

STT
10/08/98

Realização



DE PAVIMENTAÇÃO

PATROCÍNIO

ESTADUAL DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM
DO ESTADO DE SÃO PAULO

31º Reunião Anual de Pavimentação

26 a 30 de Outubro de 1998

São Paulo - SP

Brasil

Teatro Studium

ANAIIS - Volume 1

ÍNDICE GERAL

VOLUME 1

1º Sessão Técnica

MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO

1.01 - ESTUDO DO CONCRETO PARA O WHITETOPPING DA PISTA CIRCULAR EXPERIMENTAL DA DDTec-IPR .	
<i>Márcio Rocha Pitta / Hugo Nicodemo Guida / Luiz Carlos Grossi / Walter Pacheco Godinho</i>	<i>01</i>
1.02 - O POTENCIAL DE MISTURAS DE FOSFOGESSO E CIMENTO PARA USO COMO MATERIAL NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA.	
<i>Marcelo De Castro Takeda / Alexandre Benetti Parreira</i>	<i>14</i>
1.03 - ESTUDO DE SOLO ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE, EM LABORATÓRIO E PISTA EXPERIMENTAL, NA IMPLANTAÇÃO DO TRECHO RIO RUFINO / BR - 282, NA RODOVIA SC - 427 NO ESTADO DE SANTA CATARINA.	
<i>José Vidal Nardi</i>	<i>32</i>
1.04 - ADITIVOS ORGÂNICOS PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS. METODOLOGIA E TÉCNICAS ASSOCIADAS PARA AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS ORGANOMINERAIS - ESPECTROMETRIA NO INFRAREMELHO.	
<i>Rubens Brazetti / Felipe A A Domingues</i>	<i>47</i>
1.05 - ADITIVOS ORGÂNICOS PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS – MECANISMOS DE INTERAÇÕES ENTRE MATERIAIS ORGÂNICOS E MINERAIS.	
<i>Rubens Brazetti / Felipe A A Domingues</i>	<i>68</i>
1.06 - ADITIVOS ORGÂNICOS PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS – ESTUDOS EVIDENCIANDO AS INTERAÇÕES ENTRE MATERIAIS ORGÂNICOS E MINERAIS.	
<i>Rubens Brazetti / Felipe A A Domingues</i>	<i>89</i>
1.07 - EFEITO DA ADIÇÃO DO RESÍDUO "ÁGUA-DE-COLA" E CAL NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO.	
<i>Mario Monteiro Rolim / Wesley J.Freire</i>	<i>104</i>
1.08 - UTILIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE JUIZ DE FORA NO ESTUDO DE DOSAGEM DE PRÉ- MISTURADO A FRIO.	
<i>Geraldo Luciano De Oliveira Marques/Vinicius Machado Moreira/ Alex Magno Germano / Fabiana Nazareth Pereira / Danielle Reis Silva</i>	<i>120</i>
1.09 - COMPORTAMENTO DOS AGREGADOS ROCOSOS NAS RELAÇÕES DE ADERÊNCIA PNEU/PAVIMENTO, NO ESTADO DE SÃO PAULO.	
<i>Eduardo De Souza Fernandes/ Felipe Augusto Aranha Domingues</i>	<i>132</i>
1.10 - EFEITOS DA GRANULOMETRIA NO CONCRETO ASFÁLTICO PREPARADO PELO ENSAIO MARSHALL.	
<i>Leto Momm / Felipe Augusto Aranha Domingues</i>	<i>134</i>
1.11 - ESTUDO COMPARATIVO SOBRE RESULTADOS DE ENSAIOS TRAXIAIS COM APLICAÇÃO REPETIDA DE CARGAS.	
<i>John Kennedy Guedes Rodrigues / José Bernardes Felex / Glauco Pontes Filho</i>	<i>174</i>
1.12 - ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE DO ENSAIO DO MÓDULO RESILIENTE DE SOLO.	
<i>Carla Pereira Imbroisi / Laura Maria Goretti Da Motta</i>	<i>194</i>
1.13 - DYNMAS- UM SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA A ANÁLISE DO MÓDULO DINÂMICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS ENVELHECIDAS "IN SITU".	
<i>Osvaldo A. Fonseca</i>	<i>213</i>
1.14 - ESTUDO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MATERIAIS USADOS EM PAVIMENTAÇÃO.	
<i>Alexandre Benetti Parreira / Cássio Alberto Teoro Do Carmo / Flávio José Craveiro Cunto</i>	<i>233</i>
1.15 - ESTUDO DE DEFORMAÇÕES PERMANENTES EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM EMPREGO DE AGENTES DE RECICLAGEM ARX-1.	
<i>Alexandre Ricardo Peres / José Tadeu Baldo</i>	<i>248</i>
1.16 - DEFORMAÇÕES PERMANENTES EM MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA SEM INCORPORAÇÃO DE AGENTES DE RECICLAGEM.	
<i>Ricardo Luiz Garrido / José Tadeu Baldo</i>	<i>270</i>
1.17 - DEFORMAÇÕES PERMANENTES DE UM SOLO SUBMETIDO A UM ENSAIO TRIAXIAL CÍCLICO.	
<i>Carlos Alexandre B. de Carvalho / Manoel Henrique Alba Sória / Alexandre Benetti Parreira</i>	<i>288</i>

31ª Reunião Anual de Pavimentação

São Paulo - SP

Outubro de 1998

**DEFORMAÇÕES PERMANENTES DE UM SOLO SUBMETIDO A UM ENS.
TRIAXIAL CÍCLICO**

Autores:

Carlos Alexandre Braz de Carvalho

Manoel Henrique Alba Sória

Alexandre Benetti Parreira

}

SYSNO 109772
PROD 001516

ACERVO EESC

DEFORMAÇÕES PERMANENTES DE UM SOLO SUBMETIDO A UM ENSAIO TRIAXIAL CÍCLICO

Carlos Alexandre Braz de Carvalho¹ /Departamento de Engenharia Civil – UFV
Manoel Henrique Alba Sória² /Departamento de Transportes - EESC - USP
Alexandre Benetti Parreira³ /Departamento de Transportes - EESC - USP

