NOTA

Tese defendida pelo Prof. Dr. Nélío Gaioto, em 10 de fevereiro de 1973, junto ao Departamento de Geologia e Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Para o cadastro na BDTD, foi necessário vincular esse trabalho à área do conhecimento - **Engenharia de Estruturas** - pois em 1973, ainda não havia sido criado o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE
ALGUNS MÉTODOS DE ENSAIO DE
TRAÇÃO DE SOLOS COMPACTADOS**

TESE APRESENTADA À ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO "DOUTOR ENGENHEIRO"

NÉLIO GAIOTO

À
minha
esposa
e
aos
meus
filhos.

AGRADECIMENTO

À Professora Doutora Evelyn Bloem Souto Silveira, pela orientação, pelas relevantes sugestões e pelo incentivo apresentado. Ao Professor Doutor Décio Leal de Zagottis, pelas interessantes sugestões apresentadas. Aos senhores Nelson Ferreira da Silva, Sergio Silva Macedo e José Veríssimo Nery Filho, pelo auxílio na execução dos ensaios; aos senhores Ernani C.B.Carril, Silvio M.Bruschi e Antonio R.Damaceno pela elaboração dos desenhos; às senhoritas Neusa M.Icibaci e Ignez Brancacci pela datilografia. À Promon Engenharia S.A., pelo incentivo e apoio. À Escola de Engenharia de São Carlos e a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização do presente trabalho.

RELAÇÃO DOS SÍMBOLOS

a	distância entre a carga e o apoio da viga
A	força de atrito no pistão
A_c	área do corpo de prova no trecho central
A_e	área do corpo de prova nas extremidades
A_p	área do pistão
b	largura do corpo de prova
c	coesão
C	resultante das tensões de compressão
CP	corpo de prova
CS	ensaio de compressão simples
CT-2,0	ensaio de compressão triaxial com $\sigma_3 = 2,0 \text{ kg/cm}^2$
D	diâmetro do corpo de prova
d	diâmetro do disco usado no ensaio de dupla punção
e	índice de vazios
E	módulo de elasticidade
f	flecha
GC	grau de compactação
h	altura do corpo de prova
I_p	índice de plasticidade
J	momento de inércia
ℓ	vão entre os apoios da viga
P	carga aplicada nos ensaios
P_{rut}	carga de rutura
r, r_1 e r_2	identificados na figura 3.14
R	raio do corpo de prova
R_c	resistência à compressão simples
R_f	resistência à tração simples, determinada no ensaio de flexão

S	grau de saturação
S_c	área do diagrama de tensões de compressão, correspondente à deformação específica ϵ_c .
S_t	área do diagrama de tensões de tração, correspondente à deformação específica ϵ_t
T	resultante das tensões de tração
TD	ensaio de tração por compressão diametral
TF	ensaio de tração por flexão
TT-0,3	ensaio de tração triaxial com $\sigma_1 = 0,3 \text{ kg/cm}^2$
W	módulo de resistência à flexão
w	umidade
w_{ot}	umidade ótima
w_L	limite de liquidez
w_p	limite de plasticidade
x, y	coordenadas
y'	dy/dx
y''	d^2y/dx^2
Z	braço do binário
α	inclinação da curva $\sigma = \phi(y)$ na origem
γ	peso específico do solo
γ_d	peso específico aparente seco
γ_{dmax}	peso específico aparente seco máximo
γ_s	peso específico dos sólidos
ϵ	deformação específica
ϵ_c	deformação específica de compressão
ϵ_t	deformação específica de tração
ϵ_{rut}	deformação específica na rutura
ϕ	ângulo de atrito interno
$\phi(y)$	função de y
ρ	raio de curvatura da viga

σ	tensão normal
σ_c	tensão de compressão
σ_d	tensão de rutura à tração, obtida no ensaio de compressão diametral
σ_p	tensão de rutura à tração, obtida no ensaio de punção
σ_t	tensão de tração
σ_1	tensão principal maior
σ_3	tensão principal menor
$(\sigma_3)_t$	tensão principal menor na rutura à tração
$(\sigma_1 - \sigma_3)_c$	diferença de tensões, na rutura à compressão
$(\sigma_1 - \sigma_3)_t$	diferença de tensões, na rutura à tração
τ	tensão cisalhante

ÍNDICE

Folha

ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
ÍNDICE DE TABELAS.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS.....	31
3. TIPOS DE ENSAIOS EXECUTADOS.....	33
3.1. Ensaio de Flexão.....	33
3.2. Ensaio de Tração Triaxial.....	44
3.3. Ensaio de Compressão Diametral.....	50
3.4. Ensaio de Compressão Simples e de Com- pressão Triaxial.....	55
4. TIPOS DE SOLOS ENSAIADOS.....	61
5. CONDIÇÕES DE COMPACTAÇÃO INVESTIGADAS.....	63
6. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXECUTADOS.....	67
7. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS.....	91
7.1. Influência da Umidade e do Grau de Com- pactação dos Corpos de Prova.....	91
7.2. Influência do Tipo de Solo.....	112
7.3. Influência do Método de Ensaio.....	117
8. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ENSAIO.....	138

8.1. Análise Comparativa da Variação dos Resultados dos Ensaios.....	140
8.2. Análise Comparativa Econômica entre os Métodos de Ensaio.....	141
9. CONCLUSÕES	
9.1. Sobre a Escolha do Método de Ensaio.....	147
9.2. Sobre o Comportamento dos Solos Submetidos à Tração.....	149
10. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	153
11. REFERÊNCIAS.....	157
APÊNDICE.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

	Folha
Figura 3.1. -Esquema do Ensaio de Flexão.....	34
Figura 3.2. -Fotos do Ensaio de Flexão.....	35
Figura 3.3. -Hipóteses de Distribuição das Tensões na Seção da Viga, na Rutura..	38
Figura 3.4. -Elemento da Viga sob Flexão.....	41
Figura 3.5. -Curva $\sigma_t = \phi(\epsilon_t)$	42
Figura 3.6. -Esquema do Ensaio de Tração Triaxial.....	45
Figura 3.7. -Foto do Ensaio de Tração Triaxial.	48
Figura 3.8. -Esquema das Forças do Ensaio de Tração Triaxial.....	48
Figura 3.9. -Esquema do Ensaio de Compressão Diametral.....	51
Figura 3.10. -Tensões Atuando no Corpo de Prova Submetido à Carga P.....	53
Figura 3.11. -Envoltória de Resistência ao Cisalhamento, Determinada com Ensaios de Compressão e de Tração CP-A6...	57
Figura 3.12. -Envoltória de Resistência ao Cisalhamento, Determinada com Ensaios de Compressão e de Tração CP-B4...	58
Figura 3.13. -Envoltória de Resistência ao Cisalhamento, Determinada com Ensaios de Compressão e de Tração CP-C4...	59
Figura 5.1. -Curvas de Compactação e Faixas de Umidade e Peso Específico Ensaia-	
das.....	65

		Folha
Figura 6.1.	-Curvas Carga-Flecha, Obtidas em Ensaaios de Flexão - Solo A.....	75
Figura 6.2.	-Curvas Carga-Flecha, Obtidas em Ensaaios de Flexão - Solo B.....	76
Figura 6.3.	-Curvas Carga-Flecha, Obtidas em Ensaaios de Flexão - Solo C.....	77
Figura 6.4.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaaios de Tração Triaxial - Solo A.....	78
Figura 6.5.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaaios de Tração Triaxial - Solo B.....	79
Figura 6.6.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaaios de Tração Triaxial - Solo C.....	80
Figura 6.7.	-Curvas Obtidas nos Ensaaios de Compressão Diametral - Solo A..	81
Figura 6.8.	-Curvas Obtidas nos Ensaaios de Compressão Diametral - Solo B..	82
Figura 6.9.	-Curvas Obtidas nos Ensaaios de Compressão Diametral - Solo C..	83
Figura 6.10.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaaios de Compressão Simples - Solo A.....	84
Figura 6.11.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaaios de Compressão Simples - Solo B.....	85
Figura 6.12.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaaios de Compressão Simples - Solo C.....	86

Figura 6.13.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaios de Compressão Triaxial - Solo A.....	87
Figura 6.14.	-Curvas Tensão-Deformação, obtidas em Ensaios de Compressão Triaxial - Solo B.....	88
Figura 6.15.	-Curvas Tensão-Deformação, Obtidas em Ensaios de Compressão Triaxial - Solo C.....	89
Figura 7.1.	-Curvas de Igual R_f (Ensaio de Flexão) - Solo A.....	92
Figura 7.2.	-Curvas de Igual $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ (Ensaio de Tração Triaxial, com $\sigma_1 = 0,3\text{kg/cm}^2$) - Solo A.....	93
Figura 7.3.	-Curvas de Igual σ_d (Ensaio de Compressão Diametral) - Solo A.	94
Figura 7.4.	-Curvas de Igual R_c (Ensaio de Compressão Simples) - Solo A...	95
Figura 7.5.	-Curvas de Igual R_f (Ensaio de Flexão) - Solo B.....	96
Figura 7.6.	-Curvas de Igual $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ (Ensaio de Tração Triaxial, com $\sigma_1 = 0,3\text{kg/cm}^2$) - Solo B.....	97
Figura 7.7.	-Curvas de igual σ_d (Ensaio de Compressão Diametral) - Solo B.	98
Figura 7.8.	-Curvas de Igual R_c (Ensaio de Compressão Simples) - Solo B...	99
Figura 7.9.	-Curvas de Igual R_f (Ensaio de Flexão) - Solo C.....	100

		Folha
Figura 7.10.	-Curvas de Igual $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ (Ensaaios de Tração Triaxial, com $\sigma_1 = 0,3 \text{ kg/cm}^2$) - Solo C.....	101
Figura 7.11.	-Curvas de Igual σ_d (Ensaaios de Compressão Diametral) - Solo C.	102
Figura 7.12.	-Curvas de Igual R_c (Ensaaios de Compressão Simples) - Solo C...	103
Figura 7.13.	-Variação dos Módulos de Elasticidade com a Umidade - Solo A..	105
Figura 7.14.	-Variação dos Módulos de Elasticidade com a Umidade - Solo B..	106
Figura 7.15.	-Variação dos Módulos de Elasticidade com a Umidade - Solo C..	107
Figura 7.16.	-Variação do Módulo de Elasticidade à Tração (Ensaio de Flexão) e à Compressão Simples com a Umidade.....	109
Figura 7.17.	-Variação de ϵ_{rut} com o Desvio de Umidade (Ensaaios CT-2,0, CS e TF).....	110
Figura 7.18.	-Variação da Deformação Específica, Medida no Penúltimo Carregamento do Corpo de Prova, com o Desvio de Umidade.....	111
Figura 7.19.	-Variação das tensões de rutura com a umidade ótima dos solos, incluindo curva média(*) apresentada na referência (6).....	113

Figura 7.20.	-Correlações R_c/σ_d (em valor absoluto) com W_L e I_p , Obtidas para os Solos A, B e C, Juntamente com Valores e Curvas de Narain e Rawat (Ref.17, p.2188)..	115
Figura 7.21.	-Variação do Módulo de Elasticidade com a Umidade Ótima (Ensaaios TF e CS).....	116
Figura 7.22.	-Variação da Deformação Específica de Rutura com a Umidade Ótima (Ensaaios TT-03, TF e resultados de Leonards e Narain).....	116
Figura 7.23.	-Círculos de Mohr Representativos dos Três Tipos de Ensaio de Tração.....	118
Figura 7.24.	-Curvas de Variação das Tensões de Rutura com o Desvio de Umidade, para GC= 100% - Solo A.....	122
Figura 7.25.	-Curvas de Variação das Tensões de Rutura com o Desvio de Umidade para GC= 100%, - Solo B.....	123
Figura 7.26.	-Curvas de Variação das Tensões de Rutura com o Desvio de Umidade, para GC= 100% - Solo C.....	124
Figura 7.27.	-Variação das Relações entre as Tensões de Rutura à Tração com a Umidade Ótima.....	126
Figura 7.28.	-Trechos Iniciais de Curvas Tensão-Deformação de Ensaaios CT-2,0, CS e TT-0,3 (CP-A7).....	127

Figura 7.29.	-Trechos Iniciais de Curvas Tensão-Deformação de Ensaio CT-2,0, CS, TT-0,3 e TT-0,5 (CP-A8)	128
Figura 7.30.	-Trechos Iniciais de Curvas Tensão-Deformação de Ensaio CT-2,0, CS e TT-0,3 (CP-B2).....	129
Figura 7.31.	-Trechos Iniciais de Curvas Tensão-Deformação de Ensaio CT-2,0, CS e TT-0,3 (CP-B4).....	130
Figura 7.32.	-Trechos Iniciais de Curvas Tensão-Deformação de Ensaio CT-2,0, CS e TT-0,3 (CP-C3).....	131
Figura A.1.	-Cálculo Preliminar de E.....	161
Figura A.2.	-Curvas de Distribuição das Tensões na Seção da Viga - CP-B2..	166
Figura A.3.	-Curva $S_t = \phi(\epsilon_t)$ - CP-B2.....	166
Figura A.4.	-Curvas $y'' = \phi(M)$ - CP-B2.....	167
Figura A.5.	-Gráficos de y'' , y' e y , Calculados para o Ensaio do CP-B2.....	168
Figura A.6.	-Gráficos de y'' , y' e y , Calculados para o Ensaio do CP-C3.....	169
Figura A.7.	-Curva Calculada, $P = \phi(f)$, e Pontos Obtidos no Ensaio do CP-B2.	171
Figura A.8.	-Curva Calculada, $P = \phi(f)$, e Pontos Obtidos no Ensaio do CP-C3.	172
Figura A.9.	-Curvas $P = \phi(\epsilon_t)$, Calculadas para os Ensaio do CP-B2 e do CP-C3.	173
Figura A.10.	-Correlação $\epsilon_t = \phi(f)$, Determinada nos Ensaio do CP-B2 e do CP-C3.....	174

ÍNDICE DE TABELAS

	Folha
Tabela 4.1. -Caracterização dos Solos En-	
saiados	62
Tabela 6.1. -Solo A - Resultados dos Ensaios	
de Compressão e de Tração.....	69
Tabela 6.2. -Solo B - Resultados dos Ensaios	
de Compressão e de Tração.....	71
Tabela 6.3. -Solo C - Resultados dos Ensaios	
de Compressão e de Tração.....	73

1.

INTRODUÇÃO

1.1.

O emprego cada vez mais intenso do método dos elementos finitos, para análises de tensões, deformações e deslocamentos de maciços de terra, tem requerido o conhecimento dos parâmetros de resistência e compressibilidade dos solos, determinados sob condições que representem aquelas que realmente ocorrem nos maciços. Pesquisas para a determinação das correlações tensão-deformação de solos, submetidos a esforços de tração, vêm sendo realizadas há mais de duas dezenas de anos, objetivando o desenvolvimento de teorias fundamentais relativas às características de resistência dos solos, à estabilidade de bases de aeroportos e estradas e de taludes de terra, assim como para o estudo de empuxos de terra sobre estruturas de arrimo (22). Diversos métodos de ensaio, que ainda não receberam uma padronização definitiva, vêm sendo realizados, não se decidindo ainda qual, ou quais, devam ser adotados, em função de uma justificativa técnica ou técnico-econômica.

1.2.

O primeiro trabalho de que se tem conhecimento sobre ensaios de tração em solos diz respeito ao realizado por R. Haefeli (10), em Zurich (1951). Inicialmente realizou ensaios por meio de um equipamento que desenvolvia forças centrífugas de tração em corpos de prova de solo compactados, mas que não permitia a determinação do cor

relacionamento tensão-deformação. Posteriormente utilizou um equipamento para ensaios triaxiais, tracionando corpos de prova que eram fixados pelas extremidades por meio de congelamento. Estes sistemas não apresentaram resultados satisfatórios, principalmente quanto se pretendia fazer medidas de deformações.

1.3.

Em 1952, DePhilippe realizou ensaios piloto, para a determinação da resistência à tração de solos compactados, por um método que foi no ano seguinte desenvolvido pelo mesmo autor, juntamente com Tschebotarioff na Universidade de Princeton, U.S.A. (22). Os corpos de prova eram prismáticos, com seção reduzida em um trecho central, e os ensaios eram realizados com os mesmos apoiados sobre uma mesa. Os corpos de prova apresentavam 52 pol. de comprimento e 18 pol. de largura, e o trecho central, de 18 pol. de comprimento, tinha 6 pol. de largura; eram compactados por meio do soquete do Proctor Normal. As formas de moldagem dos corpos de prova eram removidas apenas no trecho central e mantidas nos trechos externos; uma das extremidades era fixada à mesa, sendo a parte central e a outra extremidade apoiadas sobre a mesa através de roletes, com o objetivo de diminuir o atrito durante a realização dos ensaios. Alguns ensaios foram realizados com deformação controlada e outros com tensão controlada, tracionando-se os corpos de prova pela extremidade livre. Na parte central foram instalados extensômetros para as medidas das deformações.

Os ensaios foram realizados com três tipos de argila (montmorilonita, caolinita e ilita) e com um solo natural composto dos três tipos de argila. Foram também realizados ensaios de compressão simples. As principais conclusões a que chegaram foram as seguintes:

a.

a natureza do mineral argila afeta consideravelmente os valores da resistência e da deformação à tração;

b.

a umidade e a velocidade de ensaio influem na resistência à tração e na deformação de rutura de solos argilosos;

c.

o aumento do teor de areia aumenta, até certo ponto, a resistência à tração de uma argila pura.

1.4.

