

---

## **CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

---

### **3.1 INTRODUÇÃO**

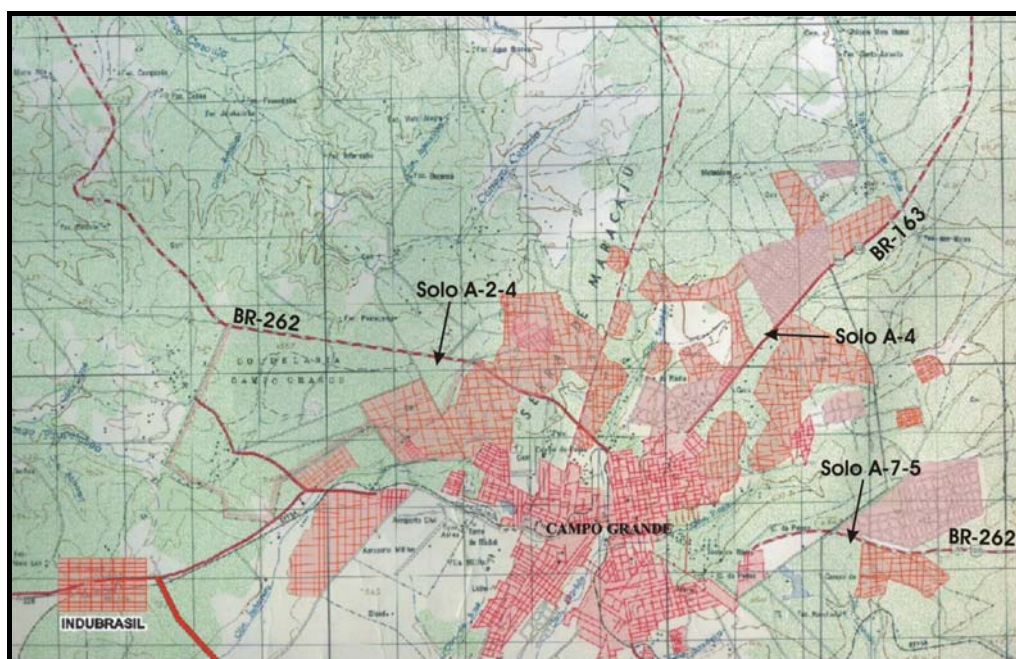
Neste capítulo são apresentados a origem, características físicas, classificações geotécnicas e os resultados dos ensaios de caracterização e compactação das três amostras de solos coletadas para o desenvolvimento desta pesquisa. São também descritos os equipamentos e procedimentos laboratoriais utilizados para a execução dos ensaios triaxiais cíclicos e de compressão simples.

Finalmente apresenta-se a metodologia para a análise dos resultados obtidos na fase experimental do trabalho.

### **3.2 ORIGEM E CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS UTILIZADOS**

#### **3.2.1 Origem**

Os solos utilizados nesta pesquisa foram coletados na região de Campo Grande - MS, em locais representativos da malha viária existente, jazidas em produção ou potenciais jazidas. As amostras de solos coletadas são típicas do subleito e dos materiais utilizados na construção de reforço, sub-base e base dos pavimentos locais. Ao todo, foram coletados três tipos de solos denominados respectivamente de argiloso; areno-argiloso e arenoso. A figura 3.1 ilustra a localidade das três jazidas de onde foram coletados os materiais.



**FIGURA 3.1 – Mapa geográfico ilustrando o local de coleta dos materiais envolvidos no desenvolvimento desta pesquisa.**

### **3.2.2 Massa Específica dos Solos e Limites de Atterberg**

Os procedimentos para a determinação da massa específica dos sólidos foram executados segundo o método de ensaio “Determinação da Massa Específica” – NBR 6508 (1984).

A determinação dos limites de Atterberg foram realizados seguindo os procedimentos descritos nas normas “Solo – Determinação do Limite de Liquidez” – NBR 6490 (1984) e “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade” – NBR 7180 (1984).

