

À memória de meu pai

À memória de meu cunhado

À minha mãe e à minha esposa Sonia, por tudo e pelo sacrifício a que se submeteram a fim de concretizar este trabalho.



M337e Marinho, Reinaldo Lins.  
Estudo da variabilidade estatística de ensaios de  
classificação de solos / Reinaldo Lins Marinho. - Campina  
Grande, 1976.  
129 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade  
Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Solos - Classificação - Estatística. 2. Dissertação -  
Engenharia Civil. I. Cabrera, J. G. II. Universidade  
Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 631.44(043)

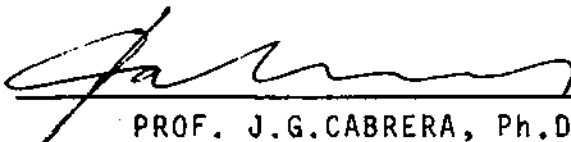
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT

ESTUDO DA VARIABILIDADE ESTATÍSTICA  
DE ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

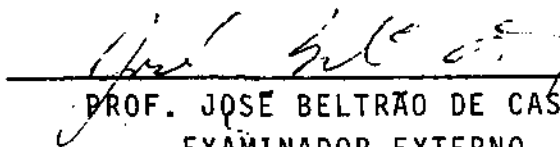
Reinaldo Lins Marinho

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NE  
CESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

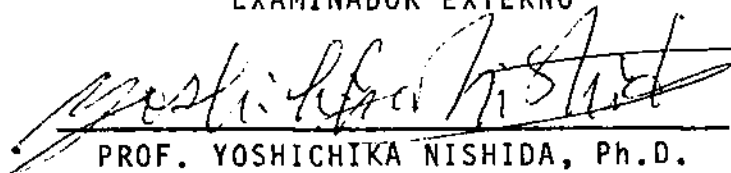
APROVADA:



PROF. J.G. CABRERA, Ph.D.  
PRESIDENTE



PROF. JOSÉ BELTRÃO DE CASTRO  
EXAMINADOR EXTERNO



PROF. YOSHICHIKA NISHIDA, Ph.D.  
EXAMINADOR INTERNO

CAMPINA GRANDE  
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL  
MAIO - 1976

# A STUDY OF THE REPRODUCIBILITY OF SOIL CLASSIFICATION TESTS

M.Sc. Dissertation

by

Reinaldo Lins Marinho

## ABSTRACT

The study presented in this dissertation deals with the reproducibility of four soil classification tests.

A critical literature survey on methods of testing and reproducibility results in other countries is presented and discussed.

The laboratory study was carried out using eleven natural soils, three industrially processed soils and two soils resulting of mixtures of natural and processed soils.

The reproducibility of the Liquid Limit test, Plastic Limit test, Grain Size Distribution analysis and Specific Gravity test is presented in terms of repeatability and reproducibility. The study of repeatability was conducted in one laboratory with the same equipment and the same operator while the study of reproducibility was possible with the cooperation of sixteen laboratories (three laboratories from Academic Institutions, eight laboratories from Federal and State Highway Authorities and five laboratories from Consultant Engineering Firms).

A pilot study was also carried out to investigate the advantages of the use of the Cone Penetration method for the determination of the Liquid Limit of fourteen soils of the sixteen investigated.

Statistical analysis of the repeatability study shows that the coefficients of variation are comparable to others reported in the literature while the reproducibility results show very clearly that the coefficients of variation are unacceptably high. It is shown that the reproducibility of the four tests investigated is so poor that their validity has to be questioned.

A discussion of the methods used is presented and suggestions to improve the reproducibility of the tests suggested.

ESTUDO DA VARIABILIDADE ESTATÍSTICA  
DE ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

Tese de Mestrado

por

Reinaldo Lins Marinho

SUMÁRIO

O estudo apresentado nesta dissertação trata da reprodutibilidade de quatro ensaios de classificação de solos.

É apresentada uma revisão crítica da literatura, nos métodos de ensaio e resultados de reprodutibilidade obtidos em outros países.

O estudo de laboratório foi efetuado usando-se onze solos naturais, três solos beneficiados industrialmente e dois solos resultantes de misturas de solos natural e beneficiado.

A reprodutibilidade do ensaio de Limite de Líquidez, ensaio de Limite de Plasticidade, Análise Granulométrica e ensaio de Densidade Real é apresentada em termos de repetibilidade e reprodutibilidade. O estudo de repetibilidade foi conduzido em um laboratório com o mesmo equipamento e o mesmo operador, enquanto o estudo de reprodutibilidade contou com a cooperação de dezesseis laboratórios (três de Universidades, oito de Organizações Rodoviárias Federais e Estaduais e cinco de Empresas Consultoras).

Um estudo piloto foi também efetuado a fim de pesquisar as vantagens do uso do método do Cone de Penetração para a determinação do Limite de Liquidez de quatorze solos, dos de zesseis investigados.

Análise estatística do estudo de repetibilidade mostra que os coeficientes de variação são comparáveis com outros reportados na literatura, enquanto os resultados de reprodutibilidade mostram muito claramente que os coeficientes de variação são extremamente sem aceitação. É mostrado que a reprodutibilidade dos quatro solos pesquisados é tão pobre que sua validade é contestada.

É apresentada uma discussão dos métodos usados e são feitas sugestões para melhorar a reprodutibilidade dos ensaios.

## Í N D I C E

			Página
CAPÍTULO	1	INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO	2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
	2.1	Introdução	3
	2.2	A variabilidade de ensaios de classifica ção	3
	2.3	Determinação do Limite de Liquidez e sua variabilidade devido à aparelhagem	8
	2.3.1	Variabilidade do Limite de Liquidez obti do com o aparelho de Casagrande	8
	2.3.2	Medida do Limite de Liquidez com o Cone de Penetração	12
CAPÍTULO	3	OBJETIVO DA PESQUISA	18
CAPÍTULO	4	MATERIAIS USADOS NA PESQUISA	19
CAPÍTULO	5	PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS	24
	5.1	Preparação de amostras	24
	5.2	Métodos de Ensaio	25
	5.2.1	Métodos de ensaio nos laboratórios par- ticipantes	25
	5.2.2	Métodos de ensaio no laboratório do CCT	26
	5.2.2.1	Ensaio de Limite de Liquidez	26
	5.2.2.2	Ensaio de Limite de Plasticidade	29
	5.2.2.3	Ensaio de Granulometria	31
	5.2.2.4	Ensaio de Densidade Real	33
CAPÍTULO	6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DA REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS	43
	6.1	Introdução	43
	6.2	Ensaio de Limite de Liquidez	43
	6.3	Ensaio de Limite de Plasticidade	45
	6.4	Análise Granulométrica	46
	6.5	Ensaio de Densidade Real	48
CAPÍTULO	7	ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ UTILIZANDO O CONE DE PENETRAÇÃO	66



		Página	
	7.1	Introdução	66
	7.2	Análise e discussão dos resultados	67
	7.3	Repetibilidade do ensaio de Limite de Liquidez utilizando o Cone de Penetração	68
CAPÍTULO	8	ANÁLISE E DISCUSSÃO DA REPRODUTIBILIDADE DOS ENSAIOS	76
	8.1	Introdução	76
	8.2	Ensaio de Limite de Liquidez	76
	8.3	Ensaio de Limite de Plasticidade	78
	8.4	Análise Granulométrica	79
	8.5	Ensaio de Densidade Real	80
CAPÍTULO	9	C O N C L U S Õ E S	94
CAPÍTULO	10	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	98
		REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
		AGRADECIMENTOS	104
APÊNDICE	A	CÓPIA DA CARTA, NOTAS EXPLANATÓRIAS E CARTA-RESPOSTA ENVIADAS ÀS ORGANIZAÇÕES	105
APÊNDICE	B	CÓPIA DA CARTA, RECOMENDAÇÕES PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS E CARTA-RESPOSTA ENVIADAS ÀS ORGANIZAÇÕES QUE CONCORDARAM EM PARTICIPAR DO PROGRAMA	110
APÊNDICE	C	MÉTODO DE DETECÇÃO DE "OUT-LIERS"	114
APÊNDICE	D	RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	118
APÊNDICE	E	PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ COM O CONE DE PENETRAÇÃO	122
APÊNDICE	F	DEFINIÇÕES DE ALGUNS TERMOS USADOS NESTE TRABALHO E LISTA DE ABREVIACÕES.	127

## CAPÍTULO 1

### I N T R O D U Ç Ã O

Os ensaios de classificação de solos são largamente empregados quando se quer decidir sobre a adequabilidade de um solo a ser usado como material de construção. Por exemplo, propriedades de retenção de umidade são utilizadas na seleção de solos para formação de aterros, propriedades de compactação são relacionadas com as características de plasticidade, valores de densidade real são empregados como guia para a compactação num índice de vazios especificado.

Os erros na determinação dos valores quantitativos dos ensaios de classificação de solos podem, portanto, resultar na rejeição de materiais satisfatórios ou, o que é pior, na aceitação de material inadequado. Por exemplo, ensaios de classificação de solos que abrangem determinações de distribuição granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade de um solo são utilizados para a determinação do valor do Índice de Grupo (IG) e este é usado no Brasil para calcular o Índice de Suporte Califórnia ou CBR do material. Erros de grande magnitude em qualquer destes parâmetros de classificação, podem levar a projetar estruturas de pavimentos com um grau de imprecisão inaceitável.

Embora se saiba que a repetibilidade nos resultados, dentro de um mesmo laboratório, possa ser obtida en-

tre valores aceitáveis, a variabilidade de resultados entre laboratórios diferentes nunca foi examinada no Brasil. A importância que é dada aos ensaios de classificação torna desejável não só a análise da extensão destas variações, mas a possibilidade de se usar métodos alternativos de ensaios.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - Introdução

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo, analisa dois aspectos relacionados com a metodologia de alguns ensaios de classificação de solos:

1º - A variabilidade de resultados de ensaios de laboratório, que abrange aspectos de repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados quantitativos de densidade real, análise granulométrica e limites de Atterberg;

2º - O aspecto mecânico da determinação do limite de liquidez usando o aparelho de Casagrande e sua possível substituição por um método alternativo que melhore a repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio.

#### 2.2 - A variabilidade de ensaios de classificação

É intuitivamente aceito por engenheiros e

cientistas que os resultados de um ensaio estão sujeitos a certo grau de erro. Até o presente não existe conhecimento sobre as tolerâncias que poderiam ser aceitáveis para os diferentes ensaios de classificação isto é, a variabilidade de um ensaio em termos estatísticos quantitativos não é especificada nos padrões de ensaio.

Brunschwig (1), citando a Norma Francesa X-05-020, indica que normalizar um método de ensaio sem conhecer a precisão da "fidelidade", não tem sentido. Ele diz: a "fidelidade" deve ser verificada em termos de repetibilidade e reprodutibilidade, definidos quantitativamente em função de um índice de dispersão tal como o desvio-padrão ou a variância.

A Organização Internacional de Normas (International Standard Organization, ISO) (1), na sua terceira lista de termos estatísticos, estabelece para repetibilidade e reprodutibilidade o valor abaixo do qual está situado, com uma probabilidade de 95%, o valor absoluto da diferença entre dois resultados individuais. Vários países fizeram objeção à palavra "probabilidade", preferindo "confiabilidade" e ainda que o valor numérico de 95% não devia ser imposto, sendo o valor indicado como repetibilidade ou reprodutibilidade a X%.

São muito poucas as referências relativas à variabilidade dos ensaios de granulometria e densidade real. Sherwood (2) é um dos poucos pesquisadores que refere resultados de análises granulométricas das frações silte e argila de três solos, indicando que sua repetibilidade foi boa mas a reprodutibilidade nos resultados de laboratórios apresentou grande dispersão, tão grande que o método atual das especificações inglesas (38) tem desprezível valor prático. No entanto ele recomenda que um estudo de muita utilidade prática seria fazer a análise da reprodutibilidade do peneiramento mecânico das frações de solos maiores que 74 microns.

Com referência à variabilidade de resultados de densidade real em solos, Sherwood (2) encontrou que a fonte de erro mais comum é a incompleta remoção de ar. Os ensaios de repetibilidade com um operador no mesmo laboratório foram excelentes para o alto grau de precisão alcançado. Os ensaios de

reprodutibilidade (ensaios em diferentes laboratórios) foram de boa consistência; no entanto a precisão de  $\pm 0,05$  recomendada, não foi alcançada.

Analisando a variação de vários ensaios de solos em pavimentação, Penna de Carvalho (3) concluiu haver boa repetibilidade. Os resultados obtidos com uma areia pouco sil-tosa, forneceram para as peneiras de 3/4", 3/8", nºs 4, 10, 40 e 200, desvios-padrão que variaram de 0,50 a 1,50 e de 0,96 a 3,9 respectivamente, para operadores com muita e com pouca prática do ensaio. Comparando-se as médias resultantes de 4 ensaios, entre operadores com muita e com pouca prática, verificaram-se diferenças inferiores a 1 (um) nas percentagens passando encontradas; entretanto há variações para mais de 3 (três) nas percentagens de ensaios isolados encontradas por um mesmo operador. Concluiu também que a variação depende aparentemente muito pouco da influência da prática dos operadores.

Em contrapartida é vasta a experiência sobre a variabilidade dos Limites de Consistência, não só no Exterior como no Brasil, onde o aspecto de variabilidade estudado foi apenas o de repetibilidade.

Sherwood et al (4) estudando a reprodutibilidade do limite de liquidez de três solos, obtido por quarenta laboratórios utilizando a especificação inglesa, observaram variações consideradas grandes: em médias de 34, 69 e 67% houve desvios-padrão de 2,4, 5,2 e 5,3% e coeficientes de variação de 7,1, 7,5 e 7,9% respectivamente.

Estudos sobre a influência da mudança de operadores, considerados no mesmo nível de experiência, em dois tipos de solos, mostraram, baseados na análise estatística dos resultados, usando o método da variância, que havia significativas diferenças entre vários operadores, enquanto apenas pequena variação ocorria nos ensaios pelo mesmo operador; concluiu-se que para um limite de confiança de 95%, o conjunto de operadores usado neste estudo podia reproduzir tanto o limite de liquidez como o limite de plasticidade com uma precisão de  $\pm 2\%$  (5, 6, 7).

Em cinco solos, incluindo uma argila orgânica, Pinto et al (8) verificaram a variabilidade no mesmo laboratório determinando cinco limites de liquidez em cada solo, embora não especificassem se com o mesmo ou vários operadores, chegando a desvios-padrão altos.

O Laboratoire Central de Ponts et Chaussées-L.C.P.C., há dez anos passados, verificou a dispersão dos limites de liquidez e plasticidade, através de numerosos ensaios e efetuados em seus diferentes laboratórios regionais e seu Laboratório Central, observando que a variação do limite de liquidez é maior que a variação do limite de plasticidade (9).

Pinto e Massad (10) estudaram a reprodutibilidade dos limites de consistência de três solos constituídos de argila orgânica da Baixada Santista, usando os resultados feitos por seis laboratórios, evidenciando uma variação, em termos da diferença entre os valores extremos, bastante acentuada e sempre maior para o limite de liquidez, como por exemplo, para um dos solos, 19% e 6%.

Bogossian et al (11) analisaram a variação dos limites de consistência de argilas siltosas orgânicas de origem marinha na área do futuro Terminal Marítimo de Sepetiba, entre ensaios com secagem prévia (mantendo a estufa com um máximo de 50°C) e sem secagem prévia; embora não tenha havido repetição, pois apenas executou-se um ensaio de cada maneira referida, vale ressaltar a grande variação e a conclusão por eles chegada da maior coerência entre os valores encontrados sem secagem prévia.

Cabrera e Queiroz (12) estudando uma argila orgânica do Recife, determinaram os limites de consistência para vários pontos do perfil da camada, ensaiando o solo com e sem secagem prévia. Verificaram a ocorrência de uma grande variação para os limites de Atterberg com os valores sem secagem prévia comparando-se com os limites obtidos com o solo previamente seco em estufa a 110°C.

Pesquisando um grande número de solos aluviais, Uppal et al (13) observaram que para solos com certa quan

tidade de areia, seja com limite de liquidez abaixo de 25% ou Índice de plasticidade entre 4 e 7%, o aparelho de Casagrande não dava valores corretos; eles prepararam uma série de misturas artificiais de areia com um solo de Índice de plasticidade conhecido, determinando então seus limites de consistência e comparando os respectivos Índices de plasticidade com os calculados pela fórmula de Hogentogler (13). Observaram grandes discrepâncias e concluíram que estas podiam atribuir-se ao aparelho de Casagrande.

Togrol (14), em um valioso estudo estatístico dos limites de consistência determinados em dez amostras de um solo argiloso cuidadosamente homogeneizado, conduzido no mesmo laboratório por cinco operadores diferentes porém na mesma época do ano e com o mesmo equipamento, seguindo os mesmos procedimentos, chegou a resultados similares aos já citados nesta revisão; variações realmente significantes, tanto referentes à repetibilidade (mesmo operador) como, e principalmente, com relação à reprodutibilidade (conjunto de todos operadores).

Em ensaios realizados por cinco entidades de alta categoria profissional dos EUA, com uma amostra suficientemente homogeneizada, Ballard et al (15) verificaram a variação do limite de plasticidade através de um modelo matemático, bastante sofisticado, concluindo que a reprodutibilidade de cinco ensaios não era adequada pois observaram desvios-padrão de até 1,07% em uma média de 20,2%. Os laboratórios eram considerados como similares, com o mesmo nível de experiência e conhecimento; cada laboratório utilizou dois operadores, cada qual efetuando o ensaio cinco vezes. Um dos laboratórios usou operadores com pouca ou nenhuma experiência os quais realizaram os ensaios apenas seguindo as instruções da American Society for Testing Materials - ASTM, sem que nenhuma explicação ou instrução lhes tenha sido dada; concluíram também que nada justificava a eliminação de resultados obtidos por operadores não treinados pois não houve diferenças sensíveis entre o desvio-padrão do operador e a grande média, denotando que qualquer operador usando somente as normas da ASTM como orientação poderia obter resultados compatíveis com os obtidos por profissionais.



## 2.3 - Determinação do Limite de Liquidez e sua variabilidade devido à aparelhagem

### 2.3.1 - Variabilidade do Limite de Liquidez obtido com o aparelho de Casagrande

Os limites de consistência de um solo são parâmetros definidos em forma arbitrária e portanto sua interpretação em termos fundamentais não é possível. Entretanto, correlações empíricas dos limites de consistência com parâmetros de propriedades de engenharia são parte fundamental de Mecânica dos Solos e sua utilidade é ainda maior para propósitos de classificação. Disso decorre a permanente preocupação sobre a variabilidade desses parâmetros.

O objetivo deste subcapítulo é revisar o trabalho relevante de alguns pesquisadores no que se refere à influência do aparelho de Casagrande na variabilidade dos resultados do limite de liquidez, enquanto que o subcapítulo seguinte apresenta o trabalho de pesquisa conhecido sobre um método alternativo para a determinação do limite de liquidez, o Cone de Penetração.

A inovação mais importante ao método manual proposto por Atterberg (16) foi a introdução de um aparelho mecânico projetado por Casagrande em 1932 (16) e utilizado atualmente, com menores variações, pela maioria dos laboratórios de mecânica dos solos do mundo.

O aparelho mecânico mostrou rapidamente que a dispersão de resultados de limite de liquidez para um solo podia diminuir notavelmente. Casagrande (17) continuando estudos mais acurados, propôs a padronização do aparelho original, reconhecendo no entanto a desvantagem do método que consiste fundamentalmente num ensaio dinâmico de cisalhamento; ele diz: isto é uma grande desvantagem, por que não se pode estipular bases uniformes de comparação para solos de granulação fina, que reagem diferentemente quando submetidos a um ensaio de sacudidela (shaking). Por exemplo solos arenosos submetidos a

um teste do tipo de Casagrande podem exibir dilatãncia segundo o mesmo princı́pio demonstrado no teste de dilatãncia recomendado pelo DNER (18).

Dando continuidade, Casagrande (17) indicou os itens a considerar para a normalizão do aparelho para de terminão do limite de liquidez. Sã os seguintes:

- a) material da base,
- b) as dimensões da base e protẽo desta contra a influẽncia de eventuais vibrães e choques na mesa de trabalho,
- c) material, dimensões e peso da concha,
- d) altura vertical de queda da concha,
- e) dimensões do cinzel, cujo formato ẽ chato.

Dando continuidade a estes estudos, vãrios pesquisadores procuraram verificar as causas de erros, variães e limitães do aparelho mecãnico, tratando nã sã das caracterı́sticas do aparelho e do cinzel em si, como tambẽm de outros fatores tais como: influẽncias do operador, influẽncia da qualidade da ẽgua adicionada no ensaio, mẽtodo de preparão de amostra, tempo de homogeneizão da massa, tempo em que a massa homogeneizada ficou sujeita ẽ cura antes de ser submetida ao ensaio, influẽncia da secagem prẽvia, etc.

Norman (19) em 1958 pesquisou a influẽncia de diferentes tipos de material constituintes das bases do aparelho de Casagrande nos resultados do limite de liquidez de cinco solos argilosos. Os ensaios foram realizados com aparelhos fabricados nos EEUA e na Inglaterra; a dureza da base do aparelho de Casagrande foi medida com um aparelho conhecido como "Dunlop tire" o qual consiste essencialmente em um penetrõmetro que dã valores numa escala variãvel de 0 (zero) a 100 (cem) com crescimento diretamente proporcional ẽ rigidez do material da base. O equipamento americano, de maior dureza, deu valores de limite de liquidez de 3 a 4% menores que os obtidos com o equipamento britãnico considerados com dureza muito inferior. Este artigo foi comentado por Feda e Stopek (20) os

quais achavam que a dispersão encontrada por Norman não era sã e principalmente pela diferença de dureza das bases, pois segundo Casagrande (17) os ensaios de dureza de Ripley mostravam claramente a possibilidade da existência de outros fatores que poderiam exercer maior influência nos resultados dos limites de liquidez que a dureza da base. Por outro lado, Tesorieri (21), baseado em estudos estatísticos de variação de resultados de ensaio feitos em locais diferentes com solos cujos limites de liquidez variavam entre 30 e 35% obteve um coeficiente médio de variação de 3,3%, enquanto que Kohoutek (22), usando os mesmos ensaios mas considerando solos no intervalo de limite de liquidez de 54,8 a 86,4% obteve um coeficiente médio de variação de 3,6%. Ambos autores mostraram que a diferença obtida por Norman, 3 a 4%, pode ser atribuída à diferença de base somente se o coeficiente de variação for menor que 2,24%. Norman (23) responde que os coeficientes de variação usando as bases tipo americana e inglesa, foram respectivamente, 3,8 e 3,2% perfeitamente de acordo com os valores obtidos por Tesorieri e Kohoutek.

Outros problemas relacionados com o uso do aparelho de Casagrande foram sendo observados e, Sowers et al (24) enumeram alguns tais como:

- 1) dificuldade de fazer a ranhura em alguns solos, principalmente aqueles contendo a reia,
- 2) tendência dos solos de baixa plasticidade de deslizar na concha antes de fluir por plasticidade,
- 3) tendência de alguns solos de baixa plasticidade de se liquefazer antes de fluir por plasticidade,
- 4) pequenas diferenças nas aparelhagens, como a forma do cinzel,
- 5) influência do operador na execução da profundidade, forma e alinhamento da canelura, velocidade da operação, observação

oportuna do ponto de fechamento da canelura e falta de sistematização, perfeição na homogeneização do solo.

Kumapley et al (5) estudaram a influência do atrito e do declive decorrente da rugosidade da concha nos valores dos limites de liquidez de alguns solos de Ghana e concluíram que para as amostras de argila os resultados não eram afetados enquanto que para os solos micáceos geralmente os valores do limite de liquidez aumentavam proporcionalmente com a rugosidade, até um certo grau a partir do qual não mais havia diferença.

Freitas Junior (25) estudou os limites de consistência de solos paulistas chegando às seguintes conclusões:

- a) as dimensões e peso da concha não afetam sensivelmente os valores do limite de liquidez;
- b) o tipo de material da base causa muito pequena variação nos resultados, desde que o coeficiente de restituição seja maior que 80%; este coeficiente, determinado pela esfera de aço por um método simples, caracteriza bem o material da base, dispensando-se outros métodos como o da determinação da dureza (Rockwell), de precisão muito grande para os fins propostos; em três amostras ensaiadas, os valores do limite de liquidez diminuíram em cerca de 10% em média, utilizando-se vários tipos de bases com coeficientes de restituição variando na faixa de 53 a 90%;
- c) o método de preparação da amostra, a partir da secagem prévia, pode influir decisivamente nos resultados dos limites de consistência; ensaios realizados com solos oriundos de basalto evidenciaram que o tempo de

manipulação da amostra, isto é, da operação com a espátula metálica, pode variar em até 10% os valores do limite de liquidez e no traçado da curva de fluidez os últimos pontos (maiores umidades) apresentavam maiores dispersões, pois a amostra, para estes pontos, sofria um processo de homogeneização mais intenso.

### 2.3.2 - Medida do limite de liquidez com o Cone de Penetração

A maior desvantagem do aparelho de Casagrande é que o limite de liquidez é obtido por um ensaio de cisalhamento dinâmico o qual ocasiona problemas fundamentais para a interpretação do comportamento de alguns solos como foi indicado no subcapítulo anterior. Então, parece lógico que um aparelho que substituisse o de Casagrande deveria ser aquele com o qual o cisalhamento fosse do tipo estático.

O Cone de Penetração no qual uma carga estática aplicada através de um cone é permitida penetrar na superfície do solo úmido satisfaz essa condição de maneira que o problema é reduzido a encontrar uma relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e a percentagem de umidade que corresponde ao limite de liquidez.

Na Suécia, o método preferido para a determinação do limite de liquidez é o ensaio de cone "fall-cone test", originalmente desenvolvido pelo "Swedish State Railways" entre 1914 e 1922 e usado desde então como parte do procedimento para classificação de solos (26). Neste ensaio assume-se que a resistência ao cisalhamento de um solo a uma penetração constante do cone é diretamente proporcional ao peso do cone. Pesquisas na Suécia (26) mostraram que a resistência ao cisalhamento não drenado é uma função de penetração e do peso do cone e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$c = k p/h^2$$

onde:

c = resistência ao cisalhamento não drenado,  
p = peso do cone,  
h = profundidade de penetração do cone,  
k = uma constante que depende principalmente do ângulo do cone e ainda da velocidade de cisalhamento e sensibilidade do solo.

O cone padrão usado na Suécia tem um peso de 60g e um ângulo de  $60^{\circ}$ . A percentagem de umidade correspondente ao limite de liquidez é dada pelo "número de finura" (fineness number) o qual é definido como a percentagem de umidade para a qual a penetração do cone é igual a 10mm.

Karlsson (27), num estudo comparativo de limites de liquidez obtidos com o cone de penetração e com o aparelho de Casagrande, mostrou que existia uma razoável correspondência entre os valores numéricos do "número de finura" e a percentagem de umidade correspondente ao limite de liquidez obtido com o aparelho de Casagrande quando os limites de liquidez estavam próximos de 40%. A valores maiores o número de finura tendia a ser menor que o limite de liquidez obtido pelo aparelho de Casagrande. Karlsson mostrou ainda que a resistência de solos ao cisalhamento medida com o ensaio de Vane é muito mais consistente ao número de finura que ao limite de liquidez de Casagrande.

O método do cone de penetração foi introduzido na Rússia, conforme citação de Sherwood (4), por Vasilev em 1949. O equipamento também é simples e consiste em um cone de aço com peso de 76g e ângulo de  $30^{\circ}$ . A penetração de 10 mm é tomada para indicar o limite de liquidez; o teor de umidade correspondente à penetração de 10mm é encontrado por tentativa, plotando-se a penetração obtida a vários teores de umidade. Melhoramentos no aparelho de Vasilev têm sido feitos por vários pesquisadores da Europa Oriental e todos eles concordam que a penetração de 10mm não corresponde exatamente ao limite de liquidez de Casagrande, exceto para valores baixos; para valores altos a diferença entre os dois métodos torna-se

grande; as equações seguintes relacionam o limite de liquidez obtido pelo método russo ( $L_c$ ) e o aparelho de Casagrande ( $LL$ ):

$$LL = 1,5 L_c - 7,4 \text{ (segundo Stefanov)}$$

$$LL = 1,2 L_c - 5,3 \text{ (segundo Bozinovic)}$$

$$LL = 1,2 L_c - 3,7 \text{ (segundo Matschak e Rie-  
tschel)}$$

Sowers et al (24) obtiveram uma relação equivalente à encontrada por Stefanov.