Em 1961, Uchida e Matsumoto (23) realizaram ensaios de tração por compressão diametral, inspirados no "ensaio brasileiro de tração" desenvolvido por Lobo Carneiro para corpos de prova de concreto. Em corpos de prova cilíndricos a carga é aplicada em duas geratrizes opostas, verificando-se a rutura ao longo do diâmetro, na direção do carregamento. A rutura é produzida por tensões de tração, perpendiculares à direção do carregamento, que podem ser calculadas de forma aproximada pe

la expressão:

$$\sigma_d = - \frac{2 P}{\pi D h} \quad (\dagger)$$

Foram realizados ensaios com amostras indeformadas e deformadas, bem como ensaios de compressão simples para a comparação de resultados. Os ensaios de tração foram realizados com corpos de prova de 7,5cm de diâmetro e 2,5 a 3,7 cm de altura, e os de compressão com 5,0 cm de diâmetro de 10,4 a 12,0 cm de altura. Foi utilizado equipamento de deformação controlada, com velocidade de compressão de 2,0 mm por minuto. Os valores de resistência à compressão simples foram em média 7 vezes os das tensões de rutura à tração, calculados pela formula acima.

1.5.

Ainda em 1961, na Bélgica, Dutron e Canfyn (7), realizaram ensaios de flexão e de compressão diametral em solos arenosos e siltosos estabilizados com cimento. As vigas para os ensaios de flexão tinham 11. 1/4 pol de comprimento e 3x3 pol² de seção, sendo os ensaios realizados com duas cargas igualmente espaçadas do centro, e o vão entre os apoios era de 9 pol. Para os ensaios de compressão diametral, os corpos de prova eram cilíndri-

(†) No presente trabalho, os valores das tensões e deformações de tração estão indicados com sinal negativo. As relações entre as tensões de compressão e de tração estão referidas a valores absolutos.

cos, com 2 pol de diâmetro e 4 pol de altura; com estas mesmas dimensões foram preparados corpos de prova para ensaios à compressão simples. Os valores da resistência à tração, obtidas nos ensaios de flexão, variaram entre 1/3 e 1/6 da resistência à compressão simples, enquanto que, para ensaios de compressão diametral os valores de σ_d/R_c variaram entre 1/6 e 1/8.

1.6.

Em 1963, Leonards e Narain (14) apresentaram os resultados de ensaios desenvolvidos para estimar as deformações limites de tração que provocam fissuras em argila compactada. Os ensaios foram realizados com vigas de argila compactada, de 3 pol. de largura, 2.3/4 pol de altura e 22.1/8 pol de comprimento. O solo era compactado dentro de um molde, em 10 camadas, por meio de um soquete pneumático de base quadrada, de 2 1/2" de lado. A viga, apoiada em dois apoios, era carregada verticalmente em dois pontos, dispostos simetricamente. Para compensar as tensões devidas ao peso próprio, era aplicada, uma carga de baixo para cima, no centro da viga por meio de uma mola de pequena rigidez. Para medida das deflexões foram instaladas duas linhas de 11 pinos ao longo do vão central. As deflexões eram medidas por meio de um catetômetro, logo após a aplicação de um incremento de carga, imediatamente antes da colocação do incremento seguinte, e em periodos intermediários. As deflexões, eram plotadas em gráficos preparados com curvas teóricas para determinação das deformações de tração. As cargas eram aplicadas

em incrementos iguais e com igual intervalo de tempo, tal que a rutura ocorria após dois dias (ensaio a curto prazo) ou em quatro semanas (ensaio a longo prazo). Uma única viga foi ensaiada com a duração de seis meses. A rutura da viga ocorria imediatamente após a constatação da primeira fissura. As curvas tensão-deformação, calculadas com as deflexões medidas no instante final de carregamento, apresentaram (em valor absoluto) deformações de rutura entre 0,02 e 0,04% maiores que as calculadas com as leituras iniciais.

Alguns ensaios de compressão simples foram realizados para a comparação entre os módulos de elasticidade e deformações de rutura à tração e à compressão.

Leonards e Narain chamam atenção para as seguintes conclusões a que chegaram:

a.

as curvas tensão-deformação são aproximadamente lineares, quase até a rutura;

b.

as deformações de tração na rutura são muito menores que as de compressão; a relação entre elas varia, ao acaso, de 0,11 a 0,014.

c.

as curvas tensão de compressão-deformação são lineares até valores comparáveis às tensões de rutura de tração.

d.

os valores do módulo de elasticidade à tração são comparáveis aos valores obtidos à compressão.

1.7.

No ano seguinte, na discussão do trabalho acima referido (15), os mesmos autores apresentavam gráficos ampliando o estudo do efeito das condições de compactação na deformação de fissuramento à tração, determinados através de novos ensaios de flexão. Estes gráficos contem curvas que indicam significativo acréscimo da "flexibilidade" do solo (maior deformação específica de fissuramento) com o acréscimo da umidade de compactação.

1.8.

Hasegawa e Ikenti (11), em 1964, apresentaram resultados de ensaios de tração, realizados sobre corpos de prova com o formato de algarifmos achatados, tendo engastada em cada extremidade uma haste na qual a força de tração era aplicada. As forças eram aplicadas horizontalmente, com os corpos de prova flutuando sobre mercúrio, para reduzir as forças de atrito entre os corpos de prova e a superfície de apoio. O comprimento total dos corpos de prova era de 19cm; as extremidades alargadas apresentaram 5 cm de largura; o trecho central tinha 7 cm de comprimento e 2 cm de largura; a altura, de 2 cm ao longo de todo o comprimento. O solo era compactado em moldes de aço, com o mesmo formato dos corpos de prova, por meio de golpes de um soquete. Os ensaios fo -

ram realizados com carregamento controlado, obtendo-se as deformações do corpo de prova por meio de um catetometro que media o deslocamento de dois marcos de referencia introduzidos no trecho central. As fissuras ocorriam em planos perpendiculares ao eixo de carregamento, não sendo constatadas ruturas por deslizamento. Dos 63 corpos de prova ensaiados, cerca de 30% apresentaram rutura fora do trecho central. Para a realização dos ensaios foi utilizada apenas a fração de finos (que passou na peneira 200) de um solo, apresentando $w_L = 98\%$, $w_p = 80\%$, $w_{ot} = 82\%$. Os resultados mostraram que o módulo de elasticidade secante diminuiu de cerca de 300 para 1 kg/cm^2 quando a umidade cresceu de 70 para 100%; a resistencia à tração variou de -0,3 para -0,02 kg/cm^2 quando a umidade variou entre 70 e 100%; a deformação específica máxima variou de -0,08 a -3% com a umidade variando entre 70 e 100%.

1.9.

Em 1965, os ingoslávicos, Suklje e Drnovšek (18) investigaram a deformabilidade à tração de solos em corpos de prova cilíndricos, vasados, submetidos a estado plano de tensões, em câmaras para ensaios triaxiais. Os corpos de prova apresentavam 8 cm de altura, 4 cm de diâmetro interno e 6,4 cm de diâmetro externo. Eram revestidos interna e externamente por membranas de borracha, fixadas na base e no topo da célula de ensaio. O ensaio era realizado aplicando-se pressões na parte interna do corpo de prova, enquanto que externamente era mantida uma pequena pressão hidrostática, por meio de uma bure

ta, na qual era medida a variação de volume; no topo da célula havia um dispositivo ajustável, que não permitia a aplicação de reação axial no corpo de prova, ao mesmo tempo que possibilitava a medida das deformações axiais (o equipamento podia ser adaptado para ensaios correspondentes a estado duplo de deformações, introduzindo um dinamômetro para a medida da reação axial). O equipamento não permitia a realização de ensaios drenados, nem medidas de pressão neutra. Por outro lado foi possível considerar o efeito de anisotropia (comparando-se as variações de volumes internos e externos) e de "creep" (registrando as deformações axiais para varios tempos). Assumindo-se diversos valores para a relação de módulos de elasticidade nas direções tangencial e radial, determinaram-se curvas de módulos de elasticidade e de coeficientes de Poisson. Estas curvas permitiram constatar que o efeito de anisotropia não afetava os valores de módulo de elasticidade à tração; o mesmo não ocorreu em relação ao coeficiente de Poisson, o que permitiu concluir que a consideração de isotropia não conduz a valores reais deste coeficiente. Foi verificado ainda que o acréscimo do tempo de ensaio resultou em decréscimo, tanto do coeficiente de Poisson, como do módulo de elasticidade.

1.10.

Na Australia, em 1965, Clegg (5) realizou investigações com amostras de areia fina e media, estabilizada com 4% de cimento portland, compactadas com 70% de compactidade relativa. Foram realizados, além de ensaios

de compressão e de cisalhamento direto, dois tipos de ensaio de tração:

a.

ensaios de compressão diametral, com corpos de prova cilíndricos, de 8 pol. de altura e 4 pol. de diâmetro;

b.

ensaios em vigas, de 15 pol. de comprimento, 3.1/4 pol. de largura e 1.1/2 pol de altura.

Os primeiros foram conduzidos de forma análoga à referida no trabalho de Uchida e Matsumoto; a relação entre os valores da resistência à compressão simples e os das tensões de rutura à tração variou de 5,5 a 13, quando o tempo de cura dos corpos de prova variou de zero a 200 horas (o módulo de elasticidade determinado nos ensaios de compressão simples variou entre 350 e 1400 kg/cm² para os tempos de cura acima referidos).

Para os ensaios em vigas, as mesmas eram apoiadas sobre uma série de anéis justapostos, montados sobre bases ajustáveis, de forma a representar o sub-leito de um pavimento. Os anéis foram confeccionados a partir de um mesmo tubo de aço. Foram experimentados três tipos de anéis, com rigidez diferentes, para corresponder a coeficientes de reação de sub-leito, variando de 3 à 22 kg/cm³ (equivalente a solos com CBR de aproximadamente 3 a 100). As vigas eram carregadas no centro, e durante os ensaios

eram feitas leituras de deflexão nos lados interno e externo dos anéis, e na placa de carregamento. Antes dos ensaios os anéis eram ajustados com um carregamento feito através de uma viga rígida de aço, abaixando-se ou levantando-se os anéis para que resultasse uma mesma carga em todos eles. Com os resultados dos ensaios foram elaborados gráficos para as três rigidez programadas, mostrando a variação das deformações e da distribuição das pressões com o carregamento.

1.11.

Em 1969, Bishop e Garga (2) realizaram ensaios triaxiais, com corpos de prova cilíndricos, com o diâmetro reduzido na parte central. O esforço de tração é produzido na parte central, pela redução da pressão de confinamento no topo do corpo de prova. Os ensaios foram realizados com deformação controlada em câmaras utilizadas para ensaios de compressão triaxial, adequadamente modificadas. As forças de tração, aplicadas no cabecote do corpo de prova, eram registradas por meio de um dinamômetro de anel, com transdutor, situado dentro da câmara triaxial, e ligado ao pistão por meio de duas articulações ("Hooke's joints"). As deformações, durante o ensaio, eram lidas em um defletômetro instalado externamente à câmara. Foram utilizados corpos de prova com 3/4 pol. de diâmetro na parte central, e com 1 pol. ou 1 1/2 pol. nas extremidades. Os ensaios foram realizados de forma lenta, dre-

nada, com argila azul de Londres, obtendo-se na rutura valores de tensão de tração (σ_3) entre os limites de -0,27 e -0,34 kg/cm², pouco dependendo dos valores das tensões confinantes (σ_1), que variaram entre 0,2 e 0,7 kg/cm². Os valores de (σ_3) obtidos, comparados com os correspondentes valores de resistência à compressão simples, determinaram relações variando de 0,178 (1/5,6) e 0,144 (1/6,9). Foram ainda feitas comparações entre envoltórias de resistência (determinadas com ensaios de tração e de compressão triaxial), obtidas com amostras indeformadas e amolgadas, da argila azul de Londres.

1.12.

Em 1970, Narain e Rawat (17) realizaram diversos ensaios de compressão diametral, em corpos de prova compactados, com 6 solos de diferentes características de plasticidade. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 4 pol. de diâmetro e 4,6 pol. de altura. Paralelamente foram realizados ensaios de compressão simples. Foi investigada a influência da umidade de moldagem dos corpos de prova, constatando-se decréscimos dos valores de tensão de rutura à tração com o aumento da umidade, conforme se constata nas curvas $\sigma_d = \phi(w)$, traçadas para os 6 tipos de solo; os valores das tensões de tração na rutura, calculados pela formula $\sigma_d = -2P/\pi Dh$, variaram desde -0,09 até -0,71 kg/cm². Foram também traçadas curvas $R_c/\sigma_d = \phi(w_L)$ e $R_c/\sigma_d = \phi(I_p)$, notando-se que a relação R_c/σ_d variou aproximadamente entre 12 e 6, decrescendo para os solos com maiores valores de w_L e I_p .

1.13.

Ainda em 1970, Souto Silveira e Gaioto (20), analisando o problema de fissuramento em barragens de terra e de núcleos de barragens de enrocamento, apresentaram os resultados que obtiveram em ensaios de flexão e de compressão simples, e os compararam com os resultados de ensaios realizados por outro autores. Os ensaios de flexão, foram realizados com vigas de 80cm de comprimento e $6 \times 6 \text{ cm}^2$ de seção, que eram ensaiadas por meio de duas cargas horizontais, simetricamente dispostas; as vigas eram apoiadas sobre uma mesa, com a intercalação de uma camada de esferas de aço, introduzida para diminuir o atrito entre a mesa e as vigas. Os resultados obtidos apresentaram uma relação entre os valores de resistencia à compressão simples e de resistencia à tração, variando entre 6 e 7, para um solo compactado sob 3 condições de umidade. Foram também comparados valores obtidos, de módulo de elasticidade e de deformação específica de rutura, com os apresentados por outros autores.

1.14.

Jamal, em 1971 (12), publicou parte de seu trabalho realizado em 1966, descrevendo os resultados de investigações sobre ensaios de extensão triaxial, realizados com corpos de prova de cilindros maciços e cilindros vazados de amostras de areia, sujeitos a idênticas condições

de carregamento e deformação (†). A altura e o diâmetro externo dos cilindros, tanto maciços como vasados, eram respectivamente 8 e 4 pol. Os cilindros vasados foram moldados com três diferentes diâmetros, resultando espessuras de 1/2, 1 e 1 1/2 pol. Foram revestidos interna e externamente por membranas de borracha, fixadas em cabecote e base com forma de anel. Os corpos de prova eram drenados, no topo e na base, por pedras porosas conectadas a uma bureta aberta. A parte vasada do corpo de prova era preenchida com água, isoladamente da parte externa, de confinamento da câmara.

Os corpos de prova eram preparados em moldes desmontáveis, sendo as membranas colocadas antes do preenchimento; a areia era introduzida saturada, no espaço anelar entre as membranas, por meio de um funil, sendo depositada de maneira uniforme e compactada por uma haste; por este processo foram obtidas porosidades variando entre 0,38 e 0,46. Antes de retirar as fôrmas era aplicada uma pressão negativa, de cerca de $0,1 \text{ kg/cm}^2$, no corpo de prova.

Os cilindros vasados foram adensados com pressão na câmara de cerca de 4 kg/cm^2 e os maciços com cerca de 3 kg/cm^2 . A pressão na parte vasada era mantida igual à

(†) Apesar deste trabalho corresponder a ensaios de extensão, foi também incluído na presente relação de métodos de ensaios de tração, por apresentar técnicas interessantes para montagens e medidas de deformações dos corpos de prova.

pressão da câmara. Eram medidas as variações de volume provocadas pela pressão de confinamento e, assumindo condições isotrópicas de deformações, eram calculadas as variações de dimensão do corpo de prova. As variações de altura e área dos corpos de prova, durante o ensaio de extensão, eram referidas às dimensões calculadas após o adensamento. Os ensaios de extensão axial eram então conduzidos tracionando-se o pistão da câmara, aliviando a pressão de confinamento no topo do corpo de prova. Eram medidas as deformações axiais e a variação de volume da parte vasada (variação introduzida para manter a pressão interior constante).

Foram apresentados gráficos com curvas tensão-deformação obtidos nos ensaios de extensão, para os corpos de prova maciços e vasados. Os valores das tensões de ruptura por extensão determinados nos cilindros vasados foram apreciavelmente menores que os obtidos com os cilindros maciços. Os cilindros vasados apresentaram, de uma modo geral, comportamentos diferentes entre si, o que foi atribuído a propriedades inerentes à configuração dos corpos de prova; esta conclusão foi considerada importante para a interpretação dos ensaios convencionais de extensão.

1.15.

Fang e Chen, ainda em 1971 (8), desenvolveram uma técnica simples para determinar a resistência à tração de solos: corpos de prova cilíndricos são carregados axialmente através de dois pequenos discos de aço, centrados

nas superfícies do topo e da base; ao longo de planos radiais ocorrem fissuras de tração, enquanto dois cones de rutura são formados junto aos discos, punccionando os corpos de prova. A tensão de rutura à tração é calculada, baseada na teoria de elasticidade linear, por uma fórmula simples, análoga à utilizada no ensaio de compressão diametral, ou seja $\sigma_p = - \frac{2 P}{\pi D h}$. O ensaio foi denominado "ensaio de dupla punção".

Posteriormente, Chen e Drucker (4), com o objetivo de avaliar a capacidade de carga de blocos de concreto e de rocha, desenvolveram uma nova fórmula, que permitiu o tratamento plástico do ensaio de dupla punção. Para corpos de prova ensaiados com as dimensões adiante referidas, recomendaram, para qualquer tipo de solo, o emprego da seguinte equação aproximada:

$$\sigma_p = - \frac{2P}{\pi(Dh - \frac{d^2}{2})}, \text{ sendo}$$

d o diâmetro do disco de aplicação da carga P, D e h o diâmetro e a altura do corpo de prova.