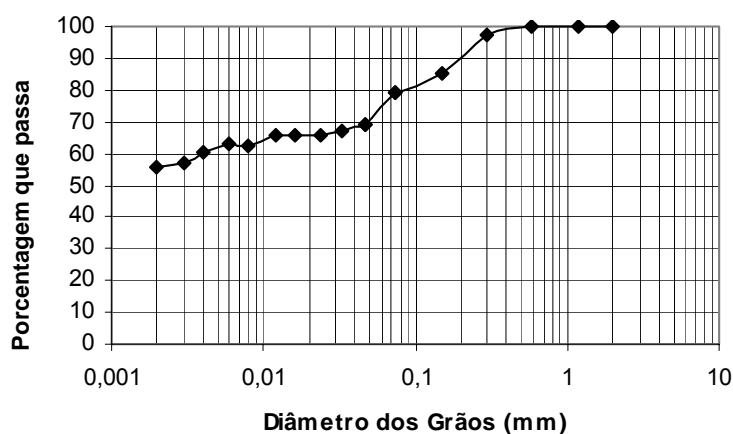
Os valores de limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e massa específica dos sólidos, para os três solos em questão, são apresentados na tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos e limites de Atterberg**

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Argiloso	58	40	18	3,035
Areia-argilosa	30	21	9	2,714
Arenoso		NP		2,672

### 3.2.3 Granulometria

A análise granulométrica dos solos foi obtida através do processo de peneiramento para a fração grossa (partículas com diâmetro  $\geq 0,074$  mm) e sedimentação para a fração fina (partículas com diâmetro  $< 0,074$  mm). Os procedimentos estão de acordo com o método de ensaio “Solo – Análise Granulométrica” – NBR 7181. As figuras 3.2, 3.3 e 3.4 mostram as curvas de distribuição granulométrica de cada um dos solos ensaiados e a figura 3.5 apresenta, conjuntamente, as três curvas de distribuição granulométrica.



