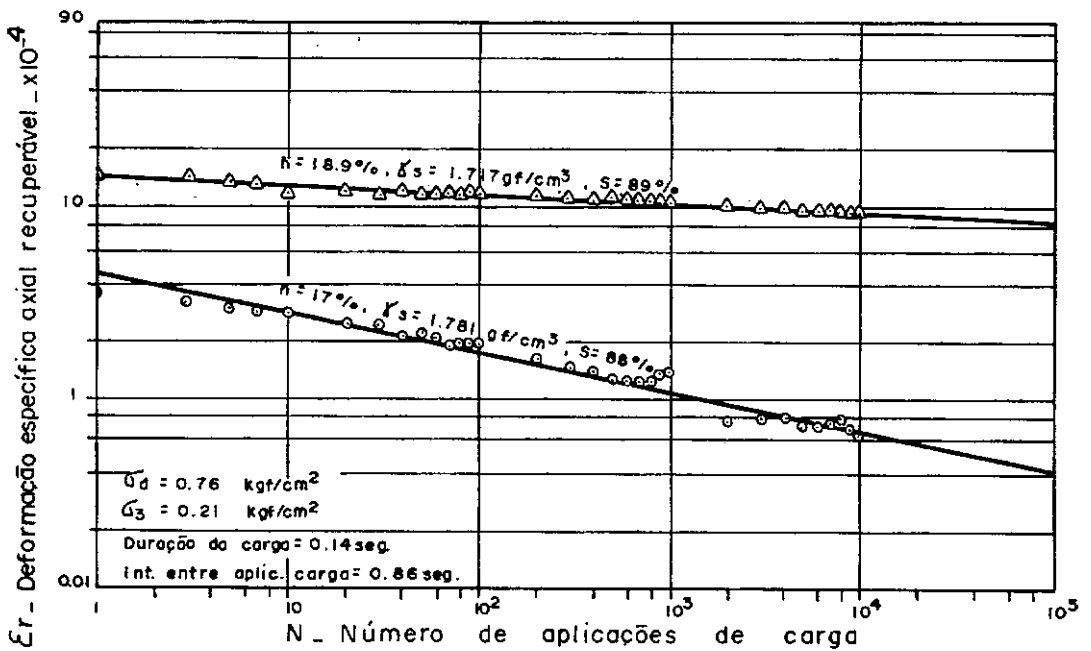


FIG.5.2.10- Efeito da umidade (h) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r), Argila vermelha - RJ.

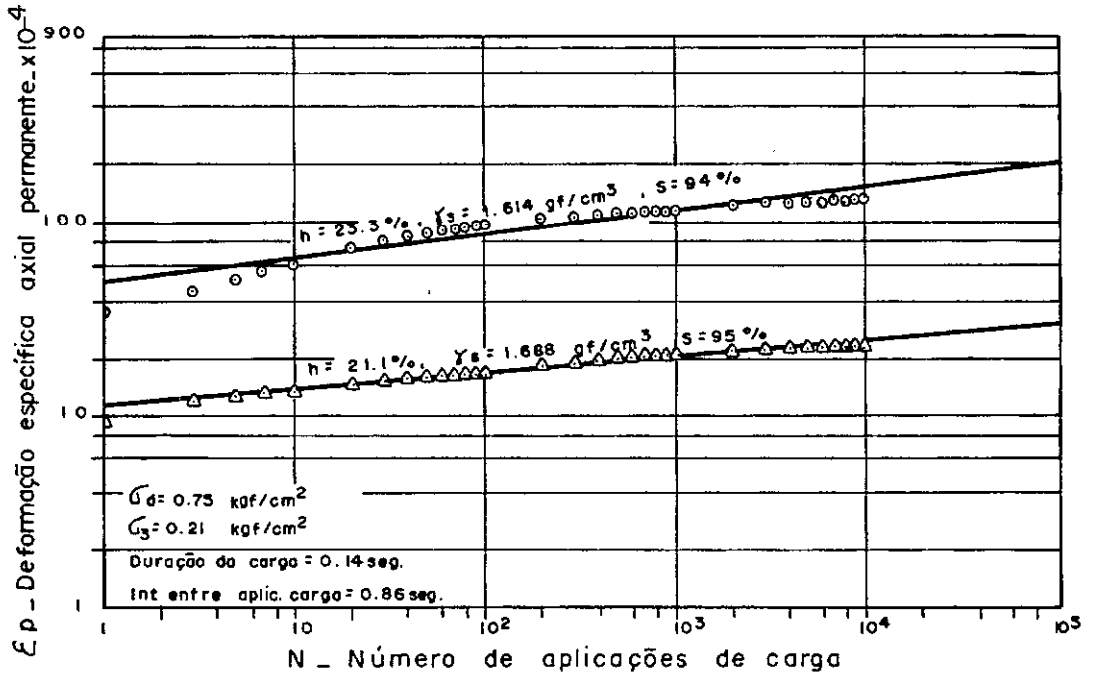


(a) - Deformação específica axial permanente (ε_p) "versus" número de aplicações de carga (N).

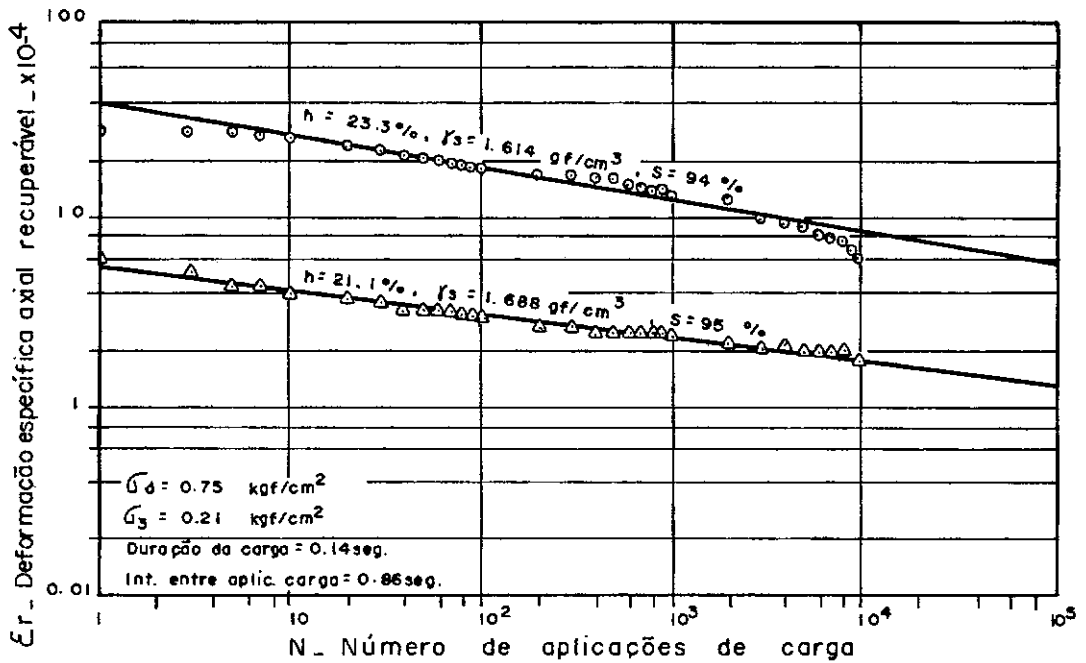


(b) - Deformação específica axial recuperável (ε_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.2.II - Efeito da umidade (h) na deformação permanente (ε_p) e deformação recuperável (ε_r). Argila vermelha - RJ.

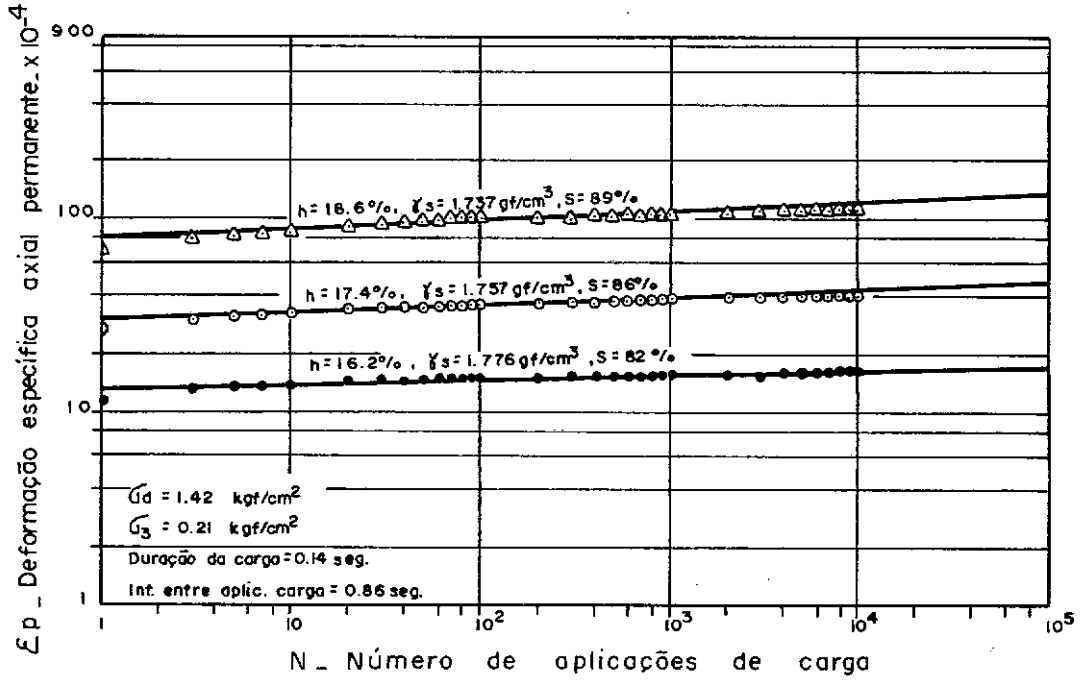


(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).

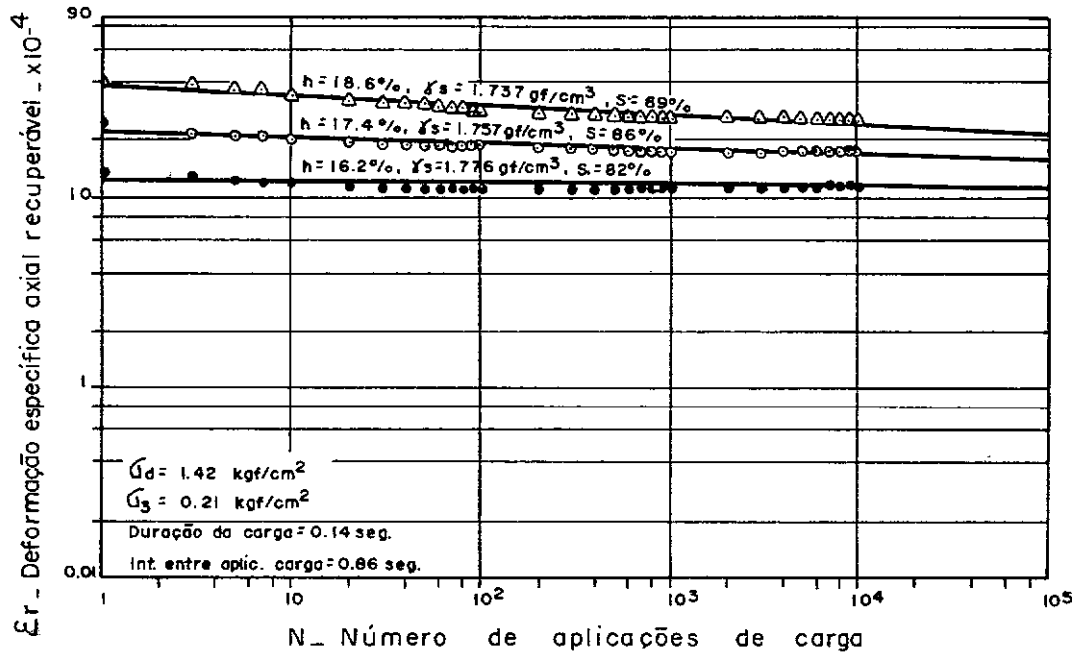


(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.2.12_ Efeito da umidade (h) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r). Argila amarela - RJ.



(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).



(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.2.13_ Efeito da umidade (h) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r). Argila vermelha - MG.

A tabela 5.2.3 contém uma lista dos coeficientes K , A , K' e A' determinados experimentalmente pelo método dos mínimos quadrados para duas condições de umidade das argilas vermelha-RJ ($h = 17\%$ e $18,9\%$) e amarela-RJ ($h = 21,1\%$ e $23,5\%$) e três condições de umidade da argila vermelha-MG ($h = 16,2; 17,4$ e $18,6\%$). Pelo motivo exposto no item anterior (5.1), estes coeficientes foram determinados somente até 10000 aplicações. Verifica-se que nem sempre a equação se adapta à relação entre de formação axial recuperável e o número de aplicações de carga, como é o caso da argila vermelha-MG na umidade de $16,2\%$, (coeficiente de correlação de $0,48$).

Verifica-se que os coeficientes K e K' aumentam com o acréscimo da umidade (tabela 5.2.3) para as três argilas ensaiadas. O coeficiente A apresenta a mesma tendência de K e K' , enquanto que A' não apresenta tendência definida de variação. Para melhor visualizar a variação desses coeficientes em função do acréscimo da umidade, os valores de K , A , K' e A' correspondentes a cada valor de umidade foram plotados em escala aritmética, para a argila vermelha-MG, (figuras 5.2.14 e 15).

