

MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO SOLO DA CIDADE DE SÃO PAULO COM VISTA À ESCAVAÇÃO DO METRÔ - LINHA PAULISTA

PARREIRA, A.B.

Prof. Assistente, EESC-USP

AZEVEDO, R.F.

Prof. Associado, PUC/RJ

ZORNBERG, J.G.

Assist. Pesquisa, PUC/RJ

RESUMO

Analisa-se, neste trabalho, a aplicação do modelo elastoplástico de Lade na previsão do comportamento da argila vermelha e do solo variegado da cidade de São Paulo em trajetórias de tensões predominantes em obras de escavação. São descritos os ensaios realizados e apresentam-se características e propriedades índices dos materiais em questão.

1. INTRODUÇÃO

Constata-se uma demanda cada vez maior na implantação de obras enterradas em regiões densamente povoadas. Nestes locais, os deslocamentos causados pela obra geotécnica devem ser previstos com precisão, visto que interferem na segurança das edificações circunvizinhas e a correção de eventuais danos que lhes sejam causados implicam em soluções, quase sempre, extremamente onerosas.

O método dos elementos finitos, já há algum tempo, tem sido usado na simulação do comportamento de escavações, possibilitando a previsão de deslocamentos e tensões. Embora constituindo-se numa ferramenta de indiscutíveis recursos, este método só fornecerá resultados confiáveis se incorporar um modelo constitutivo que realmente traduza o comportamento do solo segundo as trajetórias de tensões que ocorrem no campo.

Azevedo (1983) observa que a maioria das previsões realizadas através de métodos numéricos utiliza modelos elásticos, lineares ou não, cuja eficiência deixa muito a desejar quando comparada a de um modelo elasto-plástico.

Este artigo descreve o trabalho realizado com o intuito de se estudar a adequação do modelo elasto-plástico de Lade (1977,1979) na previsão do comportamento da argila vermelha e do solo variegado da cidade de São Paulo, tendo em vista a construção da Linha Paulista do Metrô. Além de ensaios de caracterização e adensamento, foram realizados ensaios de compressão hidrostática (HC), triaxiais convencionais (CTC), triaxiais de descarregamento lateral (RTC) e de descarregamento axial (RTE). A reprodução dos ensaios (RTC) e (RTE) pelo modelo adotado serviu para aferir a sua eficiência nas trajetórias predominantes numa escavação.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ARGILA VERMELHA E DO SOLO VARIEGADO

O material analisado é proveniente do Poço Experimental Gazeta, perfurado na Av. Paulista. Foram retirados blocos indeformados em quatro níveis: 3,5 m, 6,5 m, 9,5 m e 12,5 m, tomados a partir da superfície do terreno (812 m). Os dois primeiros níveis correspondem à argila vermelha porosa. Trata-se o primeiro deles, de uma argila de consistência mole a média (SPT 2 a 3) e, o segundo, de uma argila de consistência média (SPT = 7). Os dois níveis seguintes correspondem ao solo variegado, de consistência rija a dura (SPT 17 a 21). O lençol freático encontra-se a 10 m de profundidade, ou seja, ligeiramente abaixo do penúltimo dos níveis em questão. Cabe observar que nesta região a camada de argila vermelha rija apresenta-se muito pouco espessa, inclusive não aparecendo em alguns pontos, razão pela qual não foi incluída no presente estudo.

Propriedades Índices

Na Tabela 1 estão apresentados os índices físicos, umidade (w), índice de vazios (e), grau de saturação (Sr), massa específica (ρ), massa específica dos grãos (ρ_s) e índices de consistência (LL e IP). E complementarmente, apresenta-se a composição granulométrica e a pressão de pré-adensamento (pa) dos solos em cada nível. Os índices físicos resultam da média dos valores obtidos da totalidade dos ensaios realizados.