Foram ensaiados corpos de prova de 4 e 6 pol. de diâmetro, e 4,6 e 6 pol. de altura aproveitando os moldes dos ensaios de Proctor e de CBR. Os discos para a aplicação da punção tinham 1 e 1,3 pol de diâmetro, e eram suficientemente rígidos para não fletirem durante os ensaios.

Os ensaios foram realizados com amostras de solo de plasticidade média ($w_L = 31\%$, $I_p = 10\%$ e $w_{ot} = 17\%$), compactadas com diversas umidades, em três camadas no cilindro de Proctor, com 15, 25 e 55 golpes (cada camada), constituindo três séries de corpos de prova. A velocidade de ensaio utilizada foi de 5 cm/min. Foram ainda realizados ensaios de compressão diametral e de compressão simples, sendo também ensaiados outros diferentes materiais, tais como, concreto, argamassa, e concreto asfáltico. Os resultados foram comparados, chegando-se às seguintes conclusões:

a.

os valores das tensões de rutura à tração, obtidos nos ensaios de dupla punção, plotados em gráfico, contra os valores obtidos por compressão diametral, permitiram, com pequena dispersão, o traçado de uma reta média:

$$\sigma_p = \sigma_d, \text{ para os diferentes materiais ensaiados.}$$

b.

os maiores valores das tensões de rutura à tração dos solos foram obtidos com umidade de compactação abaixo da umidade ótima.

1.16.

Ainda em 1971, três equipes de estudantes do último ano do curso de engenharia civil, sob a orientação da Profa. Dra. E.B.Souto Silveira e do autor, realizaram três trabalhos de formatura (1),(3) e (13), onde foram desenvol-

vidos três diferentes métodos de ensaio de tração, em continuidade ao nosso programa de investigações, iniciado neste campo em 1970 (20). Para a realização destes ensaios foram preparados equipamentos, que receberam e continuam recebendo adaptações gradativas, à medida que ensaios vão sendo realizados e os seus resultados interpretados.

A primeira equipe (1) realizou ensaios de flexão adotando o mesmo sistema apresentado na referência (20). Foram introduzidos melhoramentos para facilitar o manuseio dos corpos de prova e a remoção das fôrmas de moldagem. Os corpos de prova foram moldados com três teores de umidade: $w_{ot} - 2\%$, w_{ot} e $w_{ot} + 2\%$ ($w_{ot} = 15\%$); e três graus de compactação: 95, 97 e 100% ($\gamma_d \text{ max} = 1,83 \text{ g/cm}^3$). Foram realizadas duas séries de ensaios, a primeira com as camadas de compactação dispostas paralelamente ao plano de carregamento, e a segunda, perpendicularmente a este plano; a primeira série apresentou resistência à tração com valores 2 a 1,1 vezes os da segunda série, quando a umidade dos corpos de prova variaram entre 13 e 17%. Para o cálculo da deformação específica de rutura foi admitido para os esforços de tração o mesmo módulo de elasticidade determinado em ensaios de compressão triaxial. Os valores da resistência à tração variaram entre -0,74 e -0,15 kg/cm^2 e a deformação específica de rutura entre -0,58 e - 0,11%.

A segunda equipe (3), realizou ensaios de tração em câmara triaxial, de acordo com o sistema desenvolvido por Bishop e Garga (2), com adaptações condicionadas aos equipamentos disponíveis no laboratório. Os ensaios foram realizados com corpos de prova de 35,7mm de diâmetro, nas extremidades, e 22,5mm no trecho de seção reduzida; a altura total era de 90mm e o trecho de seção reduzida apresentava 48mm de comprimento. Os corpos de prova foram talhados a partir de cilindros compactados no molde de Proctor, com o eixo daqueles perpendicular ao eixo destes. Foram ensaiados nove corpos de prova com três diferentes umidades: $w_{ot} - 2\%$, w_{ot} e $w_{ot} + 2\%$ ($w_{ot} = 28\%$) e três graus de compactação: 96, 98 e 100% ($\gamma_d \text{ max} = 1,53 \text{ g/cm}^3$). Foram utilizadas pressões de confinamento de 0,7 e 1,0 kg/cm^2 ; dois corpos de prova romperam antes de se desenvolverem tensões de tração no trecho central. Os ensaios foram realizados com carregamento controlado. De um modo geral, os valores da tensão de tração na rutura diminuíram com o acréscimo da umidade e com o decréscimo do grau de compactação.

A terceira equipe (13), realizou ensaios de compressão diametral, com corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 12,5cm de comprimento. Foram ensaiados 5 tipos de solo, sob diferentes condições de moldagem, elaborando-se para cada solo curvas de variação da tensão de rutura à tração em função da umidade e do peso específico aparente seco. A influência da umidade se fez sentir de modo

mais pronunciado que o do peso específico, decrescendo a resistência à tração com o seu acréscimo. Foram também construídos gráficos de variação de σ_d , com a relação (γ_d/w) , indicando ainda que $\frac{\sigma_d}{\gamma_d/w}$ cresce com (γ_d/w) .

1.17.

Cumprir ainda mencionar, que na fase final de redação deste trabalho, em novembro de 1972, Cruz P.T., e Mellios, G.A. (6) apresentaram resultados de ensaios de tração triaxial de 5 tipos de solos compactados. Para a realização destes ensaios foram feitas adaptações ao esquema de ensaio apresentado por Bishop e Carga (2), semelhantes às introduzidas para os ensaios de Borgato e outros (3), conforme descrito e esquematizado no item 3.2.

adiante. Os ensaios foram também realizados com tensão controlada, mas de forma drenada, com incrementos de carga aplicados de 6 em 6 horas. Foram realizados ensaios com amostras não saturadas e saturadas, sendo neste último caso obtidos valores de tensão de rutura à tração mais baixos. Os ensaios foram feitos com pressões de confinamento variando entre 0,25 e 0,50 kg/cm², e os valores das tensões de tração na rutura variaram entre -0,17 e -0,43 kg/cm². Foram calculadas relações entre as tensões de rutura à tração e à compressão simples, obtendo-se valores da ordem de 1/7 (amostras saturadas) a 1/4 (amostras não saturadas). Constatou-se que a resistência à tração cresce com a umidade ótima de compactação (ver curva inserida no gráfico da Figura 7.19). Ensaios realizados com in

crementos de carga aplicados em intervalos de tempo menores acusaram maiores valores das tensões de rutura à tração.

1.18.

A diversidade dos métodos de ensaio utilizados e a heterogeneidade dos valores de parâmetros determinados, tornou difícil uma síntese dos resultados obtidos. Isto motivou a análise comparativa entre alguns métodos de ensaio, para que pesquisas futuras, tal como sugerido no trabalho realizado em 1970 (20), possam seguir uma linha mestra de programa, levando em conta a importância das variáveis envolvidas, tal que representem um passo além, em relação às investigações já realizadas.

Entre os métodos de ensaios anteriormente descritos foram escolhidos três que, no ano de 1971, foram desenvolvidos (1), (3) e (13) e gradativamente melhorados, à medida que algumas dificuldades eram superadas. No estágio em que este trabalho foi realizado, algumas imperfeições, que acarretaram influências indesejáveis sobre os resultados não foram ainda corrigidas, mas constituem objeto de modificações nos equipamentos e procedimentos atualmente em curso, conforme referido adiante, no item 10. Mesmo assim foi possível proceder a análise comparativa dos métodos, levando-se em conta a precisão dos resultados e a sua confiabilidade, os tipos de parâmetros obteníveis, as possibilidades de introdução de

outras variáveis, a representatividade dos ensaios, a exigência de precauções especiais, a exiguibilidade em laboratórios com equipamentos menos sofisticados, a rapidez de execução, a fase do projeto em que os resultados serão utilizados, etc.

São ainda fornecidos inúmeros resultados, com as respectivas interpretações e comparações, que poderão ser utilizadas como primeira informação na elaboração de análises para anteprojetos e projeto-básicos de obras de terra. Estas informações poderão ainda ser úteis ao desenvolvimento de trabalhos, que atualmente vem se processando em alguns de nossos laboratórios e universidades, em um campo de pesquisa, que ainda se encontra restritamente investigado. Aliás a falta de interesse em se conhecer os parâmetros de tração do solo pode ser atribuída à baixa resistência por ele apresentada, quando comparada com a resistência à compressão, preferindo a maioria dos projetistas atribuir resistência nula à tração, nas análises do comportamento dos maciços de terra projetados. Embora este procedimento seja válido para fins práticos, na análise comparativa de soluções é de maior interesse a avaliação dos parâmetros em função das variáveis envolvidas, em todas as fases de decisão e de escolha de alternativas.

2.

PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS

Para a elaboração do presente trabalho foram consideradas quatro variáveis principais: o método de ensaio, o tipo de solo, a umidade e o grau de compactação dos corpos de prova. Considerando-se três níveis de variáveis para cada caso resultam $3^4 = 81$ combinações possíveis. Procurou-se desenvolver o trabalho tendo por base este número de combinações. No entanto, com o intuito de se obter também algumas comparações com resultados de ensaios de compressão, bem como o de se determinar algumas envoltórias de resistência ao cisalhamento, o número de ensaios ultrapassou à quantidade prevista. Por outro lado, alguns resultados, considerados inaceitáveis, por imperfeições observadas durante os ensaios, ou por se apresentarem incompatíveis com os demais, foram abandonados.

Entre os métodos de ensaio apresentados no item 1, foram escolhidos três, já inicialmente experimentados em trabalhos de formatura realizados sob nossa orientação, por estudantes de engenharia (1), (3) e (13), e com posteriores adaptações: ensaio de flexão, ensaio de tração triaxial e ensaio de compressão diametral. Estes métodos, com as adaptações introduzidas e os respectivos processos de cálculo, estão apresentados no item 3.

Foram escolhidos tres tipos de solo, denominados por A, B e C, de diferentes características, e que constituem materiais de empréstimo para a construção de barragens de terra compactada cujos projetos estão sendo realizados com nossa participação. Nestas condições durante a construção dessas obras será possível a retirada de amostras indeformadas, e a preparação de corpos de prova, para serem ensaiados sob condições mais representativas do maciço de terra, permitindo-se inclusive estabelecer correlações com os resultados de ensaios realizados sobre corpos de prova moldados no laboratório, da forma conduzida no presente trabalho. As características dos solos utilizados estão apresentados no item 4.

Os corpos de prova, correspondentes aos solos A e B, foram moldados com umidade variando desde 3,5% abaixo até 2,5% acima da umidade ótima; para o solo C a umidade de moldagem variou entre 1% abaixo e 6% acima da ótima (ver item 5). O grau de compactação variou de 94 a 100%, 92 a 100% e de 90 a 100%, respectivamente para os solos A, B e C.

3.

TIPOS DE ENSAIOS EXECUTADOS

Entre os diversos métodos de ensaio, descritos sumariamente no item 1, três foram escolhidos, para a realização do presente trabalho, nos quais foram introduzidas algumas modificações. Conforme mencionado abaixo, algumas destas modificações objetivaram superar falhas que foram constatadas em um dos métodos descritos, e outras, para permitirem a realização dos ensaios por meio de simples adaptações, introduzidas nos equipamentos de rotina usados para ensaios de compressão triaxial. Este último caso refere-se aos ensaios de tração triaxial, realizados por Bishop (2), que, na sua forma original, requerem o uso de dispositivos e equipamentos ainda não rotineiramente utilizados em nossos laboratórios de mecânica dos solos.

3.1.

Ensaio de Flexão

Estes ensaios foram realizados por meio de vigas de solo compactado, apoiadas em dois apoios cilíndricos, com a aplicação de duas cargas iguais e simetricamente dispostas, conforme mostrado na Figura 3.1. As vigas são prismáticas, com seção quadrada de $6 \times 6 \text{ cm}^2$, e 80 cm de comprimento. No trecho central foi realizada uma redução de 1,5 cm na altura, sendo a concordância com os trechos extremos feita através de arcos de círculo de

VISTA SUPERIOR

SEÇÃO A-A

FIG. 3-1 - ESQUEMA DO ENSAIO DE FLEXÃO

Figura- 3.2 - Fotos do Ensaio de Flexão

15 cm de raio. Esta redução foi introduzida com o objetivo de impor a rutura na parte central (ver Fotos da Figura 3.2), uma vez que diversas vigas de seção constante, anteriormente ensaiadas, apresentaram, em grande maioria, rutura em seção adjacente a um dos "pontos" de carregamento, onde a influência de tensões de cisalhamento, devidas à força cortante, é considerável.

Os corpos de prova foram moldados em 8 camadas, de 0,8cm de espessura, compactadas por meio de um soquete de seção retangular, de $5,5 \times 20,0 \text{ cm}^2$, em um molde metálico, desmontável, em forma de canal, rigidamente construído, para evitar deformações durante a compactação do solo e transporte dos corpos de prova. A redução de altura na parte central foi construída introduzindo-se um calço, com a configuração prevista, no fundo do molde. Após a compactação da última camada, era removida uma extensão do molde (introduzida para a confecção das últimas camadas), e o excesso de solo era raspado para que a viga apresentasse a altura igual à do molde.

Os ensaios foram realizados com o corpo de prova apoiado sobre uma mesa e o carregamento aplicado horizontalmente. Desta forma fica eliminado o efeito do peso próprio, que além de aumentar consideravelmente as tensões de tração e de compressão introduz tensões de cisalhamento na seção de rutura, afetando os resultados dos ensaios. Para minimizar as forças de atrito entre o cor

po de prova e a mesa de ensaio, esta foi revestida por uma placa de fórmica, sobre a qual era introduzida uma "camada" de esferas de aço com diâmetro de 1/8". O atrito foi ainda mais reduzido, intercalando-se, entre o corpo de prova e as esferas, uma folha de plástico fina, recortada transversalmente em toda a sua extensão. Mediu-se com um dinamômetro sensível a força necessária para vencer o atrito e deslocar o corpo de prova, da ordem de 150g, que era descontada no carregamento.

Durante os ensaios foram tomadas precauções para evitar o secamento do solo, por meio de folhas de plástico e controle da umidade do ar, através de contínua pulverização de água, na vizinhança dos corpos de prova. Alguns ensaios, realizados anteriormente sem estas precauções, apresentaram considerável acréscimo de resistência.

Todos os ensaios foram realizados com mesma velocidade de carregamento, introduzindo-se iguais incrementos de carga em intervalos de tempo constante (200g cada 10 minutos ou 100g cada 5 minutos); constatou-se que a variação entre a leitura da deformação da viga, realizada no fim do intervalo, e a leitura realizada 1 minuto antes, era inferior a 5% do valor da deformação correspondente a este intervalo. As deformações da viga foram medidas no centro por meio de defletômetros com precisão de 10^{-3} mm. Nos gráficos das Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, estão apresentadas, para três tipos de so-

lo, as curvas carga-deformação (flecha), obtidas em alguns ensaios realizados.

Para o cálculo da tensão de rutura foi admitida distribuição parabólica das tensões de tração e linear das tensões de compressão, com a mesma tangente na linha neutra da viga. No instante de rutura a curva parabólica apresenta tangente de inclinação nula, correspondente à tensão máxima de tração, conforme representado na Figura 3.3.

Figura 3.3.

Hipóteses de Distribuição das Tensões na Seção da Viga, na Rutura.

Para a determinação dos parâmetros da parábola $\sigma_t = a y^2 + b y + c$, tem-se:

- na linha neutra:

$$y = 0 \left\{ \begin{array}{l} \sigma_t = 0 \quad \therefore \quad c = 0 \\ \frac{d \sigma_t}{dy} = \operatorname{tg} \alpha \quad \therefore \quad b = \operatorname{tg} \alpha \end{array} \right.$$

- na borda tracionada: $y = (h - y_0); \quad \frac{d \sigma_t}{dy} = 0$

$$2a (h - y_0) + \operatorname{tg} \alpha = 0 \quad a = - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2(h - y_0)}$$

Portanto:

$$\sigma_t = - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2(h - y_0)} y^2 + (\operatorname{tg} \alpha) y \quad (3.1.)$$

Nesta equação, fazendo $y = (h - y_0)$, resulta $\sigma_t = R_f$

$$R_f = - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2} (h - y_0) + \operatorname{tg} \alpha (h - y_0)$$

$$R_f = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2} (h - y_0)$$

Na rutura, as resultantes das tensões de compressão e de tração, por unidade de largura da viga, valem, respectivamente

$$C = \frac{\sigma_c y_o}{2} = \frac{y_o^2 \operatorname{tg} \alpha}{2}$$

$$T = -\frac{2}{3} R_f (h - y_o) = -\frac{\operatorname{tg} \alpha}{3} (h - y_o)^2$$

$$\text{Sendo } C = -T \therefore \frac{y_o^2 \operatorname{tg} \alpha}{2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{3} (h - y_o)^2 \therefore$$

$$y_o^2 + 4 h y_o - 2 h^2 = 0$$

$$y_o = h (-2 \pm \sqrt{6})$$

$$\text{Como } y_o > 0 \quad y_o = h(-2 + \sqrt{6}) \quad \text{ou}$$

$$y_o = 0,45 h \quad (3.2)$$

$$\text{O momento fletor } M = bT \left[\frac{2}{3} y_o + \frac{5}{8} (h - y_o) \right] \therefore$$

$$M = -b \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,55 h R_f \left[\frac{2}{3} \cdot 0,45 h + \frac{5}{8} \cdot 0,55 h \right]$$

$$M = -0,236 b h^2 R_f$$

$$R_f = -\frac{4,23 M}{b h^2} \quad (3.3.)$$

$$\text{Sendo } W = \frac{M}{-R_f}, \text{ o módulo de resistência à flexão}$$

$$\text{Resulta: } W = \frac{b h^2}{4,23} \quad (3.4.)$$

No regime elástico, ou seja, quando se considera também linear a distribuição das tensões de tração

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (3.5).$$

Assim, a tensão de rutura, calculada a partir de fórmulas deduzidas para o regime elástico, corresponde à cerca de 70% do valor calculado considerando-se a distribuição parabólica das tensões de tração.