A fim de saber se o valor da tensão-desvio repetida aplicada as amostras é bem menor do que a tensão-desvio máxima ou da tensão-desvio para 5% de deformação específica, realizaram-se ensaios triaxiais não adensados e não drenados (UU) em amostras de solos de características semelhantes às utilizadas nos ensaios de carga repetida. A tabela 5.2.4 apresenta a razão da tensão-desvio repetida (σ_{dr}) para a tensão determinada no ensaio triaxial não adensado e não drenado (σ_{ds}), nas diversas condições de umidade e peso específico aparente seco das

DESCRIÇÃO	Condições das amostras			σ_d kgf/cm ²	$\epsilon_p = K N^A$			$\epsilon_r = K' N^{A'}$		
	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)		K x 10 ⁻⁴	A	r	K' x 10 ⁻⁴	A'	r'
Argila vermelha - RJ	17	1.781	88	0.76	93	0.058	0.95	4.6	-0.207	0.98
	18.9	1.717	89		29.9	0.072	0.99	14.6	-0.046	0.96
Argila amarela - RJ	21.1	1.688	95	0.75	11.5	0.086	0.98	5.5	-0.123	0.99
	23.3	1.614	94		49.3	0.121	0.93	39.1	-0.168	0.96
Argila vermelha - MG	16.2	1.776	82	1.42	12.9	0.028	0.92	12.3	-0.007	0.48
	17.4	1.757	86		29.8	0.039	0.98	21.5	-0.026	0.87
	18.6	1.737	89		80.3	0.044	0.94	37.7	-0.049	0.93

TABELA 5.2.3 - Sumário dos coeficientes da relação deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N)

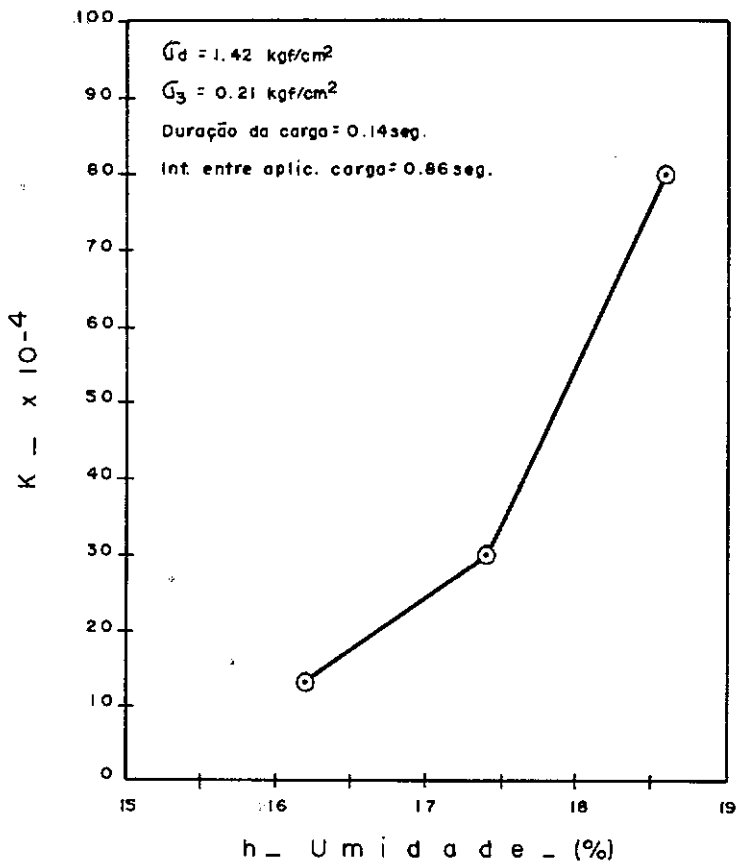
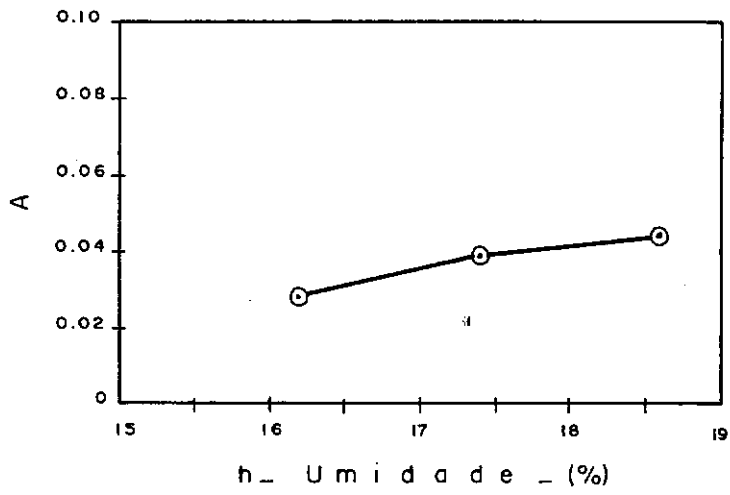


FIG.5.2.14_ Variação dos coeficientes K e A de $\epsilon_p = K N^A$ com a umidade (h). Argila vermelha - MG.

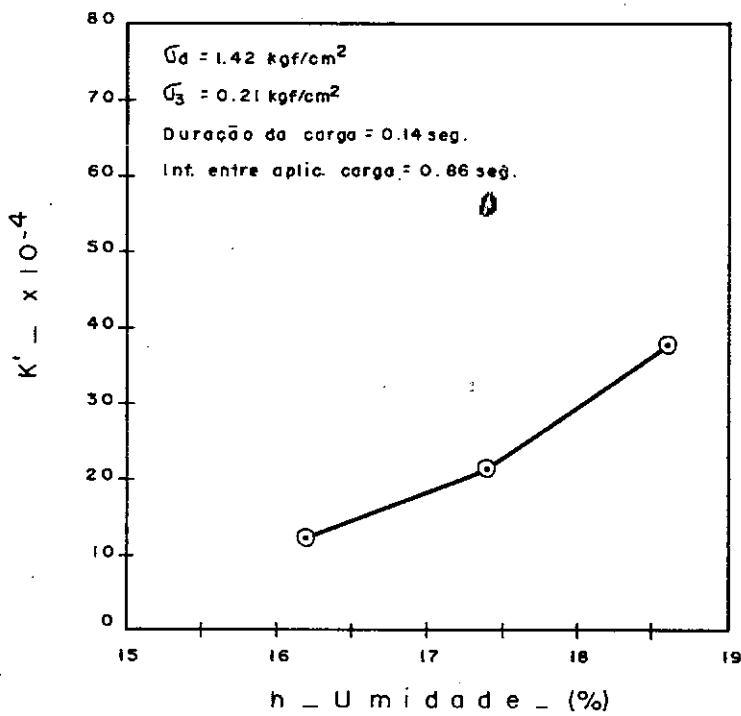
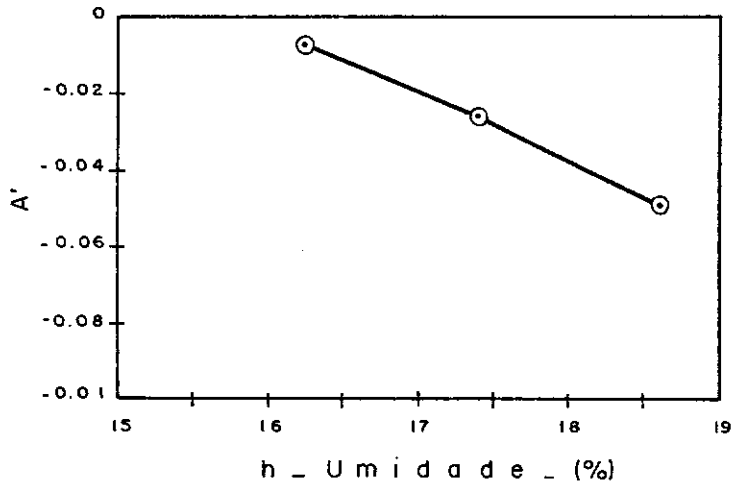


FIG.5.2.15_ Variação dos coeficientes K' e A' de $\epsilon_r = K'N^{A'}$ com a umidade(h). Argila vermelha - MG.

amostras, e tensão confinante de $0,21 \text{ kgf/cm}^2$. Observa-se que as maiores razões foram obtidas para a argila vermelha-MG (0,30-0,33 - 0,32), mesmo assim, valores estes razoavelmente baixos.

Verificou-se neste estudo o significante efeito da umidade nas características das deformações permanentes e recuperáveis de solos argilosos ensaiados dinamicamente e que a equação potencial para diversas condições de umidade, pode ser usada na estimativa das deformações que ocorrem no subleito e na camada de reforço de subleito, quando estes são solos argilosos.

5.3 - EFEITO DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO NA RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO RESILIENTE E A INTENSIDADE DA TENSÃO-DESVIO.

Com o propósito de pesquisar o efeito do método de compactação no módulo resiliente, realizaram-se ensaios triaxiais dinâmicos de acordo com a metodologia descrita no capítulo 4, em amostras de argila amarela-RJ preparadas por amassamento e por impacto. No capítulo 2, viu-se que a compactação por impacto causa deformações cisalhantes menores (menor grau de dispersão das partículas argilosas) do que a compactação por amassamento, e que as argilas altamente plásticas não têm sua resistência muito influenciada pelo método de compactação. Nesta pesquisa obtiveram-se resultados significativos, conforme veremos a seguir.

O método de compactação por amassamento foi semelhante ao descrito no capítulo 4. Utilizou-se, porém, apenas 5/6 da quantidade de solo necessária para atingir o peso específico aparente seco máximo na umidade ótima do ensaio Proctor In

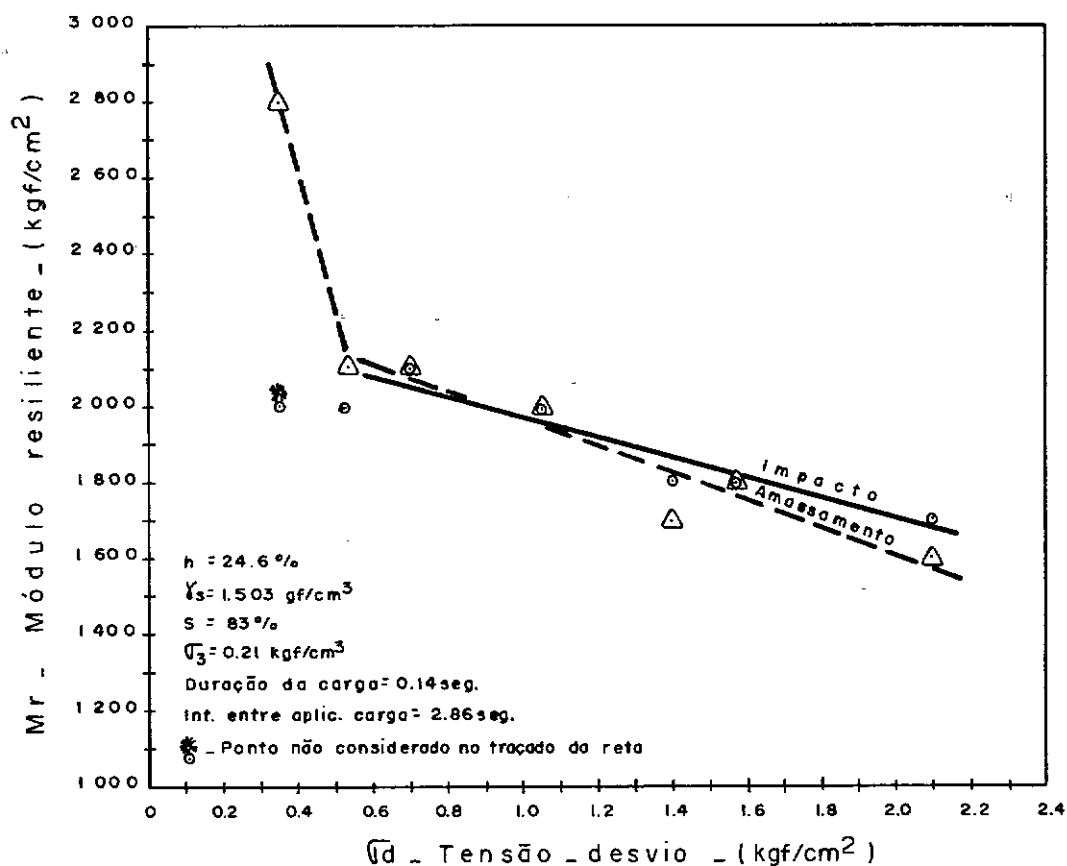
DESCRIÇÃO	Condições das amostras			σ_{dr} (kgf/cm ²)	σ_{dr}/σ_{ds}
	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)		
Argila vermelha - RJ	17	1,775	88	0,76	0,15
	18,7	1,733	90	0,76	0,20
Argila amarela - RJ	21,1	1,689	95	0,75	0,07
	23,5	1,617	94	0,75	0,18
Argila vermelha - MG	16	1,787	83	1,42	0,30
	17,2	1,764	86	1,42	0,33
	18,6	1,745	90	1,42	0,32

TABELA 5.2.4. - Sumário da razão da tensão-desvio repetida (σ_{dr}) para a tensão-desvio máxima ou a tensão de deformação específica de 5% (σ_{ds})