Tabela 1 : Propriedades Índices

Prof (m)	w (%)	e	Sr (%)	ρ (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	LL (%)	IP (%)	Areia	Silte (%)	Argila	pa (kPa)
3,5	41,5	1,62	69,6	1,47	2,72	78,8	29,3	5	16	79	127,5
6,5	41,0	1,52	72,4	1,50	2,68	73,8	25,7	5	28	67	196,0
9,5	36,5	1,04	92,2	1,76	2,63	89,5	42,1	3	3	94	760,0
12,5	37,1	1,02	96,8	1,81	2,65	90,8	43,4	10	1	89	814,0

3. ENSAIOS TRIAXIAIS (MÉTODOS DE ENSAIO)

Os corpos de prova, com altura de 7,62 cm e diâmetro de 3,81 cm (3,0 x 1,5 pol.), foram talhados a partir dos blocos indeformados.

Argila Vermelha

Este material foi ensaiado na sua umidade natural. Evitou-se a saturação para não modificar o seu comportamento real, tendo em vista tratar-se, segundo Vargas (1972), de um solo potencialmente colapsível. Este procedimento implica em considerar-se as tensões totais medidas, coincidentes com as tensões efetivas, aproximação esta justificada por Kupper (1983), que mostra ser muito pequeno o erro introduzido.

Os ensaios convencionais de compressão (CTC), drenados, foram realizados numa prensa de deformação controlada (vel. = 0,004 mm/min) equipada com uma célula de carga do tipo "Surrey", de baixa deformabilidade. Determinou-se a variação volumétrica, indiretamente, através da medida da deformação radial da amostra, feita internamente à câmara.

Os ensaios de descarregamento lateral (RTC) foram realizados num equipamento de tensão controlada do tipo "Bishop-Wesley", em estágios de 50 min. de duração, tempo suficiente para se garantir a estabilização da variação volumétrica. Esta variação foi determinada indiretamente através da medida do fluxo de água na câmara, já que suas dimensões não permitiam instrumentação no seu interior. Cuidou-se, entretanto, de calibrar-se a influência da temperatura, duração e tensões em cada estágio da aplicação da carga.

Solo Variegado

Saturou-se o material por contra-pressão previamente ao cisalhamento drenado dos corpos de prova.

Os ensaios convencionais de compressão (CTC) foram realizados no equipamento de deformação controlada já mencionado. Foi utilizado, para os ensaios de descarregamento lateral (RTC), um equipamento desenvolvido na PUC-RJ, adaptável às prensas comuns, que permite o controle das tensões aplicadas. Os estágios tiveram a duração de 50 min., tempo suficiente para a estabilização da variação volumétrica. Os ensaios de descarregamento axial (RTE) foram realizados numa prensa de deformação controlada, sendo que se desenvolveu instrumental capaz de garantir que a aplicação do alívio de tensões se desse perfeitamente centrada.

Mediu-se a variação volumétrica em todos os ensaios através de bureta graduada. Nos ensaios de descarregamento lateral e axial, em razão das pequenas deformações envolvidas, só foi possível obter a deformação vertical através de instrumentação interna. Utilizou-se um par de eletro-níveis para este fim.

4. MODELO DE LADE

O modelo elaborado por Lade (1977) é do tipo elasto-plástico. Nesta categoria de modelos os incrementos de deformação são divididos em parcelas elásticas e plásticas, sendo que a parte elástica relaciona-se linearmente com o incremento de tensão. A componente plástica, por sua vez, é dividida em duas outras componentes: uma colapsível e outra expansível, cada qual apresentando a sua respectiva função de plastificação, lei de fluxo e lei de endurecimento. A primeira destas componentes colapsível, é calculada através de uma lei de fluxo associada e a segunda, expansiva, é calculada através de uma lei de fluxo não associada e é a componente que controla a ruptura.

O modelo em questão foi desenvolvido originalmente para solos não-coesivos, mas posteriormente foi generalizado de maneira a englobar também o comportamento das argilas normalmente adensadas (Lade, 1979). Como os materiais em estudo são argilas pré-adensadas, há necessidade de se considerar alguns aspectos adicionais: em um solo pré-adensado as superfícies de plastificação colapsível (fc) e a de plastificação expansiva (fp) já se encontram inicialmente expandidas, sendo que a localização destas superfícies depende basicamente das tensões induzidas pelo pré-adensamento. Assim, na reconstituição das curvas, considerou-se que só ocorrerá incremento de deformação plástica quando o nível de tensões for suficientes para que as superfícies de plastificação acionadas (fc) e (fp) se situem além das superfícies originais (fc)o e (fp)o. Maiores detalhes deste modelo são descritos em Azevedo (1983, 1986), e Zornberg (1989).