Considerando um elemento de solo no trecho central da viga, submetido ao momento fletor M , tem-se, conforme Timoshenko (21), pag. 108, na Figura 3.4:

Figura 3.4. Elemento da viga sob flexão.

a deformação específica na direção x

$$\epsilon_t = \frac{s's_1}{n n_1} = \frac{y}{\rho} \quad (3.6)$$

sendo ρ o raio de curvatura da viga.

Para se transformar a parábola $\sigma_t = \phi(y)$, expressa pela equação (3.1), na parábola $\sigma_t = \phi(\epsilon_t)$, (Figura 3.5) tem-se, no ponto de coordenadas nulas:

Figura 3.5.

Curva $\sigma = \phi(\epsilon_t)$

$$\text{tg } \alpha = \frac{d \sigma}{d y}, \text{ da mesma forma que } E = \frac{d \sigma_t}{d \epsilon_t}$$

$$\text{Sendo } y = \rho \cdot \epsilon_t:$$

$$(h - y_0) = \rho \epsilon_{rut}$$

e

$$\text{tg } \alpha = \frac{E}{\rho},$$

a equação (3.1) resulta:

$$\sigma_t = - \frac{E}{2 \rho^2 \epsilon_{rut}} \rho^2 \epsilon_t + \frac{E}{\rho} \rho \epsilon_t, \text{ ou seja}$$

$$\sigma_t = - \frac{E}{2 \epsilon_{rut}} \epsilon_t^2 + E \epsilon_t \quad (3.7)$$

Na ruptura: $\sigma_t = R_f$ e $\epsilon_t = \epsilon_{rut}$:

$$R_f = \frac{E \epsilon_{rut}}{2} \text{ e portanto: } \epsilon_{rut} = \frac{2 R_f}{E} \quad (3.8)$$

Para a verificação da hipótese de distribuição parabólica das tensões de tração, os resultados de alguns ensaios de flexão foram assim calculados, e a curva teó-

rica obtida $\sigma_t = \phi(\epsilon_t)$, foi analiticamente transformada na curva $P = \phi(f)$, conforme exposto e exemplificado no Apêndice.

As comparações entre as curvas $P = \phi(f)$, obtidas analiticamente, e os pontos do ensaio foram estabelecidas para alguns corpos de prova e permitem concluir sobre a validade da hipótese de distribuição parabólica das tensões de tração (ver as curvas obtidas para os corpos de prova B2 e C3 nas Figuras A.7 e A.8). Nestas condições, o cálculo dos parâmetros de tração, obtidos através de ensaios de flexão, torna-se menos complexo do que o exposto no Apêndice e pode ser resumido da seguinte forma:

a.

constroeu-se a curva $P = \phi(f)$ com as leituras obtidas durante o ensaio;

b.

calcula-se o momento fletor máximo, correspondente à carga de rutura, $M = \frac{Prut}{2} \cdot a$;

c.

calcula-se o limite de resistência à tração $R_f = -\frac{4,23M}{bh^2}$, sendo b e h a largura e a altura da viga na seção de rutura;

d.

calcula-se o módulo de elasticidade $E = \frac{1900}{J} \cdot \frac{P}{f}$, sendo J o momento de inércia da seção de rutura, e a relação P/f retirada do gráfico $P = \phi(f)$

e.

calcula-se a deformação específica de tração na rutura:

$$\epsilon_{rut} = \frac{2 R_f}{E}$$

3.2.

Ensaio de Tração Triaxial

Estes ensaios foram realizados com corpos de prova cilíndricos, com a seção reduzida na parte central, introduzidos em uma câmara para ensaios triaxiais, onde recebem uma pressão confinante. A tração é produzida, sem o auxílio de garras de fixação, pela eliminação gradativa da pressão de confinamento no topo do corpo de prova. Na Figura 3.6 estão apresentados o esquema de ensaio e as dimensões dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram moldados a partir de blocos, não afetados, da viga que foi submetida ao ensaio de flexão, ficando o seu eixo paralelo aos planos das camadas. A redução da seção foi providenciada por meio de um rebaixo introduzido na peça de talhagem de corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão triaxial. Os corpos de prova foram envolvidos por uma

CÉLULA TRIAXIAL ADAPTADA

CORPO DE PROVA

FIG. 3-6 - ESQUEMA DO ENSAIO DE TRAÇÃO TRIAXIAL

membrana de borracha, fixada no cabeçote e na base da camara, não sendo esticada para evitar sua influência no esforço de tração aplicado ao corpo de prova.

Para a transmissão do esforço de tração ao cabeçote, a extremidade inferior do pistão tem a forma de "T", que é fixada em uma cavidade existente no topo do cabeçote; girando-se o pistão de 90° o "T" encaixa-se nesta cavidade. À extremidade superior do pistão é ligado um fio de aço que se apoia sobre duas roldanas, dotadas de rolamentos. Na outra extremidade do fio existe um suporte, sobre qual são aplicadas cargas para produzirem o esforço de tração. O ensaio é então realizado, por meio de carregamento controlado, medindo-se as deformações por meio de um defletômetro ligado à cabeça do pistão (V.foto da Figura 3.7). A camara é preenchida com água, com exceção do seu topo onde é colocado óleo. Os ensaios foram realizados de forma não drenada, com incrementos de carga axial de 100g cada 5 minutos. O atrito entre o pistão e a camara é minimizada por meio do sistema de buchas rotativas, existente nas câmaras Geonor, utilizadas para os ensaios de compressão triaxial. Foram realizadas medidas do atrito entre o pistão e a câmara, encontrando-se valores da ordem de 180g, que foram descontados no cálculo dos ensaios. Foi também levado em conta o esforço transmitido ao pistão, de baixo para cima, devido à pressão confinante.

Na Figura 3.8 estão esquematizadas as forças que atuam durante o andamento dos ensaios. A pressão confinante, por constituir a tensão principal maior, é denominada de σ_1 . O equilíbrio das forças sobre a metade superior do corpo de prova pode ser posto da seguinte forma:

$$P - A + \sigma_1 A_p - \sigma_1 A_e + \sigma_1 (A_e - A_c) + \sigma_3 A_c = 0$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) A_c = P - A + \sigma_1 A_p$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{P - A + \sigma_1 A_p}{A_c} \quad (3.11) \quad \text{ou}$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \frac{P - A + \sigma_1 A_p}{A_c} \quad (3.12)$$

A medida que a carga P é acrescida, a tensão σ_3 na seção central vai diminuindo até se anular e se tornar negativa, ou seja, tensão de tração. O valor limite do esforço axial ($P - A + \sigma_1 A_p$) que pode ser aplicado no ensaio é aquele que torna nula a pressão no topo do corpo de prova. Se ele foi ultrapassado o cabeçote descolar-se-á do topo do corpo de prova.

$$\text{Portanto } (P - A + \sigma_1 A_p)_{\text{lim}} = \sigma_1 A_e \quad \text{e}$$

o valor limite de σ_3 será:

FIG.3.7 - FOTO DO ENSAIO DE TRAÇÃO TRIAXIAL.

FIG. 7.8 - ESQUEMA DAS FORÇAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO TRIAXIAL.

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 A_e}{A_c} \quad \text{ou}$$

$$\sigma_3 = -\sigma_1 \left(\frac{A_e}{A_c} - 1 \right) \quad (3.13)$$

Assim, a magnitude da tensão de tração dependerá da relação entre as áreas da extremidade e do centro do corpo de prova. Os valores de σ_1 e da relação A_e/A_c devem ser, portanto, adequadamente escolhidos para que o corpo de prova sofra rutura por tração, ou seja, que o círculo de Mohr alcance o lado negativo das tensões normais, cortando o eixo das tensões cisalhantes. Os ensaios foram realizados com corpos de prova apresentando $A_c \approx 4 \text{ cm}^2$ e $A_e \approx 10 \text{ cm}^2$, portanto com a relação $A_e/A_c \approx 2,5$. As pressões confinantes utilizadas foram 0,3 e 0,5 kg/cm², a última apenas para dois ensaios. Assim, para os ensaios com $\sigma_1 = 0,3 \text{ kg/cm}^2$ o valor limite de σ_3 corresponde a:

$$(\sigma_3) \text{ lim} = -0,3 \times 1,5 = -0,45 \text{ kg/cm}^2, \text{ e}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \text{ lim} = 0,3 + 0,45 = 0,75 \text{ kg/cm}^2$$

Alguns ensaios, realizados com corpos de prova com maior grau de compactação, não romperam ao ser atingido o valor limite de $(\sigma_1 - \sigma_3)$; alguns foram repetidos aumentando-se a relação A_e/A_c para cerca de 3.

Nos gráficos das Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, estão apresentadas curvas tensão ($\sigma_1 - \sigma_3$) - deformação, obtidas em alguns dos ensaios realizados. Deve-se notar que, antes de ($\sigma_1 - \sigma_3$) alcançar o valor da pressão de confinamento (σ_1), as curvas obtidas correspondem a um ensaio de extensão, e deste valor em diante os corpos de prova passam a ser realmente tracionados.

3.3.

Ensaio de Compressão Diametral

Estes ensaios foram realizados segundo o método, desenvolvido por Lobo Carneiro (16) para corpos de prova de concreto. Os corpos de prova são cilíndricos, e as tensões de tração são produzidas ao serem aplicadas tensões de compressão em duas geratrizes diametralmente opostas, conforme ilustrado na Figura 3.9. Utilizando-se uma das extremidades das vigas, que foram submetidas aos ensaios de flexão, foram moldados corpos de prova, de diâmetro $D = 5\text{cm}$ e altura $h = 12,5\text{cm}$. Os ensaios foram realizados com deformação controlada ($0,77\text{ mm/min}$), e a força P aplicada perpendicularmente aos planos das camadas de compactação das vigas (alguns corpos de prova, de idênticas dimensões, compactados em 4 camadas, dentro de moldes cilíndricos, apresentaram rutura em um dos planos de ligação das camadas, antes de se verificar a rutura no plano diametral). A carga P foi transmitida ao corpo de prova por meio de sapatas de aço, de comprimento igual à altura do cilindro, e com $0,5\text{cm}$ de largura. Esta dimen -

FIG.3-9- ESQUEMA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

são foi escolhida após uma série de tentativas, utilizando-se larguras diferentes, e observando-se que a de 0,5 cm correspondia à que melhor propiciava a formação de cunhas, próximas dos pontos de aplicação da carga P, sem o aparecimento de fissuras secundárias, fora do plano diametral de rutura. Durante a aplicação do carregamento dos corpos de prova foram procedidas leituras de deformação de um dinamômetro de mola helicoidal, para a determinação da carga P, e as respectivas leituras de encurtamento do diâmetro do corpo de prova na direção da carga P.

Para o cálculo das tensões, foram admitidas as seguintes hipóteses:

a.

as tensões principais intermediárias não tem influência na rutura;

b.

as tensões permanecem planas;

c.

as cargas são concentradas sobre o diâmetro.

FIG. 3.10 - TENSÕES ATUANDO NO CORPO DE PROVA SUBMETIDO À CARGA P

No elemento de solo, distanciado de r_1 e r_2 respectivamente dos pontos C e D, conforme mostrado na parte (a) da Figura 3.10, tem-se as seguintes tensões de tração e compressão :

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi h} \left[\frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R-y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right] \quad (3.14)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi h} \left[\frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R-y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right] \quad (3.15)$$

Nos pontos A e B, resulta $\sigma_x = \sigma_y = 0$

$$\text{No centro O} \quad \sigma_x = - \frac{2P}{\pi Dh} \quad (3.16)$$

$$\sigma_y = \frac{6P}{\pi Dh} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Ao longo do eixo y} \quad \sigma_x &= - \frac{2P}{\pi Dh} \quad \text{e} \\ \sigma_y &= \frac{2P}{\pi Dh} \left[\frac{D}{r} + \frac{D}{D-r} - 1 \right] \quad (3.18) \end{aligned}$$

A rutura do corpo de prova se dá ao longo do eixo y, e a tensão de tração fica constante, praticamente ao longo de todo o diâmetro. A carga P, não sendo concentrada ao longo de uma linha, mas distribuída na área da sapata de 0,5 cm de largura, causa a formação de duas cunhas, no topo e na base, conforme ilustrado na parte (b) da Figura 3.10. A tensão de rutura à tração é então calculada pela equação: $\sigma_d = - \frac{2P}{\pi Dh}$ (3.19)

Nas figuras 6.7, 6.8 e 6.9, estão apresentadas curvas da tensão de tração em função da deformação diametral (na direção da carga P), correspondentes a alguns ensaios realizados com os solos A, B e C respectivamente.

3.4.

Ensaio de Compressão Simples e de Compressão Triaxial.

Com corpos de prova também obtidos de partes não danificadas das vigas dos ensaios de flexão, foram realizados ensaios de compressão simples e de compressão triaxial com $\sigma_3 = 2,0 \text{ kg/cm}^2$. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de comparar os parâmetros de resistência à tração com os de resistência à compressão. Nos gráficos das Figuras 6.10 a 6.15 estão apresentadas curvas tensão-deformação de alguns ensaios de compressão simples e triaxiais realizados com os 3 tipos de solo.

Nas Figuras 7.26 a 7.30 estão apresentadas os trechos iniciais das curvas tensão-deformação para os ensaios à compressão simples e triaxial, juntamente com as respectivas curvas de ensaios de tração triaxial. Os gráficos de tração e de compressão estão apresentados em escalas diferentes na mesma figura, mas, mantendo-se a mesma relação entre as escalas das tensões e das

deformações, a fim de facilitar as comparações visuais entre os respectivos módulos de "elasticidade" (†). Para cada tipo de solo, correspondendo a uma das condições de moldagem ensaiadas, foram realizados ensaios de compressão triaxial, também com outras tensões confinantes, a fim de permitir a determinação da envoltória de resistência ao cisalhamento, utilizando-se resultados de ensaios de compressão e de tração (v. Figuras 3.11, 3.12 e 3.13).

Todos os ensaios de compressão foram realizados de forma não drenada, com deformação controlada e velocidade de 0,77 mm/min. Os corpos de prova para os ensaios de compressão simples foram moldados com 5,0 cm de diâmetro e 12,5 cm de altura; os triaxiais com 3,6 cm de diâmetro e 9,0 cm de altura.

(†)- O módulo de "elasticidade" aqui mencionado corresponde à relação tensão/deformação, durante o carregamento, para o trecho inicial da curva respectiva, que pode ser considerado reto (19).

FIG.3.II - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO, DETERMINADA COM ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO - CP-A6

FIG.3.12 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO, DETERMINADA COM ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO - CP-B4.

FIG.3.13 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO,
DETERMINADA COM ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO-CP-C4

4.

TIPOS DE SOLOS ENSAIADOS

Conforme mencionado no item 2, foram utilizados três tipos de solo, aqui denominados por A, B e C, com os quais se pretende, em outra fase, realizar ensaios com amostras indeformadas, retiradas dos respectivos aterros compactados. Os solos A e B são aluvio-coluvionares originários principalmente de solos residuais provenientes dos arenitos Baurú, Botucatú e dos derrames de basalto da região norte do estado de São Paulo. Estão localizados em terraços recentes do Rio Grande, Estado de São Paulo. Sua fração arenosa é constituída de grãos de quartzo e magnetita e a argilosa é predominantemente do grupo caolinitico. O solo C, também aluvio-coluvionar é formado por erosão, transporte e deposição de material intemperizado de xistos, gnaisses, granitos e quartzitos da vertente interior da Serra do Mar, 30 km a noroeste da cidade de São Paulo. A fração arenosa é constituída de quartzo e ilmenita e a argilosa de caulinita.

Na Tabela 4.1. estão apresentados os resultados de ensaios de limites de consistência, granulometria, compactação Proctor Normal, etc., realizados com os três tipos de solo.

TABELA 4.1

CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ENSAIADOS

Solos	A	B	C
w_L (%)	30,2	30,1	60,0
w_P (%)	14,2	14,5	40,0
Argila (%) *	21	33	53
Silte (%) *	14	12	26
Areia (%) *	65	55	21
Atividade Coloidal	0,76	0,46	0,38
γ_s (g/cm ³)	2,78	2,73	2,73
w_{ot} (%) **	11,5	15,2	30,0
$\gamma_{d \max}$ (g/cm ³)**	1,93	1,83	1,41

* Classificação segundo M.I.T.

** Parâmetros do ensaio de Proctor Normal, realizado sem reuso do material em cada ponto.

5.

CONDIÇÕES DE COMPACTAÇÃO INVESTIGADAS

As condições de moldagem dos corpos de prova foram estabelecidas de forma a abranger as faixas previstas, de desvio de umidade e de grau de compactação, nos projetos dos aterros que serão construídos com os respectivos solos, permitindo assim, em uma fase posterior, a comparação com os resultados de ensaios realizados com corpos de prova retirados dos próprios aterros. Para os solos A e B, a umidade variou entre 3,5% abaixo e 2,5% acima da umidade ótima; para o solo C, entre 1% abaixo e 6% acima da umidade ótima. O grau de compactação variou de 94 a 100%, de 92 a 100% e de 90 a 100%, respectivamente para os solos A, B e C. A fixação de elevado teor de umidade e de baixo grau de compactação, correspondentes aos limites superior de umidade e inferior de densidade para o solo C, deve-se aos respectivos valores especificados para a construção do aterro, cujo material de empréstimo se apresenta com elevado teor de umidade.