Correlação entre valores do limite de liquidez conforme Casagrande e Valisev foi estudada por Skopek (28) para 236 amostras; dividindo os solos em grupos conforme a porcentagem de finos e a atividade coloidal e estabelecendo relações para cada grupo, ele concluiu não haver sentido para fins práticos na utilização das correlações destes sub-grupos, isto é, a correlação geral dava resultados bem compatíveis. Apresentamos a seguir a equação de Skopek para o total de amostras e de outros autores por ele citados:

$$LL = 1,4 L_c - 10,7 \text{ (segundo Skopek)}$$

$$LL = 1,3 L_c - 4,8 \text{ (segundo Feda)}$$

$$LL = 1,5 L_c - 6,4 \text{ (segundo Piaskowski)}$$

Na Índia, Uppal et al (13), após sucessivos estudos, encontraram que utilizando um cone com um peso igual a 148g e um ângulo de  $31^\circ$  o limite de liquidez correspondia a uma penetração de 25mm. Para 40 solos cobrindo uma faixa de limite de liquidez de 20 a 85% eles mostraram uma boa relação entre o limite de liquidez de Casagrande e o do cone indicado, exceto para valores abaixo de 25%, para os quais o penetrômetro dá resultados mais altos.

Nos EUA, Sowers et al (24), do Georgia Institute of Technology, introduziram em 1959 o método do cone de penetração; o cone tem um peso de 75g e um ângulo de  $30^\circ$ . O limite de liquidez é o teor de umidade que corresponde a uma penetração de 10mm; para solos com limite de liquidez acima de 40% o cone dá valores muito baixos, enquanto que para valo

res abaixo de 40% os resultados são, ao contrário, muito altos. Para converter os valores do limite de liquidez do cone nos valores do limite de liquidez de Casagrande é usado um no mograma de calibração.

Na França, o Laboratoire Central de Ponts et Chaussées - LCPC desenvolveu um método (29) usando um cone com peso de 80g e ângulo de 30°. O cone foi montado num aparelho standard usado comumente para a determinação do valor de pentração de asfaltos. O procedimento do LCPC envolve a determinação de penetração do cone a vários teores de umidade; os resultados são plotados num sistema de coordenadas cartesianas, em escala logarítmica onde a abscissa representa os valores da percentagem de umidade do solo e a ordenada representa os valores de penetração conforme a razão:

$$Q/h^2$$

onde:

Q = peso do cone,

h = profundidade de penetração

Os resultados obtidos no LCPC mostram que estas relações são lineares e paralelas para diferentes solos. No entanto, a penetração no teor de umidade correspondente ao limite de liquidez não é constante; daí decorreu uma outra alternativa de procedimento, no qual o limite de liquidez de Casagrande é lido por meio de uma linha de calibração derivada da penetração (h) do cone em função do limite de liquidez de Casagrande. Esta linha é obtida marcando-se, para um certo numero de solos de limite de liquidez (Casagrande) conhecido, estes limites de liquidez em cada reta da função  $\log Q/h^2 = f(\log w)$ , onde W é o teor de umidade, e em seguida traçando-se a melhor reta com os pontos assim obtidos. O teor de umidade na intersecção desta linha de calibração com cada reta da função  $\log Q/h^2 = f(\log W)$  dá então o limite de liquidez (Casagrande) para um solo qualquer.

Paute e Macé (30), do Laboratoire Régional de Saint-Brieuc, França, também estudaram os limites de consistência com o uso do cone de penetração. Chegaram à conclu-



são de que a utilização do método do cone como conduzido pelos suecos (27) dá resultados compatíveis com os limites de Atterberg, principalmente o limite de liquidez.

Ainda na França, o LCPC efetuou novos estudos em 1971. Anon (29) e Leflaive (9) utilizaram o método do cone e recomendaram a adoção de um cone com peso de 80g e um ângulo de  $30^{\circ}$ . Eles indicaram que o teor de umidade correspondente a uma penetração de 17mm seria perfeitamente aceitável, com o limite de liquidez do solo.

No Brasil, Scherrer (31) utilizou um cone de  $90^{\circ}$  com um equipamento e método diferentes dos já citados. Seu método consistiu essencialmente em determinar a penetração do cone com uma carga de 1 kg em uma amostra úmida. Naturalmente a penetração é uma função assintótica à penetração de equilíbrio. Nesta penetração, a carga é dividida pela área entre o cone e a superfície da amostra e esta pressão de equilíbrio é plotada contra a umidade das amostras do mesmo solo numa escala semi-logarítmica. O resultado é uma reta. Os resultados, ao se correlacionar o limite de liquidez convencional contra a pressão de equilíbrio, expressos como uma função linear, quando superpostos na relação semi-logarítmica de pressão de equilíbrio versus umidade, permitem obter o limite de liquidez pelo cone estático. A crítica mais séria que se pode fazer a este trabalho é que não apresenta nenhum estudo estatístico para propósitos de avaliação.

Na Inglaterra foi feito um estudo com 26 solos por Sherwood e Ryley (4) do Road Research Laboratory, utilizando o equipamento e procedimentos seguidos pelo LCPC. Eles mostraram que a correlação entre o limite de liquidez obtido com a linha de calibração de LCPC e o limite de liquidez obtido com o aparelho de Casagrande foi muito pobre. No entanto, uma linha de calibração aparentemente obtida por tentativa mostrou uma correlação satisfatória. Eles ainda pesquisaram as possíveis causas de erros no uso do cone e indicaram que essas seriam:

- a) o tempo durante o qual o cone é deixado penetrar no solo,

- b) o desgaste da ponta do cone,
- c) a textura da superfície do cone,
- d) o efeito do operador.

Eles conduziram depois um limitado estudo de repetibilidade utilizando um solo com o qual o ensaio foi repetido oito vezes. O desvio-padrão obtido foi de 0,7, enquanto para o mesmo solo o desvio-padrão com o aparelho de Casagrande foi de 1,0. Em termos de reprodutibilidade ensaiaram três solos, utilizando oito operadores, embora no mesmo laboratório, e chegaram a melhores resultados com o cone. Segundo estes autores, há uma grande tendência na substituição da determinação do limite de liquidez com o aparelho de Casagrande pelo uso do cone de penetração.

Pinto et al (10) fizeram um pequeno estudo em cinco solos no Laboratório Central do DNER, seguindo os procedimentos de Sherwood e Ryley (4). Utilizando a mesma linha de calibração encontrada por estes, chegaram a resultados satisfatórios, principalmente com relação à argila orgânica; o ensaio desta, quando executado com o aparelho de Casagrande, torna-se demorado e algumas vezes difícil.

### CAPÍTULO 3

#### OBJETIVO DA PESQUISA

Os métodos de classificação de solos, para seu uso como material estrutural na engenharia civil, especialmente em engenharia rodoviária e de fundações, estão baseados em ensaios empíricos de laboratório. A fidelidade dos resultados destes ensaios é de grande importância para este propósito de classificação.

O objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade de quatro ensaios utilizados para fins de classificação de solos. O estudo abrangeu os aspectos de repetibilidade e reprodutibilidade dos ensaios de Plasticidade, Análise Granulométrica e Densidade Real.

O estudo de repetibilidade foi conduzido em um laboratório com um só operador e o mesmo equipamento. Por outro lado, para o estudo de reprodutibilidade contou-se com a cooperação de 16 laboratórios dos quais 3 foram de Universidades, 8 de Organizações Rodoviárias e 5 de Empresas Consultoras.

Os resultados são analisados por meio de técnicas simples de análise estatística e comparações são mostradas entre os resultados de repetibilidade e reprodutibilidade. Além do mais o trabalho incluiu uma revisão crítica das metodologias das normas utilizadas para execução dos ensaios.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS USADOS NA PESQUISA

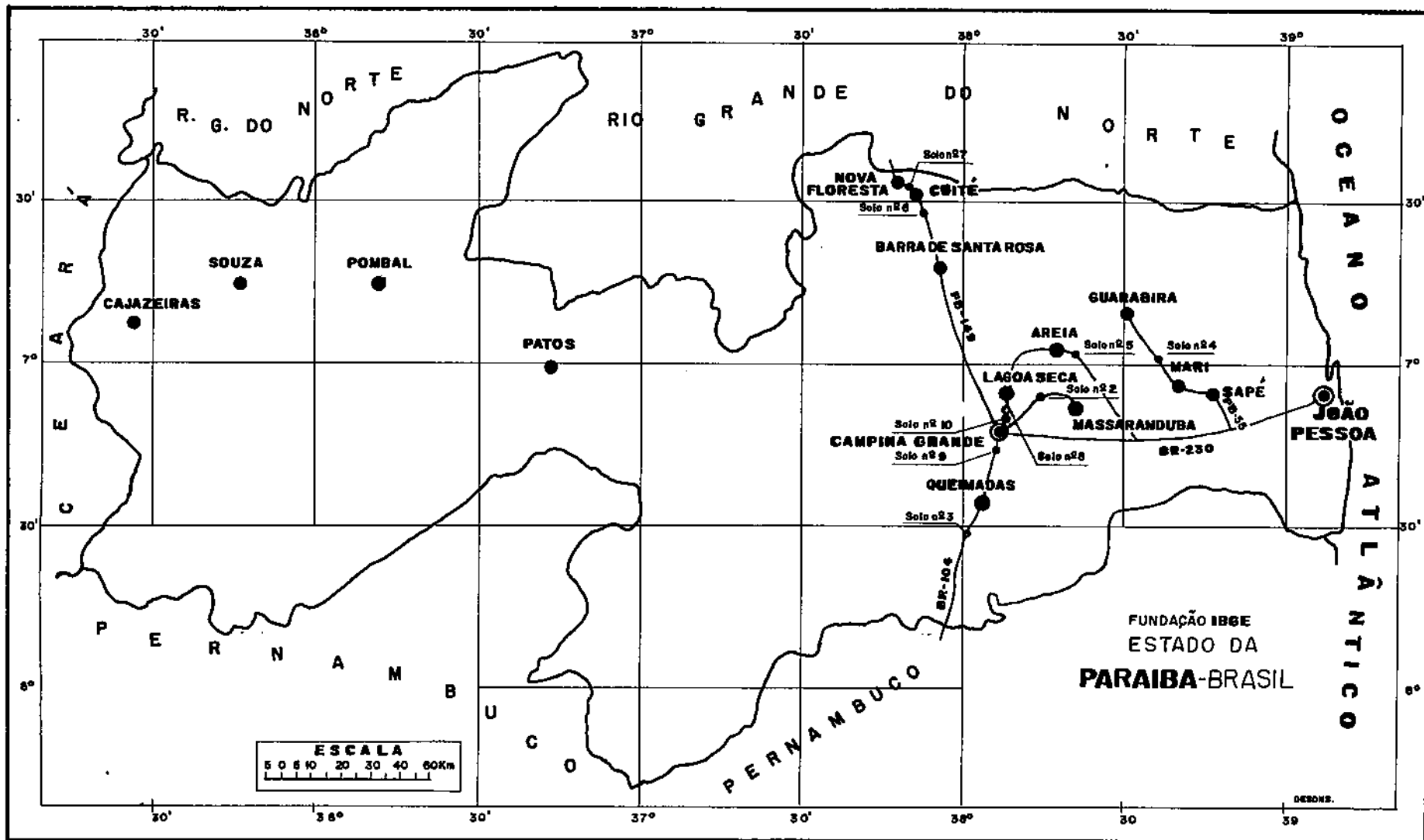
Para a escolha dos solos a serem utilizados nesta pesquisa, decidiu-se selecionar aqueles que permitiriam abranger uma ampla faixa de variação de plasticidade e cujos modos de formação foram reconhecidamente diferentes. Ao mesmo tempo tratou-se de incluir aqueles materiais que são utilizados nas obras de engenharia civil ou que tenham potencial de utilização.

Desta maneira selecionaram-se onze solos naturais e três solos beneficiados provenientes de usinas industriais os quais foram: um caulim (32), uma montmorilonita cálcica (33) e uma montmorilonita sódica (33). Ademais prepararam-se no laboratório duas misturas artificiais, uma misturando-se a amostra nº 1 com a amostra nº 16 na proporção de 80:20 respectivamente e a outra com as mesmas amostras na proporção de 60:40.

A posição geográfica desses solos, provenientes do Estado da Paraíba, é mostrada na Figura 4.1.

A origem, modo de formação e utilização atual ou potencial são dados na Tabela 4.1 que ao mesmo tempo indica o código numérico associado aos diferentes solos e usado para os propósitos de identificação durante este trabalho.

Figura 4.1 Mapa do Estado da Paraíba mostrando a posição geográfica dos solos utilizados na pesquisa.



Amostra Nº	Identificação e descrição expedita	Origem da Amostra e Localização da Jazida	Utilização (atual ou potencial)
1	Areia-argilo-sil-tosa	Solo transportado- Jazida Jara-raca, imediações de Campina Grande	Material conhecido como "Massame", usado em argamassa de alvenaria e solo-cimento para base de rodovia.
2	Areia-silto-argilosa	Solo transportado- Jazida Riacho Marinho, km 10 L.E. estrada Campina Grande-Massaranduba	Usado em concreto de cimento.
3	Areia-silto-argilosa	Solo residual- Jazida Maciel, km 7 BR-104, trecho Campina Grande-Queimadas.	Usado na construção da BR-104.
④	Argila-areno-sil-tosa	Solo laterítico de formação Barreiras- Jazida Sapê-Mari, LD. PB-55, trecho Mari-Guarabira.	Usado como revestimento primário na Rodovia PB-151; pode ser utilizada em base.
⑤	Argila-areno-sil-tosa	Solo laterítico- Jazida Areia Mata Limpa.	Usado como base na Rodovia BR-230.
⑥	Areia-argilo-sil-tosa	Solo laterítico- Jazida Cuitê, L.E. PB-149, trecho Barra de Santa Rosa-Cuitê.	Usado como revestimento primária Rodovia PB-149; pode ser utilizada em base.

Tabela 4.1 - continua

Amostra Nº	Identificação e descrição expedita	Origem da Amostra e Localização da Jazida	Utilização (atual ou potencial)
7	Argila-areno-sil_ tosa	Solo laterítico- Jazida Nova Floresta, LD. PB-151, trecho Cuitã-Nova Floresta.	Usado como revestimento primário na Rodovia PB-151; pode ser utilizado em base.
8	Areia-argilo-sil_ tosa c/mica	Solo residual- Jazida Lagoa Seca L.E. BR-104, trecho Campina Grande-Lagoa Seca.	Usado na construção da BR-104 e pavimentação ruas de Campina Grande.
9	Argila-arenosa (orgânica)	Solo residual- Jazida Aeroporto LD. BR-104, trecho Campina Grande-Queimadas.	Usado como cerâmica, em nível artesanal, na confecção de utensílios domésticos.
10	Argila-areno-sil_ tosa (orgânica)	Solo residual- Jazida Lagoa dos Patos, LE BR-104, trecho Campina Grande-Lagoa Seca.	Usado como cerâmica, em nível artesanal, na confecção de utensílios domésticos.
11	Argila-areno-sil_ tosa	Solo residual- Jazida G - Gióia, Av. Brasília, Campina Grande.	Usado industrialmente no ramo da Cerâmica.
12	Areia-argilo-sil_	Mistura artificial da amostra nº 1 com amostra nº 16 na proporção 80 : 20.	
13	Argila-arenosa	Mistura artificial da amostra nº 1 com amostra nº 16 na proporção 60 : 40.	

Tabela 4.1 - continua



Amostra Nº	Identificação e descrição expedita	Origem da Amostra e Localização da Jazida	Utilização (atual ou potencial)
14	Caulinita	Material industrializado- Indústria Caulisa, Distrito Industrial de Campina Grande.	Usado principalmente na indústria: cerâmica, papel, esmaltes, etc.
15	Montmorilonita	Material industrializado - Indústria Bentonit União Nordeste - BUN - Distrito Industrial de Campina Grande; conhecido como NT-25.	Usado como aglutinante para areia de fundição, na perfuração de poços, etc.
16	Montmorilonita Sódica	Material industrializado- Indústria Bentonit União Nordeste - BUN; conhecido como Brasgel.	Usado para purificação e clarificação de águas.

Tabela 4.1 - Código numérico, descrição, origem e possível aplicação dos solos usados na pesquisa.

## CAPÍTULO 5

### PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

#### 5.1 - Preparação de Amostras

As amostras de solos naturais foram coletadas das jazidas selecionadas tendo-se especial cuidado em obter amostras representativas em quantidade suficiente para a condução de todos os ensaios. Após transporte ao laboratório, em sacos de polietileno selados para evitar perda de fino, os solos foram secados ao ar.

O procedimento de preparação está mostrado no fluxograma da figura 5.1. As amostras dos solos N<sup>o</sup>s 1, 2, 3, 8, 9, 10 e 11 foram desagregadas manualmente, ao passo que para as amostras n<sup>o</sup>s 4, 5, 6 e 7, correspondentes a solos originados num processo de laterização e consistentes em agregações de uma dureza tal que não permitiam sua desagregação manual, usou-se uma britadora de mandíbula para reduzir seu tamanho máximo a 1,27 mm de diâmetro. Este procedimento é uma simulação do que ocorreria no campo quando estes solos fossem usados para a construção de camadas de um pavimento. A homogeneização dos solos foi feita em cada estágio de preparação. As amostras preparadas com tamanho máximo de 0,42mm foram então colocadas em sacos plásticos de polietileno e guardadas para os ensaios ou enviadas aos diferentes la

laboratórios participantes desta pesquisa.

É importante assinalar que o procedimento seguido permitiu eliminar de certo modo, as variações que ocorrem nos resultados e que são atribuídas a variações estatísticas do próprio material. Isto é, para objeto desta pesquisa as variações de repetibilidade e reprodutibilidade serão atribuídas inteiramente à metodologia dos ensaios.

Como foi dito no Capítulo anterior três amostras dos solos testados foram obtidas já preparadas e homogeneizadas para uso industrial, sendo portanto simplesmente homogeneizadas e armazenadas em sacos de polietileno para sua distribuição ou armazenamento. As amostras artificiais N<sup>o</sup>s 12 e 13 foram preparadas no laboratório numa misturadora de eixo vertical com um tempo de mistura suficiente para obter homogeneidade.

## 5.2 - Métodos de Ensaio

Como foi indicado anteriormente, todas as amostras foram preparadas para conseguir um diâmetro máximo de 0,42mm de tal modo que estas não requeririam preparação adicional antes da execução dos quatro ensaios objeto deste estudo.

### 5.2.1 - Métodos de ensaio nos laboratórios participantes

Durante o estágio de planejamento desta pesquisa enviaram-se cartas propondo-a a trinta laboratórios brasileiros. A carta de contato inicial, mostrada no Apêndice A, aproximadamente vinte laboratórios responderam positivamente. As amostras preparadas como descrito antes, foram então enviadas aos vinte laboratórios com uma carta onde se indicavam os métodos preferenciais para a pesquisa e também as possibilidades de uso de métodos alternativos. Esta carta é apresentada no Apêndice B.

Os laboratórios dos quais receberam-se finalmente os resultados foram 15, o que mostra o grande interesse despertado pela pesquisa. Os métodos utilizados por cada laboratório para os diferentes ensaios são mostrados na Tabela 5.1, onde se

pode ver que a totalidade seguiu as recomendações de utilização dos métodos recomendados pelas ABNT (34) e DNER (35).

#### 5.2.2 - Métodos de ensaio no laboratório do CCT

Os ensaios realizados pelo autor desta Tese no laboratório do CCT, foram utilizados para o estudo de repetibilidade. O operador pode ser qualificado como de pouca experiência para estes ensaios. Os métodos empregados foram os seguintes:

- a) Limite de Liquidez utilizando a norma ABNT-MB-30 (34)
- b) Limite de Plasticidade utilizando a norma ABNT-MB-31 (34)
- c) Análise Granulométrica utilizando a norma ABNT-MB-32 (34)
- d) Densidade Real utilizando a norma DNER-DPT M 93-64 (35)

A repetibilidade e reprodutibilidade de ensaios de laboratório são influenciadas enormemente não só pelo fator pessoal do operador mas pela uniformidade dos procedimentos. Esta uniformidade é função da clareza de descrição dos métodos de ensaio e aparelhagem para eles. Por isso na continuação fazem-se comentários relevantes a este aspecto, referidos particularmente aos ensaios executados pelo autor.

##### 5.2.2.1 - Ensaio de Limite de Liquidez.

As normas ABNT-MB-30 (34) e DNER-ME-71 (36) são praticamente as mesmas porém as observações feitas em seguida aplicam-se a ambas. Quatro aspectos parecem de maior importância:

- a) o volume de solo a colocar-se na concha do aparelho de Casagrande que é determinado pelo plano que forma a superfície do solo a ser cancelado. Dependendo da incli-

nação deste plano, é claro que o volume do solo na concha será maior ou menor que a quele obtido quando a superfície do solo a canelar é paralela ao plano da base do aparelho de Casagrande. As normas indicadas não fazem nenhuma referência a este aspecto. No entanto, sobre ele, outras nor mas como as da ASTM (norma D-423-66-1972) (37) dos EEUU e as BS 1377-67 (38) da Inglaterra, dão instruções claras. Todavia a norma antiga DNER-DPT M 44-64, ainda utilizada em muitos laboratórios brasileiros, apresenta gráficos nos quais o plano da superfície do solo a ser canelado forma um ângulo com o plano da base do aparelho (inclinação do plano da superfície do solo em direção ao fundo da concha) que dá um volume menor que aquele obtido com a superfície formando um plano paralelo à base do aparelho.

- b) O tipo de cinzel a utilizar: as normas da ABNT são indicam seleção do mais adaptável ao solo em questão. As normas do DNER(36) são indicam uso de um cinzel, o curvo desenvolvido pela ASTM, que ainda hoje é o único recomendado em suas normas. No entanto a BS (38), da Inglaterra, recomenda o uso do cinzel chato (o original desenvolvido por Casagrande (16, 17)), recomendando ainda o uso do cinzel curvo para solos de baixa plasticidade, quando houver dificuldade na execução da canelura. É claro que a perfeição da canelura afetará notavelmente os valores do limite de liquidez; por isso as dúvidas que decorrem da falta de clareza das normas deveriam ser desfe

tas com base na experiência obtida de tipo de trabalho como o apresentado neste estudo.

- c) A norma ABNT-MB 30 não considera como uma alternativa o ensaio de limite de liquidez com um ponto. Isto parece uma omissão importante desde que existem trabalhos de pesquisa para os solos brasileiros que mostram a possibilidade do uso deste ensaio (39,40). Durante os trabalhos de laboratório este ensaio não foi realizado pelo autor deste estudo.
- d) Algumas especificações, como a BS-1377(38), referem-se ao tempo de homogeneização do solo-água antes do ensaio e, ainda, à necessidade de obter equilíbrio de distribuição da água no solo, especialmente nos solos argilosos. Este equilíbrio é obtido fixando-se um tempo de, por exemplo, 24 horas desde a homogeneização até o ensaio ("aging"). Os resultados de solos argilosos são desta maneira menos variáveis.

Durante os ensaios de laboratório realizados pelo autor, decidiu-se que o volume de solo na concha seria controlado de forma que o plano de sua superfície ficasse paralelo ao plano da base do aparelho. Com referência ao uso de um outro tipo de cinzel, a experiência durante a investigação mostrou que o cinzel curvo pode ser utilizado com qualquer tipo de material, embora para os materiais arenosos seja necessário fazer a canelura com passadas sucessivas do cinzel tendo-se o cuidado de justapô-lo às paredes da canelura para evitar variações de largura desta. Este procedimento é o mesmo que foi recomendado por Melo et al (41). O uso do cinzel chato mostrou que este só é aplicável aos materiais argilosos, em contradição com as recomendações do método antigo do DNER (DPT M 44-64) que, como foi dito, ainda é utilizado em muitos laboratórios.

Um dos problemas associados com o uso do cinzel curvo é que, de acordo com Casagrande (17), não se pode controlar a altura do corte com a necessária precisão. Este aspecto não tem validade quando se controla o volume do solo na concha pela posição do plano de sua superfície.

A Figura 5.2a mostra os resultados de se pretender fazer a canelura com o cinzel chato num solo arenoso; no entanto as Figuras 5.2b e 5.2c mostram as caneluras obtidas no mesmo solo, primeiro com uma passada do cinzel curvo e segundo, com cinco passadas do mesmo cinzel. A eficiência do cinzel chato com solos argilosos é mostrada nas Figuras 5.3a, 5.3b e 5.3c onde se pode ver a sequência completa de um ensaio.

#### 5.2.2.2 - Ensaio de limite de plasticidade

A experiência do operador é a variável mais importante neste ensaio. Por isso algumas normas, como a do DNER por exemplo, tratam de descrever o ensaio com detalhes necessários; ao contrário, a norma da ABNT descreve o procedimento com muita simplicidade e em geral segue o padrão da ASTM norma D-424-59 (1971). Os comentários que parecem de interesse com respeito a estas normas são:

- a) As normas ABNT e DNER não referem que o ensaio possa ou deva ser executado com parte do solo utilizado para o ensaio de limite de liquidez como fazem as normas da ASTM e BS. Isto é muito importante porque o uso do mesmo material elimina a possibilidade de se introduzir outra variável na repetibilidade ou reprodutibilidade do ensaio, qual seja a possibilidade de lidar com amostras de características diferentes.
- b) Como no caso do limite de liquidez ambas

as normas não mencionam tempos de homogeneização, ou tempos de "cura", para obter equilíbrio da distribuição de água na amostra.

- c) A norma da ABNT não faz referência ao cálculo do Índice de plasticidade. Isto é importante, uma vez que o solo pode ser ou não plástico ou ter plasticidade igual a 0 (zero).

Durante o processo de ensaio no laboratório adotou-se o procedimento de utilizar em todos os casos uma parte do material úmido do ensaio de limite de liquidez para fazer o ensaio de limite de plasticidade. Por outra parte, para os solos argilosos com alto limite de plasticidade - amostras nºs 13, 14, 15 e 16 - controlou-se o tempo de mistura (homogeneização) estabelecendo-o em 15 minutos; além do mais a repetibilidade foi melhorada deixando-se os solos homogeneizados em cura por 24 horas, para obter condições de uniformidade de distribuição de água no solo.

Um aspecto de muita importância observado durante os ensaios é que para algumas das amostras não ocorre a fratura clássica dos solos muito argilosos, isto é, fratura em planos perpendiculares ao eixo do cilindro e sim fratura em planos paralelos ao citado eixo. As figuras 5.4a e 5.4b mostram a clássica fratura para solos argilosos e uma fratura com planos cilíndricos paralelos ao eixo do cilindro. Essas figuras correspondem às amostras nºs 10 e 14.

Outra observação importante durante os ensaios foi que, com aqueles solos com limite de plasticidade muito perto do limite de liquidez ou limite de plasticidade muito baixo, a pressão da mão do operador tem uma influência muito grande. Operadores não experientes tendem a descrever estes solos como não plásticos devido à dificuldade de formar os cilindros em qualquer umidade. A amostra nº 6 foi um caso típico desta situação.



### 5.2.2.3 - Ensaio de granulometria

O ensaio granulométrico está baseado na aceitação de que as partículas maiores que 75 microns são corretamente representadas pelo diâmetro da peneira na qual são retidas e de que o diâmetro das partículas menores que 75 microns é corretamente determinado pela velocidade terminal destas num fluido, velocidade que é estabelecida pela lei de Stokes.

Os métodos das normas da ABNT e DNER são similares, embora neste último não haja orientação para se construir as curvas de correção e calibração dos densímetros. Lambe por exemplo (42) indica que uma correção de imersão deve ser aplicada para as três primeiras leituras quando o densímetro permanece na suspensão. As normas do LCPC (43) utilizam a correção indicada por Lambe.

Os procedimentos das normas ABNT e DNER permitem várias alternativas com referência ao uso de equipamento; por isso a seguir se enumeram as adotadas para os ensaios neste trabalho:

- a) A variação de temperatura no laboratório foi muito pequena ( $\pm 2^{\circ}$  C), permitindo eliminar o uso de banho de temperatura constante.
- b) A concentração de solo na suspensão foi variada como segue: para solos arenosos 100g, para os solos argilosos 70g com exceção da amostra nº 14 onde o peso foi de 50g, amostra nº 15 com 40g e amostra nº 16 com 40g.
- c) O defloculante usado foi hexametáfosfato de sódio tamponado com carbonato de sódio.
- d) O volume da parte imersa do densímetro foi obtido imergindo-o em uma proveta graduada e verificando-se o acréscimo de volume de água.