Calibração

A calibração do modelo de Lade é feito a partir de um ensaio de compressão hidrostática e de no mínimo dois ensaios triaxiais convencionais (CTC) drenados, com medida da variação volumétrica. No presente estudo, visando uma melhor representatividade, optou-se por utilizar o resultado de todos os ensaios (CTC) disponíveis, sendo que ao longo da calibração alguns foram excluídos por apresentarem desvios acentuados com relação ao comportamento global.

Neste modelo, no caso de argilas, os parâmetros elásticos são obtidos a partir da inclinação inicial das curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais convencionais. O ensaio de compressão hidrostática, descontada a parcela elástica, fornece as deformações colapsíveis, pois neste tipo de trajetória não ocorrem deformações plásticas expansivas. Determinados os parâmetros referentes à parcela elástica e à plástica colapsível, pode-se, para um ensaio triaxial convencional, calculá-las sem dificuldades e, posteriormente, descontá-las da deformação total obtida do ensaio de laboratório. A diferença constituirá a deformação plástica expansiva.

A Tabela 2 contém os 14 parâmetros obtidos na calibração, ou seja, K_{ur} , n , ν , ρ , n , m , S_1 , S_2 , t_1 , t_2 , p , 1 , α , β . O solo variegado nos níveis analisados, 9,5 e 12,5 m, apresenta comportamento bastante homogêneo, sendo assim possível, com exceção da parcela elástica, representá-lo por um grupo único de parâmetros.

Tabela 2 : Parâmetros de Calibração

			3,5 (m)	6,5 (m)	9,5-12,5 (m)
ELÁSTICOS		K_{ur}	58,90	153,97	2288 (*)
		n	0,32	0,57	0,37 (*)
		ν	0,25	0,25	0,21
COLAPSÍVEL		p	0,0402	0,0199	0,0050
P L Ã S T I C O		E X P A N S I V O	RUPTURA		
			n	138,4	133,63
		m	1,235	0,88	0,99
		POTENCIAL			
		S_1	0,30	0,41	1,35
		S_2	0,19	0,00	-0,16
		PLÁSTICO			
		t_1	31,39	3,68	-253,64
		t_2	-58,72	-17,47	45,23
		ENDURECIMENTO			
		p	0,400	0,4140	0,043
		1	0,37	0,446	1,883
		α	1,10	1,65	3,27
		β	0,0	0,0	-0,34
(*)....para 12,5 m $K_{ur} = 3875$ e $n = 0,27$					

5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E OS ANALÍTICOS

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam a modelagem dos ensaios de compressão hidrostática e as Figuras 4, 5 e 6, a modelagem dos ensaios triaxiais convencionais (CTC). Como pode ser observado, as reproduções fornecidas pelo modelo se aproximam bastante das curvas de laboratório, evidenciando a sua eficiência nestas trajetórias.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam a modelagem dos ensaios de descarregamento lateral (RTC) e, a Figura 10, a modelagem dos ensaios de descarregamento axial (RTE). Nestas trajetórias a reprodução do comportamento tensão-deformação é excelente, mas em termos de variação volumétrica ocorreu uma discrepância inclusive qualitativa: o modelo prevê um comportamento predominantemente compressivo e no laboratório observa-se uma expansão da amostra. Diante deste fato, planeja-se, inicialmente, realizar-se alguns ensaios comprobatórios daqueles já feitos, e se confirmados, proceder-se-á a uma tentativa de ajuste no modelo original.

6. CONCLUSÕES

O modelo elasto-plástico de Lade permite uma excelente reprodução do comportamento da argila vermelha e do solo variegado da cidade de São Paulo em trajetórias de compressão axial (CTC) e compressão hidrostática (HC).

A reprodução dos ensaios de descarregamento lateral (RTC) e axial (RTE), mostrou-se aceitável apenas parcialmente. Obteve-se uma boa repetição em termos de tensão x deformação, mas não se conseguiu reproduzir a variação volumétrica. Este fato exige que se realizem alguns ensaios comprobatórios e se confirmados os ensaios anteriores, proceder-se-á a uma tentativa de ajuste do modelo.

7. AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças ao suporte financeiro recebido do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico), PUC/RJ (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) e EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, R.F. (1983). Centrifugal and analytical modeling of excavation in sand. Boulder, EUA, 222p. Tese (Doutorado). Universidade de Colorado.

AZEVEDO, R.F. e FARIAS, M.M. (1986). Previsão das características de deformabilidade e resistência de areias por um modelo elasto-plástico. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Porto Alegre, 1986. Anais. ABMS. V.1.p.45-56.

LADE, P.V. (1977). Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. International Journal of Solids and Structures. V.13.p.1019-35.

LADE, P.V. (1979). Stress-strain theory for normally consolidated clay. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL METHODS IN GEOMECHANICS, Aachen, 1979. Proceedings. p.1325-37.

KUPPER, A.A.G. (1983). Características tensão x deformação de uma amostra da argila vermelha do terciário de São Paulo. Rio de Janeiro. 323p. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

KUPPER, A.A.G. e COSTA FILHO, L.M. e ANTUNES, F.S. (1985). Geotechnical characterization of São Paulo red clay. In: TropicaLS'85, Brasília, 1985. Anais. ABMS. p.117-29.

VARGAS, M. (1972). Fundações de edifícios em São Paulo e Santos. Revista Politécnica, São Paulo (num. especial).p.10-28.

ZORNBERG, J.G. (1989). Análise por elementos finitos do comportamento de escavações utilizando um modelo elasto-plástico. Rio de Janeiro. 280p. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

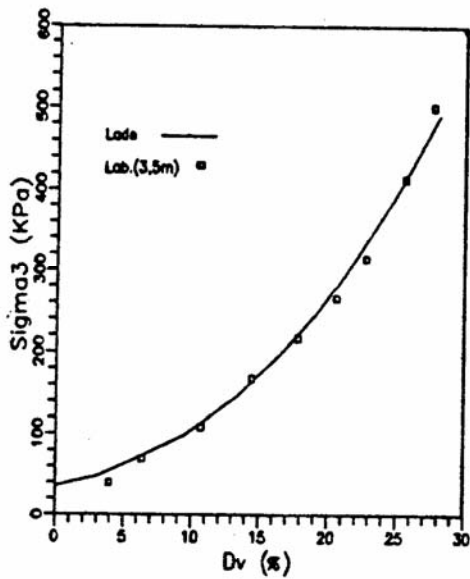


Figura 1 - Argila vermelha (3,5m), ensaio de compressão hidrostática (HC).

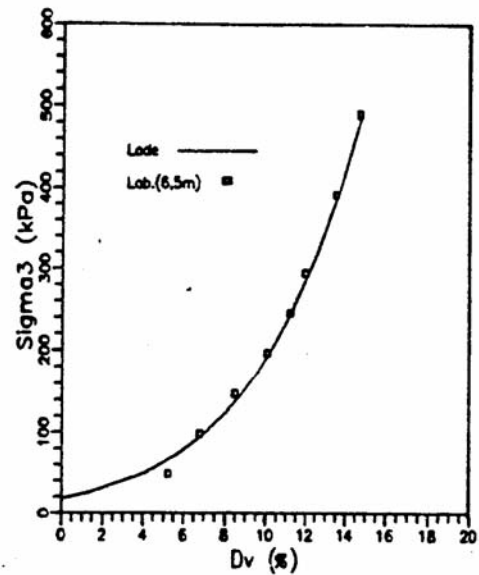


Figura 2 - Argila vermelha (6,5m), ensaio de compressão hidrostática (HC).