Na Figura 5.1 estão apresentadas, em um só gráfico, as curvas de compactação do ensaio de Proctor Normal dos três solos, e indicadas as faixas de umidade e peso específico ensaiadas.

Nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, estão apresentadas as condições de moldagem dos corpos de prova, juntamente com

os resultados dos ensaios, incluindo, tensão de rutura, módulo de elasticidade e deformação específica de rutura. para os ensaios triaxiais os valores indicados nas tabelas correspondem à diferença ($\sigma_1 - \sigma_3$).

FIG. 5-1 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO E FAIXAS DE UMIDADE E PESO ESPECÍFICO ENSAIADAS

6.

RESULTADOS DOS ENSAIOS EXECUTADOS

Os resultados dos ensaios de tração, realizados pelos três métodos, e dos ensaios de compressão simples e triaxial estão apresentados nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, juntamente com os respectivos valores das condições de moldagem dos corpos de prova. Os valores correspondentes às tensões de rutura foram calculados conforme exposto no item 3. Os módulos de elasticidade foram calculados a partir do trecho inicial das curvas tensão-deformação, levando-se em conta, tanto a precisão das leituras feitas, como o próprio grau de linearidade do comportamento do solo, conforme sugerido por Souto Silveira (19); o mesmo critério foi utilizado para determinar a relação P/f , do trecho linear das curvas dos ensaios de flexão. Para os ensaios de tração triaxial foram indicados nas tabelas os valores da máxima deformação específica, medida durante a realização dos ensaios. Para os ensaios de compressão diametral estão indicadas apenas as tensões de rutura, em vista da impossibilidade de se determinar os parâmetros E e ϵ_{rut} .

Curvas típicas do andamento dos ensaios de tração estão apresentadas nas Figuras 6.1 a 6.9, correspondentes a diferentes condições de moldagem, dos solos A, B e C:

para os ensaios de flexão estão apresentadas curvas carga-flecha (Figuras 6.1, 6.2 e 6.3; para os ensaios de tração triaxial, curvas tensão-deformação específica ; (Figuras 6.4, 6.5 e 6.6.); para os ensaios de compressão diametral, curvas tensão-deformação diametral, medida na direção do carregamento (Figuras 6.7, 6.8 e 6.9). Da mesma forma, curvas típicas tensão-deformação, obtidas nos ensaios de compressão simples e triaxiais, estão apresentadas nos gráficos das Figuras 6.10 a 6.15, para os três tipos de solo ensaiados.

TABELA 6.1 - SOLO "A"

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO

Corpo de Prova	Tipo de Ensaio	Condições de Moldagem		Tensão de Rutura (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ϵ_{rut} (%)
		w (%)	γ_d (g/cm ³)			
A1	CS	7,3	1,910	7,30	850	2,2
	CT-2,0	8,7	1,925	10,23	460	9,5
	TD	8,0	1,922	1,15		
	TF	8,3	1,921	1,35	2100	0,13
A2	CS	7,8	1,814	6,61	630	1,35
	TD	7,8	1,822	1,28		
	TF	7,8	1,820	1,45	2200	0,13
	TT-0,3	7,9	1,785	0,48	120	>0,40
A3	CT-2,0	9,0	1,803	5,35	250	9,9
	TD	8,7	1,879	0,70		
	TF	8,8	1,800	0,90	2070	0,09
	TT-0,3	8,7	1,767	0,38	220	>0,30
A4	CS	9,2	1,940	4,57	530	1,7
	CT-2,0	9,0	1,905	12,48	760	14,1
	TF	9,3	1,890	1,03	1750	0,12
	TT-0,3	9,5	1,909	0,70	480	>0,70
A5	CS	10,7	1,858	2,61	200	2,5
	TD	10,9	1,892	0,33		
A6	CS	11,2	1,920	2,44	190	2,9
	CT-2,0	10,4	1,950	5,44	500	9,6
	TF	11,1	1,910	0,55	710	0,16
	TT-0,3	11,3	1,881	0,49	120	>0,70
	TT-0,5	11,5	1,889	0,58	560	>0,10
A7	CS	12,0	1,819	1,31	150	2,5
	CT-2,0	12,0	1,810	3,72	120	18,2
	TD	11,1	1,810	0,07		
	TF	11,8	1,830	0,31	1100	0,06
	TT-03	11,7	1,797	0,34	220	>0,18

TABELA 6.1. - SOLO "A"
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO

Corpo de Prova	Tipo de Ensaio	Condições de Moldagem		Tensão de Rutura (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ϵ_{rut} (%)
		w (%)	γ_d (g/cm ³)			
A8	CS	13,2	1,944	1,59	110	4,8
	CT-2,0	13,1	1,800	3,75	110	20,0
	TF	13,2	1,860	0,31	800	0,08
	TT-0,3	13,3	1,852	0,34	250	>0,30
	TT-0,5	13,2	1,853	0,62	570	>0,50
A9	CS	13,3	1,925	1,33	50	5,1
	CT-2,0	13,6	1,911	4,45	240	23,0
	TD	13,7	1,901	0,05		
	TF	13,7	1,910	0,33	470	0,14
	TT-0,3	14,1	1,912	0,35	80	>1,0
A10	CS	14,2	1,840	0,90	70	6,0
	TD	14,1	1,831	0,01		
	TT-0,3	14,1	1,825	0,28	150	>1,0

NOTAS - Os valores da tensão de rutura apresentados na tabela para os ensaios triaxiais (CT e TT) correspondem à diferença ($\sigma_1 - \sigma_3$)

- As tensões e deformações estão apresentadas em valor absoluto.
- Os valores de E e ϵ_{rut} foram calculados considerando a origem das curvas tensão-deformação coincidindo com o início do descarregamento de σ_1 do topo dos corpos de prova.

TABELA 6.2. - SOLO "B"

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO

Corpo de Prova	Tipo de Ensaio	Condições de Moldagem		Tensão de Ruptura (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ϵ_{rut} (%)
		w (%)	γ_d (g/cm ³)			
B1	CS	10,6	1,672	5,45	380	2,1
	CT-2,0	10,6	1,617	6,80	190	15,8
	TD	10,5	1,668	1,01		
	TF	11,6	1,665	0,54	830	0,13
	TT-0,3	10,4	1,665	0,86	220	>0,50
B2	CS	12,2	1,785	5,56	500	2,0
	CT-2,0	12,7	1,699	7,49	300	13,7
	TD	12,3	1,833	0,57		
	TF	12,9	1,814	0,80	1760	0,09
	TT-0,3	12,8	1,808	0,90	500	>0,75
B3	CS	13,3	1,710	2,96	250	2,9
	CT-2,0	13,2	1,709	6,18	160	22,1
	TD	13,6	1,668	0,22		
	TF	13,2	1,730	0,52	1360	0,08
	TT-0,3	13,9	1,732	0,65	670	>0,23
B4	CS	14,9	1,836	3,21	210	3,5
	CT-2,0	14,6	1,851	4,03	230	18,0
	TD	14,4	1,848	0,37		
	TF	14,9	1,844	0,42	800	0,11
	TT-0,3	15,2	1,843	0,55	110	>0,52
B5	CS	15,0	1,750	2,40	200	4,0
	TD	15,1	1,772	0,27		
	TF	15,0	1,777	0,44	650	0,14
	TT-0,3	14,9	1,780	0,56	360	>0,40
B6	CS	15,5	1,680	1,38	140	4,2
	TD	14,9	1,695	0,17		
	TF	15,6	1,712	0,32	400	0,19
	TT-0,3	15,1	1,692	0,51	250	>0,51

TABELA 6.2. - SOLO "B"

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO

Corpo de Prova	Tipo de Ensaio	Condições de Moldagem		Tensão de Rutura (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ϵ_{rut} (%)
		w (%)	γ_d (g/cm ²)			
B7	CS	17,0	1,732	1,25	100	5,2
	TD	16,9	1,722	0,06		
	TF	17,2	1,728	0,25	200	0,22
	TT-0,3	17,1	1,718	0,34	220	>0,49
B8	CS	18,3	1,778	1,16	60	6,0
	CT-2,0	18,5	1,766	2,93	90	27,0
	TD	18,0	1,758	0,02		
	TF	18,4	1,780	0,20	75	0,55
	TT-0,3	18,4	1,760	0,22	200	>0,34

NOTAS - Os valores da tensão de rutura apresentados na tabela para os ensaios triaxiais (CT e TT) correspondem à diferença ($\sigma_1 - \sigma_3$)

- As tensões e deformações estão apresentadas em valor absoluto.
- Os valores de E e ϵ_{rut} foram calculados considerando a origem das curvas tensão-deformação coincidindo com o início do descarregamento de σ_1 do topo dos corpos de prova.

TABELA 6.3. - SOLO "C"

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO

Corpo de Prova	Tipo de Ensaio	Condições de Moldagem		Tensão de Rutura (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ϵ_{rut} (%)
		w (%)	γ_{d3} (g/cm ³)			
C1	CS	28,7	1,423	9,63	900	2,3
	TD	28,9	1,402	1,05		
	TF	27,6	1,410	1,33	1600	0,17
	TT-0,3	28,4	1,399	0,90	560	>0,20
C2	TD	28,8	1,365	0,88		
	TF	28,9	1,338	0,76	1200	0,13
	TT-0,3	28,6	1,361	0,75	530	>0,40
C3	CS	29,9	1,310	3,85	220	5,1
	CT-2,0	30,4	1,237	6,06	190	26,4
	TD	29,9	1,274	0,58		
	TF	30,0	1,278	0,50	720	0,14
	TT-0,3	29,9	1,305	0,49	350	>0,22
C4	CS	32,2	1,369	4,39	170	5,5
	CT-2,0	32,1	1,384	6,61	400	20,0
	TD	31,4	1,349	0,65		
	TF	32,5	1,363	0,54	950	0,11
	TT-0,3	32,4	1,391	0,63	1300	>0,12
C5	CS	32,3	1,417	6,07	450	4,1
	TF	32,4	1,415	0,66	1200	0,11
C6	CS	33,7	1,405	4,31	240	4,0
C7	CS	33,8	1,280	1,49	300	6,1
	CT-2,0	33,9	1,282	2,58	115	26,7
	TD	33,8	1,275	0,22		
	TF	33,8	1,280	0,22	280	0,16
	TT-0,3	33,8	1,280	0,32	70	>0,82
C8	CS	36,3	1,272	0,98	90	6,0
	CT-2,0	36,6	1,249	2,20	90	28,0

TABELA 6.3. - SOLO "C"

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO E DE TRAÇÃO

Corpo de Prova	Tipo de Ensaio	Condições de Moldagem		Tensão de Rutura (kg/cm ²)	E (kg/cm)	ϵ_{rut} (%)
		w (%)	γ_d (g/cm ³)			
C9	CS	36,3	1,353	2,10	120	6,2
	TD	35,9	1,362	0,19		
	TF	36,2	1,352	0,31	260	0,24
	TT-0,3	36,1	1,362	0,38	570	>0,24
C10	CS	36,6	1,304	1,67	65	3,7
	CT-2,0	36,5	1,316	3,12	85	19,7
	TD	36,6	1,300	0,08		
	TF	36,6	1,304	0,29	190	0,31
	TT-0,3	35,8	1,311	0,33	100	>0,77

NOTAS

- Os valores da tensão de rutura apresentados na tabela para os ensaios triaxiais (CT e TT) correspondem à diferença ($\sigma_1 - \sigma_3$)
- As tensões e deformações estão apresentadas em valor absoluto.
- Os valores de E e ϵ_{rut} foram calculados considerando a origem das curvas tensão-deformação coincidindo com o início do descarregamento de σ_1 do topo dos corpos de prova.

FIG. 6-1 - CURVAS CARGA-FLECHA, OBTIDAS EM ENSAIOS DE FLEXÃO - SOLO "A"

FIG. 6-2 - CURVAS CARGA-FLECHA, OBTIDAS EM ENSAIOS DE FLEXÃO - SOLO "B"

FIG. 6.3 - CURVAS CARGA-FLECHA, OBTIDAS EM ENSAIOS DE FLEXÃO - SOLO "C"

FIG. 6.4 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS DE TRAÇÃO TRIAXIAL - SOLO "A"

FIG. 6.5 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS DE TRAÇÃO TRIAXIAL - SOLO "B"

FIG. 6-6 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS DE TRAÇÃO TRIAXIAL - SOLO "C"

FIG. 6.7 - CURVAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL - SOLO "A"

FIG. 6.8 - CURVAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL - SOLO "B"

FIG. 6.9 – CURVAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL – SOLO "C"

FIG. 6-10 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO "A"

FIG. 6-11 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO "B"

FIG. 6-12 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - SOLO "C"

FIG. 6-13 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS TRIAXIAIS - SOLO "A"

FIG. 6-14 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS TRIAXIAIS - SOLO "B"

FIG.6.15 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO, OBTIDAS EM ENSAIOS TRIAXIAIS - SOLO "C"

7.

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos nos ensaios de tração e de compressão foram analisados e agrupados, a fim de se estudar a influência do tipo de solo, das condições de moldagem e estabelecer comparações entre os métodos de ensaio.

7.1.

Influência da Umidade e do Grau de Compactação dos Corpos de Prova.

Para cada tipo de solo e método de ensaio utilizado, foram construídos gráficos, onde são representadas as condições de moldagem dos corpos de prova: umidade (e desvio de umidade em relação à umidade ótima) e peso específico aparente seco (e grau de compactação). Nestes gráficos foram plotados os valores das tensões de rutura, em kg/cm^2 , obtidos nos ensaios; por meio de interpolações, foram construídas curvas de igual tensão de rutura à tração ou à compressão. Nas Figuras 7.1 a 7.4 estão apresentados os gráficos correspondentes aos ensaios de flexão, de tração triaxial, de compressão diametral e de compressão simples, construídos com os valores obtidos em corpos de prova moldados com o solo A. Analogamente, nas Figuras 7.5 a 7.8 estão apresentados os gráficos correspondentes aos ensaios realizados com o solo B, e nas Figuras 7.9 a 7.12 os gráficos construídos para o solo C. O exame destes gráficos permite

FIG.7.1- CURVAS DE IGUAL R_f (ENSAIOS DE FLEXÃO)- SOLO A

FIG.7.2 - CURVAS DE IGUAL $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ (ENSAIOS DE TRAÇÃO TRIAXIAL COM $\sigma_1 = 0.3 \text{ kg/cm}^2$) - SOLO A

FIG.7.3- CURVAS DE IGUAL γ_d (ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL) - SOLO A

FIG.7.4 - CURVAS DE IGUAL R_c (ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES) - SOLO A

FIG. 7.5- CURVAS DE IGUAL R_f (ENSAIOS DE FLEXÃO)- SOLO B

FIG. 7.6 - CURVAS DE IGUAL $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ (ENSAIOS DE TRAÇÃO TRIAXIAL, COM $\sigma_1 = 0,3 \text{ kg/cm}^2$) - SOLO B

FIG. 7.7 - CURVAS DE IGUAL $\tilde{\sigma}_d$ (ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL) - SOLO B

FIG. 7.8 - CURVAS DE IGUAL R_c (ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES) - SOLO B

FIG. 7.9 - CURVAS DE IGUAL R_f (ENSAIOS DE FLEXÃO) - SOLO C

FIG.7.10 - CURVAS DE IGUAL $(\sigma_1 - \sigma_3)_1$ (ENSAIOS DE TRAÇÃO TRIAXIAL, COM $\sigma_1 = 0,3 \text{ kg/cm}^2$) - SOLO C

FIG. 7.11 - CURVAS DE IGUAL γ_d (ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL) - SOLO C.

FIG.7.12- CURVAS DE IGUAL R_c (ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES) - SOLO C

facilmente constatar que a umidade de moldagem tem influência preponderante nos valores das tensões de rutura, que decrescem significativamente com o acréscimo de umidade. Já o grau de compactação não apresenta tão acentuada influência, principalmente para os solos A e B. De qualquer forma, verificam-se quase sempre acréscimos nos valores das tensões de rutura com o aumento do grau de compactação, dentro dos limites de condições de moldagem ensaiados, exceção feita a estreitas faixas de alguns gráficos (a umidades menores), onde estes valores se mantem praticamente inalterados com a variação do grau de compactação.

Foram feitas tentativas de elaboração de gráficos semelhantes aos acima referidos para a representação de curvas de igual módulo de elasticidade e de igual deformação específica de rutura. No entanto, somente para alguns casos foi possível a construção, por interpolação, destas curvas, notando-se que o grau de compactação não influiu significativamente nos resultados. Assim, para cada tipo de solo, foram plotados em gráficos mono-log os valores do módulo de elasticidade em função da umidade de moldagem. Para os ensaios de flexão e de compressão simples foi possível traçar, para os pontos plotados, retas médias: $\log E \sim w$, sendo que para os ensaios triaxiais (de tração e de compressão) os valores plotados apresentaram-se bastante dispersos, indicando apenas uma tendência do módulo de elasticidade decrescer com o aumento de umidade, tendência esta bem definida nos ensaios de flexão e de compressão simples. Nas Figuras 7.13, 7.14 e 7.15 estes gráficos, $\log E = \phi(w)$ estão

FIG.7-13-VARIAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE
COM A UMIDADE - SOLO "A"

FIG.7-14 - VARIAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE COM A UMIDADE - SOLO "B"

FIG.7-15 - VARIAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE
COM A UMIDADE - SOLO "c"

apresentados, respectivamente para os solos A, B e C.