RESUMO

Este trabalho representa uma das etapas de uma tese de doutorado, já concluída, desenvolvida no Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP e que teve como principal objetivo estudar, em laboratório, as deformações permanentes de amostras de solo submetidas a carregamentos repetidos. Além do procedimento que foi utilizado para a realização do ensaio triaxial cíclico, vários gráficos ilustrando a variação da deformação axial (elástica e permanente), em função do número e amplitude da tensão desvio axial aplicada encontram-se também neste trabalho.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos de deformação permanente, em laboratório, são importantes para a estimativa dos afundamentos das trilhas-de-roda em pavimentos flexíveis. O **afundamento das trilhas-de-roda** é um tipo de defeito bastante comum em nossas estradas e que se manifesta na superfície de rolamento do pavimento nos locais onde as rodas dos veículos, principalmente os comerciais, transitam. A sua origem está associada ao acúmulo das deformações permanentes nas camadas que compõem a estrutura dos pavimentos, devido às solicitações dinâmicas dos veículos e às influências ambientais. Inúmeros trabalhos já foram realizados objetivando estudar a evolução das deformações permanentes em pavimentos flexíveis, como por exemplo: BARKSDALE (1972), MONISMITH, C.L.; OGAWA, N.; FREEME, C.R. (1975), CHOU (1977), SVENSON (1980), PUMPHREY e LENTZ (1986), CARDOSO (1987), MOTTA (1991), BAYOMY e AL-SANAD (1993), entre outros.

¹ Doutor em Transportes. Professor do Departamento de Engenharia Civil - UFV - Viçosa - MG

² Doutor em Transportes. Professor do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP

³ Doutor em Engenharia Civil - Geotecnia. Professor do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP

2 OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo determinar, em laboratório, através do ensaio triaxial com pressão confinante constante e com tensão desvio axial cíclica, as deformações permanentes de amostras de solo utilizadas na construção de pavimentos flexíveis do tipo baixo custo do Estado de São Paulo.

3 SOLO ESTUDADO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O solo utilizado neste trabalho é proveniente de uma jazida (jazida 1) localizada na rodovia SCA-040, que liga as cidades de São Carlos a Itirapina, no estado de São Paulo. Esta jazida encontra-se a 4,3 km do trevo que interliga a rodovia anteriormente citada à rodovia SP-215. Foram coletados cerca de 250 kg de solo para a realização de todos os ensaios previstos para este trabalho. Este solo foi identificado por três métodos de classificação de solo, ou seja, HRB, USCS e MCT. Os resultados obtidos foram o seguintes, respectivamente: A-2-4 (0), SC e LA'. Os parâmetros encontrados de classificação do solo pelo Método MCT foram os seguintes: $e' = 1,04$ e $c' = 1,27$.

A Tabela 1 contém os resultados dos ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade e peso específico dos sólidos do solo da jazida 1. A Tabela 2 contém os valores dos seus pesos específicos aparentes secos nos seguintes teores de umidade: h_{opt} , h_{CBRmax} e $h_{opt} + 2\%$, respectivamente, na energia intermediária.

Para estudo das deformações permanentes, em laboratório, utilizou-se a Prensa MTS ("Material Test System"), disponível no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Na preparação das amostras de solo, para serem submetidas ao ensaio triaxial cíclico, sob condições drenadas, utilizaram-se as energias de compactação normal e intermediária e as tensões reproduzidas no laboratório foram estimadas utilizando-se o programa ILLI-PAVE. Devido a problemas de centralização da câmara triaxial no pistão da prensa, foram apresentados neste trabalho somente os resultados obtidos das deformações permanentes, correspondentes à energia intermediária.

Os teores de umidade de moldagem das amostras utilizados neste estudo foram os seguintes: teor de umidade ótimo (h_{opt}), teor de umidade correspondente ao do CBR máximo (h_{CBRmax}) e teor de umidade ótimo +2% ($h_{opt} + 2\%$). Esses teores de umidade foram obtidos a partir das relações encontradas entre umidade, densidade e CBR, quando da obtenção das curvas de compactação e CBR numa dada energia de compactação.

Em síntese, o procedimento utilizado para a realização do ensaio triaxial cíclico foi o seguinte:

- preparação e compactação do corpo-de-prova;
- extração do corpo-de-prova do molde cilíndrico de compactação;
- envolvimento do corpo-de-prova numa embalagem plástica para evitar perda de umidade e, em seguida, colocação do mesmo na câmara úmida, até início do ensaio;
- colocação da membrana de borracha no corpo-de-prova;
- colocação da pedra porosa na base da câmara triaxial (ensaio drenado) e, em seguida, o corpo-de-prova sobre a pedra porosa;
- colocação do cabeçote no topo do corpo-de-prova. A célula de carga apoia na superfície superior do cabeçote;
- fixação lateral do par de alças no corpo-de-prova para recebimento dos LVDTs. Uma das alças foi fixada na amostra a 2,5 cm da base. A outra, a 2,5 cm do topo;
- colocação dos LVDTs no par de alças;
- fixação e ajuste dos LVDTs nas alças para obtenção do registro dos deslocamentos axiais;
- medição e anotação da distância vertical entre as alças. Esta distância corresponde à altura de referência do corpo-de-prova para cálculo da deformação específica, quer seja elástica ou permanente;
- enchimento da câmara triaxial de silicone;
- posicionamento correto da esfera localizada entre a superfície superior do pistão da célula de carga e o pistão da prensa MTS, a fim de obter um perfeito ajustamento deste conjunto;
- aplicação da pressão estática de confinamento a ser utilizada no ensaio e, posteriormente, anotação das leituras de deslocamentos axiais registradas nos LVDTs. Deve-se aguardar um determinado período de tempo (aproximadamente 30 minutos) antes de iniciar o ensaio, para verificar se as leituras anteriormente observadas mantiveram-se as mesmas. Iniciar o ensaio somente após a estabilização das leituras nos LVDTs. Anotar estas leituras, pois elas representam o ponto de partida para as medidas dos deslocamentos axiais na amostra;
- número de ciclos de carga previsto para o ensaio igual 10.000, numa frequência de 60 aplicações por minuto (1 hertz) e duração do carregamento igual a 0,1 segundos.