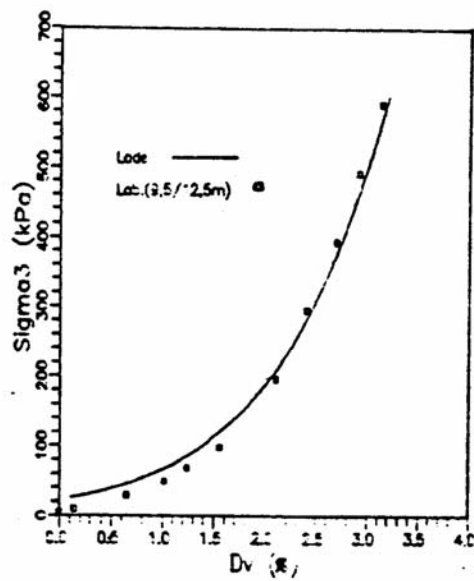


Figura 3 - Solo variegado (9,5/12,5m), ensaio de compressão hidrostática (HC).

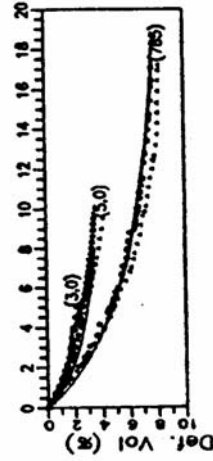
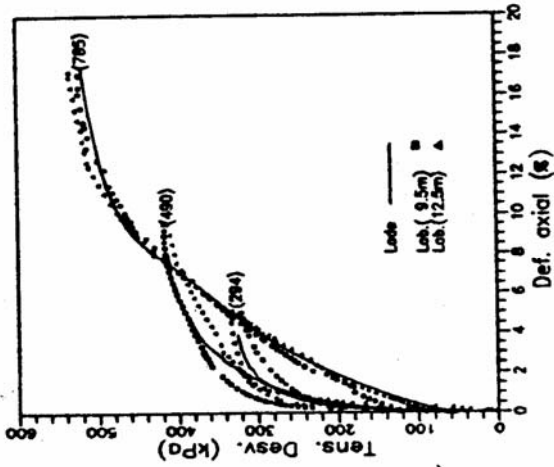


Figura 6 - Solo variegado (9,5/12,5m) triaxial convencional (CTC)

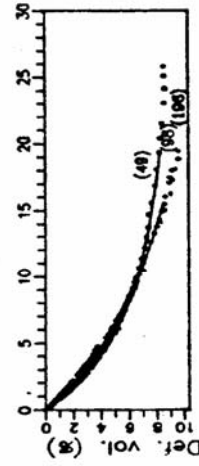
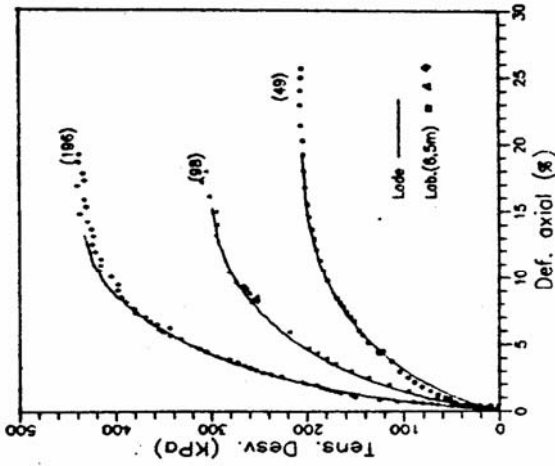


Figura 5 - Argila vermelha (6,5m), triaxial convencional (CTC)

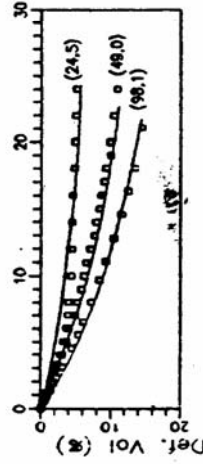
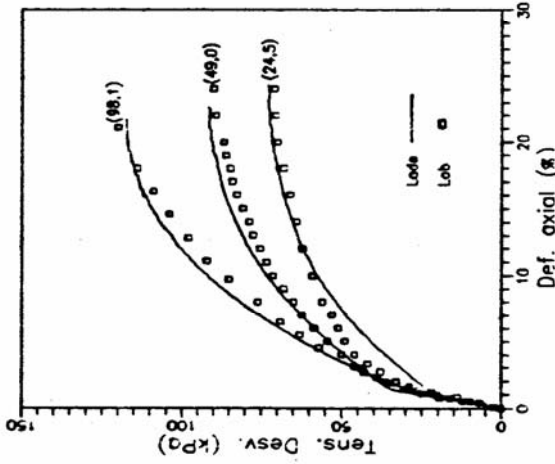