As dificuldades observadas durante a execução dos ensaios que parecem mais importantes por sua influência nos resultados foram as seguintes:

- a) Durante o processo de homogeneização e defloculação mecânica usando um agitador de alta velocidade, os materiais arenosos formaram muita espuma e esta aparecia outra vez durante a agitação na proveta de ensaio. As figuras 5.5a e 5.5b mostram este fenômeno claramente. A consequência da formação de espuma foi que as primeiras leituras do densímetro não podiam ser tomadas com precisão.
- b) Como se indicou na lista de alternativas usadas para o ensaio, as concentrações de solo na suspensão foram variadas para as amostras nºs 14, 15 e 16. No caso da amostra nº 14 uma concentração de 70 g por litro dava como resultado leituras do densímetro muito altas, isto é, o nível do densímetro ficava fora da escala. O maior problema encontrado com as amostras nºs 15 e 16 foi a impossibilidade de se obter uma suspensão uniforme com 70g; além do mais, as características tixotrópicas destes solos traduziam-se num endurecimento da suspensão após poucos minutos da iniciação do ensaio.

Parece de interesse sugerir que os procedimentos das normas usadas deveriam indicar estes fenômenos e proporcionar modos de solucionar estas dificuldades.

Durante os ensaios de granulometria usaram-se quatro densímetros calibrados; estes ensaios foram então executados em grupos de quatro solos ao mesmo tempo. A figura 5.5c mostra os solos nºs 1, 3, 8 e 16 após 25 horas de sedimentação.

#### 5.2.2.4 - Ensaio de densidade real.

O aspecto mais importante para a determinação da densidade real de um material é a eliminação do ar aderente ao solo. Dois são os procedimentos mais comuns para eliminar o ar: uso da bomba de vácuo e incremento de temperatura da amostra no picnômetro usando "banho maria". As normas do DNER e ABNT diferem neste aspecto: o DNER recomenda o uso de "banho maria", enquanto a ABNT recomenda o uso da bomba de vácuo. Outra diferença de importância radical é no tamanho do picnômetro usado. A ABNT indica um picnômetro de 500 ml, no entanto o DNER recomenda um picnômetro de 50 ml. É claro que quanto maior for o volume de solo a ser usado maior será a precisão do ensaio.

O procedimento da ABNT recomenda o uso de um agitador para homogeneizar a amostra antes de ser colocada no picnômetro, no entanto o DNER indica colocação do solo seco diretamente no picnômetro e assume homogeneização por agitação manual deste. O uso de homogeneizador mecânico só é possível devido ao grande volume do picnômetro recomendado pela ABNT.

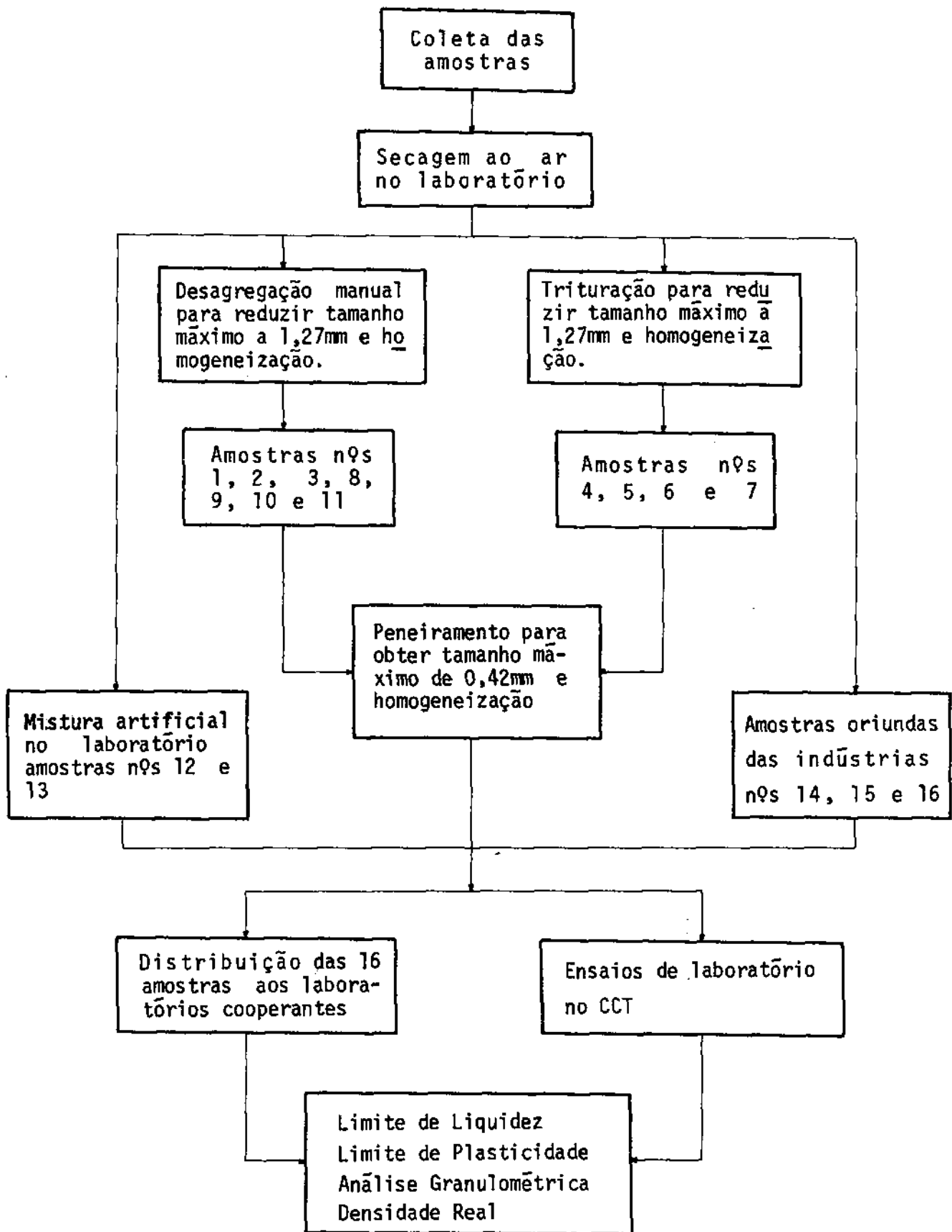
Como foi dito anteriormente, durante os trabalhos de laboratório adotou-se o ensaio recomendado pelas normas do DNER com algumas variantes que são descritas a seguir:

- a) Todas as amostras com exceção das amostras nºs 1, 2 e 3 foram secadas em estufa a 60°C. Foram feitas correções por diferença de umidade entre 60°C e 110°C. O motivo de testar as amostras sem secagem a 110°C é que várias delas são de origem laterítica que, como se sabe, são influenciadas por exposição a temperatura maior que 100°C por longo tempo. O mesmo pode-se dizer das amostras que, se presume, contenham matéria orgânica.

- b) A determinação da densidade real da amostra nº 16 foi impossível com o picnômetro de 50ml e até com um picnômetro de 100ml não se conseguiu molhar (homogeneizar) a amostra, mesmo reduzindo-a a 3g, como se pode ver na Figura 5.6a. Por isso decidiu-se substituir água por álcool (líquido não polar) e utilizar uma bomba de vácuo para a eliminação do ar. Este procedimento resultou satisfatório. A figura 5.6 b mostra a etapa inicial (direita) e final (esquerda) da homogeneização da amostra nº 16 com álcool.
- c) Um outro problema que é originado no pequeno volume do picnômetro recomendado pelo DNER, é que solos argilosos expansivos tendem a escapar do picnômetro durante a operação de eliminação de ar; este efeito pode ser eliminado utilizando-se álcool ou querosene em lugar de água. As amostras nºs 12 e 13 foram ensaiadas ainda com álcool não obstante o procedimento com água tenha sido possível quando o tempo de homogeneização e eliminação de ar foi incrementado até uma hora.

Parece então necessário indicar que as normas deveriam dar orientação sobre os aspectos descritos. Por exemplo as normas BS recomendam uso de líquidos não polares para evitar os problemas descritos.

Figura 5.1 Fluxograma da preparação das amostras para realização dos ensaios.



CÓD. DO LABORA TÓRIO Nº	NORMAS UTILIZADAS PARA OS ENSAIOS E SUAS VARIANTES MAIS IMPORTANTES												
	Limite de Liquidez			Limite de Plasticidade			Análise Granulométrica			Densidade Real			
	Norma	Equip.	Operador	Norma	Mat. reti rado do L.L.	Operador	Norma	tanque p/temp const.	Deflocu lante	Norma	secagem em estufa	desse- cador	Bomba de vãcuo
1	DNER <sup>a</sup>	Amer.bom	c/exper.	DNER <sup>b</sup>	sim	c/exper.	DNER <sup>c</sup>	não	sil.de sódio	DNER <sup>d</sup>	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> C	sim	não
2	ABNT <sup>e</sup>	Nac.bom	veterano	ABNT <sup>f</sup>	sim	veterano	ABNT <sup>g</sup>	não	hexam.	ABNT <sup>h</sup>	-	-	sim
4	ABNT	Nac.bom	c/exper.	ABNT	sim	c/exper.	ABNT	-	hexam.	ABNT	-	-	não
6	DNER	Nacional	-	DNER	sim	-	DNER	não	meta-si- lic.sódio	DNER	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> C	não	não
7	DNER	Nac.bom	pouca exper.	DNER	sim	pouca exper.	DNER	não	hexam.	DNER	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> C	não	não
9	DNER	Nacional	veterano	DNER	sim	veterano	DNER	não	hexam.	DNER	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> C	não	não
10	DNER	-	-	DNER	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	DNER	Nacional	veterano	DNER	sim	veterano	DNER	sim	hexam.*	DNER	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> C	sim	não
12	ABNT	Nac.bom	veterano	ABNT	sim	veterano	ABNT	sim	hexam.	ABNT	-	-	sim
14	ABNT	-	-	ABNT	sim	-	ABNT	-	-	ABNT	-	-	-
15	DNER	Nacional	c/exper.	DNER	-	c/exper.	-	-	-	-	-	-	-
16	DNER	-	-	DNER	-	-	DNER	-	trifosf./ sódio	DNER	-	-	-
17	DNER	Nacional	pouca exper.	DNER	sim	pouca exper.	-	-	-	DNER	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> C	sim	-

Tabela 5.1 - Continua

CÓD. DO LABORATÓRIO	NORMAS UTILIZADAS PARA OS ENSAIOS E SUAS VARIANTES MAIS IMPORTANTES												
	Limite de Liquidez			Limite de Plasticidade			Análise Granulométrica			Densidade Real			
	Nº	Norma	Equip. Operador	Norma	Mat. retirado do L.L.	Operador	Norma	tanque p/temp const.	Defloculante	Norma	Secagem em estufa	dessecador	Bomba de vácuo
18	DNER	Americ.	-	ABNT	não	-	DNER	sim	hexam.	DNER	-		
19	DNER	Nac.bom	veterano	DNER	não	veterano	DNER	não	hexam.	DNER	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> C	não	não
20	ABNT	Nac.bom	pouca exper.	ABNT	sim	pouca exper.	ABNT	não	hexam.	DNER	105 <sup>o</sup> -110 <sup>o</sup> e 60 <sup>o</sup> C	sim	não

Tabela 5.1 - Métodos de ensaios e variantes mais importantes utilizados pelos laboratórios participantes.

- |                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| a) DNER DPT - M - 44 - 64 | e) ABNT MB - 30 |
| b) DNER DPT - M - 82 - 63 | f) ABNT MB - 31 |
| c) DNER DPT - M - 51 - 64 | g) ABNT MB - 32 |
| d) DNER DPT - M - 93 - 64 | h) ABNT MB - 28 |

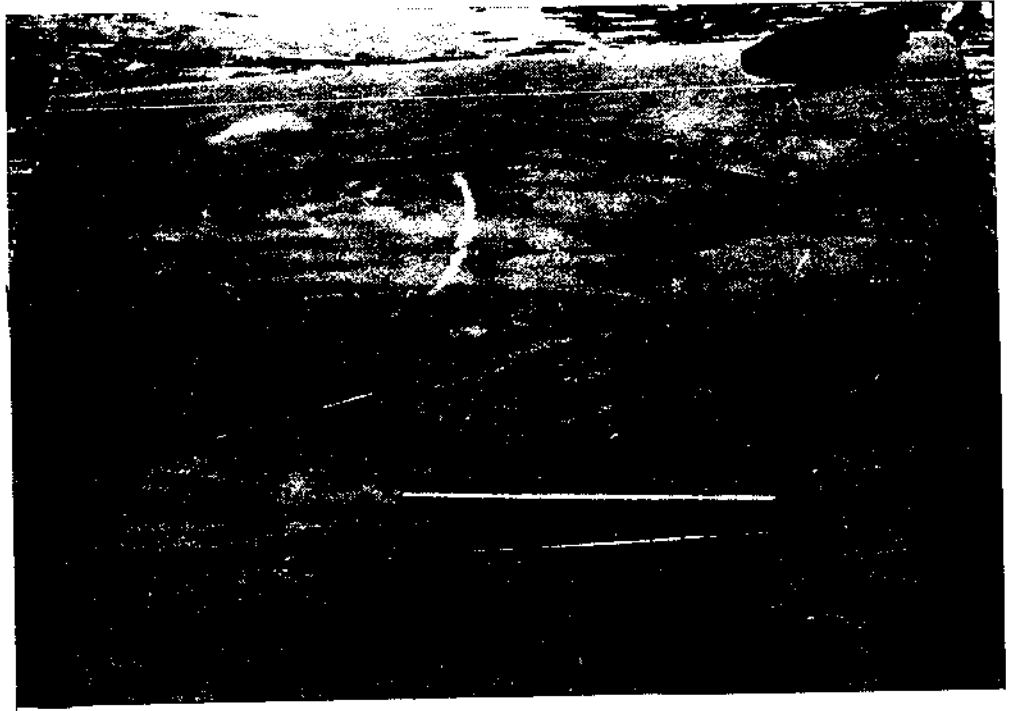
(\*) Para as amostras nºs 13, 14, 15 e 16 foi usado fosfato trisódico.



Figura 5.2a Aparelho de Casagrande, mostrando a canelura feita com o cinzel chato num solo arenoso.

Figura 5.2b Canelura obtida com uma passada do cinzel curvo, no mesmo solo.

Figura 5.2c Canelura obtida com cinco passadas do cinzel curvo, ainda no mesmo solo.



Figuras 5.3a, 5.3b e 5.3c Sequência completa do ensaio de limite de liquidez, mostrando o solo na concha: antes da passagem do cinzel curvo, após a passagem e, por fim, com as bordas inferiores da canelura unidas.

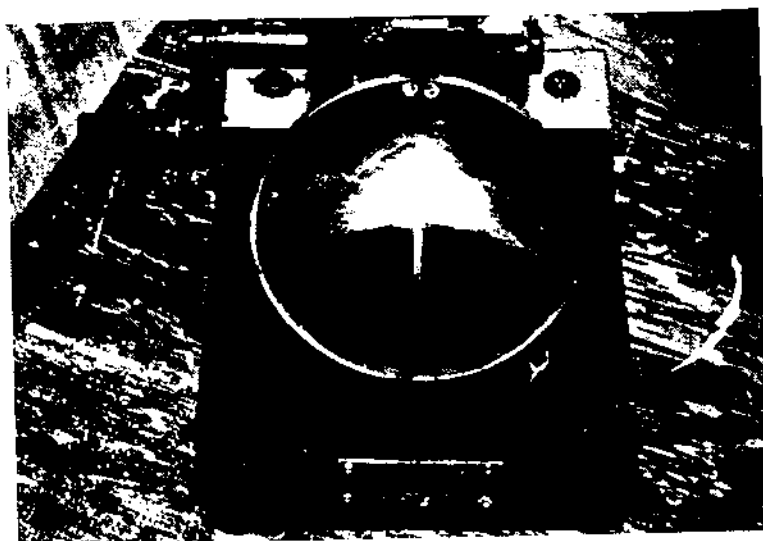
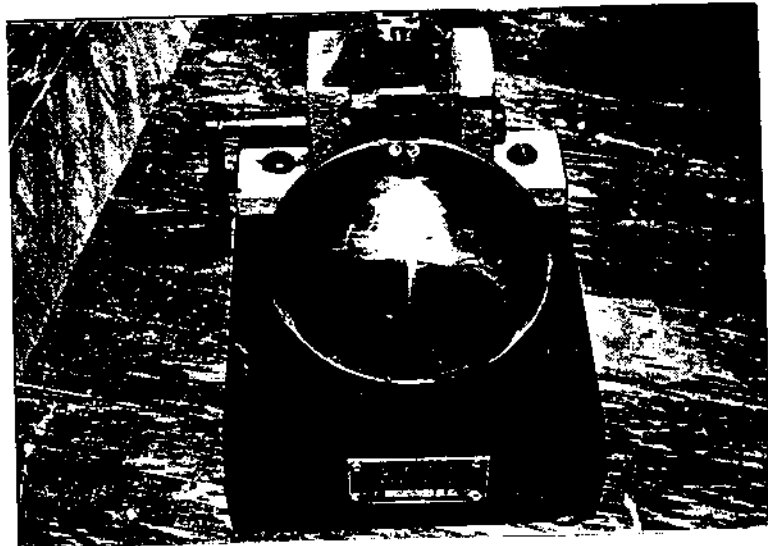
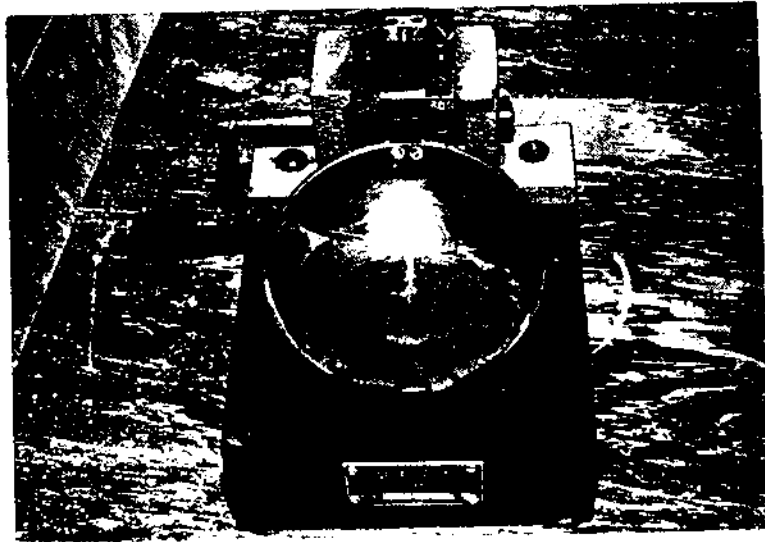


Figura 5.4a Ensaio de Limite de Plasticidade - efetuado com o solo nº 10 - mostrando a fratura clássica que ocorre em solos argilosos, fratura em planos perpendiculares ao eixo do cilindro.

Figura 5.4b Ensaio efetuado com o solo nº 14, mostrando fraturas com planos cilíndricos paralelos ao eixo do cilindro.

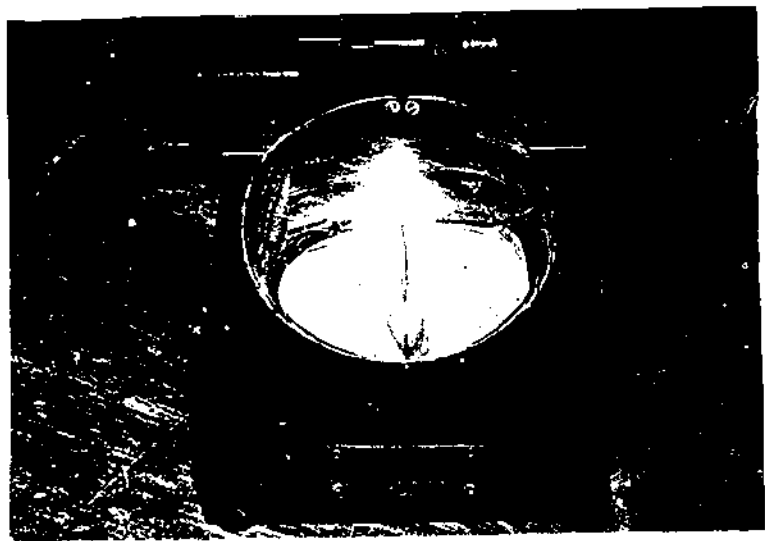
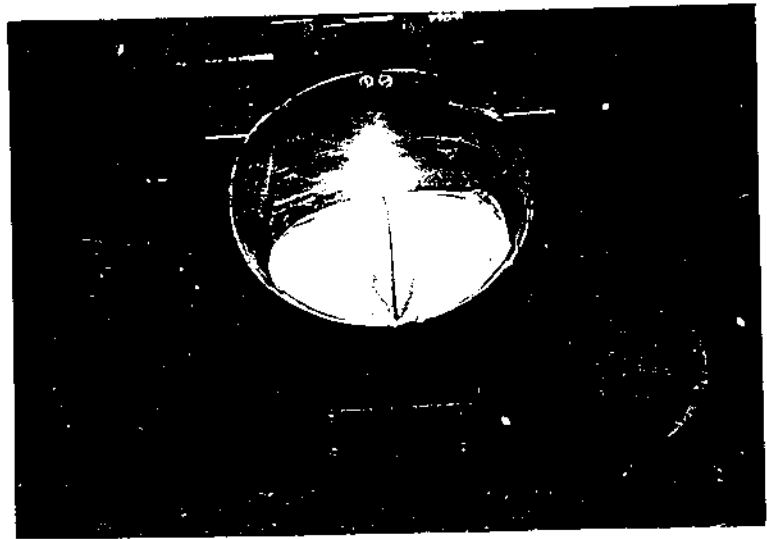
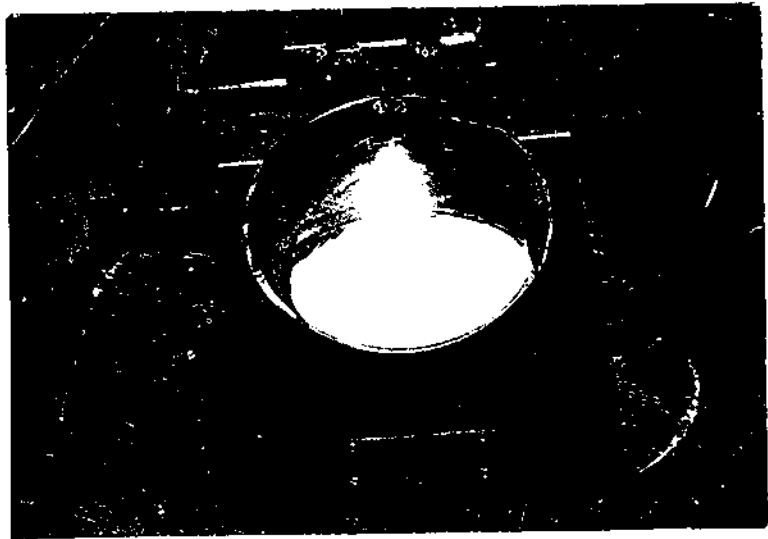


Figura 5.5a Formação de espuma - solo nº 1 - durante a deflocu-  
lação mecânica do ensaio de granulometria, em so-  
los arenosos.

Figura 5.5b Espuma formada após agitação em proveta, no mesmo  
solo.

Figura 5.5c Solos nºs 1, 3, 8 e 16 após 25 horas de sedimenta-  
ção.

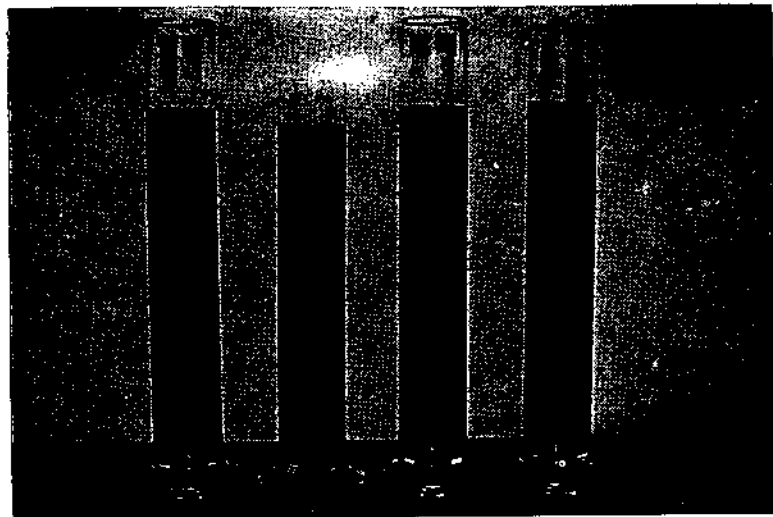
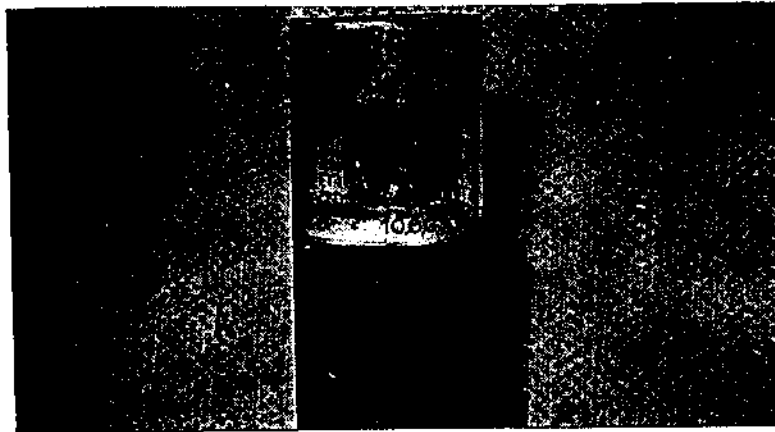
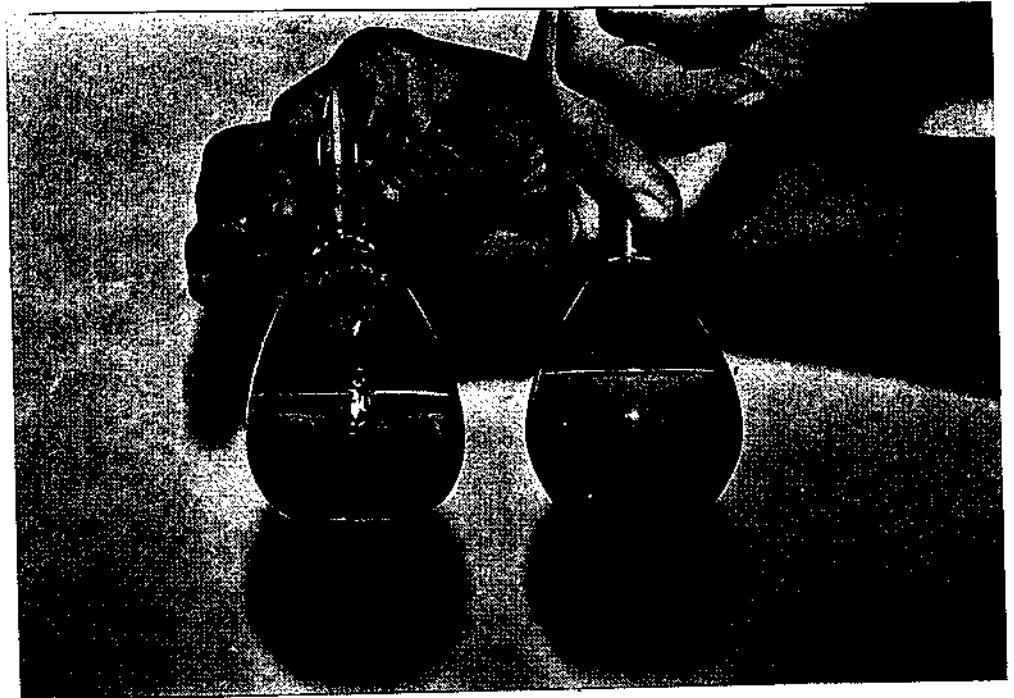
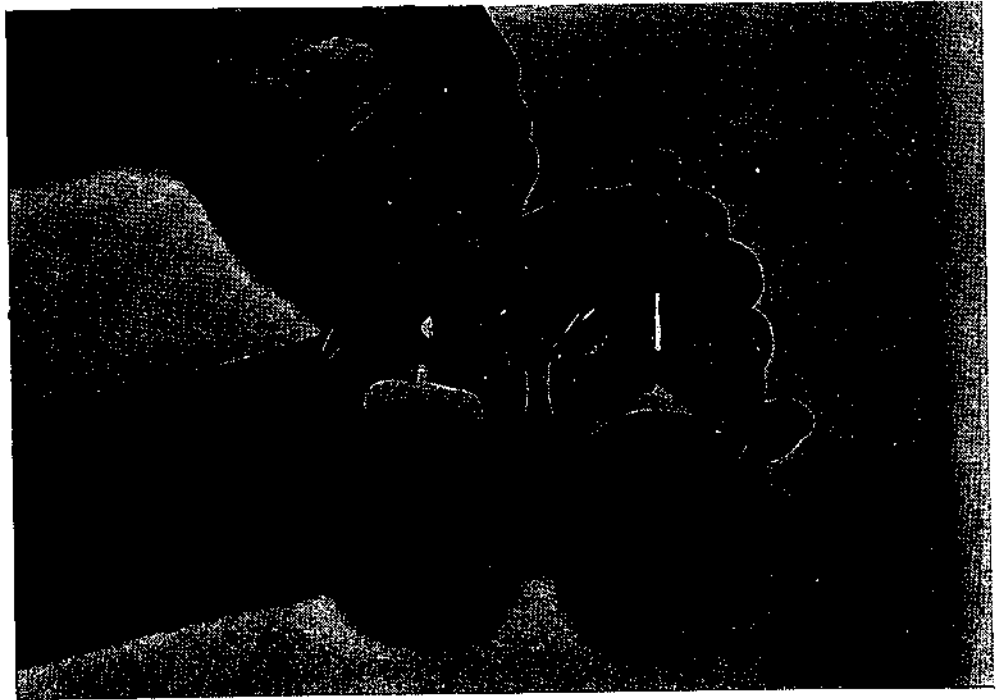




Figura 5.6a Fotografia mostrando a impossibilidade de se molhar (homogeneizar) a amostra nº 16 com água, mesmo se usando 3g em um picnômetro de 100ml.