**FIGURA 3.2 – Curva granulométrica do solo argiloso**

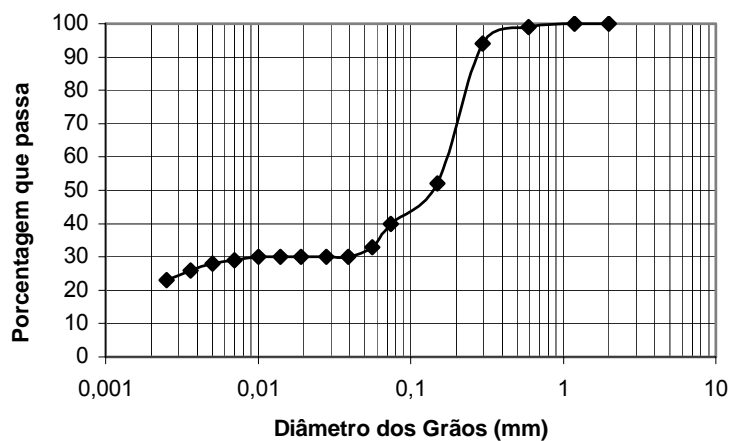


FIGURA 3.3 – Curva granulométrica do solo areno-argiloso

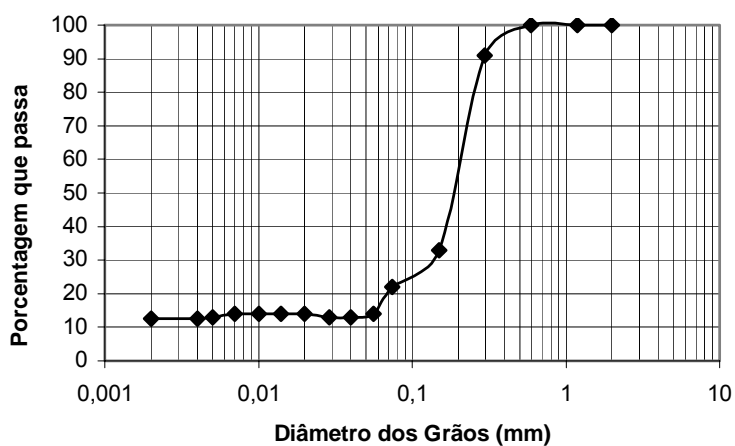
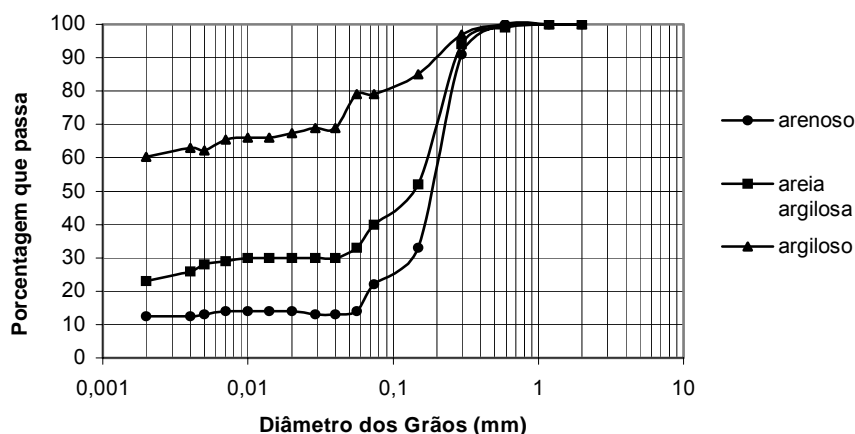


FIGURA 3.4 – Curva granulométrica do solo arenoso



**FIGURA 3.5 – Curvas granulométricas conjuntas dos três solos**

Os percentuais de areia, silte e argila segundo a norma NBR 6502 estão apresentadas na tabela 3.2.

**TABELA 3.2 – Composição granulométrica dos materiais**

Composição Granulométrica	Solo Argiloso	Solo Areno-Argiloso	Solo Arenoso
Areia	23	64	81
Silte	21	16	6
Argila	56	20	13

### 3.2.4 Classificações HRB, USCS e MCT dos solos pesquisados

Para a execução dos ensaios que possibilitaram a classificação segundo a metodologia MCT, adotou-se o procedimento descrito nas seguintes normas: “Solos Compactados com Equipamento Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão”, DNER-ME 256-94, Solos Compactados com Equipamento Miniatura – Mini-CBR e Expansão, DNER-ME 254-94; e “Classificação de Solos Tropicais Segundo a Metodologia MCT”, DER M 196-89. Na tabela 3.3 encontra-se um resumo das classificações determinadas para os três solos.

TABELA 3.3 – Classificação HRB, USCS e MCT dos materiais ensaiados

Solo	HRB	USCS	MCT
Argiloso	A-7-5	ML	LG'
Areia-argilosa	A-4	SC	LG'
Arenoso	A-2-4	SM	LA