As amplitudes de tensão adotadas no ensaio foram obtidas de uma investigação sobre a estimativa das tensões nas camadas de um pavimento para estudo das deformações permanentes de seus materiais constituintes, em laboratório.

As Figuras 1 a 9 ilustram os resultados obtidos da relação entre tensão desvio axial e deformação para o solo da jazida 1 correspondentes a 100, 1.000 e 10.000 ciclos aplicação de carga. As deformações axiais apresentadas nas figuras anteriormente citadas foram obtidas a partir da deformação acumulada anterior ao primeiro ciclo de tensão.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Duas investigações dos resultados obtidos das deformações serão apresentadas neste trabalho. Ver Figuras 10, 11 e 12. Uma delas referente aos resultados obtidos das deformações permanentes a partir da deformação acumulada anterior ao primeiro ciclo da tensão desvio axial aplicada. Esta deformação acumulada, anterior ao primeiro ciclo da tensão desvio axial aplicada, foi obtida através das leituras registradas nos dois LVDTs, após aplicação da pressão confinante utilizada no ensaio. A outra, refere-se aos resultados obtidos das deformações permanentes a partir da menor deformação observada no centésimo ciclo de aplicação da tensão desvio axial. Esta última investigação, fundamentada no trabalho de HORNYCH, CORTÉ e PAUTE (1993), procura elucidar o efeito do condicionamento da amostra nos resultados do ensaio.

A Figura 10 ilustra a variação das deformações permanentes dos corpos-de-prova 7, 8, 11 e 12, em função do número de aplicações da tensão desvio, na energia intermediária. Observa-se, nesta figura, que os corpos-de-prova moldados com teores de umidade próximos da umidade ótima (h_{opt}) e da umidade correspondente à do CBR máximo ($h_{CBRmáx}$) e submetidos a um mesmo estado de tensão, as deformações permanentes obtidas foram bastante semelhantes.

A Figura 11 ilustra os resultados das deformações permanentes do corpo-de-prova 16, em função do número de aplicações da tensão desvio, na energia intermediária. Esta figura ilustra, com mais destaque, os efeitos do estado de tensão, da umidade e do condicionamento das amostras na deformação permanente dos solos.

A Figura 12 ilustra também a variação das deformações permanentes dos corpos-de-prova 10, 13, 17 e 18, em função do número de aplicações da tensão desvio,

na energia intermediária. Considerando-se as deformações permanentes obtidas a partir da deformação permanente acumulada no centésimo ciclo de tensão, as amostras de solo moldadas com teores de umidade próximos ao da umidade ótima + 2% ($h_{ot} + 2\%$) e submetidas a um mesmo estado de tensão deformaram pouco mais do que as amostras desses mesmos solos quando compactadas com teores de umidade próximos da h_{ot} e da $h_{CBRmáx}$.

As deformações permanentes obtidas a partir da deformação acumulada no centésimo ciclo de aplicação da tensão desvio, a exceção do corpo-de-prova 17, foram inferiores às deformações permanentes obtidas a partir da deformação acumulada anterior ao primeiro ciclo de aplicação da tensão desvio. Ver Figuras 10, 11 e 12.

5 CONCLUSÕES

Uma fase de condicionamento das amostras de solo necessita de uma maior investigação para o estudo das deformações permanentes de solos, em laboratório, utilizando-se o ensaio triaxial cíclico.

O crescimento mais significativo das deformações permanentes ocorreu nos 500 primeiros ciclos de tensão. A partir desse limite, as deformações permanentes continuaram ainda a crescer, mas de uma maneira menos acentuada e mais uniforme. Portanto, os primeiros ciclos de carregamento são importantes nos estudos de deformação permanente.

Considerando-se os teores de umidade e as amplitudes de tensão utilizados na pesquisa, as deformações permanentes observadas não foram significativas para 10^4 solicitações do eixo padrão de 8,2 toneladas. A maior deformação permanente observada foi 0,0093 para o corpo-de-prova 16, Figura 11. Para essa deformação, considerando-se uma espessura da camada de um pavimento de 15 cm, constituída pelo solo investigado nesta pesquisa, o deslocamento vertical previsto foi de, aproximadamente, 1,4 mm. Este valor, para uma camada de solo do pavimento, submetida a 10.000 ciclos de aplicação do eixo padrão de 8,2 toneladas, não compromete o desempenho do pavimento sob o ponto de vista da deformação permanente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARKSDALE, Richard D. (1972). *Laboratory evaluation of rutting in base course materials*. Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - University of Michigan, p.161-174.
- BAYOMY, Fouad M.; AL-SANAD, Hassan A. (1993). *Deformation characteristics of subgrade soils in Kuwait*. Transportation Research Record, Washington, DC, n. 1406, p. 77-87.
- CARDOSO, Samuel H. (1987). *Procedure for flexible airfield pavement design based on permanent deformation*. Maryland, 405 p. Tese (Doutorado) - University of Maryland.
- CHOU, Yu T. (1977). *Analysis of permanent deformations of flexible airport pavements*. Federal Aviation Administration, Washington, DC, 20591. 116 p.
- HORNYCH, Pierre; CORTÉ, Jean-François; PAUTE, Jean-Louis (1993). *Étude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Pontes et Chaussées, n. 184, p. 45-55, mars-avril.
- MONISMITH, C.L.; OGAWA, N.; FREEME, C.R. (1975). *Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading*. Transportation Research Record, Washington, DC, n. 537, p. 01- 17.
- MOTTA, Laura M.G. (1991). *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. Rio de Janeiro, 366 p. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PUMPHREY, Norman D.; LENTZ Rodney W. (1986). *Deformation analyses of Florida highway subgrade sand subjected to repeated load triaxial tests*. Transportation Research Record, Washington, DC, n. 1089, p. 49-56.
- SVENSON, Margareth (1980). *Ensaios triaxiais dinâmicos em solos argilosos*. Rio de Janeiro, 135 p. Dissertação (Mestrado) - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Tabela.1: Resultados dos ensaios: granulometria, limites de liquidez e plasticidade e peso específico dos sólidos