Figura 4 - Argila vermelha (3,5m), triaxial convencional (CTC)

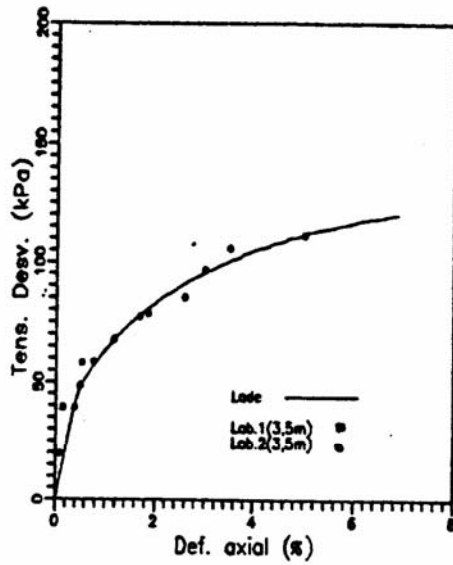


Figura 7 - Argila vermelha (3,5m), ensaio de descarregamento lateral (RTC).

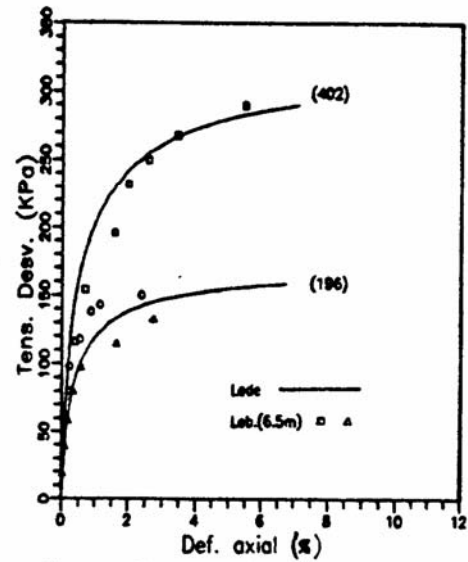


Figura 8 - Argila vermelha (6,5m), ensaio de descarregamento lateral (RTC).

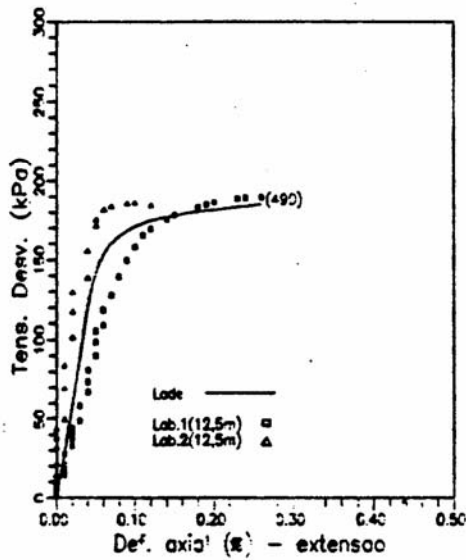


Figura 9 - Solo variegado (9,5m), ensaio de descarregamento lateral (RTC).

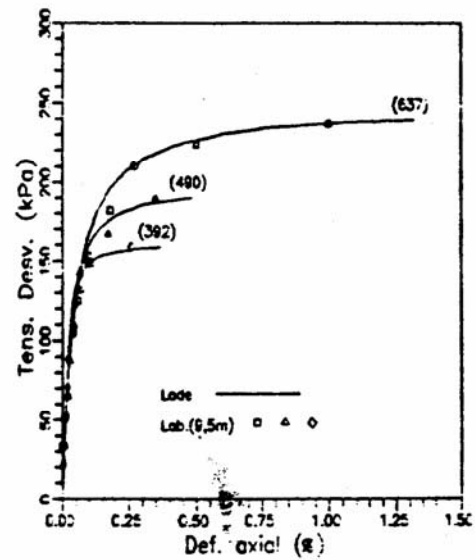


Figura 10 - Solo variegado (12,5m), ensaio de descarregamento axial (RTE).