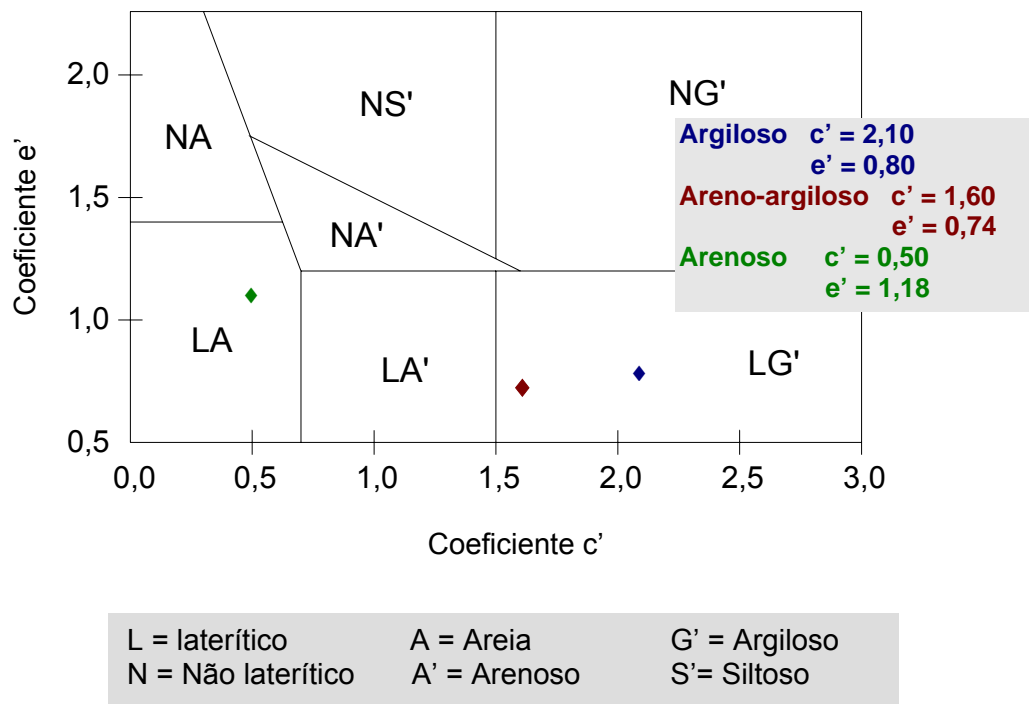


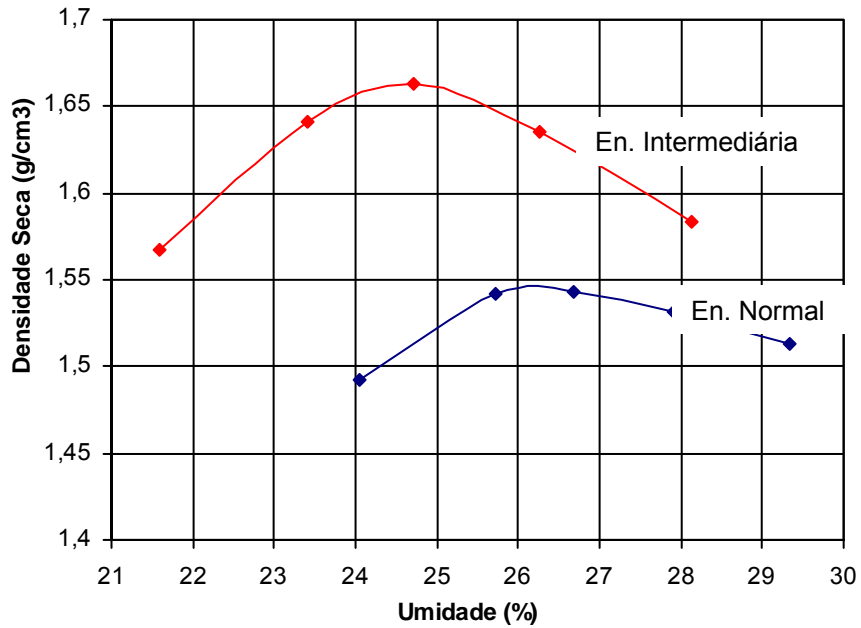
FIGURA 3.6 – Classificação geotécnica dos solos, segundo a Metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical)

### 3.2.5 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima

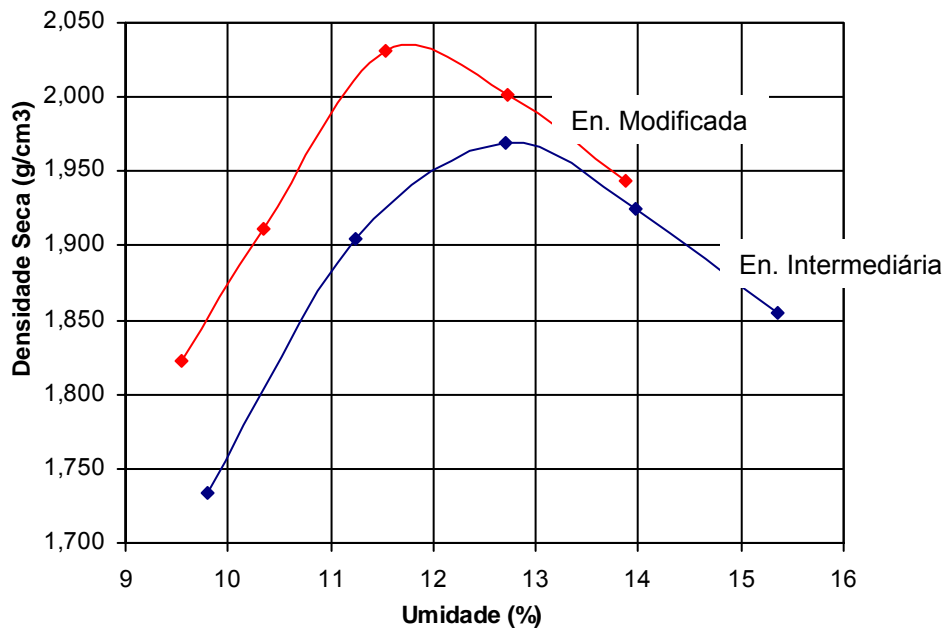
Foram realizados ensaios de compactação, correspondentes à energia normal, intermediária e modificada do ensaio de Proctor, segundo procedimentos preconizados na norma DER M 13-71, para a determinação da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima de cada um dos tipos de solos estudados.