ensaios		material: solo da jazida 1
limite de liquidez		28
método do ensaio: M 4-61 *		
limite de plasticidade:		18
método do ensaio: M 5-61 *		
índice de plasticidade		10
peso específico dos Sólidos (g/cm ³)		2,681
método do ensaio: M 3-61 *		
granulometria		porcentagem que passa em peso
método do ensaio: M 6-61 *		
Peneira		
número	abertura (mm)	
4	4,76	100
10	2,00	99,97
16	1,19	99,02
30	0,59	94,62
40	0,42	88,00
50	0,297	79,56
100	0,149	46,94
200	0,074	29,00

* DER-SP (1991)

Tabela 2: Peso específico aparente seco (γ_d) do solo da jazida 1 nos seguintes teores de umidade: h_{ot} , h_{CBRmax} e $h_{ot} + 2\%$, respectivamente

Energia de Compactação	Solo da Jazida 1	
	h%	γ_d
Intermediária	10,10	2,020
	9,25	1,935
	12,10	1,950

Tensão X Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 7)

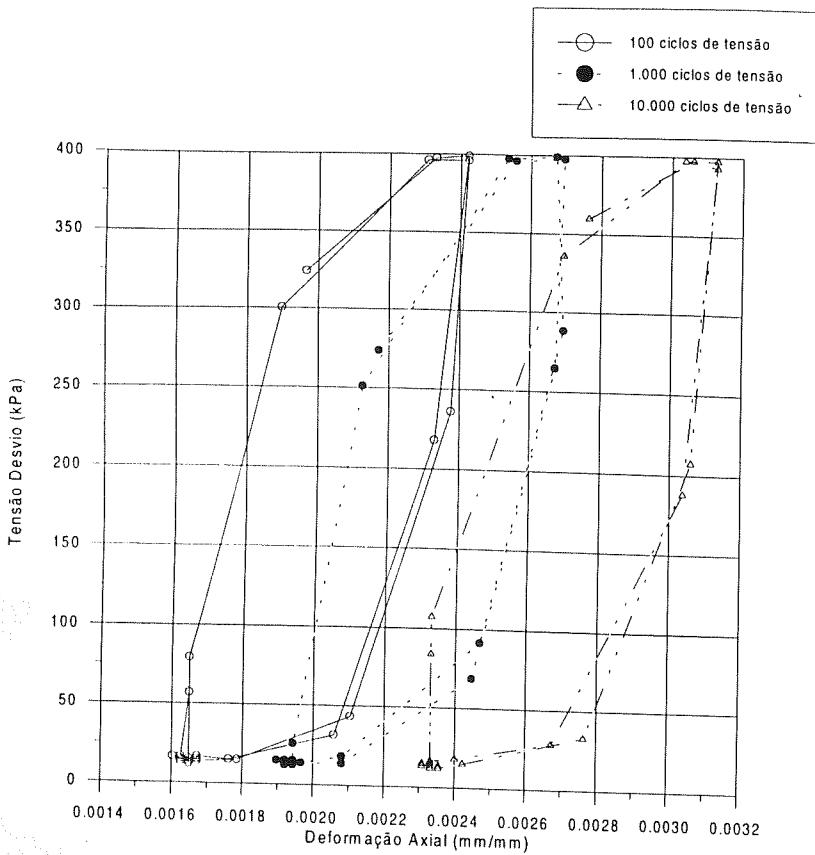


FIGURA 1: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 7)

Tensão X Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 8)

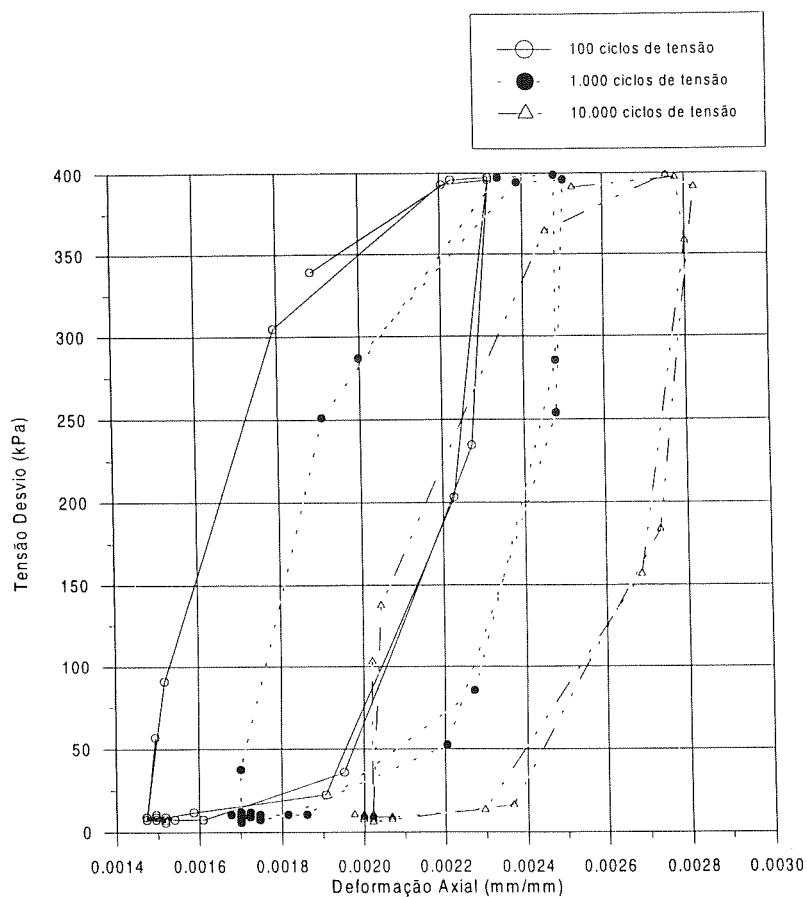


FIGURA 2: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 8)