Figura 5.6b Etapa inicial (direita) e final (esquerda) da homogeneização da mesma amostra com álcool.



## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DA REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

#### 6.1 - Introdução

Para os propósitos desta dissertação, "repetibilidade" é definida como o intervalo dentro do qual se pode repetir as medidas feitas num ensaio pelo mesmo operador no mesmo aparelho. Esta é a definição comumente usada nos países europeus (1, 2) e adotada aqui por parecer a mais conveniente.

Os ensaios destinados à verificação de repetibilidade, foram executados pelo autor desta pesquisa que pode qualificar-se como um operador de pouca experiência, protótipo dos operadores trabalhando em laboratórios de Mecânica dos Solos no Brasil.

Os ensaios de Plasticidade, Distribuição Granulométrica e Densidade Real foram repetidos em número variável de vezes e analisados por meio de técnicas estatísticas comuns. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos a seguir.

#### 6.2 - Ensaio de Limite de Liquidez

Os resultados de repetibilidade do limite de

liquidez são mostrados na Tabela 6.1. Foram obtidos pelo método normal de traçar, por tentativa, a melhor linha unindo os pontos das relações umidade versus logaritmo do número de golpes e lendo a interseção com 25 golpes. Como se pode ver nesta Tabela, os coeficientes de variação para todos os solos - exce- tuando-se os de nºs 8, 12, 13 e 16 - foram da mesma ordem dos referidos por outros investigadores para o mesmo ensaio (2, 8). No entanto, os elevados coeficientes de variação dos solos cita- dos e portanto a pobre repetibilidade obtida nos seus ensaios, parecem originar-se no fato de que três deles, nºs 12, 13 e 16, contêm montmorilonita como argilomineral. É sabido que a montmo- rilonita exibe propriedades de tixotropia e reopexia ("rheopexy") muito marcantes, isto é: a propriedade de incrementar sua resis- tência com o tempo de repouso do material ou com o incremento de cisalhamento dinâmico contínuo. O método utilizado não pres- creve um tempo padrão nem para homogeneização nem para o inter- valo entre homogeneização e ensaio na concha de Casagrande. Po- de ser que esta variável tempo tenha influenciado os resultados de repetibilidade. Com referência ao solo nº 8 parece ao autor que a origem da fraca repetibilidade poderia ser explicada no fato de que este solo, ao contrário dos solos 12, 13 e 16, não foi submetido a tempo de "cura" para obter equilíbrio de distri- buição de umidade. Foi observado que este solo era composto de uma fração fina com aparência de material micáceo que, se pensa, requereria certo tempo para chegar ao equilíbrio de distribu- ição de umidade. Julga-se necessário mencionar que o método bra- sileiro utilizado não prescreve nem recomenda um tempo de "cura" que como mostram os resultados é importante para a repetibili- de, especialmente quando se trata da determinação do limite de liquidez de materiais que contêm montmorilonita ou illita.

Uma das possibilidades de introdução de er- ros neste ensaio poderia ser o método de tentativa usado para obter o valor do limite de liquidez. Com o objetivo de se veri- ficar isto, os resultados de limite de liquidez para cada ensaio, foram obtidos pela utilização da técnica simples de regressão linear e ao mesmo tempo foram usados todos os valores de todos os ensaios de cada solo, obtendo-se, com a mesma técnica, uma só reta que,

em sua interseção com o logarítmo de 25 golpes, deu o limite de liquidez. O resumo destes resultados é mostrado na Tabela 6.2. Como se pode ver, não existe diferença apreciável entre os resultados obtidos com os três métodos usados. Daí pode-se concluir que o método de tentativa é tão bom quanto os outros e que portanto esta não é uma variável que influencie a repetibilidade.

À parte dos aspectos assinalados com referência à metodologia do ensaio, como indicada na norma padrão, não se deve desprezar o fato do operador ter sido pouco experiente e que então o fator pessoal ainda influenciou os resultados.

No capítulo 7 apresentar-se-á um estudo alternativo de ensaio para o limite de liquidez utilizando-se o Cone de Penetração e discutir-se-ão suas vantagens à luz dos resultados apresentados neste subcapítulo.

### 6.3 - Ensaio de Limite de Plasticidade

Os resultados de limite de plasticidade para todos os solos são mostrados na Tabela 6.3. Os valores da média, apontados na Tabela, foram obtidos de acordo com as indicações da norma usada. Como se pode observar, os coeficientes de variação são muito altos em relação a valores reportados por outros pesquisadores (2, 3, 6, 7, 9).

Neste ensaio a variável pessoal do operador tem uma influência predominante na repetibilidade e os coeficientes de variação parecem ser reflexo da pouca experiência deste. Não se deve descontar ainda a influência benéfica que acarretaria um tempo de "cura" para obter equilíbrio de distribuição de umidade nas amostras ensaiadas.

Como aconteceu com o limite de liquidez, pareceu necessário ao autor verificar o procedimento padrão que determina a eliminação de todos os valores afastados da média  $\pm 5\%$ ; a verificação foi feita utilizando-se o critério estatís-

tico conhecido como detecção de "out-liers". É possível que os valores fora da média  $\pm 5\%$  possam ser válidos desde que a repetibilidade mostrou-se tão pobre. Supõe-se que o método de detecção de "out-liers" possa ser usado para isto. O método adotado consistiu em fixar primeiramente uma confiabilidade arbitrária de 95% onde  $t = 1,96$  e, em segundo lugar, usar um  $t$  variável que depende do número de ensaios incluídos na análise, resultando então uma confiabilidade ainda variável. O Apêndice C descreve este método em detalhe. Os resultados resumidos dos três métodos usados são apresentados na Tabela 6.4. Nela pode-se verificar que se utilizando uma confiabilidade de 95% os coeficientes de variação são em geral reduzidos, indicando que a repetibilidade é relativamente melhor. Todavia, em termos práticos, os valores das médias são os mesmos.

O índice de plasticidade, que é um parâmetro fundamental em termos de classificação e resistência de solos, é logicamente função do LL e do LP e sua repetibilidade depende da repetibilidade destes dois ensaios. A Tabela 6.5 mostra um resumo das médias, desvios-padrão e coeficientes de variação para todos os solos, dos limites de liquidez e plasticidade e índice de plasticidade, com os valores obtidos pelos métodos indicados nas normas. Pode-se ver então que, em termos de repetibilidade, o IP não se mostra como um parâmetro com o qual se possa classificar ou predizer as propriedades de um solo.

#### 6.4 - Análise Granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica de um solo, compreende a determinação das frações pedregulho e areia por peneiramento e das frações silte e argila por sedimentação. Como se sabe, a análise por sedimentação requer bastante tempo e está sujeita a muitos erros; por isto, para solos com percentagem de silte mais argila menor que 25%, em muitos casos, se omite o ensaio de sedimentação (2).

Os resultados de repetibilidade em termos das

frações areia, silte e argila são apresentados na Tabela 6.6. Os limites de diâmetros médios que separam areia de silte e silte de argila são os recomendados pela norma ABNT- TB-3 (34). Observa-se nesta Tabela que a repetibilidade para a fração areia é boa, entretanto para as frações silte e argila é pobre. Os coeficientes de variação para a fração silte são muito altos e discordantes das das outras frações. Esta discordância parece ter origem na própria metodologia do ensaio. Traçando-se as curvas de distribuição granulométrica, observou-se que estas não são contínuas. Para a maioria dos ensaios existe uma descontinuidade entre os diâmetros correspondentes a 75 microns e 40 microns. Esta descontinuidade coincide com o método pelo qual se determinam as percentagens correspondentes a esses diâmetros. No método de ensaio utilizado, da ABNT, as frações iguais a 75 microns e maiores são obtidas por peneiramento, enquanto as frações menores são obtidas das leituras do densímetro. Os resultados mostram que a descontinuidade é comum para muitos ensaios e mais acentuada para aqueles contendo maior percentagem aparente de silte. Outros investigadores relatam o mesmo fenômeno (44) e o atribuem aos seguintes efeitos:

- a) coesão ou adesão entre partículas do solo
- b) cimentação das partículas do solo
- c) forma das partículas e sua possível variação durante o ensaio
- d) possíveis variações da densidade das partículas do solo durante o procedimento do ensaio.

Eles imaginam que os efeitos a e b influenciam principalmente a precisão do peneiramento, enquanto que os efeitos c e d influenciam principalmente a precisão da análise com densímetro. Sem sombra de dúvidas estes efeitos têm qualitativamente uma grande influência nos resultados. Porém outro fator de importância parece ser a falta de precisão na tomada de leituras do densímetro para determinação dos tamanhos imediatamente menores que 75 microns. O densímetro muda de posição com rapidez fazendo com que as leituras sejam pouco precisas. Por ou

tra parte é ainda importante mencionar que as frações obtidas por peneiramento são muito pequenas desde que elas vêm da amostra para sedimentação. A demonstração de que a repetibilidade' do tamanho silte é devida à metodologia do ensaio, pode ser feita usando-se outras escalas para dividir as frações areia, silte e argila. A Figura 6.1 mostra classificações usuais de tamanho de partículas indicadas nas especificações da ABNT (34), do DNER (18) da BS (38) e do LCPC (43). Comparando-se os resultados de repetibilidade para estas quatro classificações (veja Tabela 6.7) verifica-se que os valores dos coeficientes de variação com a classificação do DNER são muito menores para a fração silte. (O Apêndice D mostra todos os resultados da análise granulométrica). Isto é devido a que nesta classificação o limite entre silte e argila é 75 microns e consequentemente a divisão está fora da descontinuidade da curva de distribuição granulométrica. A Figura 6.2 apresenta as três curvas típicas de distribuição encontradas durante os ensaios.

Parece importante assinalar que nas normas usadas não existe indicação para o pré-tratamento das amostras com um composto ácido a fim de eliminar matéria orgânica ou materiais cimentícios que contribuem para a aderência entre partículas. As normas inglesas, por exemplo, recomendam pré-tratamento com ácido clorídrico diluído; isto elimina sobremaneira o fenômeno de adesão. As mesmas normas indicam que o peneiramento deve ser feito com amostra de maior peso para evitar a possibilidade de variações de material nas amostras ensaiadas.

#### 6.5 - Ensaio de Densidade Real

A norma DNER-DPT M 93-64, utilizada para os ensaios de densidade real, indica que "o resultado do ensaio só será considerado quanto obtido pela média de duas determinações, no mínimo, e quando não diferirem de 0,009". Embora a determinação de densidade real de solos seja em princípio um dos mais fáceis ensaios, pois esta somente envolve o peso do solo e a determinação de seu volume pelo deslocamento de um volume equivalente de água, existe uma dificuldade prática qual seja a



verificação da remoção do ar. Por isso, chama atenção o fato de que a norma do DNER não considere como válidos os resultados que diferirem em mais de 0,009. Este valor, quando comparado com valores indicados por outras normas, parece muito rigoroso. A norma da BS indica um valor de 0,03 que é claramente muito maior.

Os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados na Tabela 6.8. O aspecto mais interessante dos valores mostrados é que em cada grupo de ensaios pode-se indicar valores de densidade real concordantes com as exigências da norma, no entanto quando estes são comparados entre si as diferenças excedem grandemente o valor de 0,009 como se pode ver na última linha da Tabela 6.8.

Não obstante os coeficientes de variação tenham sido muito baixos, indicando boa repetibilidade do ensaio, tentou-se verificar se as limitações poderiam eliminar valores reais, devido ao tão pequeno intervalo indicado. Para isso, usou-se outra vez a técnica de detecção de "out-liers" e procederam-se cálculos das densidades reais para uma confiabilidade arbitrária de 95% e para valores de  $t$  variáveis com o número de ensaios.

Os resultados são mostrados na Tabela 6.9, onde se observa que para uma confiabilidade de 95% os coeficientes de variação são melhorados e o número de ensaios válidos é incrementado. Por isso os valores de densidade real mudam perceptivelmente na segunda casa decimal. Parece, como consequência dos resultados obtidos, poder-se afirmar que a limitação da norma é irreal e portanto deveria ser modificada pelo menos em uma ordem decimal.

Solo nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	-	-	29,3	31,8	35,2	23,1	25,8	41,0	67,7	54,7	53,0	43,4	77,5	64,8	149,2	390,0
			30,2	31,8	34,9	22,8	27,2	46,6	64,0	50,8	55,8	50,8	91,0	61,0	157,5	348,0
			29,8	31,5	35,4	22,5	24,6	43,0	66,3	52,3	51,0	40,8	72,8	60,6	154,5	390,0
				31,2	35,3	21,8	25,7	51,8	69,8	54,0	58,1	41,2	71,3	62,0	151,7	446,0
						22,9	25,6	40,8	67,5			44,4	78,5			
							25,8									
Média	NP	NP	29,8	31,6	35,2	22,6	27,8	44,6	67,1	53,0	54,5	44,1	78,2	62,1	153,2	393,5
D.P.			0,45	0,29	0,22	0,51	0,83	4,63	2,12	1,75	3,12	4,02	7,77	1,89	3,58	40,21
C.V.			1,5	0,9	0,6	2,3	3,0	10,4	3,2	3,3	5,7	9,1	9,9	3,0	2,3	10,2

Tabela 6.1 - Resultados de limite de liquidez obtidos por um operador com o mesmo aparelho.

Método	Manual (Clássico)				Regressão Linear				Regressão Linear de Todos os Valores			
	Solo nº	N	Média	D.P.	C.V.	N	Média	D.P.	C.V.	N	Média	C.C.L.
1	-	NP				-	NP			-	NP	
2	-	NP				-	NP			-	NP	
3	3	29,8	0,45	1,5	3	30,0	0,42	1,4	14	29,8	0,97	
4	4	31,6	0,29	0,9	4	31,6	0,41	1,3	19	31,5	0,98	
5	4	35,2	0,22	0,6	4	34,8	0,20	0,6	20	34,9	0,96	
6	5	22,6	0,51	2,3	5	22,5	0,57	2,5	22	22,5	0,94	
7	6	27,8	0,83	3,0	6	25,8	0,81	3,1	30	25,8	0,86	
8	5	44,6	4,63	10,4	5	44,9	5,39	12,0	25	44,9	0,67	
9	5	67,1	2,12	3,2	5	66,5	1,85	2,8	25	66,5	0,94	
10	4	53,0	1,75	3,3	4	53,0	1,68	3,2	19	52,8	0,93	
11	4	54,5	3,12	5,7	4	59,3	11,30	19,1	19	54,4	0,85	
12	5	44,1	4,02	9,1	5	43,8	4,12	9,4	25	43,8	0,75	
13	5	78,2	7,77	9,9	5	76,7	6,97	9,1	25	76,6	0,73	
14	4	62,1	1,89	3,0	4	61,8	1,50	2,4	19	62,0	0,90	
15	4	153,2	3,58	2,3	4	152,1	4,19	2,8	19	152,0	0,84	
16	4	393,5	40,21	10,2	4	383,0	36,65	9,6	20	379,2	0,70	

Tabela 6.2 - Resumo dos resultados de ensaio de limite de liquidez obtidos por um mesmo operador, com o mesmo aparelho.

Solo nº Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1º			24,78	*24,62	26,11	*18,55	19,86	27,13	24,05	*21,87	30,35	*20,94	40,96	*37,27	53,00	*48,27
			23,47	33,85	26,71	*18,22	19,60	24,26	*27,04	*20,75	*29,75	*22,37	30,43	34,16	*57,14	70,83
			22,01	27,69	24,82	*17,67	*18,63	31,19	23,38	17,46	*28,69	*20,63	17,69	*38,52	*56,84	*47,77
				*25,54	*25,73	16,99	*17,90	24,80	*28,07	18,79	30,97		25,00	*36,97	52,52	*49,33
				*24,80	*25,36	*19,02	*18,07		*27,35	*20,63	*27,48		20,61	*35,51	*56,81	52,43
				*25,00	*25,92		*17,44			18,04	*27,77		23,40		*54,08	
LP%			-	25,0	25,8	18,4	18,0	-	27,5	21,1	28,4	21,3	-	37,1	56,2	48,5
2º			20,91	*20,30	20,45	13,04	16,57	24,18	*30,00	*20,63	30,09	*18,95	25,58	36,92	*44,18	62,82
			*22,77	*20,30	*21,66	15,42	18,27	24,80	27,45	*18,91	*27,00	*18,40	30,95	*33,80	*44,57	52,38
			*23,75	*20,00	*22,06	15,67	24,83	*26,89	*30,10	*19,29	*27,72	20,00	22,90	*33,33	49,50	*57,77
			*23,03	*20,86	*22,22	14,28	17,73	*27,37	*30,90	21,81	*26,88	*18,12	28,81	*32,77	*46,66	*56,12
			*21,76	*21,21	*22,96	12,95		*26,66	*30,58	22,52	*29,26	20,86	21,31	35,48	*43,56	*56,38
					*21,42				26,66	*20,00	*28,75					*55,31
LP%			22,8	20,7	22,1	-	-	27,1	30,4	19,7	27,9	18,5	-	33,3	44,8	56,4
3º			*22,38	*24,15	*22,72	*15,38	*18,83	28,10	21,92	*19,33	29,89	*19,01	25,00	*34,78	45,92	*50,00
			*21,00	*24,88	*22,85	*15,13	*17,85	*25,58	19,23	*18,30	*27,77	*18,83	23,27	39,77	*53,84	*48,14
			*22,64	*24,88	*23,40	*14,93	16,90	*23,89	25,23	23,07	*29,16	*18,70	20,00	30,98	46,91	*49,47
			16,23	22,03	25,17	17,91	16,66	*25,42	23,40	20,27	*27,08	*18,56	16,54	*33,33	*51,94	56,52
			*20,68	*24,39	*24,24	*16,04	*19,33	23,68		*18,88	*27,86	*18,54		*35,36	*53,26	54,41
				*24,83							*27,27					
LP%			21,7	24,6	23,3	15,4	18,6	25,0	-	18,8	27,8	18,7	-	34,5	53,0	49,2

Tabela 6.3 - Continua

Solo n <sup>o</sup> Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
40			21,42	*21,27	*21,08	16,56	*18,06	23,89	25,00	*17,29	*26,40	17,94	*18,11		31,25	*46,66
			*18,18	*21,60	18,49	14,06	*16,76	25,43	*22,14	*17,91	24,29	*21,05	*18,60		*44,15	*48,86
			*19,37	*20,30	*22,30	12,75	*17,27	18,84	18,68	*17,14	*27,77	*20,17	16,32		47,05	*44,77
			*19,37	*20,68	22,90	14,63	14,37	20,74	*22,60	19,53	*26,19	17,64	17,60		*43,03	41,79
			17,35	*21,25	*20,63	12,87	*18,01	22,93	*22,38	*17,14	*25,92	*21,00	*18,18		*43,20	50,98
LP%			19,0	20,0	21,3	-	17,3	-	22,4	17,4	26,6	20,7	18,1		43,5	46,8
50						*15,32	16,79	21,81	*27,47				*16,80			
						*14,96	16,12	*26,41	20,20				*17,29			
						*14,39	*14,83	*24,49	*25,71				*16,91			
						16,37	*14,08	22,72	23,07				15,06			
						17,85	*14,86	*25,30	*25,88				*17,64			
LP%						14,9	14,6	25,4	26,4				17,2			
60						*15,53	11,03						15,25			
						*16,96	10,65						16,37			
						*16,07	16,02						21,87			
						20,21	17,93						*19,00			
						18,18	18,75						*17,61			
LP%						16,2	-						18,6			
Média	NP	NP	21,2	22,6	23,1	16,2	17,1	25,8	26,7	19,3	27,7	19,8	18,0	35,0	49,4	50,2
D.P.			1,95	2,59	1,96	1,55	1,77	1,12	3,31	1,55	0,76	1,41	0,71	1,94	6,20	4,24
C.V.			9,2	11,5	8,5	9,6	10,3	4,3	12,4	8,1	2,7	7,1	4,0	5,5	12,6	8,4

Tabela 6.3 - Resultados de limite de plasticidade obtidos por um mesmo operador

(\*) Valores enquadrados nas normas.

Método	Clássico			Detecção de "out-liers"											
				t = 1,96						t variável					
Solo nº	Média	D.P.	C.V.	N	Média	D.P.	C.V.	Dif.	t	N	Média	D.P.	C.V.	Dif.	t
1	NP				NP						NP				
2	NP				NP						NP				
3	21,2	1,95	9,2	12	22,2	1,02	4,6	3,07	1,88	18	21,2	2,31	10,9	8,55	-2,60
4	22,6	2,59	11,5	21	22,7	2,02	8,9	5,55	1,52	22	22,9	2,24	9,8	7,69	2,46
5	23,1	1,96	8,5	21	23,4	1,92	8,2	6,26	1,93	22	23,2	2,15	9,3	8,22	-2,54
6	16,2	1,55	9,5	30	15,9	1,82	11,4	6,27	1,85	31	16,0	1,96	12,3	7,46	2,37
7	17,1	1,77	10,3	21	17,5	0,86	4,9	2,80	-1,88	22	17,3	1,52	8,8	5,78	-2,35
8	25,8	1,12	4,3	22	24,9	1,88	7,6	7,36	1,92	24	24,9	2,55	10,2	12,35	1,92
9	26,7	3,31	12,4	22	25,9	2,87	11,1	9,00	1,92	25	24,9	3,34	13,4	12,23	-2,06
10	19,3	1,55	8,1	18	18,9	1,24	6,6	3,62	1,65	22	19,5	1,76	9,0	4,94	2,30
11	27,7	0,76	2,7	22	28,0	1,38	4,9	4,62	1,94	24	27,9	1,65	5,9	6,68	-2,54
12	19,8	1,41	7,1	17	19,4	1,90	9,8	3,40	-1,61	18	19,5	1,36	7,0	4,73	2,52
13	18,0	0,71	4,0	13	17,2	0,68	4,0	1,90	1,69	31	20,3	0,44	2,2	15,88	2,75
14	35,0	1,94	5,5	13	34,8	1,67	4,8	5,11	-1,83	16	35,1	2,38	6,8	8,78	2,39
15	49,4	6,20	12,6	19	49,0	4,80	9,8	13,80	-1,82	21	49,0	6,52	13,3	25,89	1,47
16	50,2	4,24	8,4	18	51,4	3,89	7,6	13,00	-1,94	20	51,5	5,02	9,7	21,03	3,85

Tabela 6.4 - Resumo dos resultados de ensaio de limite de plasticidade obtidos por um mesmo operador

Solo nº	L L %			L P %			I P %		
	Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.
1	NP			NP			NP		
2	NP			NP			NP		
3	29,8	0,45	1,5	21,2	1,95	9,2	8,6	2,15	25,0
4	31,6	0,29	0,9	22,6	2,59	11,5	9,0	2,48	27,6
5	35,2	0,22	0,6	23,1	1,96	8,5	12,1	1,95	16,1
6	22,6	0,51	2,3	16,2	1,55	9,6	6,6	1,71	25,8
7	27,8	0,83	3,0	17,1	1,77	10,3	8,1	2,17	26,8
8	44,6	4,63	10,4	25,8	1,12	4,3	21,4	7,71	36,1
9	67,1	2,12	3,2	26,7	3,31	12,4	40,6	5,65	13,9
10	53,0	1,75	3,3	19,3	1,55	8,1	33,7	2,25	6,7
11	54,5	3,12	5,7	27,7	0,76	2,7	26,8	3,70	13,8
12	44,1	4,02	9,1	19,8	1,41	7,1	22,8	0,76	3,3
13	78,2	7,77	9,9	18,0	0,71	4,0	60,4	-	-
14	62,1	1,89	3,0	35,0	1,94	5,5	26,2	2,02	7,7
15	153,2	3,58	2,3	49,4	6,20	12,6	103,9	8,57	8,3
16	393,5	40,21	10,2	50,2	4,24	8,4	345,8	44,09	12,8

Tabela 6.5 - Resumo dos resultados dos limites de liquidez, limites de plasticidade e índices de plasticidade.