A compactação dos corpos-de-prova foi executada num cilindro de 152 mm de diâmetro e 178 mm de altura, com soquete de 2,270kg para a energia normal

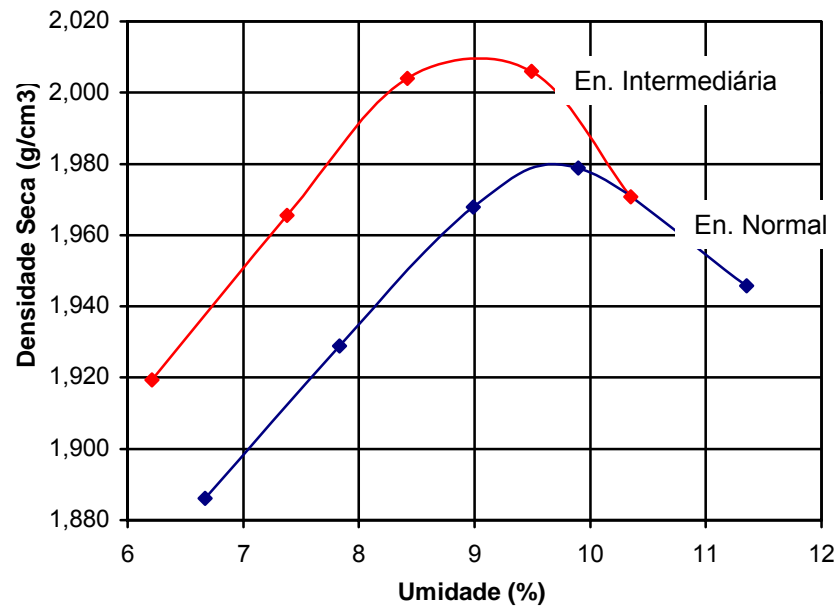
(36 golpes por camada), com o soquete de 4,540kg para a energia intermediária (28 golpes por camada) e para a energia modificada (25 golpes por camada). As figuras 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam as curvas de compactação do solo argiloso, areno-argiloso e arenoso, respectivamente.



**FIGURA 3.7 – Curvas de compactação do solo argiloso na energia normal e intermediária**



**FIGURA 3.8– Curvas de compactação do solo areno-argiloso na energia intermediária e modificada**



**FIGURA 3.9 – Curvas de compactação do solo arenoso na energia normal e intermediária**

Na tabela 3.4 são apresentados os resultados de umidade ótima e massa específica seca máxima correspondentes às energias de compactação consideradas para os três solos ensaiados.

**Tabela 3.4 – Umidade ótima, massa específica seca nas energias de compactação consideradas para os três solos ensaiados**

Amostra	Solo	Energia de Compactação	$W_{ot}$ (%)	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	Argiloso	Normal	26,2	1,545
		Intermediária	24,7	1,663
2	Areno-Argiloso	Intermediária	12,7	1,970
		Modificada	11,8	2,035
3	Arenoso	Normal	9,8	1,980
		Intermediária	9,0	2,010

Vale ressaltar que a escolha da energia de compactação de cada um dos solos baseou-se na prática construtiva na região de coleta dos mesmos.



### 3.3 ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS

Nos ensaios triaxiais cíclicos realizados no equipamento da COPPE/UFRJ, os sistemas de carregamento são pneumáticos e as aplicações e remoções das tensões são controladas por dispositivos que fazem o monitoramento das deformações e deslocamentos resilientes.