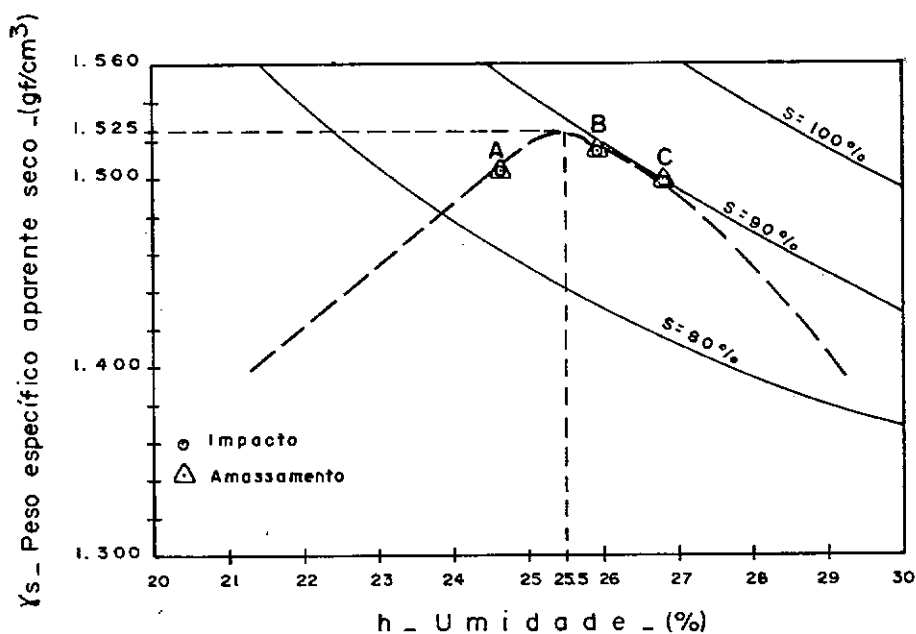
intermediário. Isto se deveu ao fato de não ter sido possível atingir o peso específico aparente seco máximo, mesmo com o aumento do número de golpes por camada, em corpos-de-prova de 10 cm de altura, uma vez fixado o número de camadas em cinco. O número de golpes por camada para a obtenção de corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura foi de 25.

Utilizou-se o aparelho reduzido de compactação divulgado pelo Eng^o Carlos de Souza Pinto para a obtenção de corpos-de-prova de 10 cm de altura, por impacto. Após várias tentativas de chegar ao peso específico aparente seco máximo, na umidade ótima, da curva de compactação por amassamento, fixou-se em três o número de camadas e três golpes por camada. A tolerância estabelecida foi de 0,5% na umidade e $0,03 \text{ gf/cm}^3$ no peso específico. A figura 5.3.1.b mostra a curva de compactação média dos pontos obtidos por amassamento e por impacto.

Realizaram-se ensaios triaxiais drenados de carga repetida próximo à umidade ótima e no ramo úmido da curva de compactação. Na figura 5.3.1.a tem-se o módulo resiliente "versus" a intensidade da tensão-desvio próximo ao ponto ótimo no ramo seco ($w = 24,6\%$, $\gamma_s = 1,503 \text{ gf/cm}^3$ e $S = 83\%$). Embora se tenha desprezado o ponto referente à tensão-desvio de $0,35 \text{ kgf/cm}^2$ no traçado da reta obtida para a amostra compactada por impacto (ver causas de erro e limitações do aparelho - referência 13), verifica-se que não houve efeito significativo do método de compactação no módulo resiliente, o que era de se esperar. Porém, este efeito é muito mais pronunciado no ramo úmido, figura 5.3.2, onde verificam-se acréscimos de aproximadamente 167% (figura 5.3.2.a) e 200% do módulo resiliente obtido em corpos-de-prova

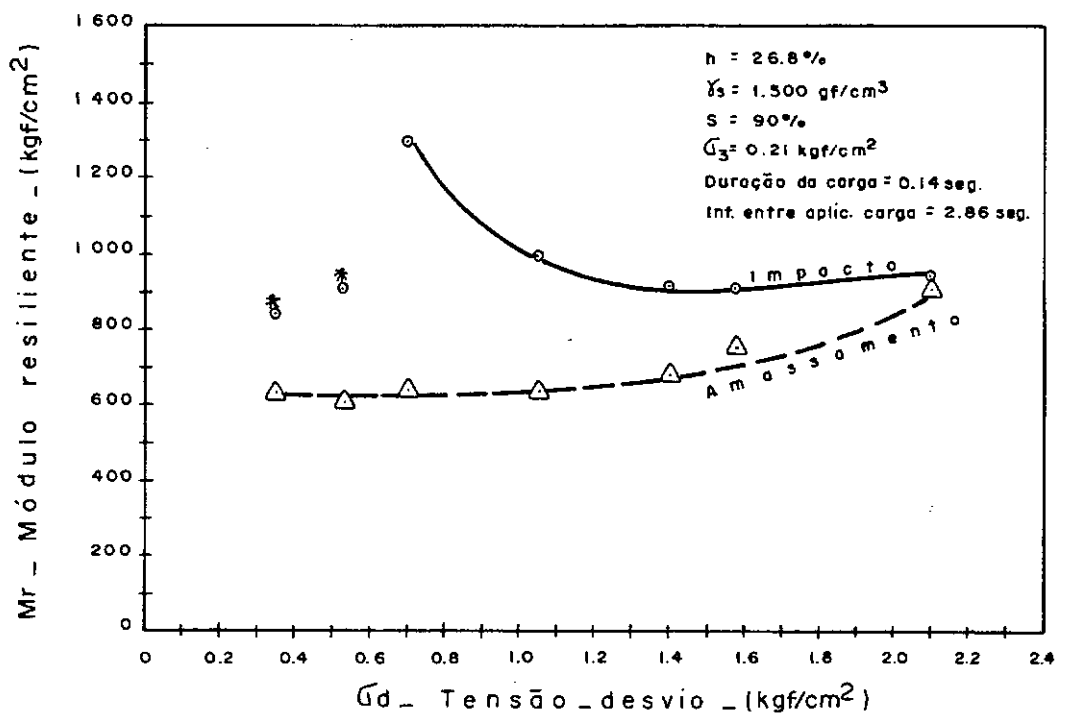
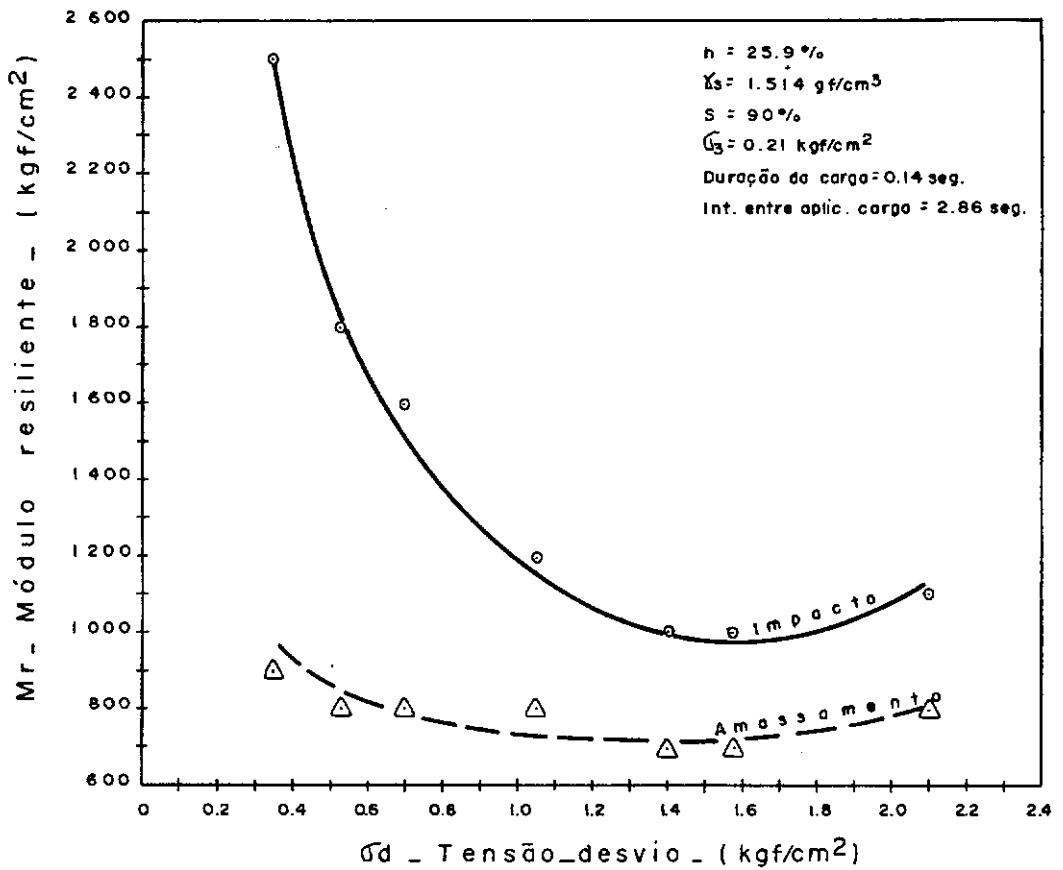


(a) - Condição A



(b) - Condições de compactação

FIG.5.3.1 - Efeito do método de compactação no relacionamen-
to módulo resiliente (M_r) "versus" tensão desvio (σ_d).
Argila amarela - RJ.



* - Ponto não considerado no traçado da curva

FIG.5.3.2 - Efeito do método de compactação no relacionamen-
to módulo resiliente (M_r) "versus" tensão-desvio (σ_d).
Argila amarela - RJ.

compactados por amassamento em relação aos compactados por impacto, para uma tensão-desvio de $0,70 \text{ kgf/cm}^2$. Estão marcados na figura 5.3.2.b pontos anômalos que foram desprezados no traçado da curva de correlação.

O modelo bi-linear apenas se esboçou no caso do ponto A e compactação por amassamento. Por este motivo não se pôde determinar os coeficientes K.

Contrariamente ao que encontraram Seed e Chan (23) em argilas muito plásticas, aqui o método de compactação influenciou bastante o módulo resiliente das argilas ensaiadas. para umidades acima da ótima ou seja, o comportamento do solo, sob este aspecto, não é o de uma argila tipo CH.

5.4.- INFLUÊNCIA DO INTERVALO ENTRE APLICAÇÕES DE CARGA NA DEFORMAÇÃO AXIAL PERMANENTE E NA DEFORMAÇÃO AXIAL RECUPERÁVEL

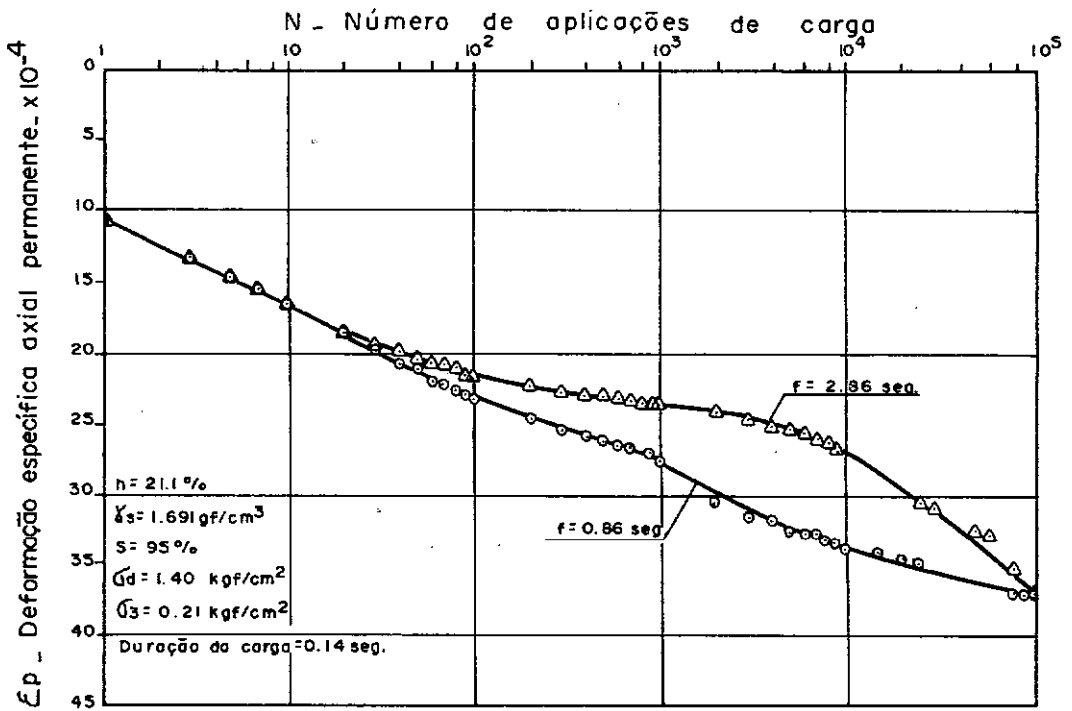
Conforme foi mencionado no capítulo 2, a influência do intervalo entre aplicações de carga na deformação axial é mais significativa para amostras compactadas no ramo úmido da curva de compactação, porém mesmo para a umidade ótima de compactação há uma ligeira influência.