69 CBGE

IX COBRAMSEF

4 A 9 NOV 1990

BGE

**AB
MS**

SALVADOR

TEMA VI - OBRAS VIÁRIAS EM ÁREAS URBANAS

Efeitos observados na execução dos túneis do minianel de São Paulo, por CAMPANHA, CARLOS A.; KOCHEN, ROBERTO; MARGARIDO, ALUIZIO B.; KOSHIMA, AKIRA	001
Aspectos construtivos e o comportamento da escavação do túnel do Metrô - Linha Paulista - Trecho "Clínicas", por KOELLN, MANFRED; SANTUCCI, HÉLIO ALEXANDRE; RICCO, MÁRIO F.; KOGA, HÉLIO	009
Recalques induzidos pela escavação dos túneis de via das estações Brigadeiro e Trianon, por KOCHEN, ROBERTO; CAMPANHA, CARLOS A.; MARGARIDO, ALUIZIO B.; ANDRADE, JOSÉ CARLOS de O.; VASCONCELLOS, CYBELE A.	021
Estudo em modelos de estradas vicinais reforçadas com geossintéticos, por PALMEIRA, ENNIO MARQUES; CUNHA, MAURÍCIO GOMES da; RIBEIRO, EDUARDO SERRATO MENDONÇA	029
Análise de uma estrutura de solo reforçado através de ensaios de laboratório e instrumentação de campo, por VIDAL, DELMA; CARVALHO, PEDRO ALEXANDRE S. de; EHRLICH, MAURÍCIO; SILVA, LUIZ FRANCISCO M. da	035
Modelagem do comportamento do solo da cidade de São Paulo com vista a escavação do Metrô - Linha Paulista, por PARREIRA, A.B.; AZEVEDO, R.F.; ZORNBERG, J.G.	045
Análise por elementos finitos de uma escavação escorada no metropolitano da Cidade de São Paulo, por ZORNBERG, J.G.; AZEVEDO, R.F.; PARREIRA, A.B.	053
Avaliação de tensões em cambotas de túnel do Metrô-SP pelo método de trepanação, por IBRI, IVO ASSAD; KAZUIRA, GETÚLIO MEGURO	061

TEMA VII - SOLOS COLAPSÍVEIS, EXPANSIVOS, DISPERSIVOS E LATERÍTICOS

Uma análise de modelos geotécnicos para a previsão de recalques em solos colapsíveis, por FERREIRA, ROBERTO CARDIERI; PERES, JAIME ELIAS ESCUDEIRO; BENVENUTO, CLOVIS	073
Banco de dados de solos especiais - Colapsíveis no Estado de Pernambuco, por FERREIRA, SILVIO ROMERO de MELO	081
Comportamento mecânico de solos residuais, por MACCARINI, MARCIANO	087
Características geotécnicas de solos compressíveis da região de Gaspar - Itajaí - Tijucas (S.C.), por MACCARINI, MARCIANO; ASSUMPÇÃO, LUIS CARLOS XAVIER; TEIXEIRA, VICTOR HUGO	095
Projeto Formoso A - Implantação de obras localizadas com fundação em solos colapsíveis, por AFLITOS, AREOBALDO OLIVEIRA; PEREIRA, JOSÉ HENRIQUE FEITOSA; CARVALHO, JOSÉ CAMAPUM de; MENDONÇA, MARCOS BARRETO	101
Análise do efeito do umedecimento do solo em fundações rasas e profundas em solos porosos, por CARVALHO, DAVID de; SOUZA, ADRIANO	109
Projeto formoso A - Implantação de irrigação em solos colapsíveis, por PEREIRA, JOSÉ HENRIQUE FEITOSA; MAHLER, CLÁUDIO FERNANDO; HURRY, EDWIM ALVARO ZURIETA	115
Análise dos resultados de provas de carga em estacas de pequeno diâmetro em solo colapsível, por SILVA, JOÃO CARLOS BAPTISTA J.	125
Análise estrutural da cobertura pedológica: Uma visão geológica dos solos, por KERTZMAN, FERNANDO FACCIOLLA; SALOMÃO, FERNANDO XIMENES TAVARES	133