Ao passar por um regulador de pressão, o ar comprimido estabelece o contato entre o cilindro de pressão e uma válvula. O início do ciclo se dá com a transmissão da pressão do ar através do cilindro para o pistão que atua no topo das amostras após a abertura da válvula. Com o fechamento da válvula, a pressão é removida. Um dispositivo mecânico digital, temporizador, controla esta operação e a frequência das solicitações atuando na válvula de três vias.

Os deslocamentos resilientes são medidos através de transdutores mecano-eletromagnéticos LVTDs, acoplados às amostras por um par de alças ou braçadeiras leves. Os LVDTs permitem medições de leituras cujas aproximações são limitadas por suas características e transformam as deformações axiais em potencial elétrico durante a fase de carregamento repetido. As deformações e os valores dos registros são relacionados através de uma calibração no equipamento.

A figura 3.10 mostra os LVDTs fixados no corpo-de-prova já instalado na base da câmara triaxial do equipamento do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e a figura 3.11 mostra a montagem da câmara triaxial.

O ensaio é efetuado em duas etapas: Na primeira etapa, o corpo-de-prova é submetido a uma fase de confinamento, com uma seqüência de carregamentos dinâmicos axiais com o objetivo de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio e de reduzir os efeitos das tensões no valor do módulo de resiliência. Na segunda etapa, onde o módulo de resiliência é determinado, as tensões aplicadas são definidas de acordo com o método da COPPE/UFRJ.

A tabela 3.5 apresenta os níveis de tensões aplicados segundo o método da COPPE/UFRJ para a fase de confinamento, bem como para a fase de aplicação das tensões propriamente dita.



**FIGURA 3.10 – LVDTs fixados no corpo-de-prova já instalado na base da câmara triaxial – COPPE/UFRJ**



**FIGURA 3.11 – Montagem da câmara triaxial – COPPE/UFRJ**

**TABELA 3.5 – Sequência de tensões e número de aplicações de carga adotadas para os ensaios triaxiais cíclicos segundo procedimento da COPPE/UFRJ**

Etapa	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	Repetições
Condicionamento	0,07	0,07	500
	0,07	0,21	500
	0,105	0,31	500
Ensaio	0,021	0,021	10
	0,021	0,041	10
	0,021	0,062	10
	0,034	0,034	10
	0,034	0,069	10
	0,034	0,103	10
	0,051	0,051	10
	0,051	0,103	10
	0,051	0,154	10
	0,069	0,069	10
	0,069	0,137	10
	0,069	0,206	10
	0,103	0,103	10
	0,103	0,206	10
	0,103	0,309	10
	0,137	0,137	10
0,137	0,275	10	
0,137	0,412	10	

#### • Preparação e moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram moldados em um cilindro bipartido, que, ao final da moldagem, produziu corpos-de-prova com diâmetro de 10cm e altura de 20cm.

Utilizou-se a compactação estática em cinco camadas iguais de solo utilizando-se a prensa mostrada na figura 3.12. Durante a preparação dos corpos-de-prova teve-se a preocupação de compactar as amostras com umidade ótima e massa específica seca máxima determinadas nos ensaios de compactação. A cada

camada do corpo-de-prova executada foi feita uma escarificação na superfície proporcionando maior atrito nas interfaces.



**FIGURA 3.12 – Prensa utilizada para compactação dos corpos de prova na COPPE/UFRJ**

Para a moldagem dos corpos-de-prova, utilizou-se um cilindro de metal apresentado na figura 3.13, composto de um corpo central, dois anéis cilíndricos complementares e quatro êmbolos espaçadores de extremidade. Antes de se iniciar a compactação da mistura, o cilindro é lubrificado com vaselina para facilitar a posterior extração do corpo-de-prova. O controle das espessuras das camadas é feita através dos espaçadores, atingindo-se para cada camada, uma altura correspondente a um quinto da altura do corpo-de-prova.