A fim de investigar a influência do intervalo entre aplicações de carga nas deformações axiais, permanente e recuperável, de solos argilosos, realizaram-se ensaios triaxiais drenados de carga repetida em duas amostras de argila amarela-RJ a uma umidade de, 21,1% (um pouco acima da umidade ótima-20,6%), correspondendo a um grau de saturação de 95% e peso específico aparente seco de $1,691 \text{ gf/cm}^3$. Manteve-se a tensão-desvio de

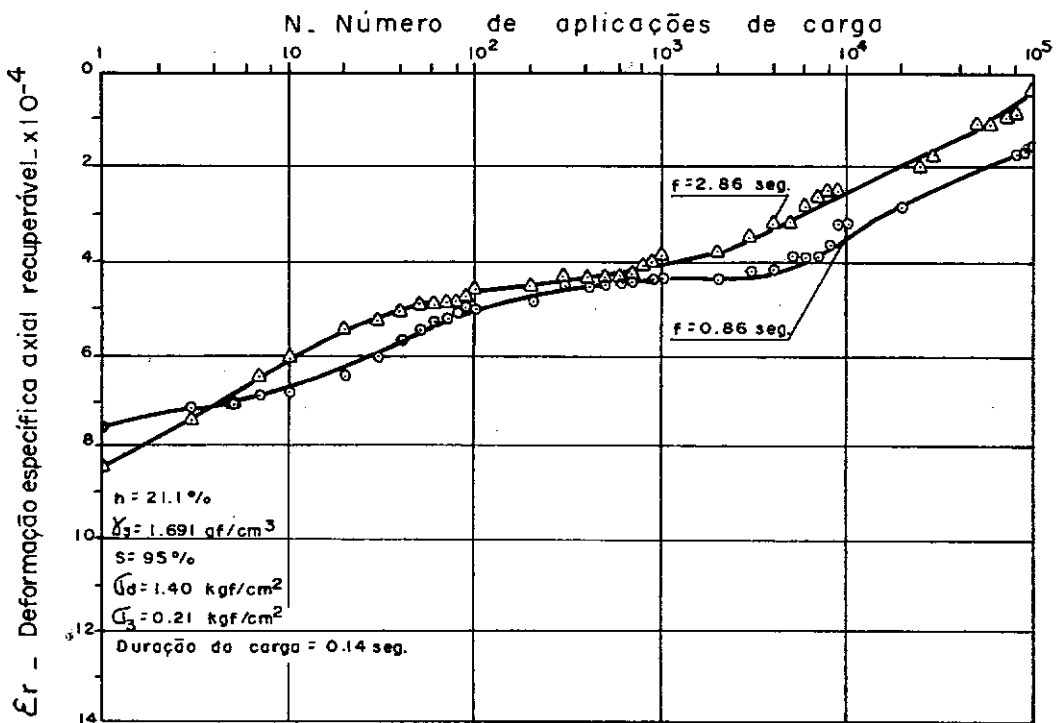
1,40 kgf/cm² constante no decorrer do ensaio e de duração de 0,14 segundo. Os intervalos entre aplicações de carga utilizadas neste estudo foram: 2,86 segundos (20 aplicações por minuto) e 0,86 segundo (60 aplicações por minuto).

A figura 5.4.1.a mostra a comparação das deformações axiais permanentes causadas pela aplicação da tensão-desvio repetida para os dois intervalos entre aplicações de carga citados acima. Observa-se que até 20 aplicações de carga as deformações axiais permanentes foram idênticas para os dois intervalos, porém a partir deste número de aplicações, o acréscimo da deformação axial permanente com o número de aplicações de carga tornou-se menos acentuado para o intervalo entre aplicações de carga de 2,86 segundos. Contudo no final de 100000 aplicações de carga as deformações axiais permanentes foram praticamente iguais para os dois intervalos. Investigações anteriores (capítulo 2) mostraram que para amostras de argila siltosa com umidades abaixo da ótima ou próxima a esta submetidas a carregamento dinâmico, acima de pelo menos 100000 aplicações de carga, a deformação axial total da amostra depende somente do número de aplicações de carga e independe do intervalo entre aplicações de carga (dentro de uma variação de frequência de 3 a 20 aplicações por minuto). Embora tenha-se mencionado apenas a influência do intervalo entre aplicações de carga na deformação axial permanente, comportamento semelhante ao encontrado para a argila siltosa foi verificado para a argila amarela-RJ, aqui estudada.

A influência do intervalo entre aplicações de carga na deformação axial recuperável para as mesmas condições an-



(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).



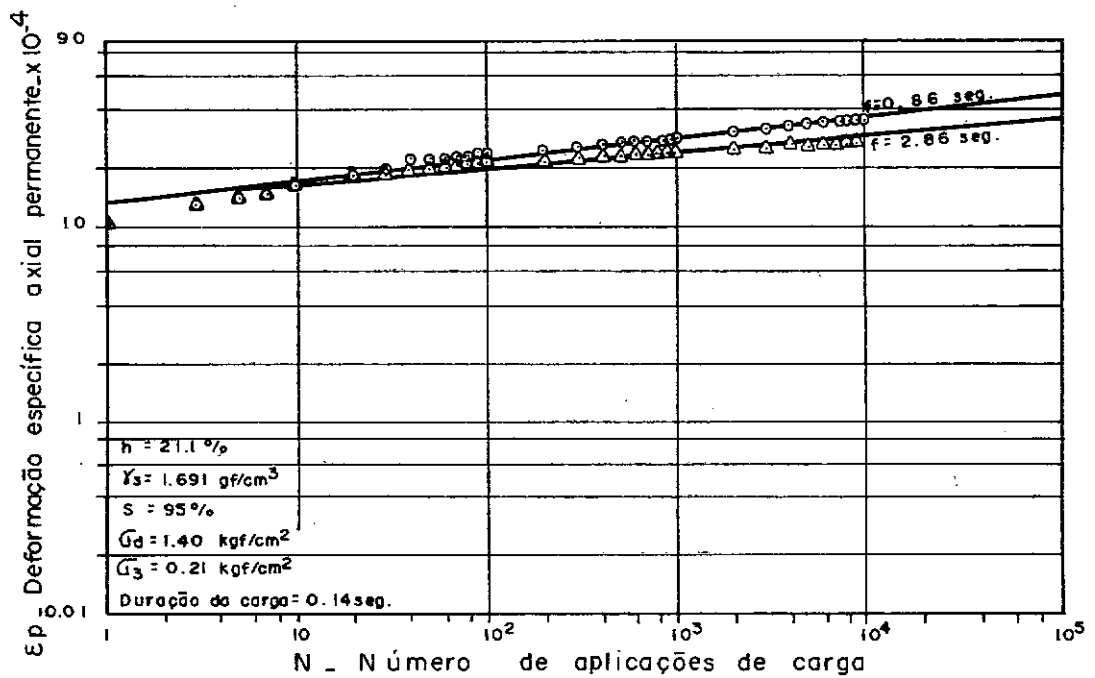
(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.4.1 - Efeito do intervalo entre aplicações de carga (f) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r). Arg. amarela.RJ

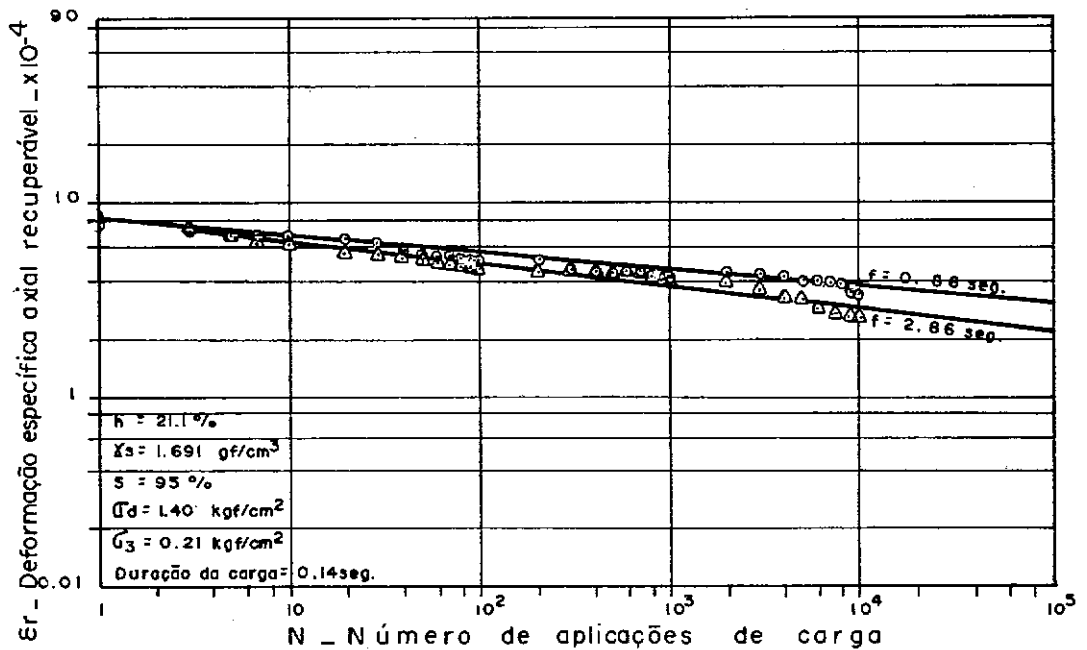
teriores está apresentada na figura 5.4.1.b. Para a primeira aplicação de carga a deformação axiãl recuperável para o intervalo de 2,86 segundos foi maior que para o intervalo de 0,86 segundos, talvez devido a imperfeições no tópo e na base da amostra, porém após 5 aplicações de carga a influência do intervalo entre aplicações de carga torna-se mais significativo. Conforme pode-se observar nesta figura, a deformação axial recuperável diminuiu com o número de aplicações de carga e foi menor para o intervalo entre aplicações de carga de 2,86 segundos que para o intervalo de 0,86 segundo. As deformações axiais recuperáveis após 100000 aplicações foram um pouco diferentes para os dois intervalos ao contrário do encontrado para a deformação axial permanente.

A relação das deformações axiais permanente e recuperável com o número de aplicações de carga, na escala log-log, para os dois intervalos de aplicações de carga estudados, está apresentada na figura 5.4.2. Os coeficientes K , A , K' e A' determinados nos ítems anteriores para as diversas condições de umidade e de tensão-desvio foram também calculados para estes dois intervalos e seus valores estão apresentados na tabela 5.4.1. Observa-se nesta tabela que embora o coeficiente K tenha sido maior para o intervalo de 2,86 segundos do que para o intervalo de 0,86 segundo, o coeficiente A , que dá a inclinação da reta, foi maior para o intervalo de 0,86 segundo.

Analisando-se em termos percentuais o acréscimo ou decréscimo dos coeficientes da tabela 5.4.1, verifica-se que os coeficientes K e A que relacionam deformação axial permanen-



(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).



(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.4.2_ Efeito do intervalo entre aplicações de carga (f) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r) Arg. amarela.RJ.

Intervalo entre aplicações de carga	$\epsilon_p = K N^A$			$\epsilon_r = K' N^{A'}$		
	$K \times 10^{-4}$	A	r	$K' \times 10^{-4}$	A'	r'
2,86 segundos	13,6	0,081	0,93	8,3	-0,116	0,97
0,86 segundos	12,8	0,112	0,98	7,9	-0,087	0,97

TABELA 5.4.1. - Sumário dos coeficientes das relações entre deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável "versus" número de aplicações de carga (N)

te com o número de aplicações de carga, K diminuiu de, aproximadamente, 6% e A aumentou de 38%, do intervalo entre aplicações de carga de 2,86 segundos para o de 0,86 segundo. Quanto aos coeficientes K' e A' da deformação axial recuperável, K' decresceu de 5% e A' (em valor absoluto) aumentou de 33%, respectivamente, do intervalo maior para o menor. Observa-se com isto que os coeficientes A e A' foram mais influenciadas nesta relação que os coeficientes K e K', porém os acréscimos de A e A' não foram tão significativos pois calculando-se as deformações axiais permanentes e recuperáveis após 100000 aplicações com as equações obtidas, verificam-se acréscimos de 34% e 32%, respectivamente, para os intervalos entre aplicações de carga de 2,86 segundo e 0,86 segundo.

A fim de verificar o acréscimo de resistência com o tempo para as mesmas condições de umidade, saturação e peso específico aparente seco nas quais foram feitos os ensaios dinâmicos, realizaram-se ensaios triaxiais não adensados e não drenados (UU) em amostras de solo a uma velocidade de 0,65 mm/seg sob uma pressão confinante de $0,21 \text{ kgf/cm}^2$. As amostras utilizadas neste estudo foram ensaiadas após diferentes períodos de repouso em seguida à compactação, períodos estes que se procurou relacionar ao tempo total de duração dos ensaios dinâmicos mais o período de repouso entre a compactação e o início do ensaio dinâmico (17 horas). Desta maneira realizaram-se os ensaios triaxiais não adensados e não drenados em pelo menos duas amostras para 45 horas (correspondente ao tempo gasto após a compactação até o fim do ensaio dinâmico com intervalo de aplicações de carga de 0,86 segundo) e 104 horas. Houve uma variação muito pe-

quena de resistência do solo para a deformação específica de 5%. Isto era de se esperar pois que no ensaio dinâmico a deformação total (soma das deformações permanente e recuperável) difere muito pouco a 100000 repetições para os dois intervalos.

Pelo exposto neste item conclui-se que para valores de umidade próximos a umidade ótima a influência do intervalo entre aplicações de carga na deformação axial permanente e de formação axial recuperável é insignificante.