As curvas destas figuras foram reunidas em um só gráfico, juntamente com os resultados obtidos por Leonards e Narain em 1963 (6). Na Figura 7.16, estão apresentadas estas curvas, podendo-se constatar em todas elas a tendência de decréscimo do módulo de elasticidade com o acréscimo de umidade.

Para a análise da variação da deformação específica de ruptura, todos os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples e triaxial e de flexão, correspondentes aos três tipos de solo ensaiados, foram reunidos em um só gráfico, na Figura 7.17. Por se apresentarem em intervalos de variação, com ordens de grandeza bastante diferentes, os resultados dos ensaios de flexão foram plotados em uma escala ampliada. As três curvas médias, interpoladas com os resultados obtidos, mostram que a deformação específica de ruptura cresce com o desvio de umidade ($w-w_{ot}$). Para os ensaios de tração triaxial foram plotados em gráfico os valores correspondentes às deformações específicas medidas no penúltimo carregamento do corpo de prova, pois os ensaios não permitem a determinação de ϵ_{rut} . Na Figura 7.18 estão plotados os valores obtidos com os três tipos de solo, correspondentes a toda deformação medida durante os ensaios (extensão + tração), e os valores correspondentes apenas à fase de tração dos corpos de prova. Em ambos os casos houve grande dispersão de resultados, não se observando qualquer tendência da deformação específica aumentar ou diminuir com a variação de umidade.

FIG. 7-16 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À TRAÇÃO (ENSAIOS DE FLEXÃO) E À COMPRESSÃO SIMPLES COM A UMIDADE

FIG.7.17-VARIAÇÃO DE ϵ_{rut} COM O DESVIO DE UMIDADE
(ENSAIOS CT-2,0, CS e TF)

FIG.7.18-VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA, MEDIDA NO PENÚLTIMO CARREGAMENTO DO CORPO DE PROVA, COM O DESVIO DE UMIDADE (ENSAIOS TT-0,3)

7.2.

Influência do Tipo de Solo

Para se estabelecer comparações entre os resultados obtidos com os três solos ensaiados, foi escolhido como mais representativo o valor da umidade ótima de compactação, utilizando-se o mesmo critério selecionado no trabalho de Souto Silveira e Gaioto (20). Os valores das tensões de rutura, determinados nos ensaios de tração e de compressão, para a condição de moldagem correspondente à umidade ótima e grau de compactação de 100%, foram colocados no gráfico mono-log da Figura 7.19. Está também aí incluída a curva média de tensões de rutura à tração versus umidade ótima apresentada por Cruz e Mellios no trabalho da referencia (19), incluindo os resultados de outros autores. O solo C, o mais argiloso de todos, apresentou, para todos os tipos de ensaios realizados, resistências, tanto à tração como à compressão, mais elevadas que os outros dois; praticamente não se constatarem diferenças entre as tensões de rutura encontradas nos solos A e B. Já os resultados de resistência à compressão simples permitiram traçar, com boa aproximação, uma reta média, $\log R_c \sim w_{ot}$. Neste mesmo gráfico foram ainda traçadas retas paralelas a esta, representando frações de R_c , a fim de permitir uma comparação visual entre as tensões de rutura à tração e à compressão.

De um modo geral, as relações entre as tensões de rutura à tração e à compressão decrescem com o aumento da umida-

FIG.7.19-VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE RUPTURA COM A UMIDADE ÓTIMA DOS SOLOS, INCLUINDO A CURVA MÉDIA (*) APRESENTADA NA REFERÊNCIA (6).

de ótima, exceção feita apenas para os ensaios de compressão diametral, que apresentaram um acréscimo na relação σ_d/R_c para o solo C ($w_{ot} = 30\%$). Neste particular, ensaios realizados por Narain e Rawat (17) mostraram também que as relações entre os valores das tensões de rutura à tração determinadas através de ensaios de compressão diametral, e os de compressão simples, são maiores para solos mais argilosos. No gráfico da Figura 7.20 estão apresentados valores das relações R_c/σ_d , obtidos por Narain e Rawat, e as curvas médias por eles traçadas, em função do limite de liquidez e do índice de plasticidade, correspondentes a cinco tipos de solo ensaiados. Neste gráfico estão também plotados os pontos correspondentes aos ensaios realizados com os solos A, B e C, do presente trabalho.

Na Figura 7.21 estão plotados em gráfico log E versus w_{ot} , pontos correspondentes à condição de moldagem $w=w_{ot}$, obtidos dos gráficos das Figuras 7.13, 7.14 e 7.15, para os ensaios de flexão e de compressão simples. O solo mais argiloso (solo C) apresentou valores de módulo de elasticidade mais elevados que os arenosos, principalmente quando comparados com os do solo B.

Na Figura 7.22 estão plotados em gráfico ϵ_{rut} versus w_{ot} , os resultados obtidos em ensaios de flexão e de tração triaxial, correspondentes a corpos de prova moldados com umidade próxima à umidade ótima. Estão também plotados pontos correspondentes aos ensaios realizados

FIG.7.20- CORRELAÇÕES R_c/σ_d (EM VALOR ABSOLUTO) COM w_L E I_p , OBTIDAS PARA OS SOLOS A, B e C, JUNTAMENTE COM VALORES E CURVAS DE NARAIN E RAWAT (Ref.17, p.2188)

FIG.7.21-VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE COM A UMIDADE ÓTIMA (ENSAIOS TF e CS)

FIG.7.22-VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE RUTURA COM A UMIDADE ÓTIMA (ENSAIOS TT-0,3, TF E RESULTADOS DE LEONARDS E NARAIN)

por Leonards e Narain (15). Para os ensaios de tração triaxial estão plotados valores correspondentes a ϵ_{rut} , determinados durante toda a fase de descarregamento da pressão confinante do topo do corpo de prova (extensão e tração do CP), e determinados a partir do ponto em que o corpo de prova começou a ser efetivamente tracionado; em ambos os casos os valores de ϵ_{rut} apresentados não correspondem à deformação no instante de rutura, mas ao máximo valor medido durante a realização dos ensaios.

Os ensaios de flexão mostraram uma ligeira tendência de acréscimo de ϵ_{rut} com a umidade ótima do solo; nos ensaios de tração não foi observada a mesma tendência.

7.3.

Influência do Método de Ensaio

Os valores das tensões de rutura à tração, obtidos através dos três métodos de ensaio, não podem ser correlacionados, pois ocorrem em estados de tensões completamente diferentes (V.Figura 7.23):

a.

no ensaio de flexão, a tensão de rutura ($R_f = \sigma_3$) ocorre na borda tracionada da viga, com direção axial, sendo nulas (ou praticamente nulas) as tensões nas outras direções ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$);

b.

no ensaio de tração triaxial, a tensão de rutura ocorre na direção axial, correspondendo à tensão principal menor, σ_3 , enquanto a tensão principal maior, σ_1 (igual à tensão intermediária, σ_2), é mantida constante, correspondendo

FIG.7.23- CÍRCULOS DE MOHR REPRESENTATIVOS DOS TRÊS TIPOS DE ENSAIO DE TRAÇÃO.

à pressão de confinamento da câmara de ensaio;

c.

o ensaio de compressão diametral, corresponde também a um estado triplo de tensões, em que, a rutura ocorre em um plano diametral, que contém as geratrizes pelas quais o corpo de prova é carregado, de forma que:

- o corpo de prova rompe por tensões de tração (σ_d) consideradas uniformemente distribuídas neste plano diametral (conforme a equação 3.16), que correspondem à tensão principal menor, σ_3 ;
- na direção do carregamento ocorrem tensões de compressão que variam conforme a equação 3.18, correspondendo à tensão principal maior, σ_1 ;
- na direção axial ocorrem tensões de compressão, devidas ao atrito, entre as sapatas de carregamento e o corpo de prova, restringindo as deformações axiais, correspondendo à tensão intermediária, σ_2 .

Nos gráficos (a), (b) e (c) da Figura 7.23 estão representados os círculos de Mohr, correspondentes aos três métodos de ensaio, e que estão conjuntamente representados no gráfico (d).

Diversos autores, que realizaram ensaios em condições que não representam o estado de tração simples, tem procurado correlacionar os valores das tensões de rutura obtidos (e alguns os denominam erroneamente de "resistência à tração") com valores de resistência à compressão simples: nos trabalhos citados nas referências (23), (7), (5) e (17), são estabelecidas correlações entre as tensões de rutura de ensaios de compressão diametral com a resistência à com-

pressão simples; no trabalho da referência (2) estão correlacionadas tensões de ruptura de ensaios de tração triaxial e resistência à compressão simples; no trabalho da referência (6) as tensões de ruptura obtidas em ensaios de tração triaxial estão correlacionadas com valores de resistência à compressão simples e de tração simples. Neste último caso, por exemplo, a comparação dos resultados no sentido de se igualar os valores de $(\sigma_3)_t$ obtidos, com a resistência à tração simples, somente teria validade se a envoltória de resistência fosse uma reta vertical. Por outro lado, Bishop e Garga (2), analisando os resultados dos ensaios triaxiais lentos drenados, realizados com amostras indeformadas da argila de Londres, constataram que "a tensão de tração é quase independente do valor efetivo de σ_1 , dentro dos limites ensaiados (0,2 a 0,7 kg/cm²)"; no entanto, esta conclusão não pode ser generalizada pois é fundamentada nos resultados de apenas 5 ensaios, cuja precisão relativa fica bastante prejudicada pela pequena grandeza dos valores das tensões de tração; além disso, o elevado valor do ângulo de atrito (da ordem de 40°), da envoltória média de ensaios drenados mostrada, contribui também para a maior proximidade dos valores de $(\sigma_3)_t$, independentemente de σ_1 .

Portanto, as comparações apresentadas neste trabalho não tem por objetivo o estabelecimento de correlações entre os resultados obtidos através dos diferentes métodos de ensaio; tem, isto sim, a finalidade de analisar de uma maneira comparativa, as tendências de comportamento dos solos, constatando as que se apresentam mais compatíveis

com suas características e concluindo para a seleção do método de ensaio mais adequado.

Os valores das tensões de rutura apresentados nas curvas dos gráficos das Figuras 7.1 a 7.12, foram reunidos em três gráficos, onde foram plotados, em escala log, em função do desvio de umidade, retirados da linha de ordenada correspondente a 100% do grau de compactação, para os três solos ensaiados: solo A - Figura 7.24; solo B - Figura 7.25 e solo C - Figura 7.26. É interessante observar que os pontos correspondentes aos valores de resistência à compressão simples, determinam, com muito boa aproximação, retas $\log R_c \sim (w - w_{ot})$. Nestes gráficos foram também traçadas retas correspondentes às frações de R_c , a fim de facilitar a comparação entre as tensões de rutura à tração e à compressão simples. Para os ensaios de tração triaxial estão apresentadas as curvas de $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ e de $-(\sigma_3)_t$, para $\sigma_1 = 0,3 \text{ kg/cm}^2$.

Para os três tipos de solo ensaiados, os valores das tensões de rutura, obtidos nos ensaios de flexão - R_f , quase sempre se apresentam, acima dos valores de $-\sigma_d$ e de $-(\sigma_3)_t$, quando comparados na mesma condição de umidade; a relação R_f/R_c variou entre 1/4 e 1/10. Os valores de $-(\sigma_3)_t$ se apresentaram inferiores aos de $-R_f$ e $-\sigma_d$, exceção feita apenas para os corpos de prova do solo B, moldados em condições mais secas do que 0,5% abaixo da umidade ótima (quando a comparação é feita com σ_d). As relações $(\sigma_3)_t/R_c$ variam entre 1/9 e 1/16 e as relações σ_d/R_c entre 1/6 e 1/12.

FIG.7.24-CURVAS DE VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE RUTURA COM O DESVIO DE UMIDADE, PARA G.C.=100% - SOLO A

FIG.7.25-CURVAS DE VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE RUTURA COM O DESVIO DE UMIDADE, PARA G.C.=100% - SOLO B

FIG.7.26- CURVAS DE VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE RUTURA COM O DESVIO DE UMIDADE, PARA G.C.=100% - SOLO C

Em resumo, os ensaios de flexão apresentaram tensões de rutura com valores absolutos mais elevados (como era de se esperar, pelo exame dos gráficos da Figura 7.23) e os de tração triaxial com valores absolutos mais baixos, quando as comparações são feitas para as mesmas condições de moldagem dos corpos de prova.

As conclusões acima podem ser mais facilmente visualizadas através do gráfico da Figura 7.27, onde são comparadas entre si as tensões de rutura à tração, obtidas para a condição de umidade ótima e grau de compactação de 100%. Neste gráfico estão apresentadas as curvas de variação de R_f/σ_d , $R_f/(\sigma_3)_t$, $\sigma_d/(\sigma_3)_t$, bem como de $R_f/(\sigma_1-\sigma_3)_t$ e $\sigma_d/(\sigma_1-\sigma_3)_t$, em função da umidade ótima de compactação de cada solo. Nota-se, nas curvas apresentadas, que as relações R_f/σ_d e $R_f/(\sigma_3)_t$ decrescem para os solos mais argilosos, ocorrendo o contrário com a relação $\sigma_d/(\sigma_3)_t$. É interessante notar que a relação $R_f/(\sigma_1-\sigma_3)_t$ se manteve constante, ligeiramente inferior a 1, para os três tipos de solo, o que se justifica, se consideradas envoltórias de resistência quase horizontais. A relação $\sigma_d/(\sigma_1-\sigma_3)_t$ cresceu para os solos mais argilosos.

Nas Figuras 7.28 a 7.32 estão apresentados os trechos iniciais de cinco curvas típicas tensão-deformação, obtidas em ensaios de compressão (simples e triaxial) e de tração triaxial. Em cada um destes gráficos, as curvas foram traçadas utilizando-se, tanto para compressão como para tração, a mesma relação entre as escalas de tensões ($\sigma_1-\sigma_3$) e de deformações específicas (ϵ_c ou ϵ_t), permitindo a compa-

FIG.7.27 - VARIAÇÃO DAS RELAÇÕES ENTRE AS TENSÕES DE RUTURA A TRAÇÃO E A UMIDADE ÓTIMA

FIG. 7.28- TRECHOS INICIAIS DE CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ENSAIOS CT-2,0, CS e TT-0,3 (CP-A7)

FIG. 7.31- TRECHOS INICIAIS DE CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ENSAIOS CT-2,0,CS E TT-0,3 (CP-B4)

FIG.7.32- TRECHOS INICIAIS DE CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO
DE ENSAIOS CT-2,0, CS E TT-0,3 (CP-C3)

ração entre os respectivos módulos de elasticidade. Os valores dos módulos de elasticidade calculados estão indicados junto às curvas (note-se que os valores de E foram calculados considerando o trecho inicial da curva correspondente ao início do descarregamento de σ_1 do topo do corpo de prova).

O traçado das curvas tensão-deformação e a determinação dos valores de E , para os ensaios de tração triaxial, apresentam certa dificuldade, dada a maior dispersão dos pontos plotados, requerendo na maioria dos ensaios a correção da origem das curvas, motivada pela compressão inicial dos corpos de prova, pela folga requerida no encaixe do pistão com o cabeçote, pela variação das forças de atrito que atuam no pistão da câmara no decorrer do ensaio e pela impossibilidade de definir o comprimento do corpo de prova submetido às deformações medidas. Estes fatos talvez justifiquem a grande dispersão dos pontos plotados nos gráficos $\log E = \phi(w)$ das Figuras 7.13, 7.14 e 7.15 (o que não acontece para os ensaios de flexão e de compressão simples, representados nestas figuras). Infelizmente, nos trabalhos citados nas referências (2) e (6), os autores não apresentaram as respectivas curvas tensão-deformação, não permitindo o exame das dispersões eventualmente ocorridas. Da análise dos gráficos apresentados, objetivando a comparação dos valores do módulo de elasticidade, obtidos através dos diferentes métodos de ensaio, pode-se apenas afirmar que os valores determinados através dos ensaios de flexão, de um modo geral, são mais elevados que os determinados através dos outros métodos. Os

ensaios de compressão diametral não permitem a determinação do módulo de elasticidade.

Com relação à deformação específica de rutura, os valores obtidos nos ensaios de tração apresentam-se bem inferiores aos respectivos valores obtidos nos ensaios de compressão, principalmente de compressão triaxial. O exame das curvas médias ϵ_{rut} versus w , traçados no gráfico da Figura 7.17, permite constatar que os valores de ϵ_{rut} , obtidos nos ensaios de compressão simples, são cerca de 15 a 30 vezes maiores que os de tração simples, obtidos nos ensaios de flexão. Foram feitas tentativas para se estabelecer correlações com os valores de " ϵ_{rut} " apresentados para os ensaios de tração triaxial, o que não foi possível, dada a grande dispersão dos resultados (V.Figura 7.18); de um modo geral os valores (que correspondem à máxima deformação específica medida) não foram além de -1%, quando considerada toda a deformação medida (extensão+tração), e além de -0,7% quando considerada apenas a deformação devida à fase em que o corpo de prova foi efetivamente tracionado.

8.