Após a compactação, os corpos-de-prova foram extraídos do cilindro com auxílio do mesmo equipamento usado para a compactação. Posteriormente, determinam-se suas dimensões e massa para avaliar o grau de compactação, aceitando-se uma variação de  $\pm 2\%$  do grau de compactação pretendido de 100%.



**FIGURA 3.13 – Cilindros de metal utilizado na moldagem dos corpos de prova**

### **3.3.1 PROCEDIMENTO E CÁLCULO DO ENSAIO**

As tensões desvio ( $\sigma_d$ ) e de confinamento ( $\sigma_3$ ) aplicadas durante o ensaio, o número de repetições e os cálculos para a determinação dos deslocamentos resilientes e  $M_R$  seguiram também o procedimento preconizado segundo o método da COPPE/UFRJ.

Durante os ensaios triaxiais foram armazenados os valores correspondentes aos 5 últimos ciclos de carregamento para cada nível de tensão. O deslocamento resiliente de cada ciclo é dado pela média dos valores registrados nos dois LVDT's.

O valor adotado para o cálculo de  $\varepsilon_R$  em cada nível de tensão é a média dos deslocamentos resilientes dos cinco últimos ciclos. (eq. 3.1)

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3.1)$$

onde:

$\varepsilon_R$  = deformação resiliente (mm/mm);

$\Delta h$  = deslocamento resiliente (mm);

$h_0$  = altura inicial (mm).

O módulo resiliente foi calculado para cada estado de tensão utilizando-se a expressão 3.2:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (3.2)$$

onde:

$M_R$  = módulo de resiliência (KPa);

$\sigma_d$  = tensão desvio aplicada (KPa);

$\varepsilon_R$  = deformação resiliente (mm/mm).

### 3.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples consistiu em submeter um corpo-de-prova, sem qualquer confinamento, à aplicação de uma força uniaxial que passa pelo seu eixo longitudinal. Esta força provoca uma tensão normal de compressão sobre o topo da amostra, a qual vai sendo gradativamente aumentada até que se atinja a ruptura.

Os ensaios de compressão simples foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, numa prensa mecânica da marca WYKEHAM FARRANCE ENGLAND, modelo TRISTAR 5000 kg STEPLESS, COM CAPACIDADE de 10000 kgf e velocidade de aplicação da carga controlável (vide figura 3.14). Nesse estudo utilizou-se a velocidade de 1,27 mm/min, a mesma aplicada para corpos-de-prova do ensaio CBR.

A força aplicada foi determinada através de um anel dinamométrico com capacidade de 500 kgf. A deformação do anel e o deslocamento dos corpos-de-prova foram medidos com o uso de LVDTs, acoplados a um sistema de aquisição automática de dados que permite o armazenamento e posterior manuseio dos resultados obtidos. Erros de medição provenientes da deformabilidade do equipamento foram calibrados e descontados durante o processamento dos resultados.

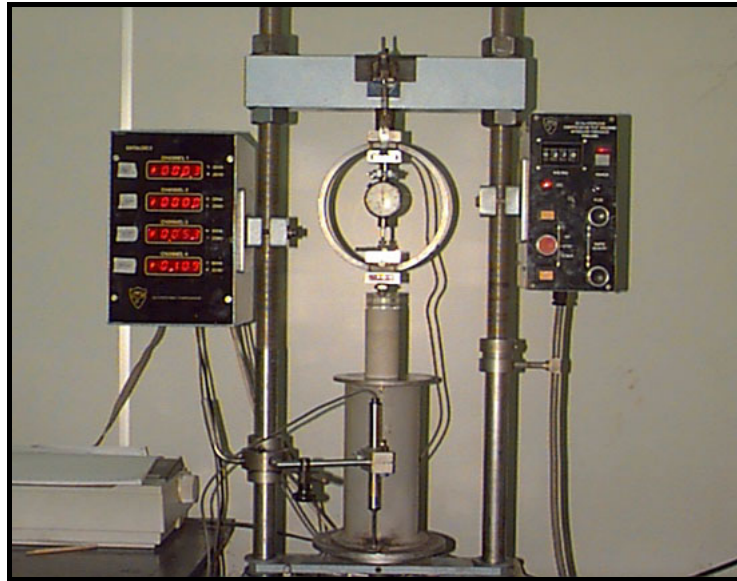


FIGURA 3.14– Prensa utilizada para os ensaios de compressão simples na EESC/USP

### 3.4.1 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO TANGENTE INICIAL

Como a determinação do módulo tangente inicial envolve alguma subjetividade e deformações muito pequenas que os equipamentos de medida, na sua maioria, não indicam com precisão, procurou-se padronizar um procedimento que minimizasse o efeito destes aspectos. Optou-se pelo método proposto por (DUNCAN e CHANG, 1970) que supõe a curva tensão x deformação uma hipérbole, descrita pela equação 3.3.