5.5.- EFEITO DO TEMPO DE CURA (TIXOTROPIA) NA DEFORMAÇÃO AXIAL PERMANENTE E DEFORMAÇÃO AXIAL RECUPERÁVEL

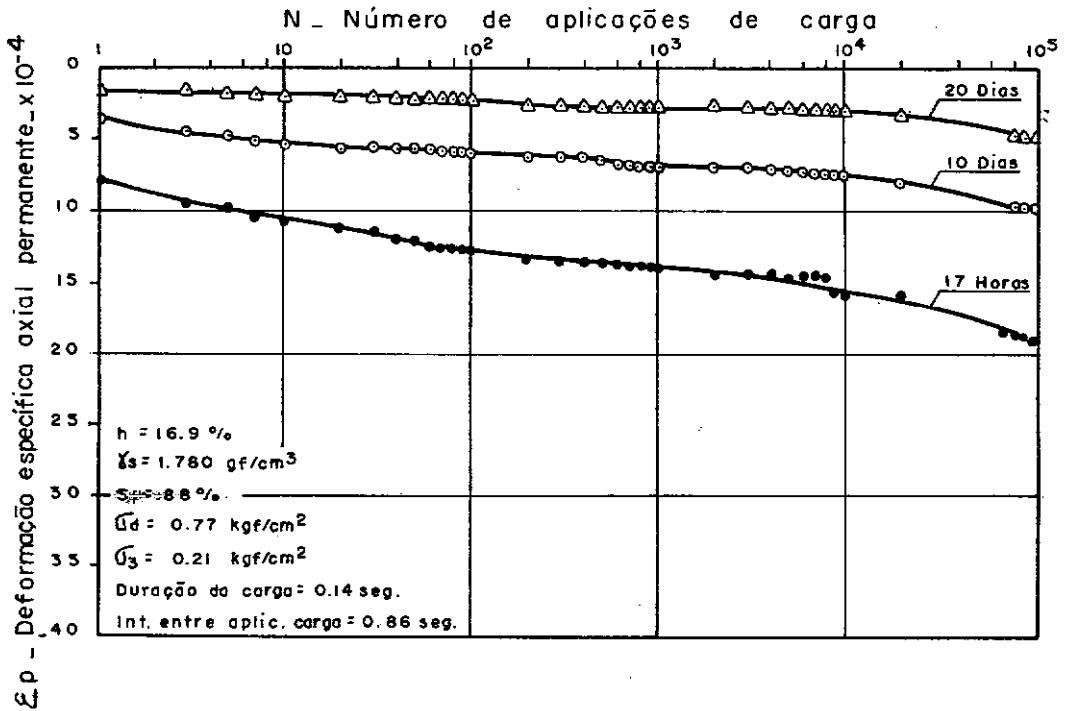
Para estudar o efeito do tempo de cura em amostras compactadas, realizaram-se ensaios triaxiais drenados de carga repetida em três amostras semelhantes de argila vermelha-RJ, com intervalos de tempo decorrido entre a compactação e o ensaio de 17 horas, 10 e 20 dias, a uma umidade de 16,9% (próxima à umidade ótima de compactação) correspondente a um grau de saturação de 88% e peso específico aparente seco de $1,780 \text{ gf/cm}^3$. A tensão-desvio repetida de valor médio igual a $0,77 \text{ kgf/cm}^2$ e de duração igual a 0,14 segundo, foi mantida constante no decorrer de cada ensaio até 100000 aplicações de carga para o intervalo de aplicações de carga de 0,86 segundo (correspondente a uma frequência de 60 aplicações por minuto).

Mencionou-se no capítulo 2 a importância da estrutura inicial das partículas e do método de compactação no comportamento tixotrópico de argilas compactadas. Embora o método de compactação utilizado na preparação das amostras não tenha tanto

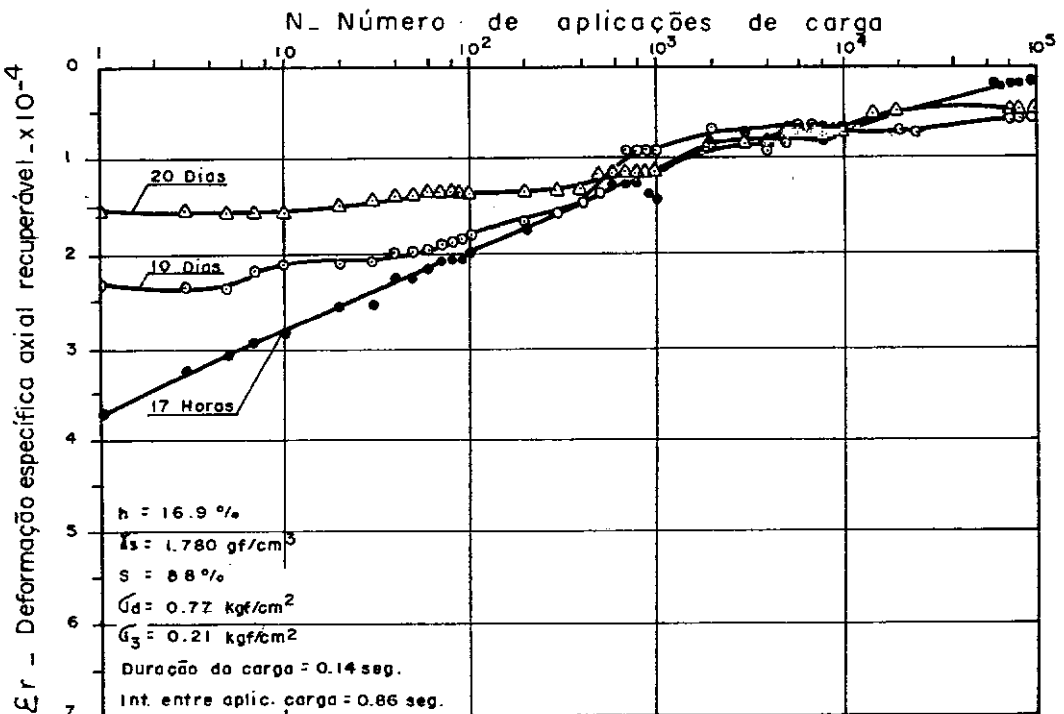
significado, em termos de indução de deformações cisalhantes quanto o método de compactação por amassamento, e por estar a umidade próxima da ótima, onde o efeito tixotrópico não é tão pronunciado, o comportamento do solo no que diz respeito ao ganho de resistência tixotrópica foi verificado quanto à deformação axial permanente e a deformação axial recuperável.

A figura 5.5.1.a ilustra a relação da deformação axial permanente com o número de aplicações de carga para as condições citadas acima. Observa-se nitidamente a redução na deformação devido ao ganho de resistência após a compactação. Quanto ao efeito tixotrópico na deformação axial recuperável, figura 5.5.1.b, verifica-se que abaixo de, aproximadamente, 400 aplicações de carga, o acréscimo no tempo de cura causou uma redução na deformação axial recuperável e que para número de aplicações maiores que 400, as deformações axiais recuperáveis foram praticamente iguais. A destruição do ganho de resistência tixotrópica das amostras curadas, induzida pela deformação, já citada no capítulo 2, ocorreu para um número de aplicações de carga bastante pequena talvez devido ao fato de que a carga repetida aplicada às amostras tenha sido relativamente elevada.

Na figura 5.5.2 as relações da deformação axial permanente e da deformação axial recuperável com o número de aplicações de carga encontram-se plotados na escala log-log. Os coeficientes K , A , K' e A' da equação potencial mencionada nos itens anteriores foram também determinados e encontram-se na tabela 5.5.1. O coeficiente K diminuiu sempre com o acréscimo do tempo de cura, porém este decréscimo não foi significativo pois que do

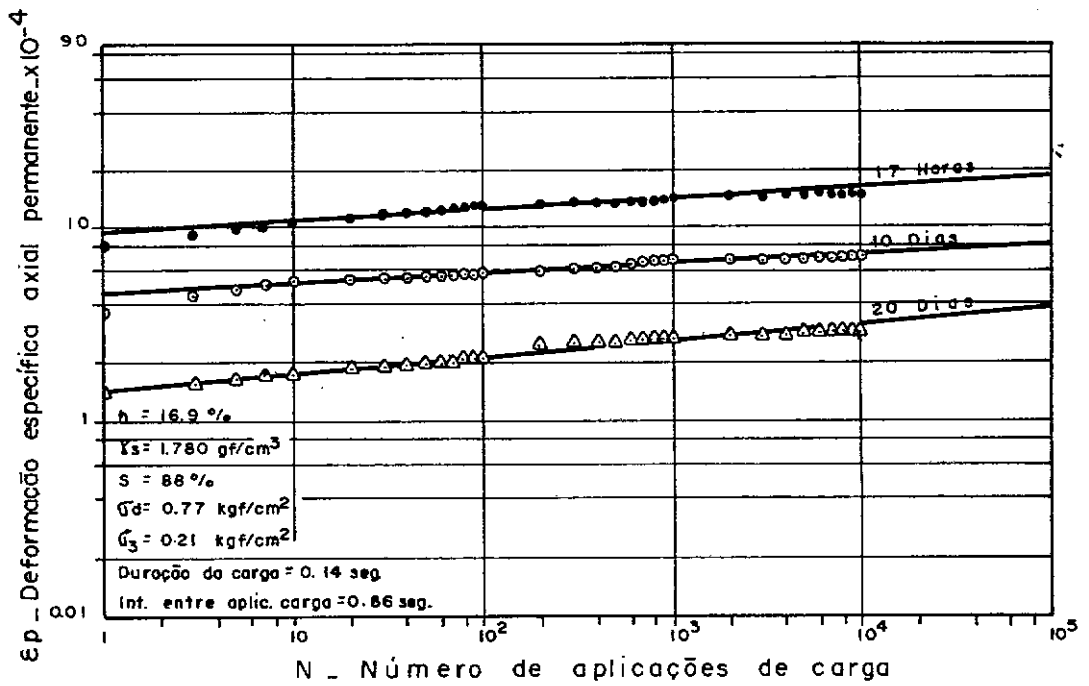


(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).

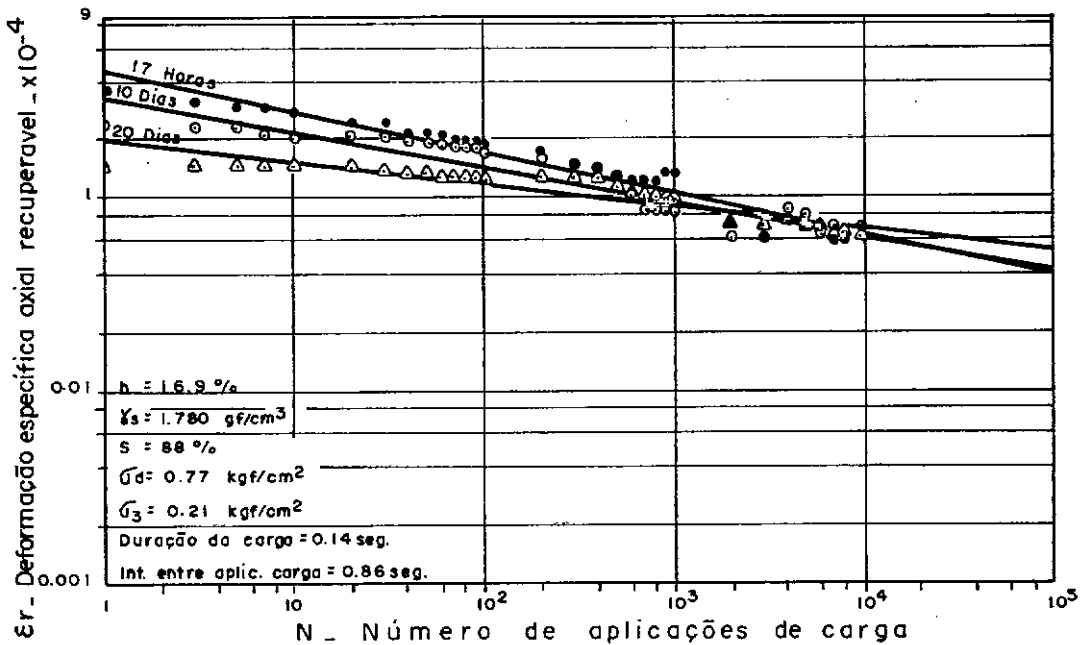


(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

FIG.5.5.1 - Efeito do tempo de cura (tixotropia) na deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r). Argila vermelha - RJ.



(a) - Deformação específica axial permanente (ϵ_p) "versus" número de aplicações de carga (N).



(b) - Deformação específica axial recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

TEMPO DE CURA	$\epsilon_p = K N^A$			$\epsilon_r = K' N^{A'}$		
	$K \times 10^{-4}$	A	r	$K' \times 10^{-4}$	A'	r'
17 horas	9,3	0,058	0,95	4,6	-0,207	0,98
10 dias	4,4	0,054	0,93	3,3	-0,173	0,94
20 dias	1,47	0,078	0,98	2,0	-0,110	0,92

TABELA 5.5.1 - Sumário dos coeficientes da relação deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r) "versus" número de aplicações de carga (N).

tempo de cura de 17 horas para o de 20 dias K decresceu de 16%. Quanto ao coeficiente A não se observou uma tendência de variação geral pois este diminuiu do tempo de cura de 17 horas para o de 10 dias e aumentou do de 10 dias para o de 20 dias. O coeficiente K' decresceu com o acréscimo do tempo de cura, bem como A' (em valor absoluto). Para melhor visualizar o acréscimo ou decréscimo desses coeficientes, plotaram-se os valores de K, A, K', e A' em função do tempo de cura, figura 5.5.3.