Solo nº	Frações	N	Média	D.P.	C.V.
1	Ar.	5	80,4	3,60	4,5
	S.		11,3	4,54	40,2
	Ag.		8,3	1,10	13,3
2	Ar.	4	90,3	1,04	1,2
	S.		5,4	1,11	20,6
	Ag.		4,4	1,75	39,8
3	Ar.	5	67,8	2,91	4,3
	S.		21,7	2,91	13,4
	Ag.		10,5	3,26	31,0
4	Ar.	4	52,7	2,78	5,3
	S.		14,3	4,87	34,1
	Ag.		32,8	2,87	8,8
5	Ar.	4	40,5	1,47	3,6
	S.		23,9	3,50	14,6
	Ag.		38,1	1,75	4,6
6	Ar.	4	63,9	5,51	8,6
	S.		20,4	4,42	21,7
	Ag.		15,8	1,85	11,7
7	Ar.	4	51,1	3,12	6,1
	S.		16,5	2,65	16,1
	Ag.		31,9	1,93	6,1
8	Ar.	4	56,4	3,30	5,9
	S.		21,3	6,96	32,7
	Ag.		24,9	1,11	4,5
9	Ar.	4	19,4	2,14	11,0
	S.		6,13	1,55	25,3
	Ag.		74,5	0,71	1,0

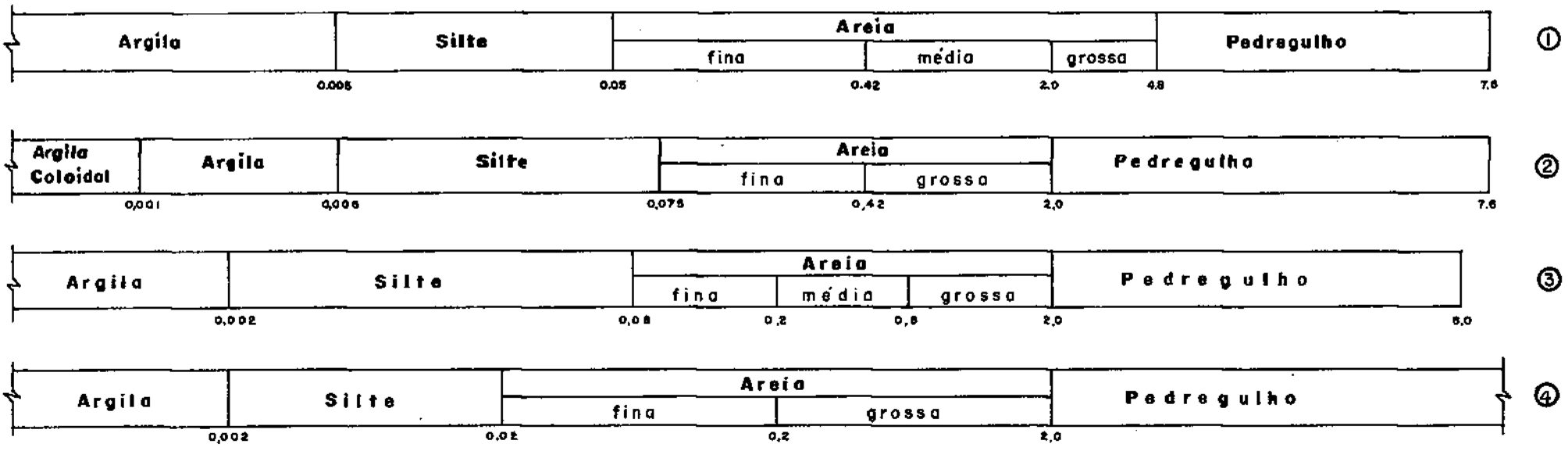
Tabela 6.6 - Continua



Solo nº	Frações	N	Média	D.P.	C.V.
10	Ar.	4	23,1	1,55	6,7
	S.		21,4	4,11	19,2
	Ag.		58,0	0,82	1,4
11	Ar.	4	39,6	2,81	7,1
	S.		15,8	2,18	13,8
	Ag.		44,6	1,60	3,6
12	Ar.	4	69,4	2,06	3,0
	S.		9,13	2,63	28,8
	Ag.		21,5	0,91	4,2
13	Ar.	4	56,4	4,07	7,2
	S.		9,2	3,97	43,2
	Ag.		34,5	2,08	6,0
14	Ar.	4	-	-	-
	S.		8,5	0,91	10,7
	Ag.		91,5	0,91	1,0
15	Ar.	4	12,2	1,84	15,1
	S.				
	Ag.		88,1	1,76	2,0
16	Ar.	6	4,5	2,37	52,7
	S.		1,5	1,00	66,7
	Ag.		94,2	2,11	2,2

Tabela 6.6 - Resultados de repetibilidade das frações areia, silte e argila, de acordo com a classificação da ABNT

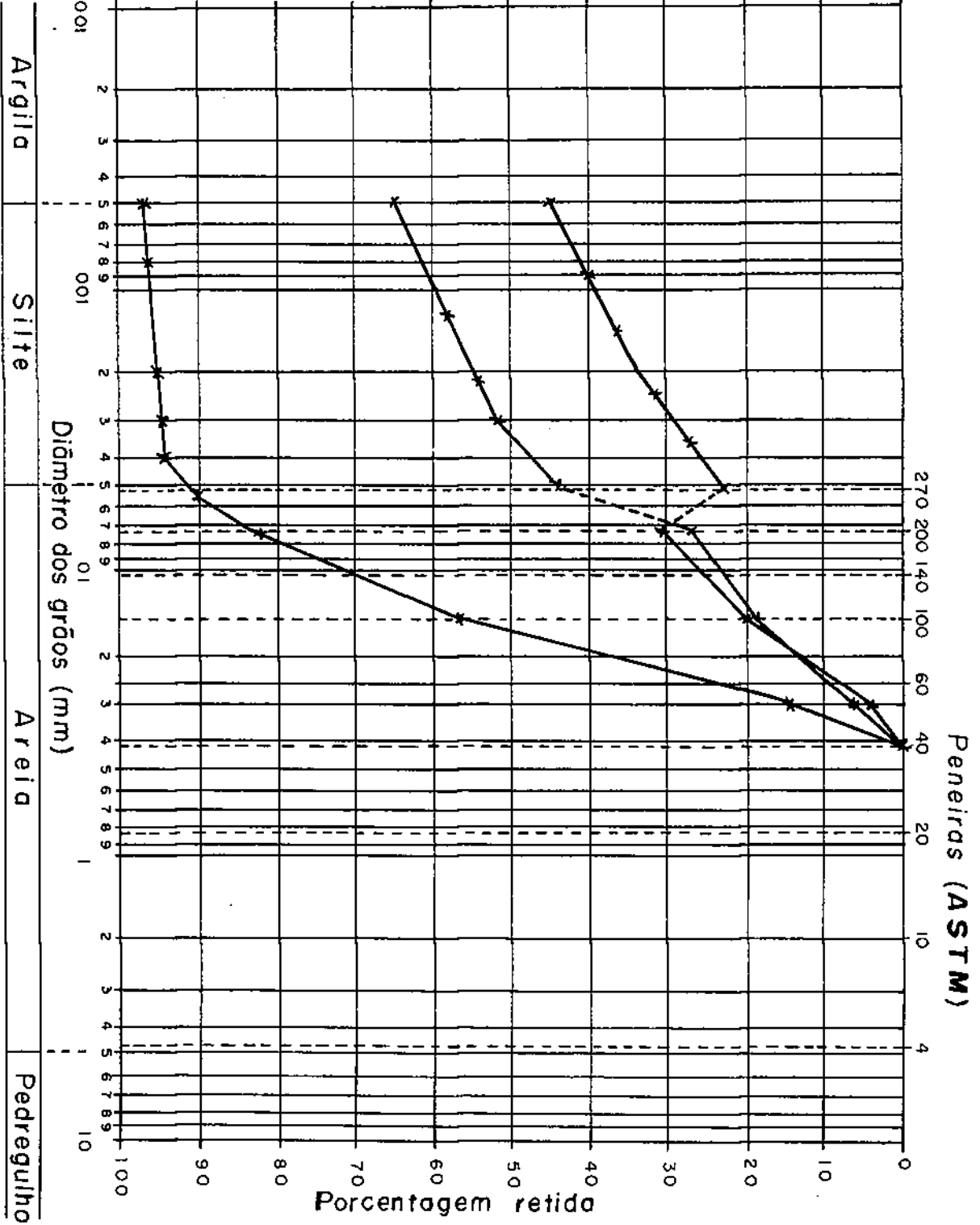
Figura 6.1 Classificações usuais de tamanhos de partículas.



- ① Associação Brasileira de Normas Técnicas — A B N T — T B - 3
- ② Departamento Nacional de Estradas de Rodagem — D N E R
- ③ British Standards Institution — B S
- ④ Laboratoire Central de Ponts et Chaussées — L C P C

Figura 6.2 Curvas típicas de distribuição granulométrica encontradas durante os ensaios.

CLASSIFICAÇÃO  
A.B.N.T.



Argila

Silte

Areia

Pedregulho

Diâmetro dos grãos (mm)

Porcentagem que passa

Porcentagem retida

Peneiras (ASTM)

Sólos	Norma	A B N T			D N E R			B S			L C P C		
	Frações	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.
1	Média	80,4	11,3	8,3	69,5	22,1	8,3	76,0	16,6	7,4	88,8	3,8	7,4
	D.P.	3,60	4,54	1,10	0,5	1,34	1,10	3,24	4,04	1,26	1,10	1,44	1,26
	C.V.	4,5	40,2	13,3	0,7	6,1	13,3	4,3	24,3	17,0	1,2	37,9	17,0
2	Média	90,3	5,4	4,4	82,9	12,9	4,4	88,0	8,1	4,0	93,6	2,5	4,0
	D.P.	1,04	1,11	1,75	0,25	1,93	1,75	0,71	0,10	0,71	1,61	1,23	0,71
	C.V.	1,2	20,6	39,8	0,3	15,0	39,8	0,8	1,2	17,8	1,7	49,2	17,8
3	Média	67,8	21,7	10,5	52,4	37,1	10,5	65,5	26,3	8,2	78,0	13,8	8,2
	D.P.	2,91	2,91	3,26	0,89	3,15	3,26	3,32	3,12	2,69	3,37	2,25	2,69
	C.V.	4,3	13,4	31,0	1,7	8,5	31,0	5,1	11,9	32,8	4,3	16,3	32,8
4	Média	52,7	14,3	32,8	34,4	35,3	32,8	51,4	24,0	27,1	60,9	12,0	27,1
	D.P.	2,78	4,87	2,87	0,36	3,18	2,87	2,14	5,02	2,43	3,01	0,71	2,43
	C.V.	5,3	34,1	8,8	1,0	9,0	8,8	4,2	20,9	9,0	4,9	5,9	9,0
5	Média	40,5	23,9	38,1	27,5	34,4	38,1	35,5	30,1	34,4	52,1	13,5	34,4
	D.P.	1,47	3,50	1,75	0,97	2,55	1,75	2,38	3,75	1,49	2,59	1,47	1,49
	C.V.	3,6	14,6	4,6	3,5	7,4	4,6	6,7	12,5	4,3	5,0	10,9	4,3
6	Média	63,9	20,4	15,8	50,5	33,7	15,8	57,6	28,0	14,4	73,7	13,2	14,4
	D.P.	5,51	4,42	1,85	0,78	1,82	1,85	5,73	2,74	1,80	5,19	5,20	1,80
	C.V.	8,6	2,17	11,7	1,5	5,4	11,7	6,5	9,8	12,5	7,0	39,4	12,5
7	Média	51,1	16,5	31,9	37,2	30,9	31,9	44,8	25,6	29,6	60,8	9,5	29,6
	D.P.	3,12	2,65	1,93	0,38	1,89	1,93	1,89	2,21	1,80	2,47	1,46	1,80
	C.V.	6,1	16,1	6,1	1,0	6,1	6,1	4,2	8,6	6,1	4,1	15,4	6,1
8	Média	56,4	21,3	24,9	44,4	33,2	24,9	53,4	25,3	21,4	65,6	13,0	21,4
	D.P.	3,30	6,96	1,11	0,80	4,15	1,11	3,04	2,40	1,44	1,89	1,0	1,44
	C.V.	5,9	32,7	4,5	1,8	12,5	4,5	5,7	9,5	6,7	2,9	7,7	6,7
9	Média	19,4	6,13	74,5	19,0	6,5	74,5	18,1	13,5	70,9	22,5	6,6	70,9
	D.P.	2,14	1,55	0,71	0,91	1,21	0,71	4,17	6,12	0,85	1,96	1,25	0,85
	C.V.	11,0	25,3	1,0	4,8	18,6	1,0	23,0	45,3	1,2	8,7	18,9	1,2

Tabela 6.7 - Continua

Solos	Norma	A B N T			D N E R			B S			L C P C		
	Frações	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.
10	Média	23,1	21,4	58,0	27,3	15,0	58,0	24,3	21,3	54,5	31,0	14,3	54,5
	D.P.	1,55	4,11	0,82	0,29	0,76	0,82	2,87	2,63	1,00	1,47	0,87	1,00
	C.V.	6,7	19,2	1,4	1,1	5,1	1,4	11,8	12,3	1,8	4,7	6,1	1,8
11	Média	39,6	15,8	44,6	28,9	29,0	44,6	38,3	20,1	41,6	48,6	9,8	41,6
	D.P.	2,81	2,18	1,60	0,58	5,58	1,60	2,96	2,06	1,49	4,39	3,71	1,49
	C.V.	7,1	13,8	3,6	2,0	19,9	3,6	7,7	10,2	3,6	9,0	37,9	3,6
12	Média	69,4	9,13	21,5	59,7	18,9	21,5	67,0	13,0	20,0	75,9	4,13	20,0
	D.P.	2,06	2,63	0,91	0,45	0,54	0,91	3,89	4,71	1,08	0,63	0,75	1,08
	C.V.	3,0	28,8	4,2	0,8	2,9	4,2	5,8	36,2	5,4	0,8	18,2	5,4
13	Média	56,4	9,2	34,5	53,0	12,5	34,5	56,4	11,9	31,8	63,3	5,0	31,8
	D.P.	4,07	3,97	2,08	0,79	2,03	2,08	1,49	1,25	1,19	2,06	1,87	1,19
	C.V.	7,2	43,2	6,0	1,5	16,2	6,0	2,6	10,5	3,7	3,3	37,4	3,7
14	Média	-	8,5	91,5	-	8,5	91,5	-	49,5	50,5	0,88	48,6	50,5
	D.P.	-	0,91	0,91	-	0,91	0,91	-	3,70	3,70	1,03	3,82	3,70
	C.V.	-	10,7	1,0	-	10,7	1,0	-	7,5	7,3	117,0	7,9	7,3
15	Média	12,2	-	88,1	12,2	-	88,1	12,2	5,3	82,5	12,2	5,3	82,5
	D.P.	1,84	-	1,76	1,84	-	1,76	1,84	3,70	4,81	1,84	3,70	4,81
	C.V.	15,1	-	2,0	15,1	-	2,0	15,1	69,8	5,8	15,1	69,8	5,8
16	Média	4,5	1,5	94,2	4,4	1,5	94,2	4,7	4,4	90,9	5,0	4,1	90,9
	D.P.	2,37	1,00	2,11	2,52	1,00	2,11	2,56	0,86	2,54	3,08	1,16	2,54
	C.V.	52,7	66,7	2,2	57,3	66,7	2,2	54,5	19,5	2,8	61,6	28,3	2,8

Tabela 6.7 - Resultados de repetibilidade das frações areia, silte e argila, de acordo com as classificações da ABNT, do DNER, da BS e do LCPC.

SOLOS	Valores dos ensaios							
	1	2	3	4	5			
	2,550	1 <sup>2</sup> 2,644	2,640	1 <sup>2</sup> 2,726	2,732	1 <sup>2</sup> 2,736	2,738	2,842
	2,553	2 <sup>2</sup> 2,620	2,620	1 <sup>2</sup> 2,733	2,732	2,751	2,738	2,807
	2,568	1 <sup>2</sup> 2,637	2,620	2,615	1 <sup>2</sup> 2,741	2,783	2,738	2,794
	2,590	2 <sup>2</sup> 2,621	2,640	1 <sup>2</sup> 2,735	2,732	2,783	2,738	2,908
	1 <sup>2</sup> 2,621	2,624	2,649	2,780	2,789	2,822	2,869	1 <sup>2</sup> 2,911
	1 <sup>2</sup> 2,629	2,624	2,659	2,764	2,759	2,787	2,869	2,881
	1 <sup>2</sup> 2,622	2,624	2,659	2,813	2,759	2,852	2,869	1 <sup>2</sup> 2,906
				2,824	2,789	2,811	2,869	1 <sup>2</sup> 2,913
	1 <sup>2</sup> 2,597	2,601	2,673	1 <sup>2</sup> 2,790	2,789	2,822	2,869	1 <sup>2</sup> 2,926
	2,631	2,601	2,659	2 <sup>2</sup> 2,760	2,759	2,787	2,869	2,881
	1 <sup>2</sup> 2,606	2,601	2,659	2 <sup>2</sup> 2,759	2,759	2,852	2,869	1 <sup>2</sup> 2,906
	2,641	2,601	2,659	1 <sup>2</sup> 2,788	2,789	2,811	2,869	1 <sup>2</sup> 2,913
	1 <sup>2</sup> 2,624	2,620	2,663	2,789	2,812	1 <sup>2</sup> 2,866	2,869	1 <sup>2</sup> 2,926
	1 <sup>2</sup> 2,620	2,620	2,668	2,812	2,804	1 <sup>2</sup> 2,870	2,869	2 <sup>2</sup> 2,936
	1 <sup>2</sup> 2,616	2,620	2,668	2,803	2,804	1 <sup>2</sup> 2,873	2,869	2,947
	2,606	2,620	2,668	2,742	2,812	2,846	2,869	1 <sup>2</sup> 2,931
				2 <sup>1</sup> 2,807	2,812	2 <sup>1</sup> 2,855	2,852	2,895
				2 <sup>2</sup> 2,801	2,804	2 <sup>1</sup> 2,850	2,852	1 <sup>2</sup> 2,935
				1 <sup>2</sup> 2,816	2,804	2 <sup>2</sup> 2,863	2,848	1 <sup>2</sup> 2,940
				1 <sup>2</sup> 2,814	2,812	2,846	2,848	1 <sup>2</sup> 2,934
	N	8	13	10	9	9	9	9
	Média	2,615	2,653	2,779	2,833	2,833	2,833	2,927
	D.P.	0,012	0,018	0,033	0,054	0,054	0,054	0,012
	C.V.	0,5	0,7	1,2	1,9	1,9	1,9	0,4
	Dif.	0,023	0,053	0,080	0,131	0,131	0,131	0,026

Tabela 6.8 - continua



SOLOS		6		7		8		9		10	
			D. R.		D. R.		D. R.		D. R.		D. R.
Valores dos ensaios	1º	<sup>1</sup> 2,824 2,792 <sup>1</sup> 2,816 2,773	2,820	2,815 2,772 2,828 2,802		<sup>21</sup> 2,680 <sup>2</sup> 2,686 <sup>1</sup> 2,674 2,613	2,677 2,683	<sup>1</sup> 2,627 2,629 <sup>1</sup> 2,633 <sup>1</sup> 2,627	2,629	2,575 <sup>1</sup> 2,598 <sup>1</sup> 2,593 <sup>1</sup> 2,595	2,595
	2º	<sup>1</sup> 2,793 2,821 <sup>1</sup> 2,792 <sup>1</sup> 2,790	2,791	2,813 2,837 2,848 2,789		2,687 2,676 <sup>1</sup> 2,667 <sup>1</sup> 2,662	2,664	<sup>1</sup> 2,661 2,658 2,622 <sup>1</sup> 2,656	2,658	<sup>1</sup> 2,594 2,611 <sup>1</sup> 2,587 <sup>1</sup> 2,595	2,592
	3º	<sup>1</sup> 2,773 <sup>1</sup> 2,768 2,787 2,820	2,770	<sup>1</sup> 2,864 <sup>2</sup> 2,876 2,857 <sup>2</sup> 2,871	2,861 2,874 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> 2,689 <sup>2</sup> 2,673 2,675 <sup>1</sup> 2,694	2,691 2,674 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> 2,654 <sup>1</sup> 2,656 2,667 <sup>2</sup> 2,670	2,655 2,668	<sup>1</sup> 2,616 2,637 2,601 <sup>1</sup> 2,625	2,620
	4º	<sup>1</sup> 2,817 2,838 <sup>1</sup> 2,822 <sup>1</sup> 2,814	2,817	<sup>1</sup> 2,855 <sup>2</sup> 2,867 2,881 <sup>21</sup> 2,859	2,857 2,863	2,672 2,708		<sup>1</sup> 2,664 <sup>2</sup> 2,678 <sup>1</sup> 2,672 <sup>2</sup> 2,687	2,668	2,559 2,608 <sup>1</sup> 2,626 <sup>1</sup> 2,625	2,625
	5º	<sup>1</sup> 2,785 <sup>2</sup> 2,833 <sup>1</sup> 2,786 <sup>2</sup> 2,835	2,785 2,834	<sup>1</sup> 2,887 <sup>1</sup> 2,895 2,928	2,891						
	N	14		9		9		15		10	
	Média	2,803		2,869		2,678		2,664		2,608	
	D.P.	0,025		0,014		0,010		0,025		0,017	
	C.V.	0,9		0,5		0,4		0,9		0,7	
	Dif.	0,064		0,034		0,027		0,059		0,033	

Tabela 6.8 - Continua

SOLOS		11		12		13		14		15		16	
			D. R.		D. R.		D. R.		D. R.		D. R.		D. R.
Valores dos ensaios	1º	2,693 12,687 12,684 12,682	2,686	<sup>2</sup> 12,602 <sup>2</sup> 2,593 2,544 <sup>1</sup> 2,608	2,604 2,597	<sup>1</sup> 2,659 <sup>1</sup> 2,657 2,704	2,658	2,560 2,535 2,547		2,497 2,518 2,533		2,385 2,336 2,356 2,397	
	2º	<sup>1</sup> 2,701 2,712 2,680 <sup>1</sup> 2,693	2,697	2,621 <sup>1</sup> 2,632 2,611 <sup>1</sup> 2,638	2,635	<sup>1</sup> 2,618 2,596 <sup>1</sup> 2,622	2,620	<sup>1</sup> 2,576 2,586 <sup>1</sup> 2,574 2,558	2,575	<sup>1</sup> 2,614 2,643 <sup>1</sup> 2,607 2,583	2,610	2,670 <sup>1</sup> 2,657 2,683 <sup>1</sup> 2,658	2,657
	3º	<sup>1</sup> 2,727 <sup>2</sup> 2,738 2,715 <sup>2</sup> 12,734	2,730 2,736	2,602 <sup>1</sup> 2,579 2,650 <sup>1</sup> 2,581	2,580	<sup>1</sup> 2,490 <sup>2</sup> 2,548 <sup>2</sup> 2,552 <sup>1</sup> 2,493	2,491 2,550	2,585 2,556 2,570		<sup>1</sup> 2,493 <sup>1</sup> 2,485	2,488	<sup>1</sup> 2,608 2,576 2,595 <sup>1</sup> 2,616	2,612
	4º	<sup>1</sup> 2,728 <sup>3</sup> 2,741 <sup>3</sup> 12,735 <sup>2</sup> 2,746	2,731 2,743 2,738	<sup>1</sup> 2,626 <sup>1</sup> 2,620 <sup>1</sup> 2,624 <sup>1</sup> 2,621	2,622	2,579 2,590 2,568 2,554		2,517 <sup>1</sup> 2,473 <sup>1</sup> 2,471	2,472	2,507 <sup>1</sup> 2,491 2,478 <sup>1</sup> 2,491	2,491	2,650 2,629	
	5º							2,576 2,604		<sup>1</sup> 2,442 <sup>1</sup> 2,441	2,420		
	6º							2,598 2,544 <sup>1</sup> 2,572 <sup>1</sup> 2,579 <sup>1</sup> 2,577	2,576				
	N	12		11		8		7		8		4	
	Média	2,723		2,580		2,580		2,541		2,537		2,634	
	D.P.	0,022		0,022		0,074		0,060		0,082		0,032	
	C.V.	0,8		0,8		2,9		2,4		3,2		1,2	
	Dif.	0,112		0,055		0,167		0,104		0,203		0,045	

Tabela 6.8 - Resultados de repetibilidade do ensaio de densidade real.

(1, 2, 3) - Valores enquadrados nas normas.

Método	Clássico					Detecção de "out-liers"											
						t = 1,96						t variável					
Solo nº	N	Média	D.P.	C.V.	Dif.	N	Média	D.P.	C.V.	Dif.	t	N	Média	D.P.	C.V.	Dif.	t
1	8	2,615	0,012	0,5	0,023	9	2,620	0,009	0,3	0,025	1,92	12	2,617	0,015	0,6	0,051	-2,30
2	13	2,653	0,018	0,7	0,053	5	2,662	0,003	0,1	0,006	-1,63	16	2,659	0,022	0,8	0,087	-2,72
3	10	2,779	0,033	1,2	0,080	15	2,795	0,021	0,8	0,065	-1,96	19	2,782	0,032	1,1	0,098	5,27
4	9	2,833	0,054	1,9	0,131	12	2,846	0,022	0,8	0,024	-1,93	17	2,821	0,046	1,6	0,056	3,05
5	9	2,927	0,012	0,4	0,026	15	2,922	0,016	0,6	0,052	-1,42	16	2,919	0,019	0,6	0,066	-4,16
6	13	2,803	0,025	0,9	0,064	20	2,804	0,022	0,8	0,070	-1,79	-	-	-	-	-	-
7	9	2,869	0,014	0,5	0,034	19	2,850	0,039	1,4	0,156	2,35	-	-	-	-	-	-
8	9	2,678	0,010	0,4	0,027	10	2,678	0,007	0,3	0,022	1,88	11	2,677	0,009	0,3	0,032	2,07
9	15	2,664	0,025	0,9	0,059	16	2,654	0,020	0,8	0,065	1,88	-	-	-	-	-	-
10	10	2,608	0,017	0,7	0,033	12	2,604	0,013	0,5	0,067	1,71	16	2,603	0,020	0,8	0,078	-2,70
11	12	2,723	0,022	0,8	0,112	16	2,712	0,024	0,9	0,066	1,59	-	-	-	-	-	-
12	11	2,608	0,022	0,8	0,055	10	2,617	0,010	0,4	0,030	1,81	15	2,614	0,020	0,8	0,071	2,14
13	8	2,580	0,074	2,9	0,167	9	2,581	0,028	1,1	0,074	1,88	14	2,588	0,061	2,4	0,214	2,35
14	7	2,541	0,060	2,4	0,104	-	-	-	-	-	-	20	2,558	0,035	1,4	0,133	-3,25
15	8	2,537	0,082	3,2	0,203	-	-	-	-	-	-	16	2,520	0,064	2,5	0,222	2,29
16*	4	2,634	0,032	1,2	0,045	8	2,647	0,026	1,0	0,075	-1,93	10	2,634	0,035	1,3	0,107	-2,16

Tabela 6.9 - Resumo dos resultados de ensaio de densidade real obtidos por um mesmo operador.

(\*) Resultado obtido com o uso de álcool.

## CAPÍTULO 7

### ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ UTILIZANDO O CONE DE PENETRAÇÃO

#### 7.1 - Introdução

A aparelhagem usada para a determinação do limite de liquidez nas amostras nºs 3 a 14 teve as mesmas características que as utilizadas pelo Road Research Laboratory da Inglaterra (4) e pelo Laboratoire Central de Ponts et Chaussées da França (29). Este aparelho consiste em um penetrômetro, utilizado para medir o valor da penetração de betumes, convenientemente modificado. A modificação constou em substituir a agulha do penetrômetro por um cone de alumínio polido que tem uma altura de 35 mm e cujo ângulo é  $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$ . O peso do cone mais o eixo guia é de  $80g \pm 0,05g$ . O recipiente para conter o solo a ensaiar é também de alumínio - ou outro material apropriado - e suas dimensões são 55mm de diâmetro por 40mm de altura. A Figura 7.1a mostra uma vista geral do equipamento utilizado durante este trabalho e as Figuras 7.1b e 7.1c mostram o início e o final de um ensaio.

O procedimento seguido para a determinação do limite de liquidez dos solos ensaiados foi o mesmo que o recomendado por Sherwood (4) e Anon (29) e está apresentado em detalhe, no Apêndice E.

## 7.2 - Análise e discussão dos resultados

Para a obtenção dos resultados foi necessário em primeiro lugar pesquisar se as relações mais conhecidas propostas pelo LCPC e RRL seriam apropriadas para os solos utilizados neste estudo. Com este objetivo preparou-se um gráfico, igual ao proposto pelo LCPC, que consiste na relação logaritmo do teor de umidade do solo ensaiado versus o logaritmo da razão  $Q/h^2$ , onde  $Q$  é o peso do cone e  $h$  sua penetração correspondente àquela umidade. A Figura 7.2 apresenta esta relação para todos os solos ensaiados e mostra também a linha de calibração proposta pelo LCPC para obter os limites de liquidez. Esta linha de calibração deveria logicamente permitir a obtenção de limites de liquidez iguais aos obtidos com o aparelho de Casagrande. No entanto para os solos estudados pode-se verificar que os limites de liquidez obtidos com o aparelho de Casagrande caem, quase todos, abaixo desta linha.

Utilizando a função proposta pelo RRL, que consiste no estabelecimento de uma relação entre a profundidade de penetração do cone e a umidade do solo correspondente àquela profundidade, obtêm-se retas aproximadamente paralelas para os diferentes solos ensaiados, como se pode ver na Figura 7.3. A linha de calibração obtida pelos estudos no RRL é superposta nesta Figura. Pode-se ver que os valores obtidos com o aparelho de Casagrande são outra vez menores que os que se obteriam com a linha de calibração do RRL. É claro então, que para os solos ensaiados, dever-se-ia tentar uma linha de calibração mais aceitável. Isto foi feito usando-se simplesmente a técnica de regressão linear. A equação representativa da reta é:

$$h = 7,57 + 0,17 W$$

onde

$h$  - altura de penetração do cone

$W$  - teor de umidade para a penetração  $h$

O coeficiente de correlação linear  $|r|$  para a equação de regressão, foi igual a 0,62. Esta nova linha de calibração também é mostrada na mesma Figura 7.3.