Tensão X Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 10)

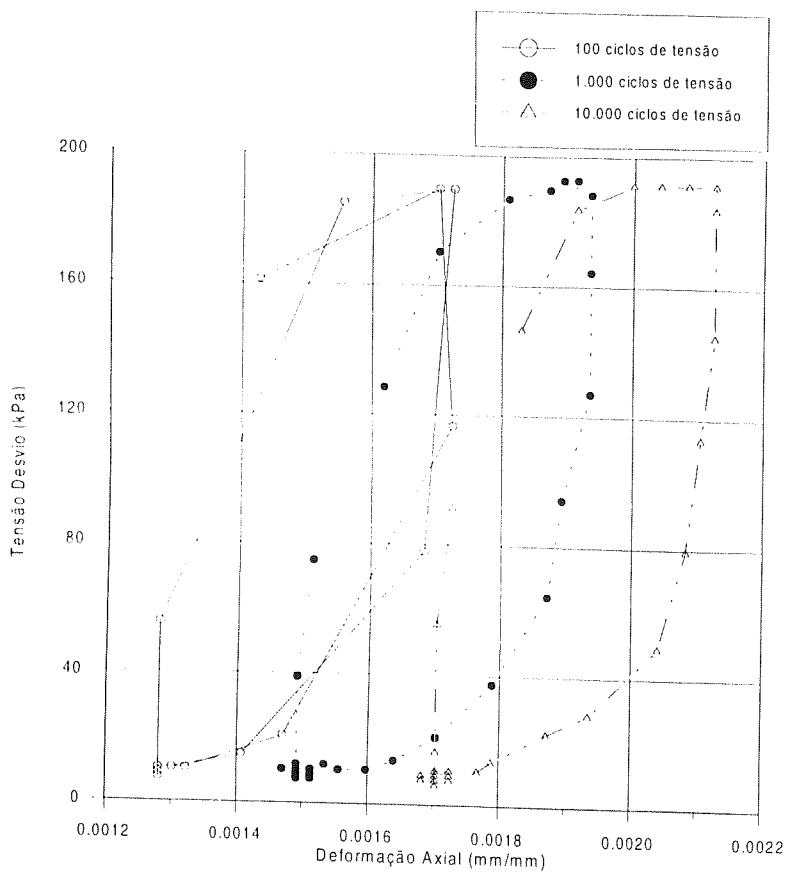


FIGURA 3: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 10)

Tensão X Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 11)

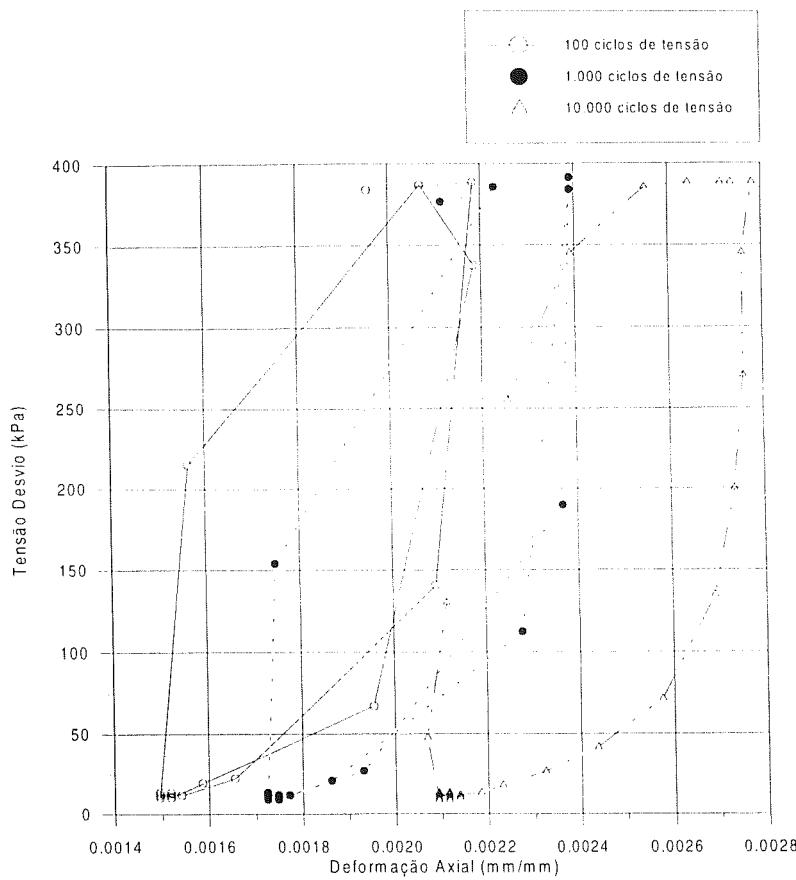


FIGURA 4: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 11)

Tensão X Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 12)