Paralelamente aos ensaios triaxiais dinâmicos, realizaram-se ensaios triaxiais não adensados e não drenados (UU) em pelo menos duas amostras para cada uma das condições anteriores ou seja: 17 horas, 10 dias e 20 dias de cura. O objetivo desses ensaios foi o de tentar determinar em ensaios estáticos o provável ganho de resistência tixotrópica após cada período de cura, para deformações inferiores a 5%. Contudo, como era de se esperar, houve uma insignificante variação na resistência do solo. Deve-se levar em conta que nos ensaios dinâmicos as tensões aplicadas repetidamente às amostras são bem menores do que a resistência máxima do solo (a relação entre a tensão-desvio repetida e a tensão-desvio máxima do ensaio estático para o tempo de cura de 17 horas foi de 0,15) e que as deformações obtidas após 100000 aplicações de carga são muito pequenas (para 17 horas de cura a deformação foi de aproximadamente 0,2%). Dai porque o provável ganho de resistência com o aumento do tempo de cura após a compactação, pode ter sido perdido nas 400 aplicações de carga iniciais do ensaio de carga repetida, para o caso da deformação axial recuperável, enquanto que para a deformação axial permanente este ganho de resistência foi mais visível.

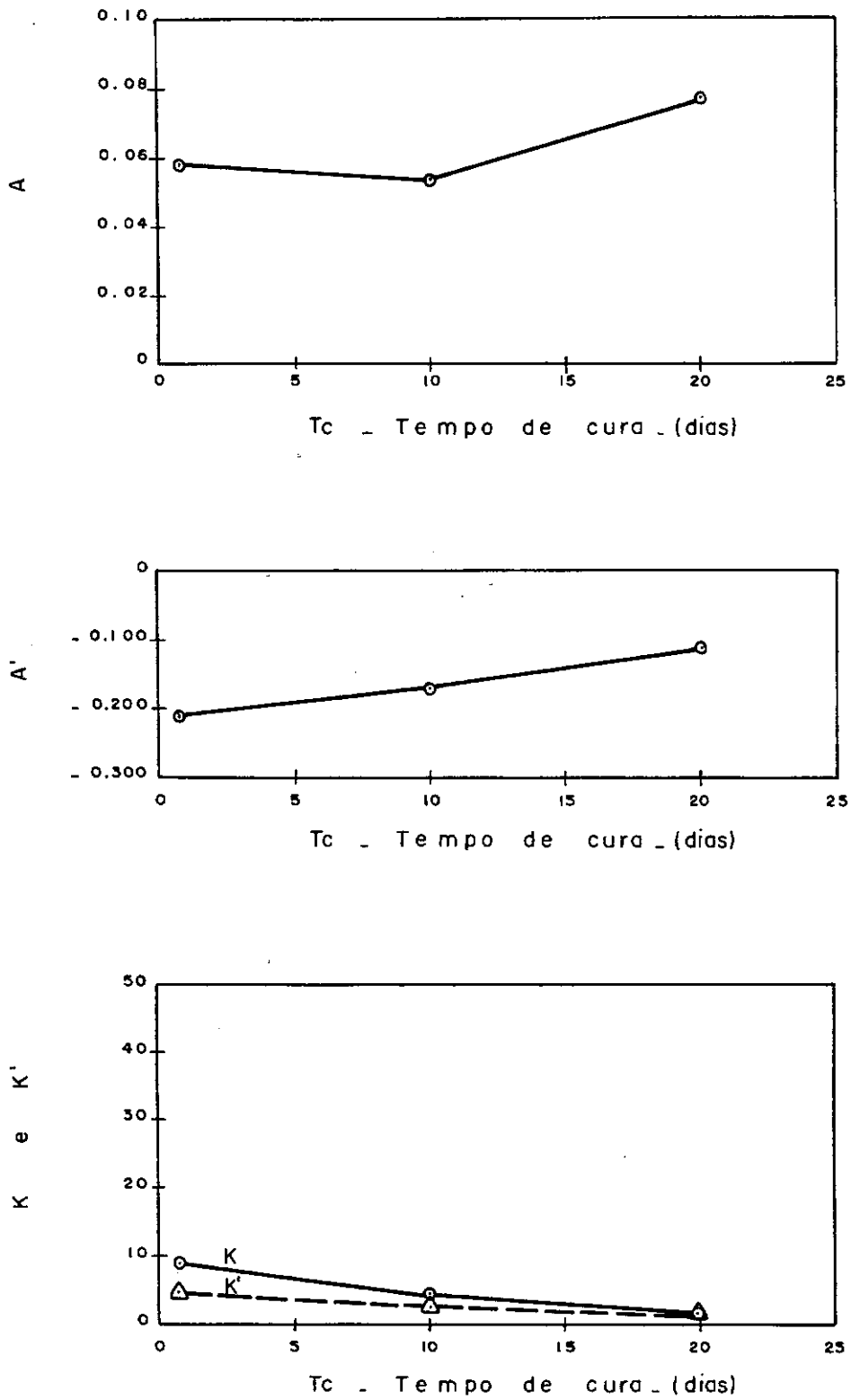


FIG.5.5.3 - Variação dos coeficientes K, A, K' e A' de $\epsilon_p = K N^A$ e $\epsilon_r = K' N^{A'}$ com o tempo de cura (T_c). Argila vermelha - RJ.

Os resultados anteriores indicam, portanto, que a variação das características de deformação, permanente e recuperável, no período de repouso entre a compactação e a solicitação pelas cargas, traz dificuldades aos ensaios dinâmicos de solos argilosos e sua interpretação para finalidade de projeto.

CAPÍTULO VIOUTRAS RELAÇÕES

Ensaaios ditos estáticos tais como o índice de suporte California, eo valor R do estabilômetro de Hvem ainda são muito usados para avaliar as características dos materiais de um pavimento, embora no campo sejam os pavimentos submetidos a carregamentos dinâmicos. Porém, nos últimos anos, especial atenção tem sido dada ao desenvolvimento de métodos de projeto de pavimentos baseados nas características dos solos obtidos de ensaios de carga repetida.

O propósito desse capítulo é o de apresentar a relação entre a intensidade da tensão-desvio repetida e a deformação axial permanente acumulada, para um determinado número de aplicações de carga, e a variação da deformação axial permanente acumulada com o CBR, sendo que a primeira relação foi desenvolvida por Barksdale (1) para predizer o afundamento da trilha de rodas dos pavimentos.

6.1 - RELAÇÃO ENTRE A INTENSIDADE DA TENSÃO-DESVIO REPETIDA E A DEFORMAÇÃO AXIAL PERMANENTE ACUMULADA

Conforme foi mencionado no capítulo 4, o subleito e a camada de reforço do subleito de um pavimento são submetidos a tensões relativamente pequenas se comparadas à resistência do solo. Porém, nem sempre é possível simular o nível de tensão que ocorre na realidade, ainda mais quando se trata de medir deformações permanentes. Portanto, se a deformação permanente a baixos níveis de tensão pudesse ser deduzida das defor-

mações medidas a tensões. grandes, tais dificuldades de medições poderiam ser minimizadas.

A impossibilidade de medir deformações permanente para tensões-desvio menores do que $0,35 \text{ kgf/cm}^2$, devido às limitações do aparelho usado neste estudo, fez com que se procurasse estabelecer uma relação entre a tensão-desvio e a deformação axial permanente acumulada após 10000 aplicações de carga.

Segundo Barksdale (1) para se estudar o afundamento da trilha de roda, provavelmente o melhor meio de se apresentar ensaios de carga repetida é através de uma curva tensão-deformação análoga à curva determinada em ensaios estáticos. Conhecendo-se as características tensão-deformação dos diferentes materiais que compõem a estrutura, a várias umidades e pesos específicos aparentes secos, tem-se a indicação das características de ruptura dos materiais quando submetidos a um determinado número de aplicações de carga.

Para estudar a relação entre a tensão-desvio repetida e a deformação axial permanente acumulada, Barksdale (1) ensaiou um solo residual de granito gnaíssico. As curvas tensão-deformação foram traçados após 100000 aplicações de carga e estas exibiram uma característica tipicamente não linear ou seja de forma hiperbólica. Barksdale observou para este caso específico de material granular que a deformação plástica era muito dependente da tensão-confinante.

Utilizando este mesmo conceito, Monismith (10)

sugeriu uma equação para desenvolver o relacionamento entre tensão-desvio repetida e deformação axial permanente acumulada após um número particular de aplicações de carga, para solos de granulometria fina estudado em sua investigação. A equação proposta é da forma:

$$\sigma_a = \frac{\epsilon_p^a}{1+m \epsilon_p^a} \quad (1)$$

onde:

σ_a = tensão axial repetida

ϵ_p^a = deformação axial permanente acumulada para um número específico de aplicações de carga

$1, m$ = coeficientes determinados experimentalmente

A equação (1) pode também ser expressa como:

$$\frac{\epsilon_p^a}{\sigma_a} = 1+m \epsilon_p^a \quad (2)$$

Se ϵ_p^a / σ_a é plotado como uma função de ϵ_p^a , uma linha reta é obtida. O intercepto dessa linha com o eixo ϵ_p^a / σ_a conduz ao valor de 1 enquanto que o valor de m é a inclinação da linha. Usando a técnica dos mínimos quadrados os dados experimentais foram analisados de acordo com a equação (1). Com isto uma relação hiperbólica foi encontrada após 10000 aplicações de carga para cada nível de tensão a que estava sendo submetida cada amostra.

Com o objetivo de investigar a relação entre a tensão-desvio repetida e a deformação axial permanente acumulada, plotaram-se os resultados dos ensaios de carga repetida após 10000 de carga para as argilas mostradas no capítulo 5.1.

Porém, julgou-se mais simples, ao invés de usar a equação (1), adotar uma equação potencial:

$$\sigma_a = B \epsilon_p^a{}^C \quad (3)$$

onde:

σ_a = tensão axial repetida

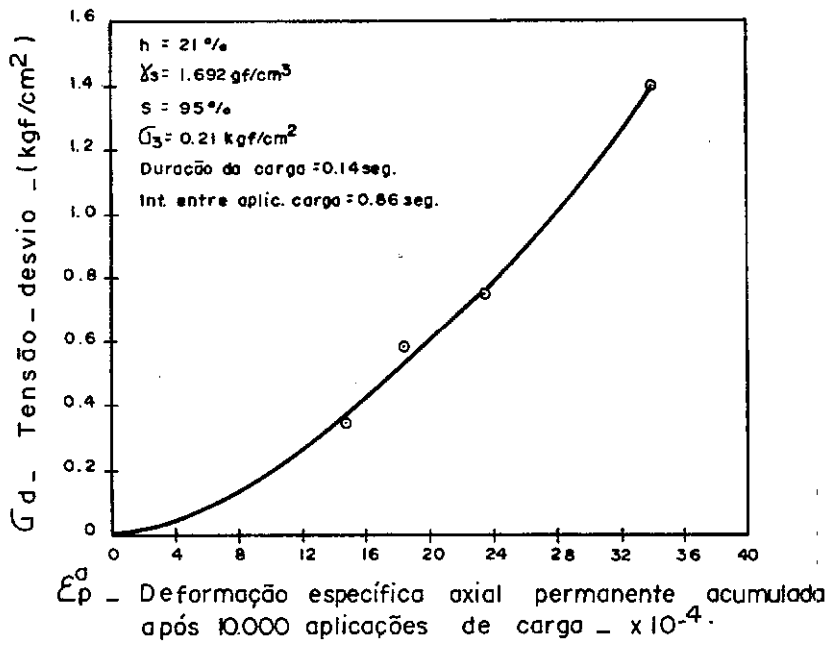
ϵ_p^a = deformação axial permanente acumulada para um número es
pecífico de aplicações de carga

B,C= coeficientes determinados experimentalmente

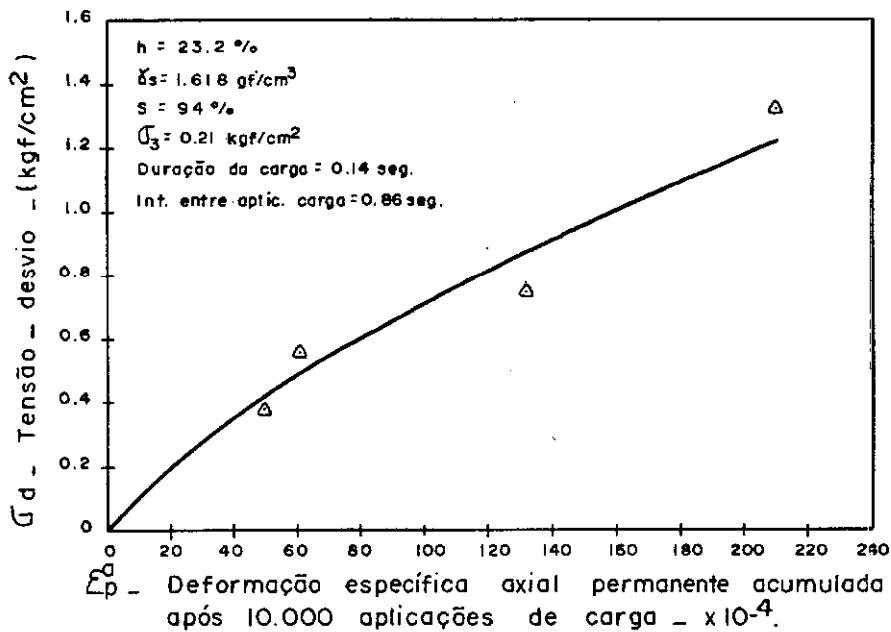
Embora a determinação dos coeficientes B e C tor
ne necessário uma anamorfose da equação (3), esta é um modelo
simples pois se o coeficiente C for menor que a unidade, tem-se
uma hipérbóle equilátera.