A informação apresentada desta forma não dá uma idéia clara da real magnitude da variação dos limites de liquidez obtidos pelo método corrente, em relação aos valores de limite de liquidez obtidos com as curvas de calibração. Por isso nas Figuras 7.4a, 7.4b e 7.4c são mostradas as relações entre LL obtido da linha de calibração do LCPC versus LL Casagrande, LL obtido da linha de calibração do RRL versus LL Casagrande e LL obtido da linha de calibração com regressão linear versus LL Casagrande, respectivamente. Nestas Figuras os pontos traçados ficam afastados da linha de  $45^{\circ}$ , denotando claramente as diferenças; por exemplo, para a linha de calibração do RRL todos os valores de LL Casagrande, com exceção de um, foram menores que os valores de LL obtidos com a linha de calibração. Por outro lado, para a linha de calibração proposta pelo LCPC, as relações apresentam-se muito melhores. No entanto, para a linha de calibração deduzida durante esta pesquisa os valores de LL Casagrande versus LL Cone são os mais concordantes. É lógico que não se pode recomendar esta linha de correlação como definitiva desde que os solos foram limitados àqueles mais comuns no Estado da Paraíba. Dever-se-ia envolver maior quantidade de solos a fim de verificar sua validade. Entretanto, para os solos testados não há dúvida que esta linha de calibração é a melhor. Cabe mencionar aqui que Pinto et al (8), num trabalho realizado com solos da região Sul do Brasil, informaram que a linha de calibração do RRL parecia ser apropriada para obter os valores de LL com o Cone de Penetração. Esta informação é inteiramente contraditória à encontrada nesta pesquisa. Poder-se-ia dizer que tal contradição é devida ao intervalo de valores de limite de liquidez dos solos ensaiados. Para os solos testados nesta pesquisa, a variação entre os LL's obtidos com o cone e os LL's obtidos com o aparelho de Casagrande não é maior que 1% para os solos com limite de liquidez até 45%, no entanto para valores maiores as diferenças "vis a vis" são também maiores, como pode ser visto na Tabela 7.1.

### 7.3 - Repetibilidade do Ensaio de Limite de Liquidez utilizando o Cone de Penetração

O estudo de repetibilidade deste ensaio foi limitado aos solos de nºs 5, 7, 11 e 13; fizeram-se quatro ensaios por solo. Estes resultados são mostrados na Tabela 7.2 e a título de comparação mostram-se ainda os correspondentes resultados de limite de liquidez com o aparelho de Casagrande. Os coeficientes de variação para os valores do ensaio do cone são da mesma ordem que os valores para o ensaio do aparelho de Casagrande. A diferença entre os ensaios deste trabalho e os de Sherwood (4) é que nos deste último os solos foram sempre "curados" a fim de obter condições de homogeneidade na distribuição de umidade. Este parece ser um fator relevante ao se considerar que a variável do operador é diminuída em importância com a utilização do cone.

É evidente que os resultados desta pesquisa com o cone são muito limitados; no entanto pode-se dizer que a experiência realizada mostra que o cone se afigura com muito potencial como um substituto do aparelho de Casagrande. Além do exposto, vários tópicos de menor importância podem ser enfocados - que são frutos da experiência durante a realização dos ensaios e concordantes com outros pesquisadores - para reforçar a inclusão do cone como um método alternativo na determinação do limite de liquidez:

- a) a aparelhagem utilizada é encontrada facilmente nos laboratórios rodoviários e as adaptações não exigem qualquer dificuldade;
- b) o ensaio não requer qualquer experiência do operador que apenas seguindo os procedimentos das normas o executará normalmente;
- c) o tempo de execução do ensaio é sensivelmente menor que o de Casagrande, principalmente para os solos que requerem maiores cuidados;
- d) os tempos de cálculo são relativamente iguais e os pontos se alinham bem melhor que na curva de fluidez, não exigindo aquele ajustamento pessoal característico.

Figura 7.1a Vista geral do equipamento de determinação do limite de liquidez com o Cone de Penetração.

Figura 7.1b Início de um ensaio.

Figura 7.1c Final de um ensaio.



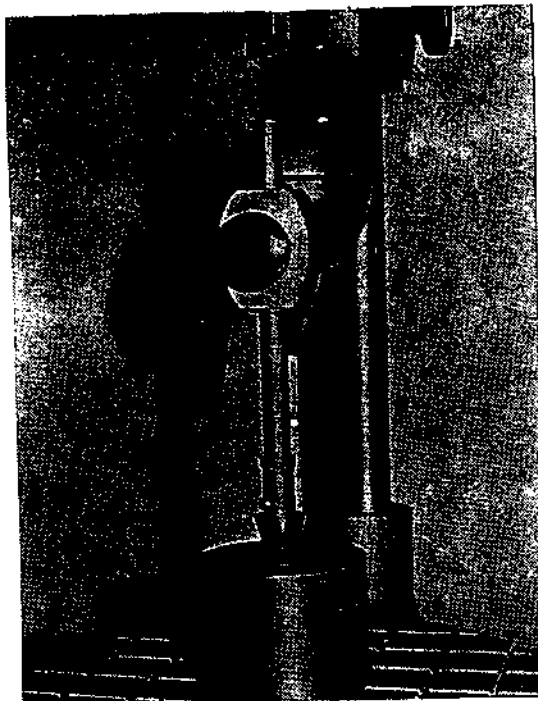
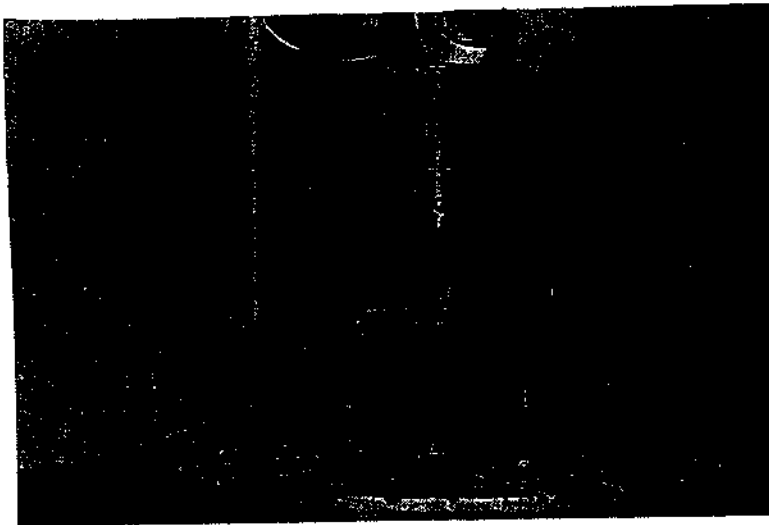
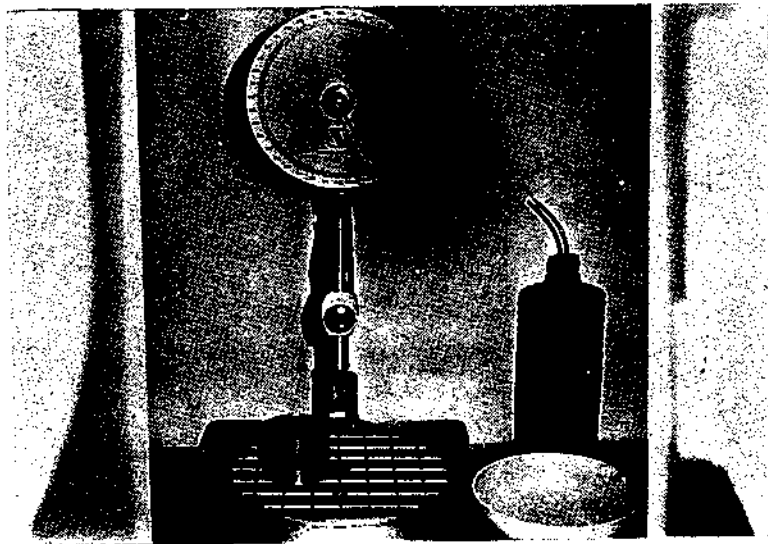
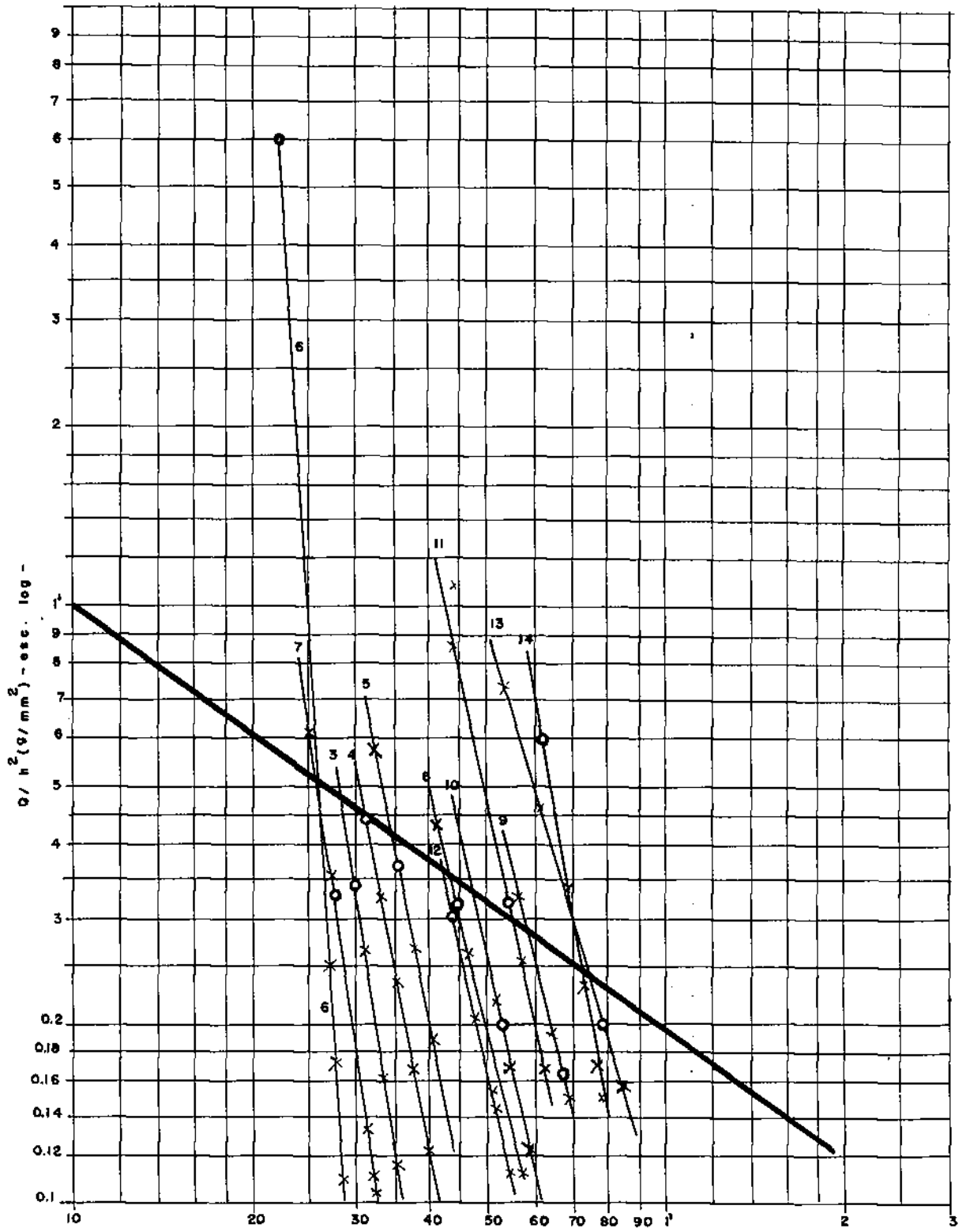


Figura 7.2 Relação entre a penetração (h) de um cone de peso (Q) e teor de umidade, para os solos ensaiados.

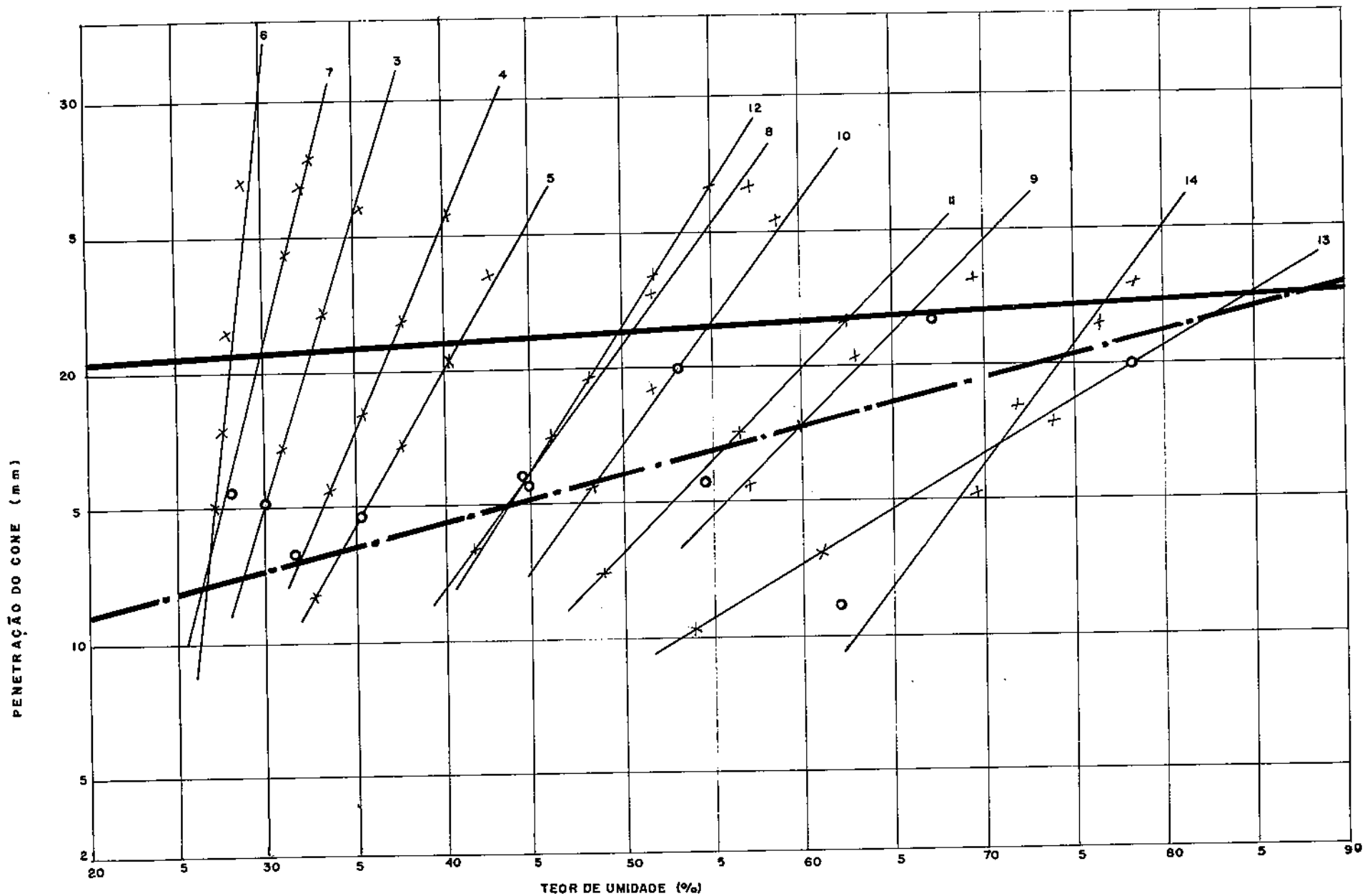


TEOR DE UMIDADE (%)-ESC. LOG.

— LINHA DE CALIBRAÇÃO USADA PELO LGPC

○ LIMITE DE LIQUIDEZ CONFORME ABNT

Figura 7.3 Relação entre a penetração do cone (h), o teor de umidade e o limite de liquidez dos solos.



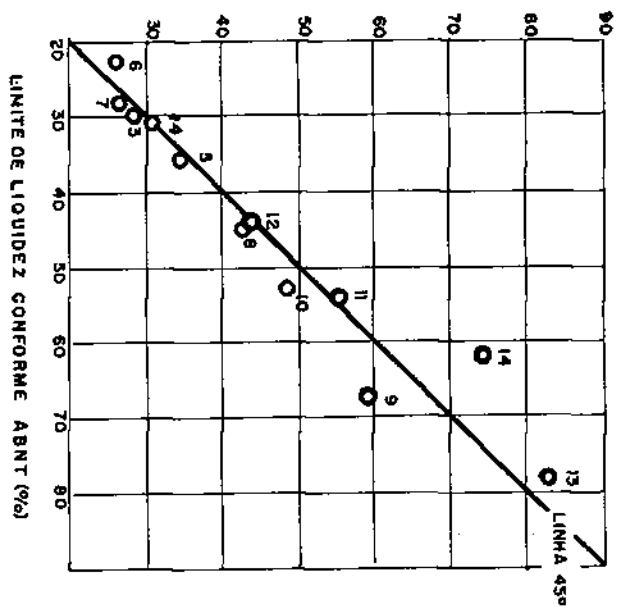
——— LINHA DE CALIBRAÇÃO USADA PELO RRL  
 - - - LINHA DE CALIBRAÇÃO COM REGRESSÃO LINEAR DETERMINADA NESTA PESQUISA  
 ○ LIMITE DE LIQUIDEZ CONFORME ABNT

Figura 7.4a Relação entre limite de liquidez determinado pelo cone de penetração com a linha de calibração do LCPC e conforme ABNT.

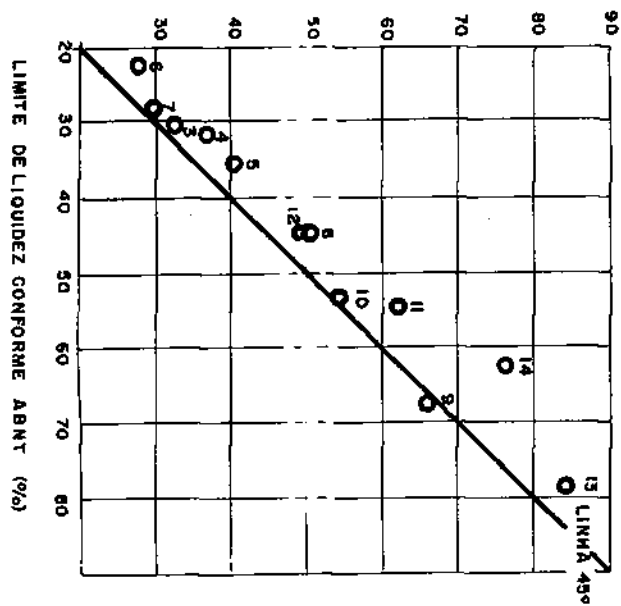
Figura 7.4b Relação entre limite de liquidez determinado pelo cone de penetração com a linha de calibração do RRL e conforme ABNT.

Figura 7.4c Relação entre limite de liquidez determinado pelo cone de penetração com a linha de calibração de rivada de regressão linear e conforme ABNT.

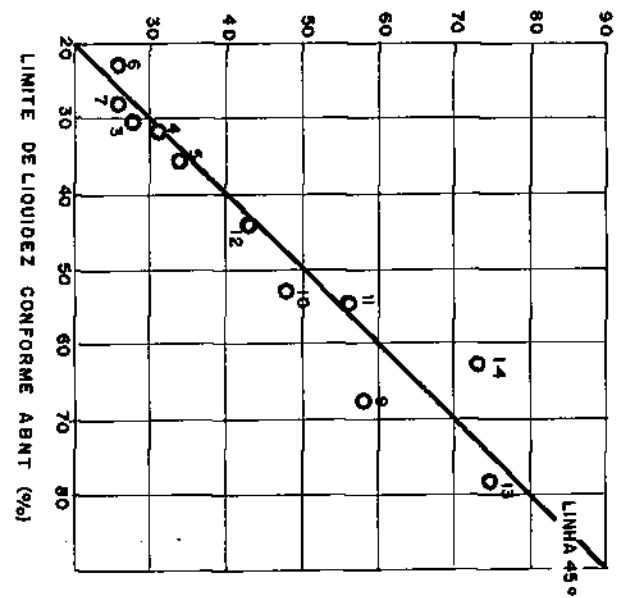
LIMITE DE LIQUIDEZ PELO CONE DE PENETRAÇÃO COM A LINHA DE GALIBRAÇÃO DETERMINADA NESTA PESQUISA (%)



LIMITE DE LIQUIDEZ PELO CONE DE PENETRAÇÃO COM A LINHA DE GALIBRAÇÃO DO RRL (%)



LIMITE DE LIQUIDEZ PELO CONE DE PENETRAÇÃO COM A LINHA DE GALIBRAÇÃO DO LGPC (%)



Solo Nº	Limite de Liquidez (%)	
	Cone de Penetração	Aparelho de Casagrande
3	28,6	29,8
4	31,4	31,6
5	34,4	35,2
6	26,5	22,6
7	26,2	27,8
8	43,0	44,6
9	59,4	67,1
10	48,5	53,0
11	55,6	54,5
12	43,4	44,1
13	83,0	78,2
14	74,6	62,1

Tabela 7.1 - Comparação entre os resultados dos limites de liquidez obtidos com o Cone de Penetração e com o aparelho de Casagrande.



Solo nº	Cone de Penetração				Aparelho de Casagrande			
	5	7	11	13	5	7	11	13
1 operador	34,4	26,2	55,6	83,0	35,2	25,8	53,0	77,5
	34,5	27,3	49,2	82,0	34,9	27,2	55,8	91,0
	34,1	25,8	51,8	82,6	35,4	24,6	51,0	72,8
	33,9	26,0	47,6	81,6	35,3	25,7	58,1	71,3
Média	34,2	26,3	51,1	82,3	35,2	25,8	54,5	78,2
D.P.	0,28	0,67	3,49	0,62	0,22	1,07	3,12	8,96
C.V.	0,82	2,55	6,83	0,75	0,63	4,15	5,72	11,46

Tabela 7.2 - Comparação entre a repetibilidade do limite de liquidez obtido com o cone de penetração e com o aparelho de Casagrande.

## CAPÍTULO 8

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DA REPRODUTIBILIDADE DOS ENSAIOS

#### 8.1 - Introdução

A definição de "reprodutibilidade" adotada neste trabalho é a mesma proposta por Brunshwig (1) e por Sherwood (2): o intervalo dentro do qual se fazem repetidas medidas dos valores de um ensaio por diferentes operadores em diferentes aparelhos.

Os laboratórios participantes nos ensaios de reprodutibilidade foram 16, incluindo o laboratório do CCT onde os ensaios de repetibilidade foram levados a efeito. Destes laboratórios, 3 foram de Universidades, 8 de Organizações Rodoviárias e 5 de Empresas Consultoras privadas.

#### 8.2 - Ensaio de Limite de Liquidez

A Tabela 8.1 apresenta os resultados do limite de liquidez obtidos para os 16 solos pelos 16 laboratórios participantes. A média, desvio-padrão e coeficiente de variação para cada solo foram obtidos dos valores de limite de liquidez, calculados para cada solo pelo método indicado nas normas utilizadas. Como se pode ver nesta Tabela, os coeficientes de variação são

muito altos em relação a valores reportados em outros países. Na realidade, em muitos solos, os valores de limite de liquidez variam em mais de 50%. Esta variação imensa e surpreendente nem se quer é atenuada com a idéia de que alguns laboratórios poderiam mostrar consistentemente tendências para valores extremos. As variações entre os laboratórios são aleatórias. A única exceção aparece nos resultados do solo nº 6, onde 7 laboratórios o indicaram como sem limite de liquidez; por este motivo o coeficiente de variação foi 104%; portanto, calculando-se a média, desvio-padrão e coeficiente de variação, sem levar em conta estes 7 laboratórios, o coeficiente de variação é reduzido para 7.3%, valor que é muito mais aceitável. No entanto para outros solos não foi possível fazer a mesma coisa desde que, como já se mencionou, as variações entre laboratórios não são consistentes mas aleatórias.

A Tabela 8.2 mostra os valores das médias, desvios-padrão e coeficientes de variação para os 16 solos, tanto para o ensaio de repetibilidade como para o de reprodutibilidade. Em todos os casos os coeficientes de variação foram maiores para os ensaios de reprodutibilidade. As causas para resultados tão ruins de reprodutibilidade não foram investigadas nos laboratórios onde estes foram executados. No entanto se pode dizer que as diferenças nos aparelhos usados (ver Tabela 5.1), desde que estes estivessem em boas condições de manutenção, não influenciariam grandemente os resultados. Isto foi mostrado por Sherwood (2) em seu estudo com solos da Inglaterra. Provavelmente os fatores que teriam grande influência em resultados tão desencorajadores seriam as más condições dos aparelhos e desgaste do equipamento de canelar; porém de maior importância parece ser o fato de que não há controle de tempo entre a homogeneização e o ensaio, nem controle do tempo de homogeneização. A isto deve-se somar o fator pessoal do operador.

Estes resultados mostram que o ensaio, como executado atualmente, deveria ser modificado ou melhor substituído. O cone de penetração apresenta-se como uma alternativa promissora para tal.

### 8.3 - Ensaio do Limite de Plasticidade

Se os resultados de limite de liquidez foram considerados ruins, os de limite de plasticidade são ainda piores. A Tabela 8.3 mostra estes resultados; neles pode-se ver que os coeficientes de variação são maiores que os do limite de liquidez. A variação de resultados entre laboratórios é ainda aleatória, não existindo laboratórios que consistentemente reportem valores extremos para todos os solos. Neste ensaio o fator pessoal do operador é a variável que tem maior influência. A Tabela 8.4 apresenta a comparação entre resultados de repetibilidade e reprodutibilidade. Observa-se que se os coeficientes de variação para os ensaios de repetibilidade foram considerados altos em relação a outros enunciados na literatura, os coeficientes de variação para os resultados de reprodutibilidade são ainda maiores.

À luz desses resultados é possível se afirmar que o ensaio de limite de plasticidade, da maneira como é executado no Brasil, tem muito pouca significação.

Os valores do Índice de Plasticidade, suas médias, desvios-padrão e coeficientes de variação são mostrados na Tabela 8.5. Os resultados são obviamente reflexo dos outros ensaios. Os coeficientes de variação são maiores ainda que os dos limites de liquidez e plasticidade. Como consequência tem-se que os intervalos de valores do IP variam em até 100% e em alguns casos em mais de 100%. Como exemplo, observe-se o solo nº 16: não obstante o coeficiente de variação ser um dos mais baixos dentro dos valores indicados na Tabela 8.5, o IP varia entre 228 e 492.

A Tabela 8.6 compara os valores das médias, desvios-padrão e coeficientes de variação dos resultados de repetibilidade e reprodutibilidade. Observação desta Tabela confirma outra vez a pobreza dos ensaios de reprodutibilidade.

As implicações destes resultados, em termos da utilização de valores destes ensaios, são muito sérias. No Brasil, como já se mencionou, o valor do IP é usado para determinar o valor da resistência em termos de CBR para projeto de pavimentos, é usado a fim de aceitar solos para a construção de sub-ba-

ses e bases e ainda para a estabilização com cimento. Não há dúvida da necessidade de uma ação imediata para modificar ou substituir a metodologia atual.

#### 8.4 - Análise Granulométrica

Na Tabela 8.7 é apresentada a reprodutibilidade dos valores das percentagens de areia, silte e argila determinados pelos laboratórios participantes, onde se mostra ainda os valores das médias, desvios-padrão, e coeficientes de variação. Estes foram obtidos usando-se os limites de separação entre areia, silte e argila indicados pela classificação da ABNT.

Como nos outros ensaios, claramente se nota a grande discrepância entre os resultados. De uma maneira geral, as maiores diferenças são percebidas nas percentagens de silte e argila, onde quase a metade dos solos apresenta coeficientes de variação em torno de 50%. Para os solos nºs 14, 15 e 16 houve discrepâncias anormais devido a que vários laboratórios não encontraram frações tamanho areia e silte.

A comparação entre os resultados da repetibilidade e da reprodutibilidade é mostrada na Tabela 8.8. Percebe-se que embora a repetibilidade não tenha sido boa, principalmente em relação à fração silte, a reprodutibilidade foi péssima. No entanto comparando-se as médias dos resultados do CCT (repetibilidade) com as respectivas médias dos resultados dos 16 laboratórios (reprodutibilidade), verifica-se que as médias das percentagens de areia, silte e argila não são muito diferentes, com exceção do solo nº 2.

De um modo geral o equipamento, defloculante, procedimentos e variantes dos ensaios realizados pelos laboratórios, como em parte se pode ver na Tabela 5.1 do Capítulo 5, é que são as causas de tão elevadas discrepâncias. Notadamente para o caso das percentagens de silte e de argila, é o pré-tratamento, ou seja, o defloculante utilizado, a maior causa de dificuldades na sedimentação, pois muitos solos finos apresentam for

te resistência à desagregação.