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_a} = a + b \cdot \varepsilon_a \quad (3.3)$$

onde:

$\varepsilon_a$  = deformação axial;

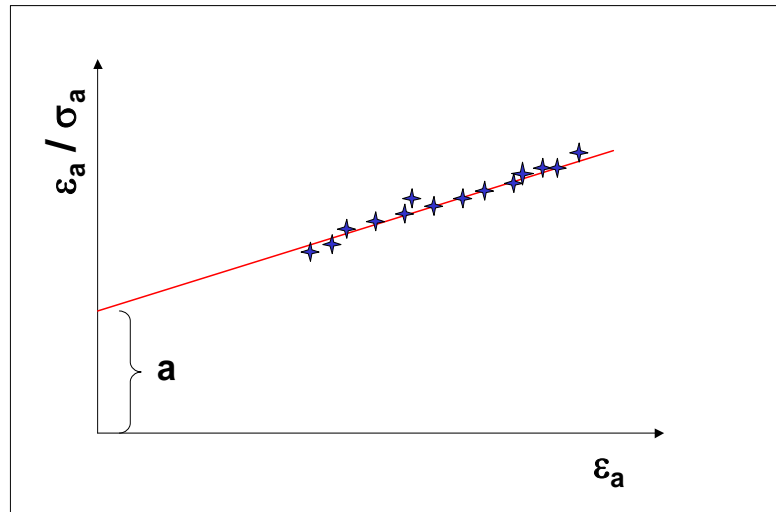
$\sigma_a$  = tensão axial;

a e b = coeficientes de regressão considerando a reta que melhor se ajusta aos resultados experimentais.

Assim, o módulo tangente inicial  $E_0$  será determinado pela expressão 3.4:

$$E = \frac{1}{a} \quad (3.4)$$

A figura 3.15 mostra graficamente a estimativa de  $E_0$  a partir do coeficiente “a”.



**FIGURA 3.15 - Exemplo da estimativa de  $E_0$  a partir da determinação do coeficiente “a”, segundo o modelo hiperbólico proposto por DUNCAN & CHANG (1970)**

A determinação do coeficiente “a” é feita através da reta que melhor se ajusta aos dados experimentais. Para tal, lança-se em gráfico os valores de deformação específica axial ( $\epsilon_a$ ) no eixo das abscissas e os valores da relação entre deformação específica axial e tensão axial ( $\epsilon_a/\sigma$ ) no eixo das ordenadas, conforme exemplificado na figura 3.15.

Ressalta-se que devem ser descartados os pontos iniciais da curva tensão x deformação, devido à imprecisão existente na determinação de deslocamentos muito pequenos, e os pontos posteriores à ruptura do corpo de prova.

### 3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos permitiram a investigação da variação do valor do módulo de resiliência de acordo com alterações no estado de tensão confinante, tensão desvio, primeiro invariante de tensão, tensão principal



maior e combinações destas variáveis para os três tipos de solos utilizados nesta pesquisa.

Com os resultados dos ensaios de compressão simples, foi investigada a existências de expressões matemáticas entre o valor do módulo tangente inicial ( $E_o$ ) dos solos analisados e seus respectivos valores do módulo de resiliência, considerando-se os diversos estados de tensão presentes no ensaio triaxial cíclico.

Finalmente, foi analisada a existência de relações que englobem, além dos solos estudados nesta pesquisa, também os solos estudados anteriormente por Cunto (1998) e Carmo (1998) na EESC-USP, possibilitando assim, validar uma relação matemática genérica para um universo maior de tipos de solos.