A figura 6.1.1 ilustra a relação entre tensão-
desvio repetida e deformação axial permanente acumulada após
10000 aplicações de carga para duas condições de umidade da ar-
gila amarela-RJ. Observa-se que para a umidade de 21% a rela-
ção hiperbólica não foi encontrada, mas o foi para a umidade de
23,2%. Na figura 6.1.2 verifica-se que para as argilas verme-
lhas-RJ e PR de umidades 18,8% e 18,7%, respectivamente, encon-
trou-se praticamente uma reta para ambos os casos.

A tabela 6.1.1 contém os coeficientes da equa-
ção (3) determinados pelo método dos mínimos quadrados para as
três argilas anteriormente citadas. Embora o número de pontos
para a determinação desses coeficientes seja bastante reduzido,
os coeficientes de correlação (r) indicam que esta equação po-
tencial se ajusta razoavelmente bem aos dados. Observa-se nes-

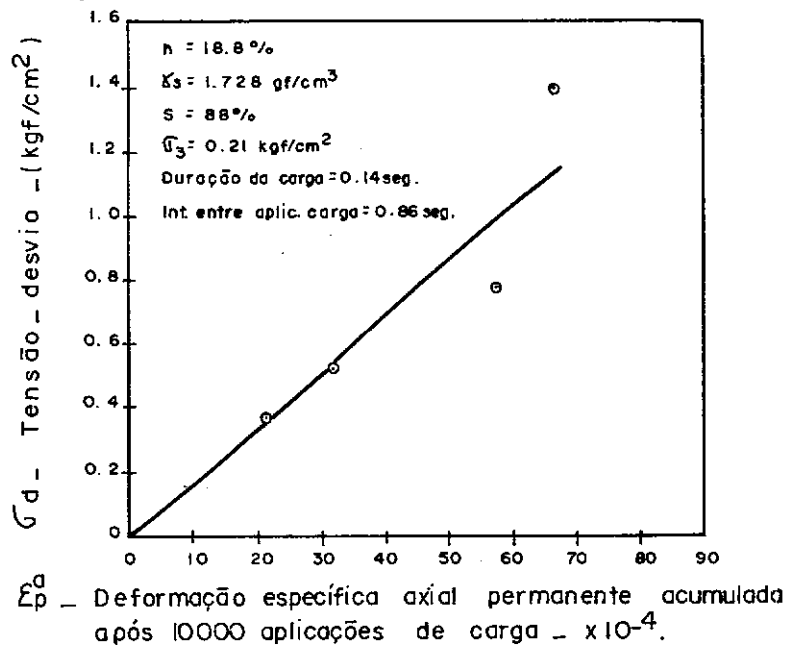


(a) - Argila amarela - RJ

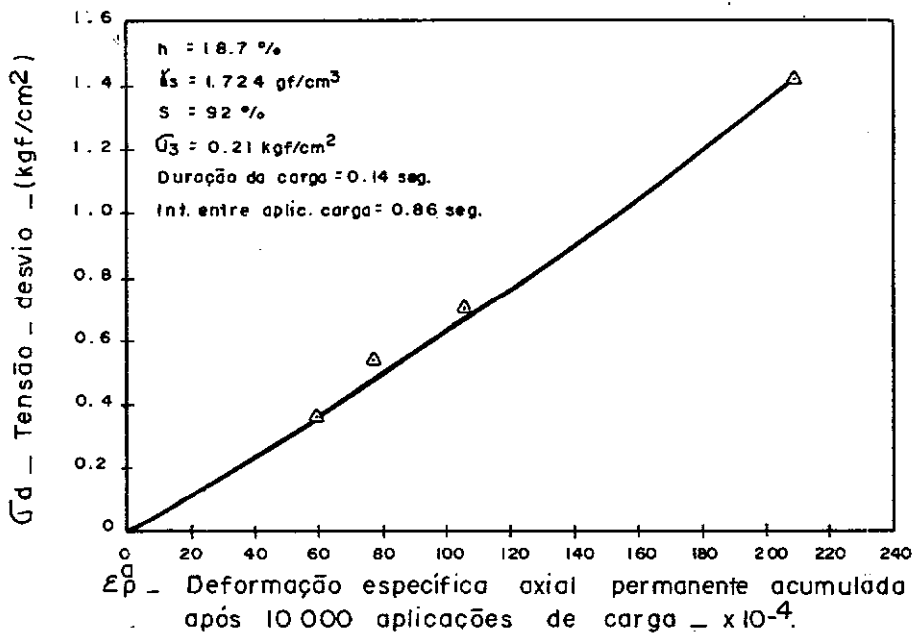


(b) - Argila Amarela - RJ

FIG.6.1.1 - Relação entre tensão-desvio (G_d) e deformação específica axial acumulada (E_p^a).



(a) - Argila vermelha - RJ



(b) - Argila vermelha - PR

 FIG.6.1.2 - Relação entre tensão-desvio (G_d) e deformação específica axial acumulada (E_p).

DESCRIÇÃO	Condições das amostras			$\sigma_{dr} = B \epsilon_p^A$		
	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)	B $\times 10^{-4}$	A	r
Argila amarela-RJ	21	1,692	95	49	1,607	0,99
	23,2	1,618	93	230	0,746	0,97
Argila vermelha-RJ	18,8	1,728	88	166	1,010	0,95
Argila vermelha-PR	18,7	1,724	92	43	1,080	0,99

TABELA 6.1.1. - Sumário dos coeficientes da relação tensão-desvio (σ_d) "versus" deformação axial permanente acumulada (ϵ_p^a)

sa tabela, que somente para a argila amarela-RJ de umidade 23,2%, o coeficiente C foi menor que a unidade o que implica numa hipérbole equilátera. Os coeficientes C maiores do que a unidade foram obtidos para as amostras com umidade próxima à ótima (argila amarela-RJ, $h = 21\%$) ou 2% e 1,6% acima da ótima, argilas vermelhas-RJ e PR, respectivamente. Parece provável que em condições de umidade muito elevada possa-se encontrar uma hipérbole, embora as características dos solos também possam influir nos valores desses coeficientes.

O método simplificado para prever a profundidade da trilha de roda proposto por Barksdale (1) será aqui brevemente apresentado. Este método faz uso da teoria das camadas de elasticidade não-linear e das propriedades tensão-deformação plástica obtidas dos ensaios de carga repetida. Para prever o total da deformação da trilha de roda que poderá ocorrer após um certo número de repetições, cada camada da estrutura é dividida em várias subcamadas e a tensão principal maior, σ_1 , e a pressão confinante, σ_3 , são então calculadas no centro de cada subcamada abaixo da carga, como ilustrado na figura 6.1.3. As tensões devem ser calculadas usando uma teoria elástica não-linear ou viscoelástica não-linear. As deformações plásticas podem então ser calculadas no centro de cada subcamada, usando um número desejado de aplicações de carga, pela lei tensão-deformação plástica hiperbólica, ou então, fazendo-se uma interpolação direta das curvas tensão-deformação plástica de laboratório. A profundidade total da trilha de roda é então obtida pelo somatório de todos os produtos das deformações plásticas médias no centro de cada sub-camada pela espessura de cada sub-camada. Isto é matematicamente expresso por:

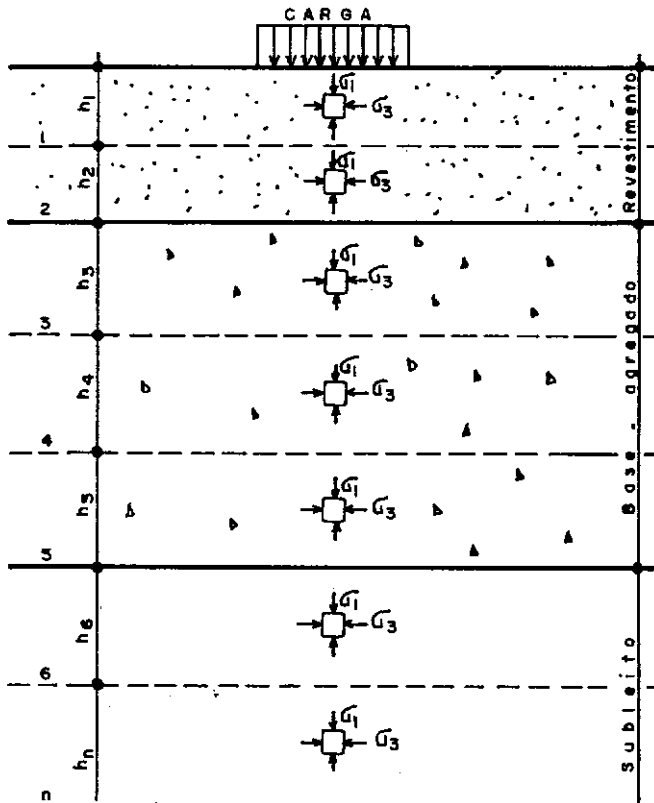


FIG.6.13_ Idealização de uma estrutura de um pavimento para o cálculo da profundidade da trilha de roda. (Barksdale - 1972).

$$\delta_{total}^P = \sum_{i=1}^n (\bar{\epsilon}_i^P \cdot h_i) \quad (4)$$

onde:

δ_{total}^P = profundidade total do afundamento da trilha de roda
abaixo do centro da carga

$\bar{\epsilon}_i^P$ = deformação plástica média na i-ésima sub-camada

h_i = espessura da i-ésima sub-camada

n = número total de sub-camadas

Este método pode ser aplicado tanto para camadas não estabilizadas como estabilizadas. Por outro lado, a fim de considerar os efeitos das variações nas propriedades dos materiais com o tempo, o processo acima pode ser usado para qualquer número de aplicações de carga. A diferença nas deformações plásticas entre incrementos sucessivos pode ser somado para dar a deformação permanente total que ocorrerá na estrutura do pavimento.

Verifica-se, com o exposto acima, que embora a relação hiperbólica não tenha sido encontrada para três casos das argilas ensaiadas, este pode ser aplicado para a determinação da profundidade da trilha de roda usando o método proposto por Barksdale (1) bastando para isto conhecer a relação tensão-deformação plástica para as outras camadas que compõem o pavimento.

6.2 - VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO AXIAL PERMANENTE ACUMULADA COM O ÍNDICE CBR

Sendo o ensaio CBR, utilizado para o dimensionamento de pavimentos, muito difundido, julgou-se oportuno corre-

lacioná-lo com parâmetros obtidos de ensaios dinâmicos os quais permitam simular melhor as solicitações de campo. No caso de solos arenosos Preussler (13) obteve razoável correlação do índice CBR com o módulo resiliente de amostras compactadas acima do teor ótimo de umidade. Procurou-se aqui uma relação com a deformação axial permanente acumulada a 10000 repêtições em solos argilosos, e umidade superior ou bastante próxima da ótimo de compactação, determinada segundo método descrito no capítulo 3.

Realizaram-se ensaios CBR com embebição, para quatro pontos da curva de compactação, energia Interme Normal, com a argila amarela-RJ e as argilas vermelhas-RJ, MG e PR; a seguir traçaram-se as curvas de CBR "versus" umidade.

Paralelamente aos ensaios CBR, realizaram-se ensaios triaxiais drenados de carga repetida em amostras de solo submetidas a tensão-desvio de, aproximadamente, $1,40 \text{ kgf/cm}^2$, constante no decorrer de cada ensaio e tensão confinante igual a $0,21 \text{ kgf/cm}^2$. Determinaram-se as deformações axiais permanentes acumuladas após 10000 aplicações de carga para uma condição de umidade da argila vermelha-RJ, três condições de umidade da argila amarela-RJ e argila vermelha-MG e duas da argila vermelha-PR. Para cada uma dessas umidades determinou-se o correspondente valor de CBR através da curva CBR "versus" umidade. A tabela 6.2.1 apresenta para cada uma das umidades, a deformação axial permanente acumulada e o CBR.

A figura 6.2.1 ilustra a variação da deformação axial permanente acumulada após 10000 aplicações (ϵ_p^a) com o

DESCRIÇÃO	CONDIÇÃO DAS AMOSTRAS			ϵ_p^a $\times 10^{-4}$	CBR (%)
	h (%)	γ_s (gf/cm ³)	S (%)		
Argila amarela-RJ	20,2	1,714	94	15,06	30
	21,0	1,695	96	33,82	18
	23,6	1,613	95	210,30	5
Argila vermelha-RJ	18,6	1,708	86	63,48	8
Argila vermelha-MG	16,2	1,776	82	17,09	16
	17,4	1,757	86	41,85	13
	18,6	1,737	89	116,72	8
Argila vermelha-OR	16,0	1,781	87	25,19	17,5
	18,9	1,725	93	209,20	9

TABELA 6.2.1 - Sumário dos valores da deformação axial permanente acumulada após 10.000 aplicações de carga (ϵ_p^a) e CBR.