O problema de descontinuidade da curva granulométrica, observado para muitos dos solos pela maioria dos laboratórios, foi discutido no Capítulo VI; esta parece ser a causa mais importante para a variação dos resultados.

#### 8.5 - Densidade Real

Quatorze organizações tomaram parte na investigação de reprodutibilidade da densidade real, cujos valores e análise estatística são apresentados na Tabela 8.9.

De todos os ensaios este é o que apresentou menores discrepâncias, embora os solos nºs 4, 14, 15 e 16 tenham oferecido coeficientes de variação acima de 3%.

Pela Tabela 8.10 verifica-se que a variabilidade dos resultados inter-laboratórios é bem maior que em um mesmo laboratório e que as maiores discrepâncias ocorreram com os mesmos solos citados: nºs 4, 14, 15 e 16. A comparação entre os valores das médias da repetibilidade e da reprodutibilidade parece significativa.

As variações podem ser atribuídas às diferentes normas usadas pelos laboratórios e à insuficiência na remoção do ar entre as partículas, que em parte a Tabela 5.1 esclarece. A amostra nº 16, que forneceu média aparentemente pequena, indicou resultados mais coerentes para os laboratórios que usaram álcool ou querosene no lugar de água destilada e removeram o ar com bomba de vácuo.

CÓD. LAB.	S / O L O S															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	NL	NL	NL	28,0	35,0	NL	25,0	40,0	56,0	45,0	46,0	41,0	79,0	70,0	128,0	386,0
2	NP	NP	41,0	43,0	42,0	27,0	30,0	75,0	75,0	58,0	67,0	52,0	107,0	68,0	169,0	441,0
4	O	O	31,6	32,6	33,6	21,7	26,4	42,0	61,3	46,7	56,0	38,0	69,8	59,5	158,0	360,0
6	NL	NL	26,5	28,2	28,2	32,4	NL	24,2	38,0	59,1	43,3	42,1	47,4	83,2	130,2	316,5
7	NL	NL	29,0	30,0	32,0	N1	25,0	42,0	62,0	48,0	47,0	43,0	67,0	64,0	128,0	353,0
9	NP	NP	29,1	33,9	35,0	NP	25,5	44,7	69,1	50,0	51,4	47,4	84,1	62,3	139,8	300,0
10	NP	Np	30,0	34,0	35,0	NP	26,0	43,0	66,0	51,0	54,0	52,0	92,0	63,0	142,0	420,0
11	-	-	31,6	33,2	39,0	-	24,5	47,8	67,0	53,2	55,1	46,3	79,6	61,6	144,8	423,0
12	NP	NP	32,3	36,3	37,2	24,0	28,4	49,6	69,7	51,1	54,8	49,5	75,2	57,7	147,6	400,0
14	NP	NP	28,5	39,1	36,4	23,6	29,6	51,7	75,4	62,0	59,0	52,8	94,5	70,4	174,3	544,0
15	NL	NL	29,0	33,0	37,0	24,0	26,0	47,0	60,0	50,0	48,0	55,0	110,0	76,0	142,0	351,0
16	NL	NL	30,2	32,6	37,3	24,5	27,3	47,6	66,7	53,3	54,0	58,6	95,3	69,0	149,8	421,0
17	NL	NL	28,1	29,5	31,6	NL	23,4	41,4	64,8	50,7	44,2	56,3	87,4	65,2	141,0	335,0
18	NP	NP	31,4	32,5	35,5	21,7	26,2	45,1	68,3	50,4	55,8	48,1	92,3	61,3	142,5	370,4
19	NL	NL	27,7	28,0	32,1	NL	24,8	36,1	62,1	48,0	47,2	40,6	90,5	64,5	124,1	380,0
20	NP	NP	29,8	31,6	35,2	22,6	27,8	44,6	67,1	53,0	54,5	44,1	78,2	62,1	153,2	393,5
Média	NP	NP	28,5	32,8	35,4	11,8	26,3	44,8	65,6	50,9	52,3	48,3	86,6	63,5	144,6	387,2
D.P.			8,3	4,0	2,8	12,3	1,9	5,1	5,9	4,6	6,3	6,0	12,0	7,6	14,1	57,8
C.V.			29,1	12,2	7,9	104,2	7,2	11,4	9,0	9,0	12,0	12,4	13,9	11,6	9,8	14,9

Tabela 8.1 - Resultados de limite de liquidez obtidos pelos 16 laboratórios participantes.

SOLO Nº	LIMITE DE LIQUIDEZ (%)					
	Resultado mesmo Laboratório (repetibilidade)			Resultado diferentes Laboratórios (reprodutibilidade)		
	Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.
1	NP			NP		
2	NP			NP		
3	29,8	0,45	1,5	28,5	8,3	29,1
4	31,6	0,29	0,9	32,8	4,0	12,3
5	35,2	0,22	0,6	35,4	2,8	7,9
6	22,6	0,51	2,3	11,8	12,3	<del>104,2</del>
7	27,8	0,83	3,0	26,3	1,9	7,2
8	44,6	4,63	10,4	44,8	5,1	11,4
9	67,1	2,12	3,2	65,6	5,9	9,0
10	53,0	1,75	3,3	50,9	4,6	9,0
11	54,4	3,12	5,7	52,3	6,3	12,0
12	44,1	4,02	9,1	48,3	6,0	12,4
13	78,2	7,77	9,9	86,6	12,0	13,9
14	62,1	1,89	3,0	63,5	7,6	11,6
15	153,2	3,58	2,3	144,6	14,1	9,8
16	393,5	40,21	10,2	387,2	57,8	14,9
			9,7			13,7

Tabela 8.2 - Comparação entre os resultados de repetibilidade e de reprodutibilidade dos limites de liquidez.



CÓD. LAB.	S O L O S															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	NP	NP	NP	NP	20,0	NP	14,0	NP	22,0	19,0	17,0	16,0	25,0	NP	37,0	45,0
2	NP	NP	17,0	20,0	19,0	16,0	15,0	23,0	22,0	18,0	28,0	18,0	17,0	38,0	39,0	*
4	0	0	16,3	18,7	22,7	13,8	15,1	22,0	29,2	12,4	24,8	21,1	22,7	33,0	66,5	55,4
6	NP	NP	18,3	20,5	21,6	NP	18,1	23,8	30,2	24,2	23,9	24,9	33,4	24,6	68,2	65,4
7	NP	NP	21,0	22,0	24,0	NP	18,0	29,0	32,0	27,0	29,0	21,0	23,0	42,0	65,0	82,0
9	NP	NP	21,2	23,5	21,7	NP	17,4	26,8	32,3	24,9	29,6	18,8	24,7	38,6	61,6	72,0
10	NP	NP	23,0	27,0	26,0	NP	22,0	30,0	29,0	23,0	33,0	19,0	27,0	41,0	62,0	84,0
11	-	-	25,7	21,1	24,9	-	17,3	30,0	24,6	24,2	27,6	18,4	21,1	38,3	52,9	75,2
12	NP	NP	17,7	18,6	22,0	11,4	13,9	22,0	22,5	18,1	21,9	17,8	19,5	29,9	42,9	37,0
14	NP	NP	22,0	21,1	23,7	18,5	19,0	26,5	28,9	22,9	29,1	18,2	20,8	35,6	50,5	52,3
15	NP	NP	14,0	22,0	19,0	NP	13,0	NP	27,0	19,0	21,0	17,0	20,0	NP	52,0	56,0
16	NP	NP	21,1	22,7	23,3	19,7	19,4	27,8	29,0	22,9	29,4	20,8	21,1	34,5	52,7	*
17	NP	NP	19,1	24,4	25,5	NP	18,3	32,2	36,7	31,5	30,3	24,5	27,6	45,5	61,0	73,8
18	NP	NP	20,6	19,5	19,8	15,0	18,0	22,7	24,7	18,1	22,5	15,6	16,3	38,1	42,3	49,7
19	NP	NP	18,4	21,6	23,2	NP	18,4	25,2	32,5	26,8	26,9	21,4	27,7	40,1	52,0	73,7
20	NP	NP	21,2	22,6	23,1	16,2	17,1	25,8	26,7	19,3	27,7	19,8	18,0	35,0	49,4	50,2
Média	NP	NP	18,5	20,3	22,5	11,8	26,3	44,8	65,6	50,9	52,3	48,3	86,6	63,5	144,6	387,2
D.P.			5,7	5,8	2,2	12,3	1,9	5,1	5,9	4,6	6,3	6,0	12,0	7,6	14,1	57,8
C.V.			30,8	28,6	9,8	120,3	14,0	41,5	14,9	20,9	15,9	13,3	20,2	42,1	18,5	46,4

Tabela 8.3 - Resultados de limite de plasticidade obtidos pelos 16 laboratórios participantes.

(\*) Não foi possível executar dentro das normas.

SOLO Nº	LIMITE DE PLASTICIDADE (%)					
	Resultado mesmo Laboratório (repetibilidade)			Resultados diferentes Laboratórios (reprodutibilidade)		
	Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.
1	NP			NP		
2	NP			NP		
3	21,2	1,95	9,2	18,5	5,7	30,8
4	22,6	2,59	11,5	20,3	5,8	28,6
5	23,1	1,96	8,5	22,5	2,2	9,8
6	16,2	1,55	9,6	6,9	8,3	<del>120,3</del>
7	17,1	1,77	10,3	17,1	2,4	<del>14,0</del>
8	25,8	1,12	4,3	22,9	9,5	41,5
9	26,7	3,31	12,4	28,1	4,2	14,9
10	19,2	1,55	8,1	22,0	4,6	20,9
11	27,7	0,76	2,7	26,4	4,2	15,9
12	19,8	1,41	7,1	19,5	2,6	13,3
13	18,0	0,71	4,0	22,8	4,6	20,2
14	35,0	1,94	5,5	32,1	13,5	<del>42,1</del>
15	49,4	6,20	12,6	53,4	9,9	18,5
16	50,2	4,24	8,4	54,5	25,3	46,4

Tabela 8.4 - Comparação entre os resultados de repetibilidade e de reprodutibilidade dos limites de plasticidade.

CÓD. LAB.	S O L O S															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	NP	NP	NP	NP	15,0	NP	11,0	NP	34,0	26,0	29,0	25,0	54,0	NP	91,0	341,0
2	NP	NP	24,0	23,0	23,0	11,0	15,0	33,0	53,0	40,0	39,0	34,0	90,0	30,0	130,0	-
4	NP	NP	15,3	13,9	10,9	7,9	11,3	20,0	32,1	34,3	31,2	16,9	47,1	26,5	91,5	304,6
6	NP	NP	8,2	7,7	10,8	NP	6,1	14,2	28,9	19,1	17,2	23,1	50,2	16,4	62,0	251,1
7	NP	NP	8,0	8,0	8,0	NP	7,0	13,0	30,0	21,0	18,0	22,0	44,0	22,0	63,0	271,0
9	NP	NP	7,9	10,4	13,3	NP	8,1	17,9	36,8	25,1	21,8	28,6	59,4	23,7	78,2	228,0
10	NP	NP	7,0	7,0	9,0	NP	4,0	13,0	37,0	28,0	21,0	33,0	65,0	22,0	80,0	336,0
11	NP	NP	5,9	12,1	14,1	NP	7,2	17,8	42,4	29,0	27,5	27,9	58,5	23,3	91,9	347,8
12	NP	NP	14,6	17,7	15,2	12,6	14,5	27,6	42,6	33,0	32,9	31,7	55,7	27,8	104,7	363,0
14	NP	NP	6,5	17,0	12,7	5,1	10,6	25,2	46,5	39,1	29,9	34,6	73,7	34,8	123,8	491,7
15	NP	NP	15,0	11,0	18,0	NP	13,0	NP	33,0	31,0	27,0	38,0	90,0	NP	90,0	295,0
16	NP	NP	9,1	9,9	14,0	4,8	7,9	19,7	37,7	30,4	24,6	37,8	74,2	34,5	97,1	-
17	NP	NP	9,0	5,1	6,1	NP	5,1	9,2	28,1	19,2	13,9	31,8	59,8	19,7	80,0	261,2
18	NP	NP	10,8	13,0	15,7	6,7	8,2	22,4	43,6	32,3	33,3	32,5	76,0	23,2	100,2	320,7
19	NP	NP	9,3	6,4	8,9	NP	6,4	10,9	29,6	21,2	20,3	19,2	62,8	24,1	72,1	306,3
20	NP	NP	7,9	9,0	12,1	6,6	8,1	21,4	40,6	33,7	26,8	22,8	60,4	26,2	103,9	345,8
Média	NP	NP	9,9	10,7	12,9	3,4	9,0	16,6	37,2	28,9	25,8	28,7	63,8	22,1	91,2	318,8
D.P.			5,3	5,5	4,2	4,4	3,3	9,0	7,1	6,6	6,8	6,5	13,7	9,9	19,1	64,2
C.V.			53,5	51,4	36,2	129,4	36,7	54,2	19,1	22,8	26,4	22,6	21,5	44,8	20,9	20,1

Tabela 8.5 - Resultados de Índice de plasticidade obtidos pelos 16 laboratórios participantes.

SOLO Nº	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)					
	Resultado mesmo Laboratório (repetibilidade)			Resultado diferentes Laboratórios (reprodutibilidade)		
	Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.
1	NP			NP		
2	NP			NP		
3	7,9	1,25	15,8	9,9	5,3	53,5
4	9,0	2,48	27,6	10,7	5,5	51,4
5	12,1	1,95	16,1	12,9	4,2	32,6
6	6,6	1,71	25,9	3,4	4,4	<del>129,4</del>
7	8,1	2,17	26,8	9,0	3,3	36,7
8	21,4	7,71	36,1	16,6	9,0	54,2
9	40,6	5,65	13,9	37,2	7,1	19,1
10	33,7	2,25	6,7	28,9	6,6	22,8
11	26,8	3,70	13,8	25,8	6,8	26,4
12	22,8	0,76	3,3	28,7	6,5	22,6
13	60,4	-	-	63,8	13,7	21,5
14	26,2	2,02	7,7	22,1	9,9	44,8
15	103,9	8,57	8,3	91,2	19,1	20,9
16	345,8	44,09	12,8	318,8	64,2	20,1

Tabela 8.6 - Comparação entre os resultados de repetibilidade e de reprodutibilidade dos índices de plasticidade.

SOLOS		1			2			3			4			5			6		
Cód. Lab.	Fra- ções	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.
		1	80	11	9	90	4	6	69	18	13	66	18	16	58	19	23	64	21
2	80	6	14	73	10	17	53	23	24	46	19	35	64	16	20	44	18	38	
4	69	18	13	84	8	8	65	20	15	29	22	49	30	14	56	57	16	27	
6	83	11	6	95	2	3	74	16	10	60	16	24	62	18	20	72	18	10	
7	79	12	9	92	4	4	67	21	12	57	20	23	52	20	28	66	19	15	
9	75	18	7	89	7	4	66	23	11	48	14	38	40	15	45	18	16	66	
11	77	6,4	16,6	82	5,4	12,6	45	24,8	30,2	42	14,1	43,9	45	11,2	43,9	46	14	40	
12	80	14	6	91	7	2	69	20	11	40	16	44	55	19	26	68	18	14	
14	76	15	9	87	8	5	62	23	15	50	23	27	42	22	36	61	22	17	
16	76	19	5	88	11	1	56	32,5	11,5	23,5	46,5	30	32	35,5	32,5	29	53,5	17,5	
18	91	4,5	4,5	97	1	2	83	8	9	69	8	23	65	7	28	80	8	12	
19	84	10	6	94	4	2	73	14	13	56	13	31	49	12	39	73	12	15	
20	80,4	11,3	8,3	90,3	5,4	4,4	67,8	21,7	10,5	52,7	14,3	32,8	40,5	23,9	38,1	63,9	20,4	15,8	
Média	79,3	12	8,7	57,1	19,7	23,3	65,4	20,4	14,3	49,2	18,8	32,1	48,8	17,9	33,5	57,1	19,7	23,3	
D.P.	5,2	4,7	3,7	18,1	10,9	16	9,8	5,8	6,1	13,3	9,3	9,7	11,7	7	10,8	18,1	10,9	16,0	
C.V.	6,6	39,2	42,5	31,7	55,3	68,7	15	28,4	42,7	27	49,5	30,2	24	39,1	32,2	31,7	55,3	68,7	

Tabela 8.7 - Continua

SOLOS	7			8			9			10			11			12		
Cód. Lab. / Frações																		
1	59	16	25	60	20	20	24	35	41	34	18	48	51	19	30	67	12	21
2	48	19	33	46	22	32	22	6	72	31	15	54	33	16	51	69	10	21
4	34	16	50	44	19	37	0	3	97	6	19	75	16	14	70	52	16	32
6	50	23	27	62	22	16	31	11	58	34	19	47	47	23	30	66	13	21
7	53	20	27	56	20	24	24	10	66	30	19	51	42	22	36	72	10	18
9	33	16	51	29	20	51	28	3	69	36	16	48	44	18	38	70	10	20
11	40	15,1	44,9	53	17,3	29,7	-	-	-	23	17	60	15	17,1	67,9	70	8	22
12	58	13	29	62	16	22	26	9	65	34	17	49	42	17	41	70	13	17
14	47	15	38	54	16	30	16	6	78	23	20	57	30	18	52	64	12	24
16	39,5	30,5	30	41,5	32,5	26	20	12	68	31	21,5	47,5	20	36	44	60,5	23	16,5
18	76	9	15	69	9	22	43	4	53	48	11	41	52	11	37	87	3	10
19	57	11	32	63	15	22	42	7	51	43	13	44	49	11	40	78	8	14
20	16,5	31,9	31,9	56,4	21,3	24,9	19,4	6,1	74,5	23,1	21,4	58	39,6	15,8	44,6	69,4	9,1	21,5
Média	49,7	16,9	33,4	53,5	19,2	27,4	24,6	9,3	66	30,5	17,5	52,3	37	18,3	44,7	68,8	11,3	19,9
D. P.	11,7	5,5	10,3	10,9	5,4	9	11,4	8,6	14,5	10,4	3,1	8,8	13,1	6,4	12,7	8,3	4,7	5,3
C. V.	23,5	32,5	30,8	20,4	28,1	32,8	46,3	92,5	22	34,1	17,7	16,8	35,4	35	28,4	12,1	41,6	26,6

Tabela 8.7 - Continua

SOLOS	13			14			15			16		
Cód. Lab.	Frações			Frações			Frações			Frações		
	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.
1	59	12	29	13	3	84	16	8	76	8	2	90
2	59	10	31	0	7	93	2	9	89	1	4	95
4	42	13	45	0	0	100	-	-	-	-	-	-
6	67	6	27	8	7	85	-	-	-	-	-	-
7	58	13	29	3	7	90	13	6	81	2	6	92
9	65	9	26	11	4	85	15	3	82	10	0	90
11	55	2,7	42,3	12	1,4	86,6	0	86,5	13,5	0	90,5	9,5
12	61	12	27	8	8	84	9	5	86	8	0	92
14	55	10	35	0	2	98	0	0	100	0	0	100
16	55,5	16,5	28	0	10	90	8	23	69	6	7,5	86,5
18	80	3	17	17	3	80	13	0	87	3	4	93
19	67	9	24	18	5	77	26	0	74	27	0	73
20	56,4	9,2	34,5	0	8,5	91,5	12,2	0	88,1	4,5	1,5	94
Média	60	9,7	30,4	6,9	5,1	88,0	10,4	12,8	76,9	6,3	10,5	83,2
D. P.	8,8	4,0	7,5	6,8	3,1	6,6	7,8	25,4	22,6	7,7	26,7	25,4
C. V.	14,7	41,2	24,7	98,6	60,8	7,5	75	198,4	29,4	121,8	254,3	30,5

Tabela 8.7 - Resultados de Análise Granulométrica obtidos pelos laboratórios participantes.

SOLO Nº	Frações	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA					
		Resultado mesmo Laboratório (repetibilidade)			Resultado diferentes Laboratórios (reprodutibilidade)		
		Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.
1	Ar	80,4	3,60	4,5	79,3	5,2	6,6
	S	11,3	4,54	40,2	12,0	4,7	39,2
	Ag	8,3	1,10	13,3	8,7	3,7	42,5
2	Ar	90,3	1,04	1,2	57,1	18,1	31,7
	S	5,4	1,11	20,6	19,7	10,9	55,3
	Ag	4,4	1,75	39,8	23,3	16,0	68,7
3	Ar	67,8	2,91	4,3	65,4	9,8	15,0
	S	21,7	2,91	13,4	20,4	5,8	28,4
	Ag	10,5	3,26	31,0	14,3	6,1	42,7
4	Ar	52,7	2,78	5,3	49,2	13,3	27,0
	S	14,3	4,87	34,1	18,8	9,3	49,5
	Ag	32,8	2,87	8,8	32,1	9,7	30,2
5	Ar	40,5	1,47	3,6	48,8	11,7	24,0
	S	23,9	3,50	14,6	17,9	7,0	10,8
	Ag	38,1	1,75	4,6	33,5	10,8	32,2
6	Ar	63,9	5,51	8,6	57,1	18,1	31,7
	S	20,4	4,42	21,7	19,7	10,9	55,3
	Ag	15,8	1,85	11,7	23,3	16,0	68,7
7	Ar	51,1	3,12	6,1	49,7	11,7	23,5
	S	16,5	2,65	16,1	16,9	5,5	32,5
	Ag	31,9	1,93	6,1	33,4	10,3	30,8
8	Ar	56,4	3,30	5,9	53,5	10,9	20,4
	S	21,3	6,96	32,7	19,2	5,4	28,1
	Ag	24,9	1,11	4,5	27,4	9,0	32,8
9	Ar	19,4	2,14	11,0	24,6	11,4	46,3
	S	6,1	1,55	25,3	9,3	8,6	92,5
	Ag	74,5	0,71	1,0	66,0	14,5	22,0
10	Ar	23,1	1,55	6,7	30,5	10,4	34,1
	S	21,4	4,11	19,2	17,5	3,1	17,7
	Ag	58,0	0,82	1,4	52,3	8,8	16,8

Tabela 8.8 - Continua



SOLO Nº	Frações	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA					
		Resultado mesmo Laboratório (repetibilidade)			Resultado diferentes Laboratórios (reprodutibilidade)		
		Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.
11	Ar	39,6	2,81	7,1	37,0	13,1	35,4
	S	15,8	2,18	13,8	18,3	6,4	35,0
	Ag	44,6	1,60	3,6	44,7	12,7	28,4
12	Ar	69,4	2,06	3,0	68,8	8,3	12,1
	S	9,1	2,63	28,8	11,3	4,7	41,6
	Ag	21,5	0,91	4,2	19,9	5,3	26,6
13	Ar	56,4	4,07	7,2	60,0	8,8	14,7
	S	9,2	3,97	43,2	9,7	4,0	41,2
	Ag	34,5	2,08	6,0	30,4	7,5	24,7
14	Ar	-	-	-	6,9	6,8	98,6
	S	8,5	0,91	10,7	5,1	3,1	60,8
	Ag	91,5	0,91	1,0	88,0	6,6	7,5
15	Ar	12,2	1,84	15,1	10,4	7,8	75,0
	S	-	-	-	12,8	25,4	198,4
	Ag	88,1	1,76	2,0	76,9	22,6	29,4
16	Ar	4,5	2,37	52,7	6,3	7,7	121,8
	S	1,5	1,00	66,7	10,5	26,7	254,3
	Ag	94,2	2,11	2,2	83,2	25,4	30,5

Tabela 8.8 - Comparação entre os resultados de repetibilidade e de reprodutibilidade das frações areia, silte, e argila, segundo a classificação da ABNT.

CÓD. LAB.	S O L O S															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2,56	2,62	2,73	2,78	2,83	2,80	2,82	2,65	2,46	2,46	2,64	2,56	2,48	2,48	2,47	2,44
2	2,65	2,71	2,87	2,95	2,99	2,90	2,95	2,72	2,70	2,68	2,73	2,70	2,70	2,67	2,79	2,86
4	2,64	2,69	2,73	2,73	2,75	2,71	2,71	2,74	2,60	2,60	2,70	2,63	2,67	2,71	2,28	2,76
6	2,60	2,64	2,77	2,86	2,93	2,78	2,79	2,67	2,59	2,58	2,55	2,57	-	2,38	2,47	2,55
7	2,62	2,69	2,85	2,85	2,93	2,85	2,89	2,70	2,70	2,62	2,69	2,62	2,62	2,50	2,50	2,46
9	2,67	2,70	2,91	2,91	2,96	2,89	2,92	2,71	2,62	2,65	2,69	2,70	2,61	2,57	2,49	2,56
11	2,62	2,68	2,80	2,83	2,81	2,83	2,87	2,69	2,64	2,61	2,69	2,60	2,56	2,54	2,25	2,41
12	2,65	2,70	2,86	2,92	2,94	2,86	2,93	2,76	2,69	2,66	2,73	2,67	2,66	2,59	2,66	2,58
14	2,62	2,65	2,81	2,91	2,92	2,82	2,76	2,70	2,62	2,56	2,68	2,67	2,63	2,65	2,68	2,69
16	2,65	2,72	2,83	2,94	2,96	2,88	2,94	2,73	2,67	2,64	2,73	2,66	2,66	2,63	2,67	*2,77
17	2,67	2,85	2,75	2,97	2,97	2,86	2,86	2,72	2,49	2,49	2,52	2,63	2,63	2,60	2,55	2,04
18	2,62	2,70	2,85	2,90	2,92	2,85	2,94	2,74	2,67	2,63	2,72	2,65	2,68	2,58	2,49	2,50
19	2,63	2,82	2,94	2,63	2,79	2,80	2,79	2,78	2,63	2,60	2,80	2,69	2,66	2,50	2,17	2,39
20	2,62	2,65	2,78	2,83	2,93	2,80	2,87	2,68	2,66	2,61	2,72	2,61	2,58	2,54	2,54	*2,63
Média	2,63	2,70	2,82	2,86	2,90	2,83	2,86	2,71	2,62	2,60	2,69	2,64	2,63	2,57	2,50	2,55
D.P.	0,03	0,06	0,06	0,09	0,07	0,05	0,08	0,04	0,07	0,06	0,07	0,05	0,06	0,09	0,17	0,20
C.V.	1,1	2,2	2,1	3,2	2,4	1,8	2,8	1,5	2,7	2,3	2,6	1,9	2,3	3,5	6,8	7,8

Tabela 8.9 - Resultados de densidade real obtidos pelos laboratórios participantes.

(\*) Resultado obtido com o uso do álcool.

SOLO Nº	D E N S I D A D E R E A L					
	Resultado mesmo Laboratório (repetibilidade)			Resultado diferentes Laboratórios (reprodutibilidade)		
	Média	D.P.	C.V.	Média	D.P.	C.V.
1	2,62	0,0123	0,5	2,63	0,03	1,1
2	2,65	0,0184	0,7	2,70	0,06	2,2
3	2,78	0,0333	1,2	2,82	0,06	2,1
4	2,83	0,0538	1,9	2,86	0,09	3,2
5	2,93	0,0116	0,4	2,90	0,07	2,4
6	2,80	0,0245	0,9	2,83	0,05	1,8
7	2,87	0,0137	0,5	2,86	0,08	2,8
8	2,68	0,0101	0,4	2,71	0,04	1,5
9	2,66	0,0250	0,9	2,62	0,07	2,7
10	2,61	0,0169	0,7	2,60	0,06	2,3
11	2,72	0,0222	0,8	2,69	0,07	2,6
12	2,61	0,0215	0,8	2,64	0,05	1,9
13	2,58	0,0742	2,9	2,63	0,06	2,3
14	2,54	0,0598	2,4	2,57	0,09	3,5
15	2,54	0,0818	3,2	2,50	0,17	6,8
16	2,63*	0,0321	1,2	2,55	0,20	7,8

Tabela 8.10 - Comparação entre os resultados de repetibilidade e de reprodutibilidade da densidade real, obtidos pelo método clássico.

(\*) Alcool e bomba de vácuo.

## CAPÍTULO 9

### CONCLUSÕES

À luz dos resultados analisados e discutidos nesta pesquisa, pode-se chegar às seguintes conclusões:

1. O aspecto mecânico da determinação do Limite de Liquidez precisa ser melhorado ou modificado. A aparelhagem de Casagrande e os cinzéis em uso apresentam inconvenientes que causam variações nos resultados dos ensaios.

Embora em termos de repetibilidade as variações tenham sido equivalentes as de outros pesquisadores(2), com relação à reprodutibilidade os resultados são desencorajadores.