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ENSAIO

Neste capítulo estão apresentadas comparações entre os métodos de ensaio utilizados, objetivando a indicação do método que, para fins práticos de projeto de maciços de terra, permita a determinação dos parâmetros de tração, com o grau de confiança desejado, utilizando-se de técnicas e equipamentos atualmente disponíveis em nossos laboratórios. O critério econômico é também aqui considerado, abordando não somente os custos de equipamentos e o tempo de sua utilização, mas também o nível do pessoal necessário às operações e cálculos requeridos pelos ensaios.

Preliminarmente são feitas algumas considerações sobre as deficiências constatadas em cada método, e as adaptações introduzidas para a realização dos ensaios. No item 10 são feitas recomendações para a eliminação ou diminuição dos efeitos indesejáveis, provenientes de algumas destas deficiências (estão indicadas a seguir, com asterisco (*) as deficiências para as quais são feitas as recomendações):

a.

ensaios de flexão.

a.1.

corpo de prova de grandes dimensões, que praticamente impedem a realização de ensaios com amostras indeformadas;

a.2.

processo utilizado para evitar a perda de umidade dos corpos de prova foi ainda insatisfatório (*);

a.3.

não utilização de deformação controlada;

a.4.

processo descontínuo de carregamento (*);

a.5.

atrito não totalmente eliminado entre o corpo de prova e a superfície de apoio;

a.6.

impossibilidade de realizar ensaios com corpos de prova saturados;

a.7.

impossibilidade de medidas de pressão neutra;

a.8.

os valores das tensões e deformações são calculados indiretamente, baseados na hipótese admitida de distribuição de tensões. (*).

b.

ensaios de tração triaxial.

b.1.

corpo de prova de configuração e dimensões que requerem cuidados especiais no seu manuseio;

b.2.

não utilização de deformação controlada (*);

b.3.

dificuldade de computar as forças de atrito entre o pistão e a câmara, que representam valores consideráveis

comparados com as forças aplicadas para produzir a tração (*);

b.4.

forças de atrito entre o pistão e a câmara atuando descontinuamente durante o ensaio, introduzindo dispersões nas curvas tensão-deformação;

b.5.

processo descontínuo de carregamento (*);

b.6.

necessidade de correção da origem das curvas tensão-deformação, motivada pela folga entre a ponta do pistão e o encaixe do cabeçote, pelo atrito no pistão e pela compressão inicial do corpo de prova;

b.7.

necessidade de repetição de ensaios com pressões de confinamento, ou relações entre as áreas do centro e das extremidades dos corpos de prova, diferentes, pois a rutura poderá ocorrer com a tensão principal menor positiva (compressão), ou não ocorrer após a eliminação de toda a pressão de confinamento sobre o cabeçote;

b.8.

impraticabilidade de medida de pressões neutras;

b.9.

para ensaios saturados, em vista das baixas pressões de confinamento que devem ser utilizadas, não pode ser empregada a técnica de saturação por contra-pressão, pois os corpos de prova ficariam submetidos a pressões com elevada ordem de grandeza em relação ao restrito intervalo de suas variações; mesmo a saturação por simples percolação poderia produzir tensões excessivas de perco-

lação, no trecho de área reduzida do corpo de prova, onde o gradiente hidráulico seria maior que nas extremidades (uma rede de percolação correspondente a um fluxo na direção axial apresentaria "malhas" menores na parte central); a saturação prévia do corpo de prova cilíndrico torna ainda mais delicada a operação de tornear o trecho central com área reduzida, e para solos menos argilosos o grau de saturação poderá decrescer durante esta operação;

b.10.

a deformação específica foi calculada tomando por base o comprimento do trecho central que apresenta mesmo diâmetro; no entanto, dada a configuração do corpo de prova, fica difícil a determinação deste comprimento; além disso, não são levadas em conta as deformações nas extremidades e nos trechos de transição.

c.

ensaio de compressão diametral.

c.1.

as tensões de rutura são calculadas por meio de fórmulas aproximadas, admitindo comportamento elástico na rutura;

c.2.

estas fórmulas indicam que, enquanto as tensões de tração são aproximadamente constantes na direção perpendicular ao plano de rutura, na direção do carregamento as tensões de compressão são variáveis ao longo do diâmetro do corpo de prova; na direção axial atuam tensões de compressão, devidas ao atrito entre as sapatas de carregamento e o corpo de prova, de valores desconhecidos; des-

ta forma fica indefinido o estado de tensões a que o corpo de prova está submetido;

c.3.

na vizinhança do contato entre as sapatas e o corpo de prova, a relação σ_1/σ_3 é muito superior à existente na parte central, desenvolvendo-se uma zona plástica, onde os círculos de Mohr correspondentes ultrapassariam a envoltória de resistência; portanto, a interpretação do ensaio diametral através de comportamento elástico, não pode ser admitido na rutura (+);

c.4.

impossibilidade da determinação tanto do módulo de elasticidade, como das deformações específicas;

c.5.

impossibilidade de medida de pressões neutras;

c.6.

impraticabilidade de realizar ensaios saturados.

Após estas considerações, a seguir estão procedidas as análises comparativas entre os métodos de ensaio utilizados.

(+)

Cumpre aqui mencionar o trabalho apresentado por Habib, Morlier e Radenkovic (9), que realizaram ensaios de compressão diametral, em cilindros de rocha, submetidos a pressões de confinamento variáveis. Analisaram o desenvolvimento de uma cunha plástica ao longo do corpo de prova, constatando que, na face de rutura, a largura da superfície de contato entre as cunhas, é variável, em função da pressão de confinamento; ensaios realizados com elevadas pressões de confinamento permitiram a obtenção de superfícies mais largas, de contato entre as duas metades do corpo de prova. Desenvolveram uma teoria para a interpretação plástica da rutura por compressão diametral.

8.1.

Análise Comparativa da Variação dos Resultados dos Ensaios

Do ponto de vista de resistência, os valores obtidos através dos três métodos de ensaio à tração, possibilitaram, da mesma forma que os obtidos nos ensaios de compressão simples, o traçado de curvas de igual tensão de ruptura por interpolações, praticamente com o mesmo grau de aproximação, conforme mostrado nas Figuras 7.1 a 7.12. No entanto, para o traçado das envoltórias de resistência, conforme mostrado nos desenhos 3.11 a 3.13, os resultados dos ensaios de flexão apresentaram-se mais compatíveis com os de compressão, que os resultados dos ensaios de tração triaxial. Neste aspecto, os próprios resultados apresentados no trabalho que introduziu o método de ensaio de tração triaxial (2), como os apresentados na referência (6), mostraram também certa incompatibilidade, pois os valores de $(\sigma_3)_t$ obtidos, praticamente independeram da pressão de confinamento. Os valores das tensões de ruptura, obtidos nos ensaios de compressão diametral, não permitem o traçado dos círculos de Mohr, conforme já anteriormente mencionado. Nestas condições, analisando os resultados da forma obtida no presente trabalho, o ensaio de flexão é o que se apresenta mais razoável. O método de ensaio de tração triaxial somente seria recomendável, se realizado com os dispositivos utilizados conforme a referência (2) ou, pelo menos, com os melhoramentos que estão sugeridos no item 10.b.

Idênticas considerações podem ser feitas nas análises dos

valores do módulo de elasticidade e da deformação específica de rutura obtidos. Enquanto que os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão, permitiram estabelecer correlações com a umidade do solo, os valores obtidos nos ensaios de tração triaxial, permitiram apenas, a indicação de uma tendência (V.Figuras 7.13 a 7.15). Além disso, estes valores não correspondem à condição de tração, mas sim de extensão dos corpos de prova. Da mesma forma, o gráfico da Figura 7.17 permite, com boa aproximação, o traçado de uma curva média $\epsilon_{rut} = \phi(w - w_{ot})$, a partir dos resultados obtidos com os três tipos de solo, enquanto que os valores obtidos nos ensaios de tração triaxial (V.Figura 7.18), apresentam grande dispersão, além de não representarem efetivamente a deformação específica de rutura. Os ensaios de compressão diametral, conforme já mencionado, não permitem determinações nem do módulo de elasticidade, nem da deformação específica. Nestas condições, com os equipamentos e procedimentos que foram utilizados no presente trabalho, o método de ensaio por flexão apresenta-se também como o mais indicado no aspecto da determinação de E e de ϵ_{rut} .

8.2.

Análise Comparativa Econômica entre os Métodos de Ensaio.

Para a análise comparativa entre os três tipos de ensaio foram considerados os custos dos principais equipamentos necessários, e a respectiva depreciação, a qualificação

dos técnicos e o número de horas requeridas para a realização e o cálculo dos ensaios.

A seguir estão indicados os principais equipamentos envolvidos e os custos estimados para o conjunto de equipamentos necessários a cada tipo de ensaio; estão apresentados separadamente os equipamentos comuns aos três métodos investigados (†).

a.

ensaio de flexão:

formas metálicas desmontáveis, mesa com dispositivos para apoio e carregamento do corpo de prova, dispositivos para controle da umidade do ar..... Cr\$ 2.000,00

b.

ensaios de tração triaxial:

célula para ensaio triaxial, com os equipamentos de aplicação de pressão de confinamento, adaptações introduzidas, torno especial para moldagem do corpo de prova..... Cr\$ 12.000,00

c.

ensaios de compressão diametral

prensa (semelhante à utilizada em ensaio de compressão simples)..... Cr\$ 10.000,00

(†)

Os valores apresentados referem-se a dezembro de 1972, não estando incluídos custos de móveis e materiais de escritório.

d.

equipamentos comuns aos três ensaios,
balanças, estufa, equipamentos para câ-
mara úmida, etc..... Cr\$ 15.000,00

Para o cálculo da amortização dos equipamentos, foi atribuída uma taxa mensal de 1%, e estimados os tempos de vida útil, considerando o número de ensaios diários realizados com cada conjunto de equipamentos, conforme indicado abaixo:

- a. flexão: 2 anos; 1 ensaio/dia
- b. tração triaxial: 10 anos; 1 ensaio/dia
- c. compressão diametral: 10 anos; 4 ensaios/dia
- d. ensaios comuns: 5 anos; 3 ensaios/dia.

Nestas condições, resultaram os seguintes valores de depreciação dos equipamentos, por ensaio realizado (incluindo-se os equipamentos comuns aos três tipos de ensaio):

- a. flexão: Cr\$ 14,50
- b. tração triaxial: Cr\$ 14,20
- c. compressão diametral: Cr\$ 7,40.

As horas necessárias à preparação, acompanhamento e cálculo dos ensaios foram distribuídas em duas categorias, de técnicos de qualificações diferentes: de nível A, com salário mensal de Cr\$ 3.000,00 e de nível B, com salário de Cr\$ 1.200,00; considerando a incidência de encargos

sociais e as taxas de reincidência, previstas para cada faixa salarial, resultam respectivamente custos horários de Cr\$ 23,10 e Cr\$ 9,80. Com base nos ensaios realizados, foram estimadas as seguintes parcelas de homens-hora para cada tipo de ensaio, e os respectivos custos:

a.

ensaios de flexão:

Técnico A - 6hh	Cr\$	138,60
Técnico B - 2hh	Cr\$	19,60
Total	Cr\$	158,20

b.

ensaios de tração triaxial:

Técnico A - 5hh	Cr\$	115,50
Técnico B - 1hh	Cr\$	9,80
Total	Cr\$	125,30

c.

ensaios de compressão diametral:

Técnico A - 1hh.....	Cr\$	23,10
Técnico B - 3hh	Cr\$	29,40
Total	Cr\$	52,50

Acrescendo-se a estes valores os correspondentes à depreciação dos equipamentos, resultam os seguintes custos totais para cada tipo de ensaio:

a. ensaio de flexão	Cr\$	172,70
b. ensaio de tração triaxial.....	Cr\$	139,50
c. ensaios de compressão diametral...	Cr\$	60,10

O custo estimado para o ensaio de compressão diametral representa um valor de cerca de 35% do custo do ensaio de flexão, e de cerca de 43% do custo do ensaio de tração triaxial.

Na hipótese de serem aproveitados corpos de prova moldados durante a realização de ensaios de compactação, para a execução de ensaios de compressão diametral (por exemplo, na fase de investigação de áreas de empréstimo ou de controle de compactação de aterros), o custo destes ensaios ficaria ainda mais reduzido; na composição dos custos de depreciação dos equipamentos e da parcela de homens-hora, resultaria um valor da ordem de Cr\$ 35,00 por ensaio, ou seja, de cerca de 20 a 25% do custo de cada um dos outros dois ensaios. Nestas condições, se a decisão a ser tomada sobre o método a ser adotado depender exclusivamente do custo e da dispersão de resultados, o ensaio de compressão diametral resultará mais econômico, até o ponto em que sejam necessários menos de 4 (ou 5) ensaios, para se obter, estatisticamente, um grau de dispersão equivalente ao dos outros dois métodos de ensaio.

9.

CONCLUSÕES

9.1.

Sobre a Escolha do Método de Ensaio

As análises comparativas efetuadas, considerando os equipamentos e procedimentos utilizados na elaboração do presente trabalho, conduzem às seguintes recomendações, para a obtenção dos parâmetros de tração, necessários à análise do comportamento de maciços de terra compactada:

a.

em anteprojetos:

recomenda-se a execução de ensaios de compressão diametral para a estimativa da resistência à tração ($\dagger$), que poderão ser realizados paralelamente aos ensaios de compactação, utilizando-se os corpos de prova moldados no cilindro de Proctor; a grande simplicidade do método permite executar rapidamente grande número de ensaios, de forma que o problema da dispersão de resultados poderá ser superado, através de tratamento estatístico adequado; o baixo custo do ensaio, comparado aos demais, segundo o item anterior, também justifica esta observação; os parâmetros E e ϵ_{rut} , não obteníveis por meio deste método, poderão ser estimados a partir das correlações com os parâmetros de compactação apresentados neste trabalho (V. Figuras 7.13 a 7.17, 7.21 e 7.22);

($\dagger$) esta recomendação é de um modo geral conservativa, conforme se pode constatar pelo exame dos gráficos das Figuras 7.23 e 7.27.

b.

em projetos básicos.

recomenda-se a utilização do ensaio de flexão, que foi o método cujos resultados apresentaram menor grau de variação, tanto nos valores da resistência à tração como do módulo de elasticidade e da deformação específica de rutura; os outros dois métodos não seriam recomendáveis, pois o de tração triaxial apresentou grande dispersão de resultados, principalmente os valores de E e " ϵ_{rut} " (V. Figuras 7.13 a 7.15 e 7.18), e o de compressão diametral não permite a determinação destes parâmetros;

c.

em projetos executivos.

a utilização de qualquer dos métodos, da forma com que foram desenvolvidos no presente trabalho, não seria recomendável para as análises de um projeto executivo; no entanto, se procedidos os melhoramentos sugeridos no item 10, os métodos de flexão e de tração triaxial poderão se apresentar em condições de fornecer os resultados com a confiabilidade desejada.

As recomendações acima apresentadas, é evidente, poderão ser convenientemente dosadas, no sentido de torná-las mais, ou menos, rigorosas, em função das dimensões e da segurança da obra projetada, ou mesmo no sentido de proporcionar uma construção mais econômica, quando as análises forem procedidas com maior, ou menor, grau de confiança.

No que diz respeito ao desenvolvimento de pesquisas, para o estudo do comportamento de solos submetidos a tensões de tração, é de se recomendar, em primeiro lugar, a adoção do método de tração triaxial, com os dispositivos e procedimentos utilizados por Bishop e Garga, que permite a determinação de parâmetros para diferentes condições, com o solo submetido a estado triplo de tensões; seria entretanto recomendável a utilização de corpos de prova de maiores dimensões, no sentido de se obter maior representatividade da amostra, como também na determinação das correlações tensão-deformação. Em segundo lugar, seria também recomendável o desenvolvimento de pesquisas através do método de flexão, desde que procedidos os melhoramentos adiante indicados; este método apresenta a seu favor, o fato de que os dois trabalhos sobre tração triaxial, citados nas referências (2) e (6), não apresentaram curvas tensão-deformação, o que eventualmente reflete as dificuldades dos autores em determinar estas correlações, o mesmo não acontecendo nos trabalhos sobre flexão, citados nas referências (14) e (15).

9.2.

Sobre o Comportamento dos Solos Compactados Submetidos à Tração.

Estão também aqui apresentadas as principais conclusões, válidas para os limites de condições de compactação ensaiadas, determinadas para três diferentes tipos de solo utilizados. Embora algumas das conclusões abaixo houvessem sido inferidas, quer através de restrito número de en

saíam, quer através de raciocínios baseados na intuição, este é o primeiro estudo sistemático que permite realmente concluir sobre comportamento dos solos compactados, submetidos a tensões de tração:

a.

a tensão de ruptura à tração é mais influenciada pelo desvio de umidade ($w-w_{ot}$), do que pelo grau de compactação; decresce com o primeiro e cresce com o último (V.Figuras 7.1 a 7.12);

b.

o módulo de elasticidade e a deformação específica de ruptura não sofrem influência significativa do grau de compactação; E diminui com o aumento de ($w-w_{ot}$) e ϵ_{rut} cresce com este aumento (V.Figuras 7.13 a 7.17);

c.

solos mais argilosos (com maior umidade ótima) apresentam, em geral, maior resistência à tração (V.Figura 7.19); o módulo de elasticidade e a deformação específica de ruptura são pouco influenciados, apresentando pequeno acréscimo de valores com o grau de argilosidade dos solos (V.Figuras 7.21 e 7.22);

d.

as relações entre a resistência à compressão simples e à tração simples variam entre 4 e 9 (V.Figura 7.19), aumentando para os solos mais argilosos (valores comparados para $w=w_{ot}$ e $GC=100\%$);

e.

os valores de ϵ_{rut} determinados nos ensaios de flexão variaram aproximadamente entre -0,1 e -0,3% quando $(w-w_{ot})$ passou de -4 a +6%; estes valores correspondem a cerca de 1/15 a 1/30 de ϵ_{rut} , obtido nos ensaios de compressão simples (V.Figura 7.17);

f.

no ensaio de flexão, a hipótese de distribuição parabólica das tensões de tração na seção transversal da viga, foi razoavelmente comprovada através das verificações analíticas procedidas (V.Figuras A.7 e A.8).