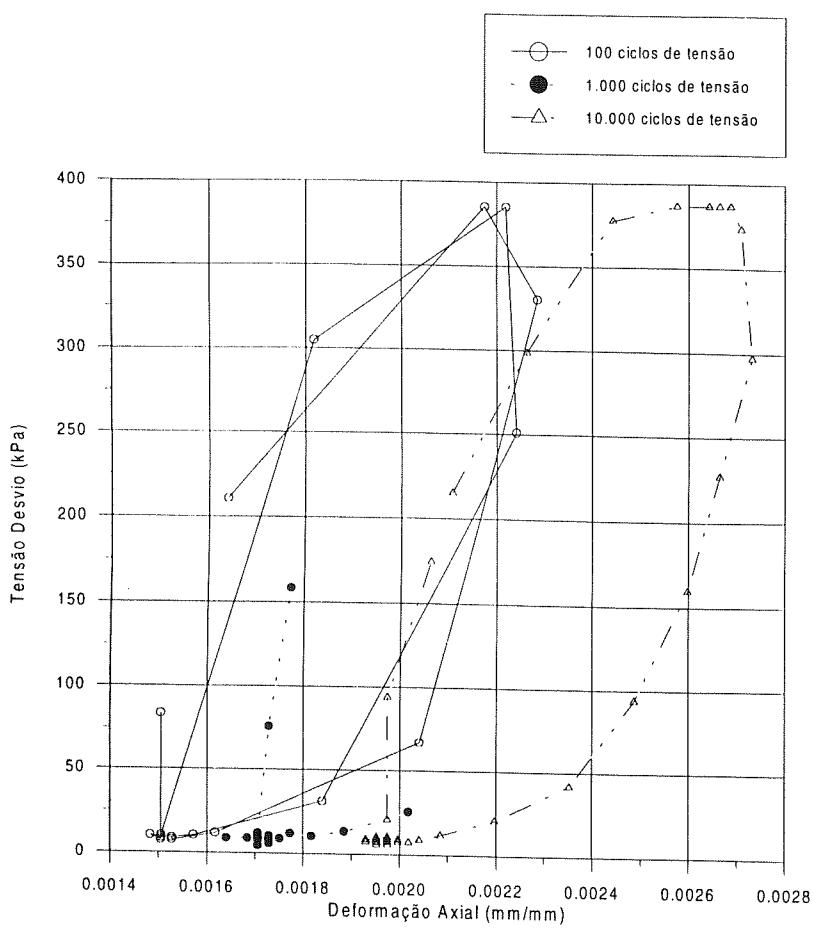


FIGURA 5: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 12)

Tensão x Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 13)

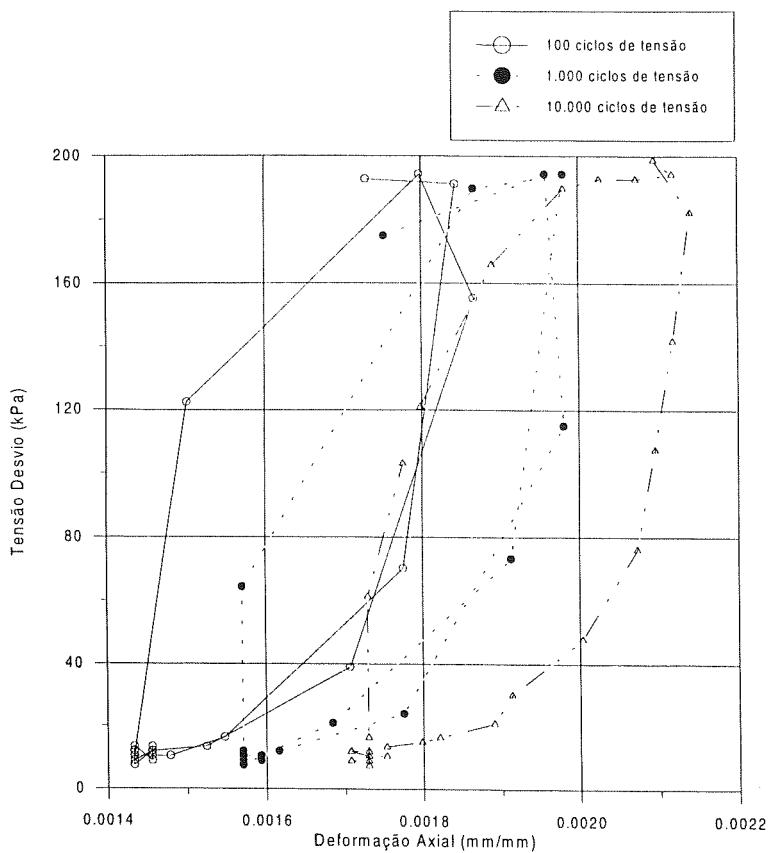


FIGURA 6: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 13)

Tensão x Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 16)

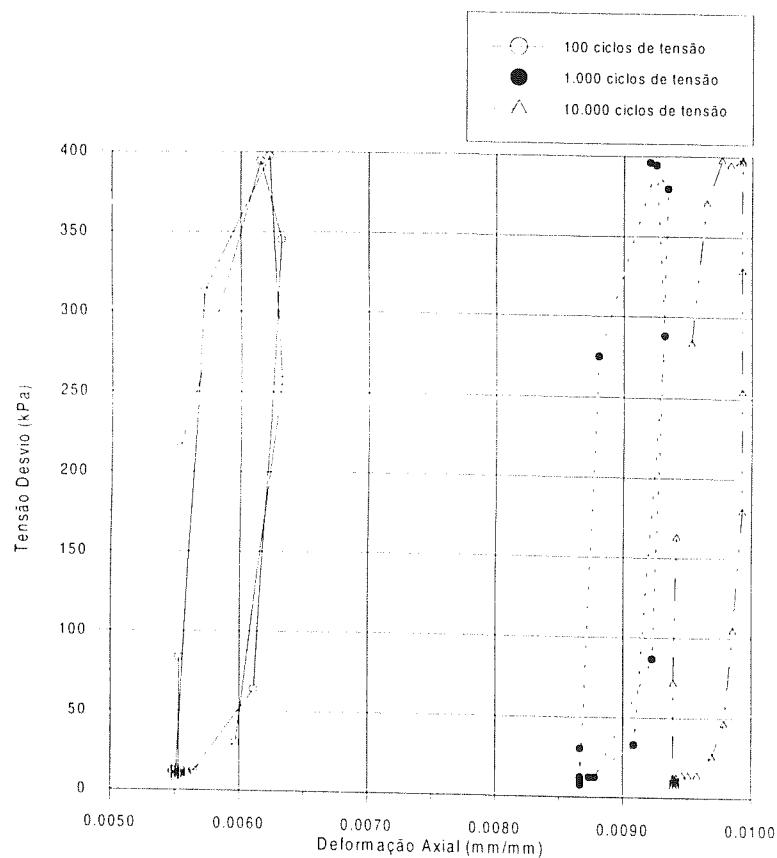


FIGURA 7: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 16)