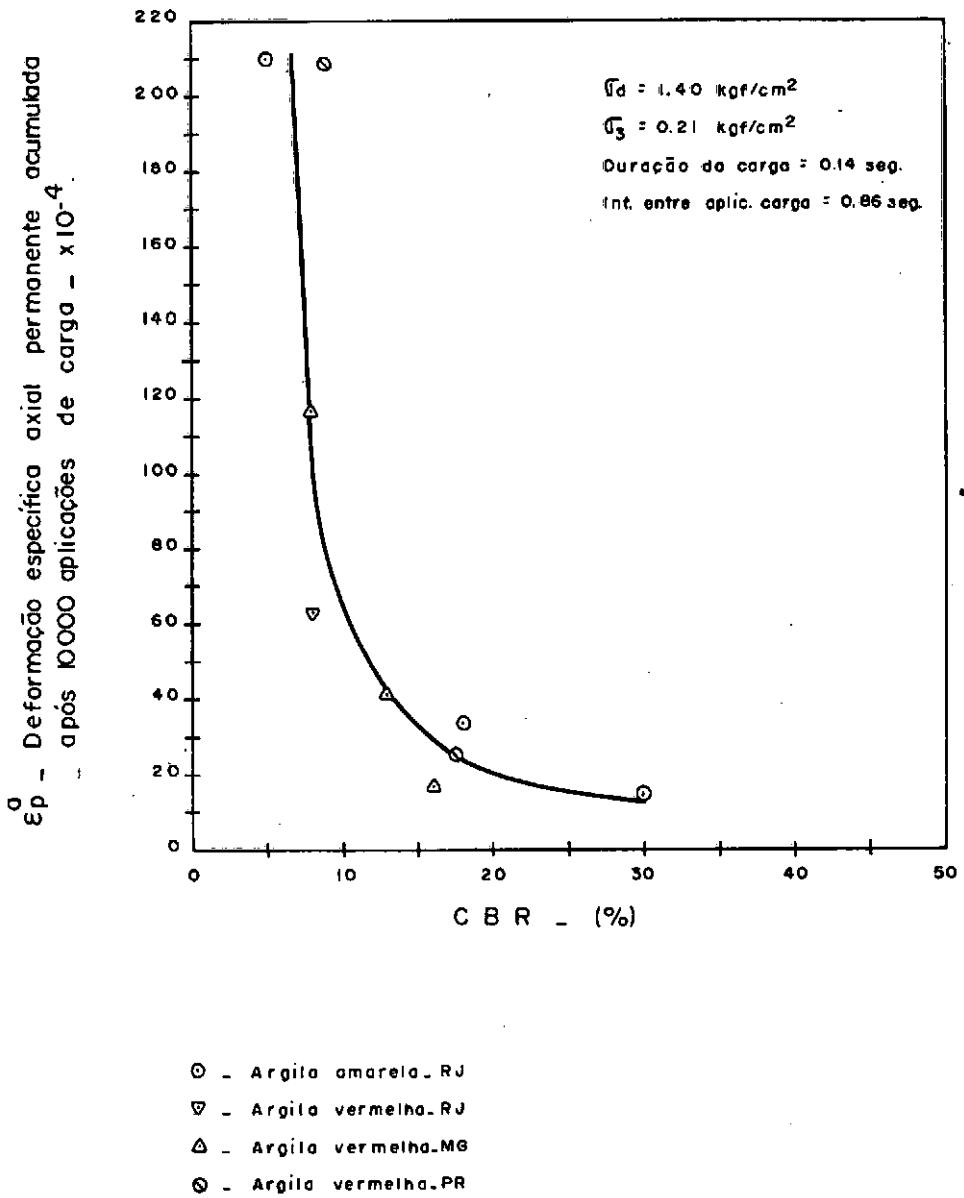


FIG. 6.2.1 - Variação da deformação específica axial permanente acumulada após 10 000 aplicações de carga (ϵ_p^a) com o CBR (%).

CBR. Embora nenhuma tentativa tenha sido feita para correlacionar a deformação (ϵ_p^a) com o CBR, verifica-se que, para valores de CBR inferiores a 15%, há um acréscimo pronunciado da deformação axial permanente acumulada com o decréscimo do CBR; contudo, para valores de CBR superiores a este a variação da deformação axial permanente acumulada com o CBR não é tão significativa.

CAPÍTULO VIICONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA

7.1 - CONCLUSÕES

Basêando-se nos resultados obtidos nesta investigação, as seguintes conclusões são apresentadas:

- 1 - O módulo resiliente dos solos argilosos compactados mostrou-se bastante influenciado pela intensidade da tensão-desvio e pouco pela da tensão-confinante, conforme a experiência existente.
- 2 - A correlação entre o módulo resiliente e a tensão-desvio pode ser representada por um modelo bi-linear na maioria dos casos e, as vezes, por um modelo linear. O modelo bi-linear em que o módulo decresce muito com a tensão-desvio para valores pequenos desta é mais comum próximo do ótimo da curva de compactação, considerados os quatro solos estudados e as condições de compactação adotadas.
- 3 - As deformações axiais, permanente e recuperável, medidas no ensaio triaxial dinâmico dependem do número de aplicações (N) de carga, aquelas crescendo cumulativamente com N e estas diminuindo com N. As equações representativas têm a forma:
$$\epsilon_p = K N^A \text{ e } \epsilon_r = K' N^{A'}$$
, e podem ser utilizadas na previsão das deformações do subleito e do reforço do subleito, se argilosos.
- 4 - O efeito da umidade de compactação é bastante significativo na relação entre o módulo resiliente e a intensidade da tensão-desvio e, geralmente, para valores de umidade elevados o módulo resiliente quase não varia com o acréscimo da tensão-desvio. Este efeito é também relevante nos valo-

res das constantes K e K' que das equações que relacionam a deformação axial permanente e a deformação axial recuperável com o número de aplicações de carga, pois estes coeficientes aumentam com o acréscimo da umidade enquanto que A e A' praticamente não variam.

- 5 - A influência do método de compactação (impacto e amassamento) na relação entre o módulo resiliente e a intensidade da tensão-desvio é significativa para umidades acima da umidade ótima de compactação. Abaixo da ótima pouca influência tem o método de compactação. Este fato espelha, na verdade, a influência da estrutura do solo argiloso compactado.
- 6 - A variação do intervalo entre aplicações de carga (0,86 a 2,86 s), para umidades próximas à umidade ótima, pouca influência tem nos valores dos coeficientes K , A , K' , e A' das expressões matemáticas das deformações em função do número de repetições.
- 7 - Notou-se a influência do tempo de cura nos valores de deformação axial permanente que evidencia um efeito de natureza tixotrópica, porém para a deformação axial recuperável este efeito não foi muito significativo.
- 8 - A relação entre a intensidade da tensão-desvio e a deformação axial permanente acumulada pode ser usada para a estimativa do afundamento da trilha de rodas segundo procedimento proposto por Barksdale (1), embora a relação não seja necessariamente hiperbólica.
- 9 - Uma curva de variação única da deformação axial permanente (ϵ_p^a) acumulada após 10000 repetições com o valor do índice CBR pôde ser obtida para as quatro argilas ensaiadas, em que

há forte decréscimo da deformação com o CBR para valores deste até 15%.

7.2 - SUGESTÕES DE PESQUISA

- 1 - Prosseguimento dos ensaios triaxiais dinâmicos para investitigar as características das deformações axiais permanente e recuperável com o número de aplicações de carga em outros tipos de solos argilosos compactados, sob várias condições de umidade e submetidas a pequenos níveis de tensão, tal que posteriormente se possa estabelecer correlações entre os coeficientes K , A , K' e A' que compõem as equações potenciais citadas anteriormente e as variáveis tensão-desvio e umidade, com base em maior número de materiais.
- 2 - Verificar se o modelo bi-linear que correlaciona o módulo resiliente com a intensidade de tensão-desvio é representativo para outros tipos de argila, e em que condições de compactação.
- 3 - Analisar a relação entre a tensão-desvio repetida e a deformação axial permanente acumulada após 10000 aplicações de carga para vários tipos de solo.
- 4 - Pesquisar para várias argilas a relação entre deformação axial permanente acumulada após 10000 aplicações de carga e CBR tal que se possa estabelecer uma correlação entre esses dois parâmetros.
- 5 - Realizar ensaios não drenados de carga repetida em argilas saturadas para que se tenha um conhecimento mais profundo do desenvolvimento de pressão neutra em solos argilosos quando submetidos a um carregamento dinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARKSDALE, R.D. - "Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials", Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - University of Michigan - 1972.
2. BROWN, S.F. and PELL, P.S. - "A Fundamental Structural Design Procedure for Flexible Pavements", Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - University of Michigan, 1972.
3. BALIGH, M.M. and LEVADOUX, J.N. - "Consolidation Theory for Cyclic Loading" - Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers - Vol. 104, GT4 - April, 1978.
4. DORMAN, G.M. - "The Extension to Practice of the Fundamental Procedure for a Design of Flexible Pavements" - Proceedings of First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - University of Michigan - 1962.
5. DORMAN, G.M. and METCALF, C.T. - "Design Curves for Flexible Pavements Based on Layered System Theory" - Highway Research Board, Record, nº 71, 1965.
6. FOSTER, C.R. - "Reduction in Soil Strength with Increase in Density" - Trans. ASCE, vol. 120 - 1955.
7. HICKS, R.G. - "Factors Influencing the Resilient Properties

- of Granular Materials" - Institute of Transportation and Traffic Engineering - University of California - May, 1970.
8. KAWAKANI, F. and OGAWA, G. - "Strength and Deformation of Compacted Soil Subjected to Repeated Stress Applications"- Sixth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Canada, 1965.
 9. MITCHELL, J.K. - "Fundamental Aspects of Tixotropy in Soils" Journal, Soil Mechanics and Foundations Division - ASCE, Vol. 86, SM 3 - June, 1960.
 10. MONISMITH, C.L.; OGAWA, N. and FREEME, C.R. - "Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading" - Paper prepared for presentation at the 54th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC - January, 1975.
 11. PELL, P.S. and BROWN, S.F. - "The Characteristics of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures" - Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - University of Michigan - 1972.
 12. PINTO, C.S. - "Equipamento Reduzido para Moldagem de Corpos-de-prova de Solo-Aditivos" - Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 87-GTM-65.01, 1965.
 13. PREUSSLER, E.S. - "Ensaio Triaxiais Dinâmicos de um Solo Arenoso" - Tese, M.Sc., COPPE-UFRJ, 1978.
 14. RAYMOND, G.P.; GASKIN, P.N. and ADDO-ABED, F.Y. - "Repeated

Compressive Loading of Leda Clay" - Canadian Geotechnical Journal - Vol. 16, number 1 - February, 1979.

15. SEED, H.B.; LUNDGREN, R. and CHAN, C.K. - "Effect of Compactatin Method on Stability and Swell Pressure of Soils" 33th Annual Meeting of HRB, Washington DC, Bulletin 93 - January, 1954.
16. SEED, H.B. and MONISMITH, C.L. - "Some Relationship between Density and Stability of Subgrade Soils" - 33th Annual Meeting of HRB, Washington DC, Bulletin 93 - January, 1954.
17. SEED, H.B. and McNEILL, R.L. - "A Comparative Study of Soil Deformation in Normal Compression and Repeated Loading Tests" - Paper prepared for presentation at the 35th Annual Meeting of HRB, Washington DC - January, 1956.
18. SEED, H.B. and CHAN, C.K. - "Thixotropic Characteristics of Compacted Clays" - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 83, SM 4 - November, 1957.
19. SEED, H.B. and CHAN, C.K. - "Effect of Stress History and Frequency of Stress Aplication on Deformation of Clay Subgrades under Repeated Loading" - Proceedings of Highway Research Board, Vol. 37, 1958.
20. SEED, H.B.; McNEILL, R.L. and GUENIN, J. - "Increased Resistance to Deformation of Clay Caused by Repeated Loading" - Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, SM 2 - May, 1958.

21. SEED, H.B. and FEAD. J.W. - "Apparatus for Repeated Load Test on Soils" - American Society for Testing and Material, S.T.P. n° 254, 1959.
22. SEED, H.B. and CHAN, C.K. - "Effect of Duration of Stress Application on Soil Deformation under Repeated Loading" - Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering - Paris, 1961
23. SEED, H.B. and CHAN, C.K. - "Structure and Strength of Compacted Clays" - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division - ASCE, Vol. 85, SM 5, 1959.
24. SEED, H.B.; CHAN, C.K. and LEE, C.E. - "Resilience Characteristics of Subgrade Soils and their Relation to Fatigue Failure in Asphalt Pavements" - Paper prepared for presentation at the International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements - University of Michigan - August, 1962.
25. SEED, H.B.; MITRY, F.G.; MONISMITH, C.L. and CHAN, C.K. - "Prediction of Flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated Load Test" - Institute of Traffic and Transportation Engineering - University of California - Report TE 65.6 - 1967.
26. SOWEES, G.F. and KENNEDY III, C.M. - "Effect of Repeated Load Application on Soil Compactation Efficiency"- Highway Research Board, Washington D.C., Bulletin 93 - January, 1954.
27. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, NATIONAL RESEARCH COUNCIL - Washington DC - 1975. "Test Procedures for Characterizing

Dynamic Stress - Strain Properties of Pavement Material" -
Special Report 162, TRB, 1975.

28. TROLLOPE, D.H.; LEE, I.K. and MORRIS, J. - "Stresses and Deformation in Two-Layer Pavement Structures under Slow Repeated Loading" - Australian Road Research Board, Proceedings Vol.1, part 2 - 1962.
29. WILSON, N.E. and GREENWOOD, J.R. - "Pore Pressure and Strains after Repeated Loading of Saturated Clay" - Canadian Geotechnical Journal - Vol. 11 n° 2 - May, 1974.