10.

RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Conforme já mencionado no item 1.18, os primeiros ensaios, objeto de nossa pesquisa para a determinação de parâmetros de tração de solos compactados, foram realizados em 1970, no Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia de São Carlos. Depois destes ensaios, os equipamentos utilizados vem recebendo aprimorações, no sentido de se obter melhor qualidade e representatividade dos resultados. Na fase atual da pesquisa, estão sendo procedidas algumas adaptações a seguir enumeradas, que poderão trazer grande melhoria nos trabalhos, a serem desenvolvidos sobre este mesmo assunto:

a.

ensaio de flexão

- foi preaparada uma câmara, de cerca de $1m^3$, no interior da qual a umidade do ar será controlada, de maneira a minimizar as perdas de umidade dos corpos de prova; o operador fará as leituras e acompanhará os ensaios por meio de janelas de vidro existentes no topo e na frente da câmara;
- o carregamento será realizado através do preenchimento, com água, de um recipiente ao qual está ligado um tubo de vidro graduado, permitindo a realização do ensaio com carregamento contínuo, e com precisão de leituras da ordem de 20g; a velocidade de carregamento poderá

ser mantida constante, regulando-se convenientemente a abertura de um registro, que permite variar as vazões de água proveniente de outro recipiente, com altura de água constante;

- sendo os corpos de prova ensaiados com as mesmas dimensões, poderão ser preparados ábacos que permitam transformar as curvas carga-flecha em curvas tensão-deformação, simplificando os cálculos dos ensaios.

b.

ensaio de tração triaxial

- foi confeccionado um dinamômetro de anel, no qual está fixado um extensômetro elétrico, com rigidez compatível com a ordem de grandeza das cargas aplicadas no ensaio;
- está sendo preparada uma câmara triaxial de maior altura, de forma a permitir a instalação do dinamômetro na parte interna da câmara, dispensando assim a correção das leituras das cargas, influenciadas pelo atrito no pistão;
- com os melhoramentos acima introduzidos, os ensaios serão realizados com deformação controlada;
- deverão ser realizados ensaios com corpos de prova moldados a partir de amostras compactadas no cilindro de Proctor, a fim de comparar os resultados obtidos com partes não danificadas das vigas de ensaio de flexão.

c.

ensaios de compressão diametral

- deverão ser realizados ensaios com corpos de prova maiores, com as dimensões do cilindro de Proctor, para comparação com os resultados aqui apresentados;
- deverão ser realizados ensaios com diferentes velocidades de deformação, permitindo determinar a sua influência nos resultados;
- deverão ser instalados defletômetros para medida das deformações na direção das tensões de tração e na direção axial, a fim de permitir uma melhor visualização do andamento do ensaio.

Além das melhorias acima citadas, está previsto o seguinte programa de investigações:

- retirada de amostras indeformadas dos aterros compactados, construídos com os solos utilizados e comparação com os resultados aqui apresentados; esta comparação tem importância fundamental para avaliar o grau de representatividade dos resultados obtidos com corpos de prova compactados no laboratório;
- utilização de outros tipos de solo, cujos resultados poderão ser interpretados com os dos solos A, B e C, a fim de se procurar estabelecer correlações entre os parâmetros de tração e os de mais fácil determinação,

que poderão ser úteis em fases preliminares dos projetos de maciços de terra;

- realização de ensaios, com diferentes velocidades de deformação ou de carregamento, a fim de se constatar a sua influência nos resultados, e procurar selecionar as que se apresentam mais compatíveis com as condições "in situ";
- realização de maior número de ensaios de compressão triaxial a fim de permitir o traçado de envoltórias de resistência, para diversas condições de moldagem dos corpos de prova; seria assim analisada a influência das condições de moldagem sobre as envoltórias determinadas também com ensaios de tração;
- cálculo analítico das tensões e deformações, dos ensaios de flexão, atribuindo-se valores diferentes para o módulo de elasticidade à tração e à compressão.

11.

REFERÊNCIAS

1. Attuy, E.D., Fanton, J.V. e Blotta, L.F. "Determinação de alguns parâmetros de tração em solo, por ensaio de flexão" - Departamento de Geologia e Mecânica dos Solos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Trabalho de Formatura, 1971.
2. Bishop, A.W. e Garga, V.K. "Drained tension tests on London clay" - Géotechnique, XIX, vol.2, 1969, p.309.
3. Borgato, E., Kakiyara, P.Y., Otsuka, K. e Bastos, R. "Ensaio de tração em solos pelo método de Bishop" - Departamento de Geologia e Mecânica dos Solos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Trabalho de Formatura, 1971.
4. Chen, W.F. e Drucker, D.C. "Bearing Capacity of Concrete Blocks or Rock" - Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, vol.95, Nº EM4, Proceedings, Aug.1969, p.955.
5. Clegg, B. "A weakly cemented sand and its behaviour in a model pavement structure" - Proceedings, Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Canadá, 1965, vol.II, p.27.
6. Cruz, P.T. e Mellios, G.A. "Notas sobre a resistência a tração de alguns solos compactados" - VIII Seminário

Nacional de Grandes Barragens, São Paulo, Nov.1972.

7. Dutron, P., e Canfyn, W. "Résistance et portance CBR des sols-ciment. Leur rélation, leur estimation par un essai accéléré" - Proceedings, Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1961, vol.II, p.221.
8. Fang, H.Y., e Chen, W.F. "New method for determination of tensile strength soil" - Highway Research Board, Nº 345, 1971, p.62.
9. Habib, P., Morlier, P. e Radenkovic, D. "L'Application de l'essai brésilien dans la Mechanique des Roches" - International Symposium on Rheology and Soil Mechanics, Grenoble, 1964, p.385.
10. Haefeli, R. "Investigation and measurements of the shear strength of saturated cohesive soils" - Géotechnique, June, vol.2 (1951), p.186.
11. Hasegawa, H., Ikenti, M. "On the tensile strength test of disturbed soils" - International Symposium on Rheology and Soil Mechanics, Grenoble, 1964.
12. Jamal, A.K. "Triaxial Extension Tests on Hollow Cylinder Sand Specimens" - Canadian Geotechnical Journal, vol.8, 1971, p.119.
13. Lascala, D., Gonçalves, J.E., Vidal, N.S. e Oliveira,

- P.M. "Determinação da tensão de tração de solos pelo ensaio de compressão diametral" - Departamento de Geologia e Mecânica dos Solos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Trabalho de Formatura, 1971.
14. Leonards, G.A., Narain, J. "Flexibility of clay and cracking of earth dams" - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol.90, N° SM4, Proceedings paper 3460, March, 1963, p.47.
15. Leonards, G.A., Narain, J. "Discussion on flexibility of clay and cracking of earth dams" - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol.90 N°SM4, Proceedings, July, 1964, p.135.
16. Lobo Carneiro, F.L., e Barcelos, A. "Résistance à la traction des bétons" - Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 1949, p.123.
17. Narain, J. e Rawat, P.C. "Tensile strength of compacted soils" - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, vol.96, N°SM6, Proceedings, Nov., 1970, p.2185.
18. Šuklje, L., Drnovšek, L. "Investigation of the tensile deformability of soils using hollow cylinders" - Proceedings, Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Canadá, 1965, vol.I, p.368.

19. Souto Silveira, E.B. "Considerações sobre os parâmetros elásticos do solo" - Jornal de Solos, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Núcleo Regional de São Paulo, vol.3, Nº1, Março, 1965, p.45.
20. Souto Silveira, E.B. e Gaioto, N. "Considerações sobre os parâmetros de tração de solos compactados e sua determinação" - Anais do VI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, Nov.1970.
21. Timoshenko, S.P. "Resistência dos Materiais" - Tomo I, Terceira Edição, 1958.
22. Tschebotarioff, G.P., Ward, E.R. e De Philippe, A.A. "The tensile strength of disturbed and recompacted soils" - Proceedings, Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, 1953, vol.I, p.207.
23. Uchida, I., Matsumoto, R. "On the test of the modulus of rupture of soil sample" - The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1961, vol. II, Nº1, p.51.

APÊNDICE

Verificação da hipótese de distribuição parabólica das tensões de tração na seção da viga.

Para se proceder esta verificação, o módulo de elasticidade E foi preliminarmente calculado a partir da fórmula elástica da flecha, conforme Timoshenko (21), pág.155, válida para a viga de seção constante (ver Figura A.1).

Figura A.1 - Cálculo Preliminar de E .

A relação P/f foi tirada diretamente dos gráficos dos ensaios. Como as vigas não apresentam seção constante ao longo de seu comprimento, o momento de inércia J , utilizado para este cálculo preliminar foi o calculado para o trecho central, onde se tem a altura reduzida. Sendo as vigas ensaiadas, praticamente iguais em suas dimensões, e o esquema de ensaio o mesmo para todas elas, procurou-

se obter, iterativamente, uma correção do módulo de elasticidade, de tal forma que a curva teórica $P = \phi(f)$ apresentasse a mesma inclinação que os pares de pontos iniciais (P, f) , obtidos nos ensaios. Para diversas vigas assim analisadas chegou-se a um mesmo valor da correção a ser aplicada, ou seja, reduzindo-se o módulo de elasticidade para 77% do valor calculado a partir da fórmula:

$$E = 0,77 \frac{a}{48J} (3 \ell^2 - 4a) \frac{P}{f} \quad (A.2)$$

sendo os valores $a=12\text{cm}$ e $\ell=59\text{cm}$ para todas as vigas, resulta:

$$E = \frac{1900}{J} \frac{P}{f} \quad (A.3)$$

onde J é o momento de inércia do trecho de altura reduzida.

Seja o corpo de prova B2, cuja curva $P = \phi(f)$ está apresentada na gráfico da Figura 7.2, de onde se pode tirar, no trecho linear $P/f = 52,5\text{kg/cm}$. Dados dos ensaios:

$$b = 6,13\text{cm}$$

$$h = 4,80\text{cm (no centro)}$$

$$h = 6,31\text{cm (nas extremidades)}$$

$$P_{\text{rut}} = 4,450\text{kg}$$

O momento no trecho central, na rutura vale:

$$M = \frac{4,450}{2} \cdot 12 = 26,70 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Da equação (3.3) tem-se: } R_f = -\frac{4,23 \cdot 26,70}{6,13 \cdot 4,80^2} = -0,800 \text{ kg/cm}^2$$

O momento de inércia da seção do trecho central:

$$J = \frac{6,13 \cdot 4,80^3}{12} = 56,49 \text{ cm}^4$$

$$\text{Da equação (A.3): } E = \frac{1900}{56,49} \cdot 52,5 = 1760 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Da equação (3.8): } \epsilon_{rut} = \frac{2(-0,800)}{1760} = -9,1 \times 10^{-4}$$

Obtido o valor do módulo de elasticidade, o cálculo analítico da curva $P = \phi(f)$, foi realizado da seguinte forma:

- a. determina-se a equação $\sigma_t = \phi(\epsilon_t)$, substituindo os valores de E e ϵ_{rut} na equação (3.7);

$$\sigma_t = \frac{1760}{9,1 \times 10^{-4}} \epsilon_t^2 + 1760 \epsilon_t$$

$$\sigma_t = 9,67 \cdot 10^5 \epsilon_t^2 + 1760 \epsilon_t$$

- b. constroi-se o gráfico conjunto $\sigma_t = \phi(\epsilon_t)$ e $\sigma_c = \phi(\epsilon_c)$. (Figura A.2).

- c. para diversos valores de ϵ_t , entre 0 e ϵ_{rut} , calcula-se a área S_t , do diagrama das tensões de tração, que é proporcional à resultante das tensões de tração T; constroi-se um gráfico $S_t = \sigma(\epsilon_t)$ (Figura A.3).

d. para os valores de S_t calculados, determina-se os valores ϵ_c , correspondentes à área do diagrama das tensões de compressão, $S_c = S_t$, ou seja, tal que $C = -T$, e calcula-se $\sigma_c = E \epsilon_c$;

e. com os pares de valores ϵ_t e ϵ_c calcula-se

$-y'' = \frac{\epsilon_c - \epsilon_t}{h}$, para quatro diferentes alturas da viga: a do trecho central, a dos trechos extremos e duas do trecho de transição.

f. a partir do gráfico $S_t \times \epsilon_t$, determina-se os valores de $\bar{\epsilon}_t$ correspondentes à abscissa do centro de gravidade de S_t (ver Figura A.3); determina-se também $\bar{\epsilon}_c$, abscissa do centro de gravidade de S_c e o valor

$Z = \frac{\bar{\epsilon}_c - \bar{\epsilon}_t}{\epsilon_c - \epsilon_t} h$, que é braço do binário constituído por T e C;

g. determina-se o momento fletor $M = ZC$, ou seja,

$M = Z \cdot \frac{bh}{2} \cdot \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c - \epsilon_t} \sigma_c$, para cada valor de ϵ_t , obtem-se assim, a correspondência entre M e $-y''$, construindo-se as respectivas curvas $-y'' = \phi(M)$ para os quatro valores de h (no regime elástico vale a relação $-y'' = \frac{M}{EJ}$ (ver Figura A.4);

h. dividindo-se o meio vão da viga $\frac{l}{2}$, em 16 partes iguais; aos limites destas partes correspondem 17 pontos, com quatro valores diferentes de h: um no trecho central, um no trecho extremo e dois no trecho de

transição, que correspondem aos valores utilizados no item e; assumindo agora diversos valores da carga P , entre 0 e P_{rut} , determina-se pelo gráfico $-y'' = \phi(M)$, os respectivos valores de $-y''$ para os 17 pontos do meio vão da viga;

- i. determina-se os valores $y'(x) = \int_0^x y'' dx$ por meio da fórmula de Simpson:

$y'_n = \frac{\Delta x}{3} (y''_{n-2} + 4y''_{n-1} + y''_n)$, para os pontos de abcissa: $x = (0, 2, 4, 6, \dots, 16) \Delta x$, onde $\Delta x = \frac{l}{32}$, e a origem o centro do vão da viga;

- j. determina-se os valores $y(x) = \int_0^x y' dx$, por meio da fórmula de Simpson:

$y_n = \frac{2\Delta x}{3} (y'_{n-4} + 4y'_{n-2} + y'_n)$, para os pontos de abcissa: $x = (0, 4, 8, 12 \text{ e } 16) \Delta x$; os valores de y_n , a menos de uma constante de integração, correspondem às deformações da viga para cada carga P assumida no item h; o valor da constante corresponde ao y_{16} calculado na integração, pois neste ponto (apoio da viga), a deformação é nula;

Tem-se assim, determinadas as curvas teóricas, $P = \phi(y)$ calculadas a partir da hipótese de distribuição parabólica das tensões de tração, para diversos pontos da viga, podendo-se determinar a linha elástica correspondente a cada carga P assumida. Em particular a curva $P = \phi(f)$, calculada para o ponto central da viga, pode ser comparada com a curva obtida durante a realização

FIG.A.2-CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES NA SEÇÃO DA VIGA-CP-B2

FIG.A.3-CURVA $S_t = \phi(\epsilon_t)$ -CP-B2

FIG.A.4 - CURVAS $y'' = \phi(M)$ - CP-B2

FIG.A.5 - GRÁFICOS DE y'' , y' E y CALCULADOS
PARA O ENSAIO DO CP-B2

FIG. A.6- GRÁFICOS DE y'' , y' E y CALCULADOS
PARA O ENSAIO DO CP-C3

dos ensaios.

Nas Figuras A.5 e A.6 estão representados os valores de y'' , y' e y calculados para os corpos de prova B2 e C3, correspondentes à carga de rutura da viga. Nos gráficos de y'' estão também representados os valores M/EJ que corresponderiam à condição de regime elástico da viga para a carga considerada. Nas Figuras A.7 e A.8 estão apresentadas as curvas $P = \phi(f)$ determinadas analiticamente e os pontos correspondentes aos pares (P, f) , obtidos durante a realização dos ensaios.

Os valores $M = \phi(\epsilon_t)$ calculados durante as análises procedidas, permitiram traçar curvas $P = (\epsilon_t)$. Na Figura A.9 estas curvas estão apresentadas para os corpos de prova B2 e C3. Os dados destas curvas, juntamente com os gráficos $P = \phi(f)$ permitiram correlacionar ϵ_t com f . Foram assim plotados diversos pontos correspondentes a pares de valores (f, ϵ_t) obtidos nos ensaios das vigas B2 e C3, determinando-se uma única reta média, $\epsilon_t = -0,87f$, sendo ϵ_t em porcentagem e f em mm, conforme mostrado na Figura A.10.

FIG.A.7 - CURVA CALCULADA, $P=\delta(f)$, E PONTOS OBTIDOS NO ENSAIO DO CP-B2

FIG.A.8- CURVA CALCULADA, $P = \phi(f)$, E PONTOS OBTIDOS NO ENSAIO DO CP-C3

FIG.A.9 - CURVAS $P = \phi(\epsilon_t)$, CALCULADAS PARA OS ENSAIOS DO CP-B2 E DO CP-C3

FIG.A.10 - CORRELAÇÃO $\epsilon_t = \phi(f)$, DETERMINADA NOS ENSAIOS DO CP - B2 E CP - C3.