Tensão X Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 17)

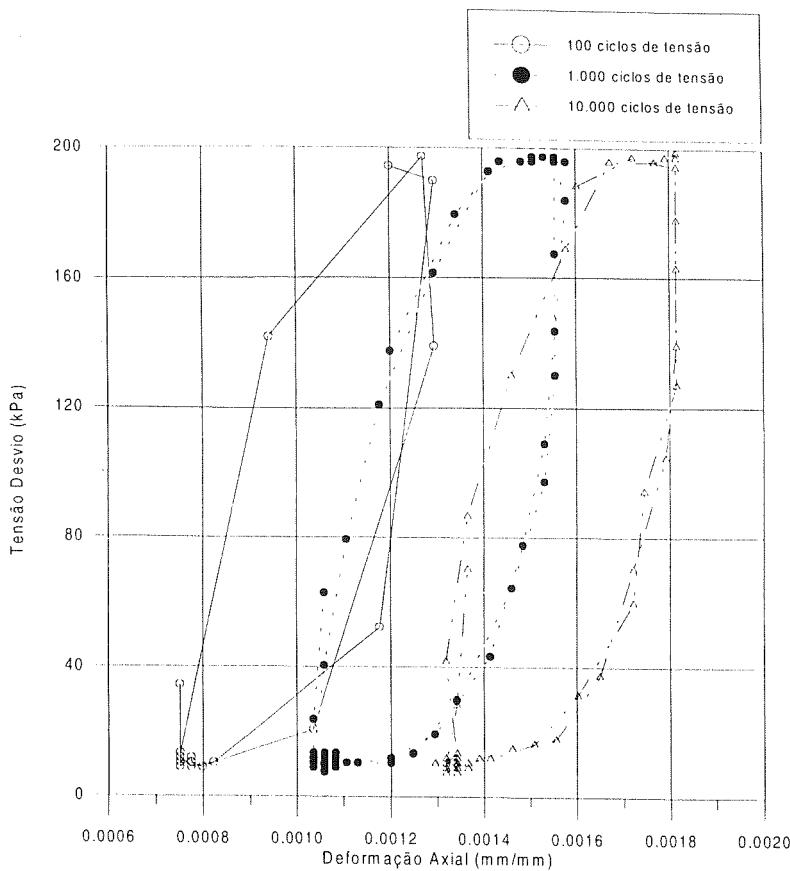


FIGURA 8: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 17)

Tensão X Deformação
(solo da jazida 1: corpo-de-prova 18)

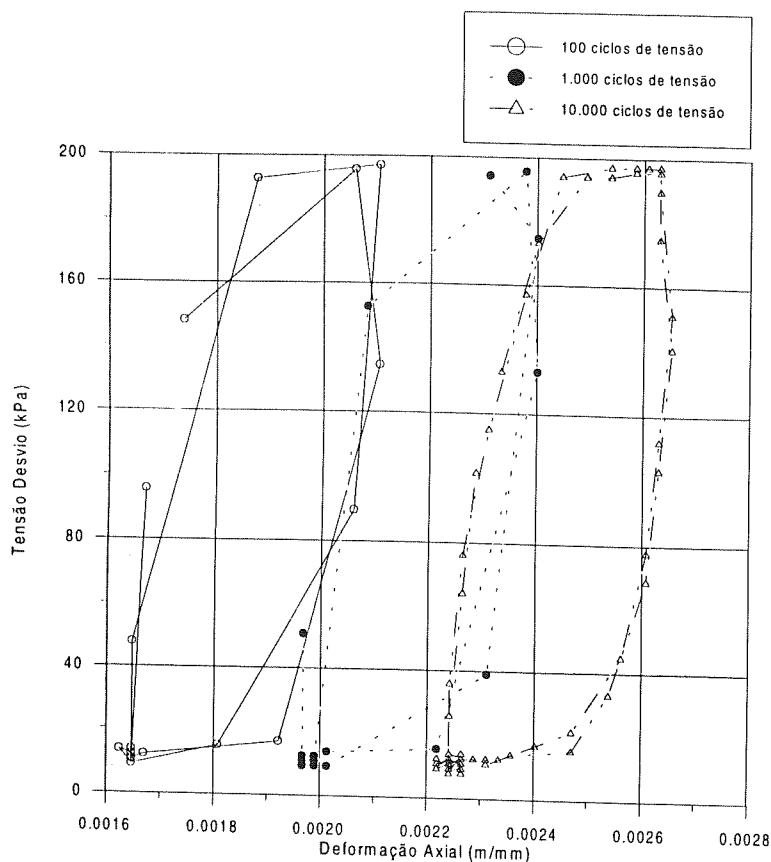


FIGURA 9: Relação Entre Tensão Desvio e Deformação Axial em Alguns Ciclos de Carregamento (Solo da Jazida 1 - Corpo-de-Prova 18)

**Deformação Permanente X Número de Aplicações da Tensão Desvio
(Solo da Jazida 1 - Energia Intermediária)**

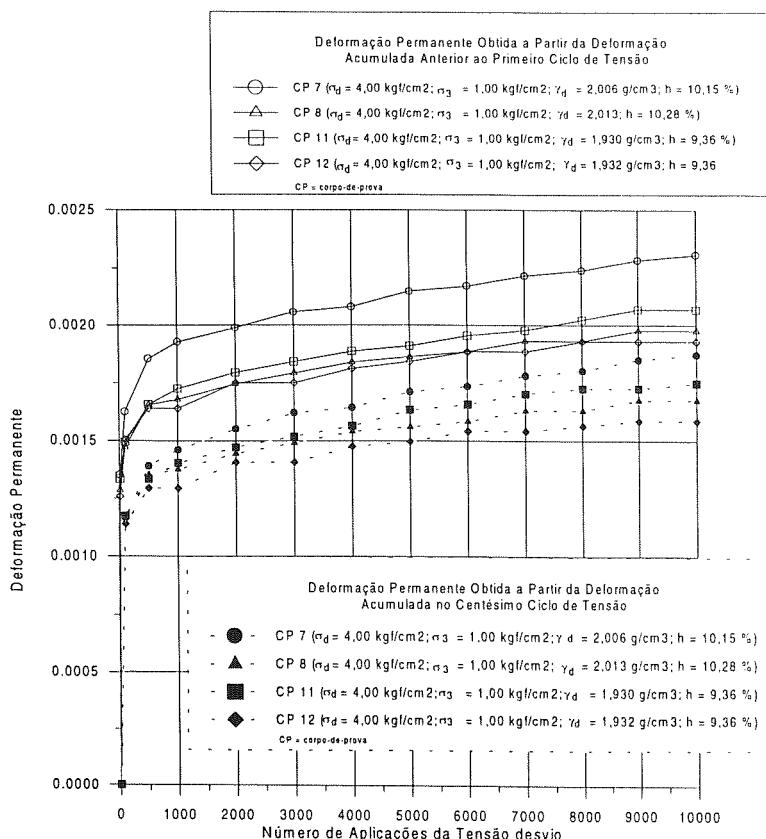


FIGURA 10: Variação da Deformação Permanente do Solo da Jazida 1 em Função do Número de Aplicações da Tensão Desvio - Energia Intermediária (Corpos-de-Prova com Teores de Umidade Abaixo do Teor Ótimo e Próximos ao do Teor Ótimo)

**Deformação Permanente X Número de Aplicações da Tensão Desvio
(Solo da Jazida 1 - Energia Intermediária)**

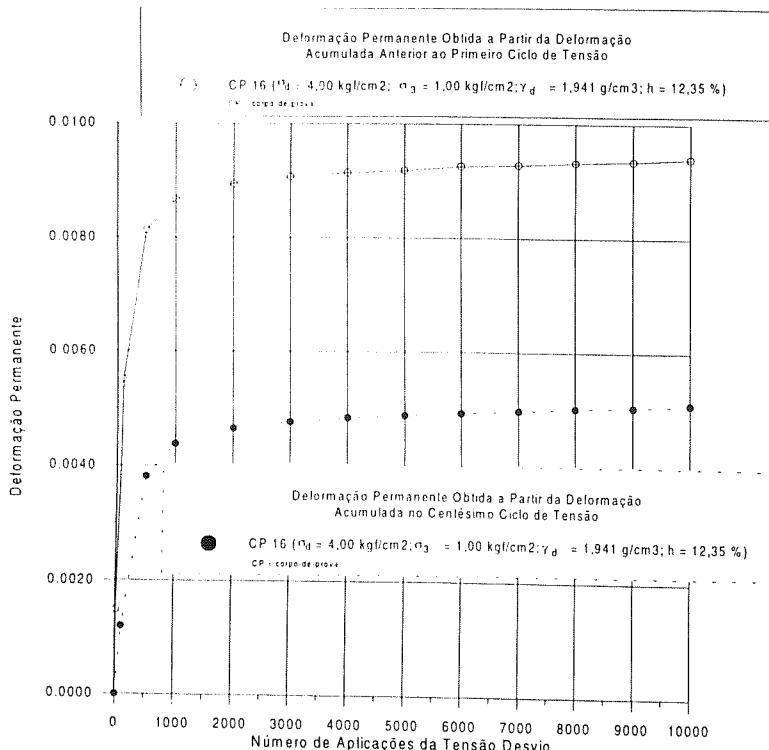


FIGURA 11: Variação da Deformação Permanente do Solo da Jazida 1 em Função do Número de Aplicações da Tensão Desvio - Energia Intermediária (Corpo-de-Prova com Teor de Umidade Próximo ao do Teor Ótimo + 2%)

**Deformação Permanente x Número de Aplicações da Tensão Desvio
(Solo da Jazida 1 - Energia Intermediária)**

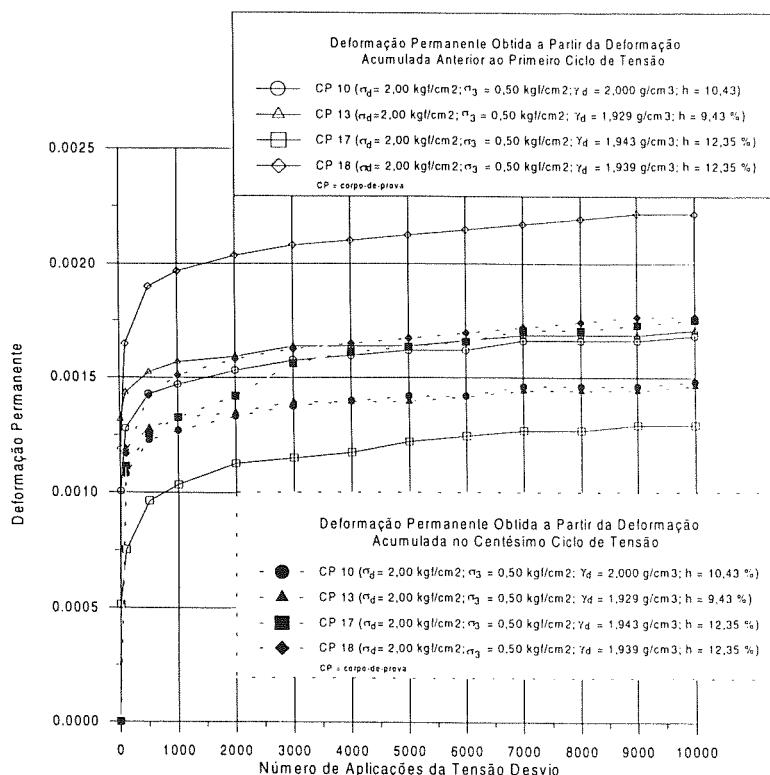


FIGURA 12: Variação da Deformação Permanente do Solo da Jazida 1 em Função do Número de Aplicações da Tensão Desvio - Energia Intermediária (Corpos-de-Prova com Teores de Umidade Abaixo do Teor Ótimo e Próximos ao do Teor Ótimo e do Teor Ótimo + 2%)