Não são as diferenças relativas às diversas marcas de equipamento usados e principalmente a negligência em termos de seu desgaste, como em muito maior escala a falta de clareza das normas brasileiras e a omissão de tópicos importantes como tempo de homogeneização e tempo de cura são fatores que merecem ser analisados e aclarados com absoluta seriedade.

O método de tentativa usado na obtenção do Limite de Liquidez, quando se traça a curva de fluidez, não fornece diferenças apreciáveis quando comparadas com os resultados obtidos pela utilização da técnica simples de regressão linear.

O ensaio de Limite de Liquidez determinado pelo Cone de Penetração se apresenta como um método alternativo bastante promissor por que resolve o problema fundamental que é a obtenção deste parâmetro através de um ensaio de cisalhamento estático. Além do mais, a aparelhagem é bastante simples, o tempo de execução e cálculo é sensivelmente menor que o ensaio de Casagrande e a influência do operador também diminui muito.

Em termo de repetibilidade não foram encontrados coeficientes de variação melhores que os dos ensaios com o aparelho de Casagrande - ao contrário de outros pesquisadores (4, 8) - embora tal estudo tenha sido restrito apenas a quatro solos.

2. A variabilidade do ensaio de Limite de Plasticidade foi surpreendente, sendo que as variações entre laboratórios (reprodutibilidade) superaram em muito as variações em um mesmo laboratório (repetibilidade).

A bibliografia consultada reporta coeficientes de variação bem menores que os encontrados nesta pesquisa.

A verificação do procedimento das normas brasileiras que determina a eliminação de todos os valores afastados da média  $\pm 5\%$  foi feita através da técnica estatística conhecida como detecção de "out-liers"; para uma confiabilidade de 95% houve uma melhora na repetibilidade embora em termos práticos os valores das médias não sejam influenciados.

O Índice de Plasticidade, que é função dos LL's e LP's, logicamente forneceu variações altas tanto para a repetibilidade como principalmente para a reprodutibilidade.

3. Observou-se uma boa repetibilidade para a fração areia e uma pobre repetibilidade para as frações silte e argila; em muito maior escala foi a pobreza da reprodutibilidade, sendo com maior ênfase na fração silte.

Esta alta variabilidade parece ter origem na

própria metodologia do ensaio que causa descontinuidade na curva granulométrica entre os diâmetros correspondentes a 75 e 40 microns. Além disto, as normas brasileiras não indicam pré-tratamento das amostras com um composto ácido a fim de eliminar a matéria orgânica ou materias cimentícias que contribuem para a aderência entre as partículas. A espuma formada em muitos solos, devida à agitação mecânica e manual, dificulta as leituras densimétricas contribuindo ainda mais para as variações.

Outro fator de destaque para a pobre repetibilidade é sem dúvidas a miscelânea de equipamentos, materiais e procedimentos utilizados.

4. A grande dificuldade no ensaio de Densidade Real reside na remoção do ar entre as partículas, necessitando portanto, para muitos solos, o uso de um líquido não polar (álcool, que rosene) em lugar da água, aspecto que as normas brasileiras omitem.

A verificação da exigência da norma DNER-DPT M 93-64, de que "o resultado do ensaio só será considerado' quando obtido pela média de duas determinações, no mínimo, e quando não diferirem de 0,009" resultou que este valor é bastante alto, ao se utilizar a técnica de detecção de "outliers", devendo este valor ser modificado pelo menos em uma casa decimal.

De todo os ensaios, a determinação da Densidade Real foi que apresentou a menor variabilidade, tanto em termos de repetibilidade como em termos de reprodutibilidade, confirmando o enunciado por outros investigadores citados na bibliografia.

5. A grande variabilidade dos resultados nesta pesquisa mostra claramente a duvidosa utilidade destes ensaios para propósitos de classificação e aceitação de solos para um determinado uso. Torna-se então, não só necessário mas imperativo reformar as normas brasileiras com o propósito de serem melhor definidas e apresentadas corrigindo os pontos falhos e adicionando os aspectos omissos.

Ao mesmo tempo parece ao autor deste trabalho que um SEMINÁRIO NACIONAL sobre "metodologias de ensaios de materiais", seria de grande importância no avanço e melhora nas técnicas empregadas atualmente pelos laboratórios brasileiros.

## CAPÍTULO 10

### SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Tendo em vista as conclusões encontradas nesta pesquisa, apresentam-se alguns tópicos cujos estudos futuros seriam de grande interesse para a continuação deste trabalho:

1. Estudos sobre repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio de Limite de Liquidez utilizando o Cone de Penetração, com solos provenientes de todas as regiões do Brasil.
2. Estudos sobre métodos alternativos para obtenção do Limite de Plasticidade como por exemplo viscosímetros industriais modificados apropriadamente.
3. Estudos detalhados sobre metodologias alternativas para pré-tratamento de solos e equipamentos diferentes para a determinação de sua Distribuição Granulométrica.
4. Pesquisas para melhorar a eficiência de evacuação de ar nas amostras de solos para determinação de Densidade Real.
5. Pesquisas sobre a variabilidade de resultados para outros ensaios de solos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. Brunschwig, G., Fidélité, répétabilité, reproductibilité des méthodes d'essai, Bulletin de Liaison n° 17, pp.85-90, ref. 1439, LCPC, Paris, 1974.
02. Sherwood, P.T., The reproducibility of the results of soil classification and compaction tests, RRL, Report LR 339, Crowthone, 1970.
03. Penna de Carvalho, J.P., Reprodutibilidade dos ensaios de solos em pavimentação, DER-BA, Salvador, 1972 (trabalho apresentado à II ROR, Brasília, 1972).
04. Sherwood, P.T. and Ryley, M.D., An examination of cone-penetrometer methods for determining the liquid limit of soils, RRL, Report LR 233, London, 1968.
05. Kumapley, N.K. and Inkabi, K.E., The influence of cup friction and grading on the liquid limits of some ghanaiian soils, TRB, n° 497, 1974.
06. Liu, T.K. and Thornburn, T.M., Study of the reproducibility of Atterberg Limits, HRR n° 63, pp. 22-31, 1964.
07. Shook, J.F. and Fang, H. Y., A study of operator variability in the determination of liquid and plastic limits of soils, HRA, vol. 31, n° 9, pp. 26-28, Special Paper, 1961.
08. Pinto, S. e Castro, P.F., Determinação do limite de liquidez pelo método do cone de penetração, DNER, Rio de Janeiro, 1971.
09. Leflaive, E., Les limites d'atterberg et le pēnētromētre à cōne, Bulletin de Liaison n° 50, pp.123-131, ref. 972, LCPC, Paris, 1971.
10. Pinto, C.S. e Massad, F., A resistēncia ao cisalhamento dos

solos variegados da cidade de São Paulo, Revista Politécnica nº 176, 1971.

11. Bogossian, F. e Lima, S.A. de, Sobre os limites de consistência das argilas orgânicas, ABMS - Anais do V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, vol. II, pp.293-299, São Paulo, 1974.
12. Cabrera, J.G., Queiroz, J.B. e Valdês, B.S., Relação entre algumas propriedades intrínsecas e de engenharia de uma argila orgânica do Recife. Anais do V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Vol. II, p.211-223, Buenos Aires, 1975.
13. Uppal, H.L. and Aggarwal, H.R., A new method of determining liquid limit of soils, Central Road Research Institute, Road Research Paper, nº 19, New Delhi, 1958.
14. Togrol, E., A statistical determination of the reliability of plastic and liquid limits of soils, Bulletin of the Technical University of Istanbul, 1961.
15. Ballard, G.E.H. and Weeks, W.F., The human factor in determining the plastic limit of cohesive soils, Material Research & Standards, pp.726-729, sept. 1963.
16. Casagrande, A., Research on the Atterberg limits of soils, Public Roads, vol. 13, nº 8, 1932.
17. Casagrande, A., Notes on the design of the liquid limit device, Géotechnique, 8:2:84-91, 1958.
18. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-DNER, Manual de Pavimentação, vol. nº 1, Rio de Janeiro, 1964.
19. Norman, L.E.J., A comparison of values of liquid limit determined with apparatus having bases of different hardness, Géotechnique, 8:2:79-83, 1958.

20. Feda, J. and Skopek, J., *Géotechnique*, 9:1:30-31, 1959 (correspondence).
21. Tesorieri, G., Considerazioni sulla determinazione dei limiti di Atterberg (some considerations of the determination of the Atterberg limits), *Géotechnica*, 4:1:16-24, 1957.
22. KOHOUTEK, J., Pruzkumné práce zemní v lomech (soil investigation in coal pits) Internal Report, Banský Projekt, Praha, 1957.
23. Norman, L.E.J., *Géotechnique*, 9:3:143-145, 1959 (correspondence).
24. Sowers, G.G., Vesic, A. and Grandolfi, M., Penetration tests for liquid limit, ASTM, Special Technical Publication, n° 254, pp. 216-226, 1960.
25. Freitas Junior, M.S., Limites de consistência: correlações e causas principais de erros de interpretações, ABMS- Anais do V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, vol. II, pp. 163-176, São Paulo, 1974.
26. Hansbo, S., A new approach to the determination of the shear strength of clays by the fall-cone test, Royal Swedish Geotechnical Institute Proceedings, n° 14, Stockholm, 1957.
27. Karlsson, R., Suggested improvements in the liquid limit test with reference to flow properties of remoulded clays, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech., vol. I, 171-184, Paris, 1961.
28. Skopek, J., Beziehung zwischen der fließgrenze der boden nach Wassiljew und nach Casagrande (correlation between liquid limit values according to Vasilyev and Casagrande), Proc. 4th Conf. Soil Mech., pp. 307-314, Budapest, 1971.
29. Anon, Détermination rapide des limites d'Atterberg à l'aide d'un pénétromètre et d'un picnomètre d'air, Dossier SGR/149,

- LCPC, Paris, 1966.
30. Paute, J.L. et Mace, Y., Le pēnētromētre de consistance, evaluation de la consistance des sols fins, Bulletin de Liaison n° 33, pp. 105-116, ref.540, LCPC, Paris, 1968.
  31. Scherrer, H.U., Determination of liquid limit by static cone penetration test, Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech., vol.I, 319-322, Paris, 1961.
  32. Indústria CAULISA- Distrito Industrial de Campina Grande-Pb, Fornecedores da argila caulinita refinada.
  33. Bentonit União Nordeste S.A.-BUN, Distrito Industrial de Campina Grande-Pb., Fornecedores da argila montmorilonita refinada - cálcica e sódica.
  34. Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 1969.
  35. Métodos de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-DNER, Rio de Janeiro, Brasil, 1964.
  36. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-DNER, Materiais para Obras Rodoviárias - Métodos e Instruções de Ensaio, Limite de Liquidez de Solos. DNER-ME 44-71, 1971.
  37. American Society for Testing and Materials-ASTM, Annual Book of ASTM Standards, Part. 11, april, 1973.
  38. British Standard Institution, BS/1377/67, Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes, British Standard Institution, London, 1967.
  39. Pinto, S. e Oliveira, O.V., Método rápido para a determinação do limite de liquidez ajustado a solos brasileiros, Instituto de Pesquisas Rodoviárias-IPR, Rio de Janeiro, 1975.

40. Menezes, M.S.de S., Utilização do método de determinação do limite de liquidez com um ponto, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1970.
41. de Mello, V.F.B., Silveira, E.B.S. e Silveira, A., Sugestões para revisão das normas de execução de ensaios de limite de liquidez e de granulometria, ABMS - Anais do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, vol.I, pp.245-255, Recife-Campina Grande, 1958.
42. Lambe, T.W., Soil Testing for Engineers, Wiley, New York, 1951.
43. LCPC-Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, analyse granulométrique par sédimentométrie, Mode Opératoire G. 3, Dunod, Paris, 1970.
44. Todres, H.A. and Clauss, K.A., Análise da Dimensão das Partículas de Solos com Teor de Argila (Particle Size Analysis of Clay - Containing Soils), Fifty Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Luanda, Angola, 1971.

## A G R A D E C I M E N T O S

Ao Professor J.G. CABRERA, Ph. D., Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Leeds, Inglaterra, e Professor de Engenharia Civil do Conselho Britânico no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, pela orientação, estímulo e apoio na realização desta pesquisa.

À Universidade Federal de Alagoas e especialmente ao Centro de Tecnologia, pela liberação a fim de participar do Curso de Pós-Graduação. Particularmente ao Professor NABUCO LOPES TAVARES DA COSTA SANTOS - Reitor na época - e ao Professor MANDEL MACHADO RAMALHO DE AZEVEDO - Prô-Reitor para assuntos acadêmicos na época.

Aos dirigentes do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb, em Campina Grande, especialmente ao Professor HEBER CARLOS FERREIRA, Ph.D., Chefe do Departamento de Engenharia Civil, pelo apoio prestado.

Aos laboratórios participantes da pesquisa, sem a colaboração dos quais esta não teria sido possível.

À ATECEL e CAPES, pelo apoio administrativo e financeiro.

Ao laboratorista NOVAL ALVES DE CARVALHO, pela ajuda na execução dos ensaios.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco-DER-PE, pelo uso da Biblioteca e fotocópias dos artigos de interesse.

À SONIA MAFRA MARINHO, pela valiosa ajuda na correção sintática e ortográfica dos originais.

Ao funcionário do CTEC da UFAL, ANTÔNIO COLATINO FERREIRA, pela exímia datilografia.

Finalmente, ao Serviços Gráficos de Alagoas-SERGASA pela pontualidade na impressão das fotografias e ao Departamento de Estradas de Rodagem de Alagoas-DER-AL, especialmente ao funcionário DAVIS MITCHEL TALBERG, chefe do serviço de Normas e Publicações, pela contribuição na impressão.

APÊNDICE A

CÓPIA DA CARTA, NOTAS EXPLANATÓRIAS E  
CARTA-RESPOSTA ENVIADAS ÀS ORGANIZAÇÕES

a) Cópia da carta

O Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, está organizando um programa associado de ensaios para verificar a exatidão de seus procedimentos e para determinar a provável variabilidade dos ensaios de classificação dos solos. Detalhes do programa de pesquisa são anexados a esta carta.

Desejaríamos saber se seu laboratório gostaria de participar deste programa de pesquisa. Prevemos que alguns laboratórios possam não querer participar do programa completo e preferiram somente executar um número limitado de ensaios nos dezesseis solos que seriam enviados. Outrossim, preferíamos que os laboratórios não executassem ensaios os quais normalmente não façam parte de sua rotina.

Se Vossa Senhoria concorda em tomar parte no programa, desejamos saber a extensão de sua participação a fim de avaliarmos a adequada quantidade de solos a remeter.

Para sua conveniência estamos incluindo uma carta-resposta com uma lista dos ensaios propostos, de forma que Vossa Senhoria possa marcar no espaço apropriado os ensaios que poderia executar. Esta carta pode ser devolvida para nós no envelope anexo, já selado e endereçado.

b) Nota explanatória

PROPOSIÇÃO PARA O PROGRAMA ASSOCIADO  
DE ENSAIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

O Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba,



está patrocinando um programa associado de ensaios, com o objetivo de determinar a variabilidade de alguns resultados de ensaios de classificação de solos. Os objetivos específicos deste programa são:

- a) Possibilitar a cada um dos laboratórios participantes verificar a exatidão de seus procedimentos;
- b) Assistir esses laboratórios na preparação de processos de ensaios e especificações mais adequadas.

Os ensaios de classificação de solos são largamente usados quando se quer decidir sobre a adequabilidade de um solo a ser usado como material de construção. Por exemplo, propriedades de retenção de umidade são usadas na seleção de solos para formação de aterros, propriedades de compactação são relacionadas com as características de plasticidade, valores de densidade real são usados como guia para a compactação num índice de vazios especificado.

Os erros na determinação dos valores quantitativos dos ensaios de classificação de solos podem, portanto, resultar na rejeição de materiais satisfatórios ou, o que é pior, na aceitação de material inadequado. Embora se saiba que a reprodutibilidade nos resultados, dentro do mesmo laboratório, possa ser obtida dentro de limites estreitos, a variação de resultados entre laboratórios diferentes, nunca foi examinada no Brasil. A importância que é dada aos ensaios de classificação torna desejável a análise da extensão desta variação.

O Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, está, desta maneira, organizando este programa cooperativo de ensaios e convidando laboratórios de Universidade, de organizações Públicas como o DNER, DER's e de Empresas Privadas de Engenharia Civil para dele participarem.

Serão obtidas dezesseis amostras de solos com características bem diferentes, e o Departamento de Engenharia

Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, cuidará de enviar a cada participante a quantidade de amostras representativas preparadas destes solos. Será solicitado a cada organização participante, realizar os seguintes ensaios, de acordo com os procedimentos seguidos na Associação Brasileira de Normas Técnicas:

- a) Limite de Liquidez
- b) Limite de Plasticidade
- c) Análise Granulométrica com Sedimentação
- d) Densidade Real.

Será pedido a cada laboratório participante não revelar a finalidade dos ensaios ao pessoal atualmente responsável por sua realização; tais ensaios deverão ser conduzidos de maneira rotineira. É desejável que os resultados sejam devolvidos ao Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba dentro de 45 dias a contar da data do recebimento das amostras.

A cada laboratório será dado um número em código, o anonimato será preservado e o Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba não divulgará o nome de nenhuma das organizações, exceto em termos gerais, como por exemplo, organização governamental, laboratório de Universidade, etc. Contudo, cada laboratório poderá comparar seus próprios resultados com todos os outros obtidos.

c) Carta-resposta

Aceitamos/não aceitamos\* participar do programa associado de ensaios de solos para efeito de classificação, iniciativa desse Departamento.

Os ensaios que nosso laboratório está preparado para realizar são:

a) Limite de Liquidez .....	sim	não
b) Limite de Plasticidade ...	sim	não
c) Análise Granulométrica com Sedimentação .....	sim	não
d) Densidade Real .....	sim	não

Estaremos em condições de enviar os resultados dentro dos 45 (quarenta e cinco) dias propostos por Vossa Senhoria.

APÊNDICE B

CÓPIA DA CARTA, RECOMENDAÇÕES PARA EXECUÇÃO DOS  
ENSAIOS E CARTA-RESPOSTA ENVIADAS ÀS ORGANIZA  
ÇÕES QUE CONCORDARAM EM PARTICIPAR DO PROGRAMA

a) Cópia da carta

O Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, comunica a Vossa Senhoria, ter recebido oportunamente sua carta-resposta aceitando participar do nosso programa associado de solos para efeito de classificação; agradecemos seu interesse em tomar parte nesse projeto.

Estamos enviando anexo, as 16 (dezesseis) a mostras representativas já preparadas, aproximadamente 600 gramas de cada, e algumas recomendações para os procedimentos e dados a coletar; os materiais estão identificados apenas pela numeração; a quantidade remetida é o dobro da que normalmente se necessitaria para a execução dos ensaios mas, caso acidentalmente precise de material adicional, estaremos aptos a lhe enviar.

Devido à escolha de solos com características bem diferentes, varrendo uma vasta faixa de plasticidade, prevemos que determinados laboratórios não estejam familiarizados com alguns e portanto adiantamos serem as amostras N<sup>o</sup>s 14, 15 e 16, respectivamente, caulinita, montmorilonita cálcica e montmorilonita sódica; acrescentamos ainda serem os solos N<sup>o</sup>s 4, 5, 6 e 7 de origem laterítica.

O código de sua organização será N<sup>o</sup> , com o qual poderá comparar os próprios resultados com os demais.

Esperamos receber os resultados dos ensaios dentro dos dias máximos acertados.

Lembramos as recomendações já feitas, afim de não ser revelado ao pessoal que executará os ensaios a finalidade da pesquisa, para que os mesmos sejam conduzidos normalmente.

Salientamos a importância das informações complementares aos resultados dos ensaios e de qualquer variante

ou ponto não bem definido do método, o que anexo exemplificamos; caso seu laboratório nunca empregue o método que solicitamos, sugerimos adotar o próprio.

Anexamos também uma carta-resposta para nos ser devolvida no envelope incluso, já selado e endereçado.

Aproveitamos a oportunidade para renovar os protestos de elevada estima e consideração.

b) Recomendações para execução e coleta de dados dos ensaios

#### LIMITE DE LIQUIDEZ

1. proceder conforme a ABNT MB-30 ou DNER-DPT-M 44-64 (DNER - ME 44-64);
2. utilizar com preferência aparelho de fabricação nacional;
3. empregar sempre o mesmo operador na obtenção dos dados da mesma amostra;
4. anotar o tempo de homogeneização da massa e durante que tempo, se assim procede, guardou a amostra homogeneizada afim de iniciar o ensaio;
5. registrar toda variação, p.ex., qual o tipo de cinzel usado, que tempo esperou em estufa a  $105^{\circ}$ - $110^{\circ}$ C para secar o material até constância de peso, qual a marca do aparelho e quanto ao desgaste, se o operador é veterano ou iniciante, etc.
6. fornecer os resultados de todos os pontos obtidos e o valor do LL, no modelo próprio com o gráfico.

#### LIMITE DE PLASTICIDADE

1. proceder conforme a ABNT-MB-31;

2. empregar sempre o mesmo operador na obtenção dos dados da mesma amostra;
3. anotar o tempo de homogeneização da massa e durante que tempo, se assim procede, guardou a amostra homogeneizada afim de iniciar o ensaio (se da massa homogeneizada no LL utiliza uma porção para este ensaio, informe);
4. registrar toda variação, p.ex., com relação ao operador, etc.;
5. fornecer todos os valores obtidos e o LP, no modelo próprio.

#### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

1. proceder conforme a ABNT-MB-32 ou DNER-DPT-M 51-64 (DNER-ME 51-64);
2. registrar toda variação p.ex., se utiliza o tanque para banho de temperatura constante, qual defloculante, etc;
3. fornecer todos os resultados, como também a calibração do densímetro e da proveta, nos modelos próprios.

#### DENSIDADE REAL

1. proceder conforme DNER-DPT-M 93-64 (DNER-ME 93-64);
2. registrar toda variação, p.ex., qual a fonte de calor usada, a que temperatura secou a amostra e se a esfriou e em que tempo, no dessecador, etc;
3. fornecer todos os resultados no modelo próprio.

#### c) Carta-Resposta

Informamos a Vossa Senhoria haver recebido as 16 (dezesseis) amostras de solo em perfeito estado.

Renovamos os nossos propósitos com relação ao programa associado de solos para efeito de classificação, iniciativa desse Departamento.

APÊNDICE C

MÉTODO DE DETECÇÃO DE "OUT-LIERS"



### MÉTODO DE DETECÇÃO DE "OUT-LIERS"

No método utilizado neste trabalho para a detecção de "out-liers" usaram-se dois critérios. O primeiro assumindo-se arbitrariamente uma confiabilidade de 95%, com um t menor ou igual a 1,96 e o segundo com o critério mais aceitável, consistindo em relacionar o nível de confiabilidade com o número de valores utilizados para obter a média.

A relação de confiabilidade versus número de valores é obtida como segue:

$$\text{Se } X_1 < X_2 < \dots < X_n \\ \text{então } f(X_1) = \phi(X_1) (1 - F(X_1))^{n-1}$$

A probabilidade de

$$X_1 < X_0 = F_n(X_0) = \int_{-\infty}^{X_0} \phi(X) (1 - F(X))^{n-1} dX = \\ = \left[ - \frac{(1 - F(X))^n}{n} \right]_{-\infty}^{X_0}$$

$$F(X_0) = 1 - (1 - F(X_0))^n$$

$$\text{Se } F_n(X_0) = 0,025$$

$$(1 - F(X_0))^n = 0,975$$

$$1 - F(X_0) = 0,975^{1/n} = (1 - 0,025)^{1/n} = 1 - \frac{0,025}{n}$$

$$F(X_0) = \frac{0,025}{n}$$

Tem-se então:

n	F(X <sub>0</sub> )	X <sub>0</sub>
1	0,0250	1,96
2	0,0125	2,24
5	0,0050	2,575
10	0,0025	2,81
15	0,0017	2,93
25	0,0010	3,01
50		3,29
500		3,89

Para mostrar claramente o processo utilizado apresenta-se, em seguida, um exemplo:

Os valores de densidade real obtidos no laboratório para o solo nº 1 foram os seguintes:

2,550 2,533 2,568 2,590 2,621 2,630 2,623  
2,597 2,631 2,606 2,641 2,624 2,620 2,616  
2,606

Colocando-se em ordem crescente:

2,533 2,550 2,568 2,590 2,597 2,606 2,606  
2,616 2,620 2,621 2,623 2,624 2,630 2,631  
2,641

Calculando-se, para todos os valores, a média e o desvio-padrão, têm-se:

$n = 15$   
Média = 2,604  
D.P. = 0,031

Omitindo-se o valor extremo mais afastado da média, e calculando-se normalmente, têm-se:

$n = 14$   
Média = 2,609  
D.P. = 0,025

Se o valor de  $t$  for superior ao permitido na tabela acima, rejeita-se o valor omitido; continua-se o processo até encontrar um valor de  $t$  compatível com a tabela e em seguida um valor de  $t = 1,96$ .

A sequência de cálculo melhor esclarece o processo.

<u>n</u>	<u>Média</u>	<u>D.P.</u>	
15	2,603	0,031	omitir 2,533
14	2,609	0,025	rejeitar 2,533 ( $t=-2,99$ ) omitir 2,550
13	2,613	0,020	rejeitar 2,550 ( $t=-3,22$ ) omitir 2,568

<u>n</u>	<u>Média</u>	<u>D.P.</u>	
12	2,617	0,015	rejeitar 2,568 (t=-3,29) omitir 2,590
11	2,620	0,013	<u>aceitar</u> 2,590 (t=-2,30) omitir 2,597
10	2,622	0,011	rejeitar 2,597 (t=-2,28) omitir 2,641
9	2,620	0,009	rejeitar 2,641 (t=-2,39) omitir 2,606
8	2,621	0,008	<u>aceitar</u> 2,606 (t=-1,92)

APÊNDICE D

RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

NORMA	ABNT			DNER			BS			LCPC			
	Fra- So- los	Ar.	S	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.
1		84,5	5,5	10,0	70,0	20,0	10,0	80,0	10,5	9,5	88,0	2,5	9,5
		77,0	15,0	8,0	69,0	23,0	8,0	73,0	19,5	7,5	90,0	2,5	7,5
		79,0	13,0	8,0	69,0	23,0	8,0	74,0	19,2	6,8	88,0	5,2	6,8
		77,5	15,5	7,0	70,0	23,0	7,0	74,0	19,5	6,5	88,0	5,5	6,5
		84,0	7,5	8,5	69,5	21,5	8,5	79,0	14,5	6,5	90,0	3,5	6,5
2		90,5	6,0	3,5	83,0	13,5	3,5	88,5	8,0	3,5	93,0	3,5	3,5
		89,0	4,0	7,0	83,0	10,0	7,0	87,0	8,0	5,0	92,0	3,0	5,0
		90,0	6,5	2,4	82,5	14,0	3,5	88,0	8,2	3,8	93,5	2,7	3,8
		91,5	5,0	3,5	83,0	14,0	3,5	88,5	8,0	3,5	95,8	0,7	3,5
3		66,5	22,5	11,0	53,0	36,0	11,0	65,0	24,0	11,0	76,5	12,5	11,0
		68,5	26,0	5,5	53,0	41,5	5,5	66,5	29,5	4,0	81,0	15,0	4,0
		69,5	19,0	11,5	53,0	35,5	11,5	68,0	24,0	8,0	78,5	13,5	8,0
		71,0	19,0	10,0	51,0	39,0	10,0	68,0	24,2	7,8	81,0	11,2	7,8
		63,5	22,0	14,5	52,0	33,5	14,5	60,0	30,0	10,0	73,0	17,0	10,0
4		50,0	17,5	32,5	34,5	33,0	32,5	49,0	21,5	29,5	58,0	12,5	29,5
		51,5	16,0	32,5	34,7	32,8	32,5	50,5	21,0	28,5	59,5	12,0	28,5
		53,0	16,5	29,5	34,6	35,2	29,5	52,0	31,5	26,5	61,0	12,5	26,5
		56,5	7,0	36,5	33,9	39,6	26,5	54,0	22,0	24,0	65,0	11,0	24,0
5		40,0	20,0	40,0	28,0	32,0	40,0	37,0	27,0	36,0	48,5	15,5	36,0
		42,5	28,5	39,0	28,5	32,5	39,0	38,0	27,0	35,0	52,0	13,0	35,0
		40,5	23,5	36,0	26,9	37,1	36,0	34,0	32,0	34,0	54,0	12,0	34,0
		39,0	23,5	37,5	26,4	36,1	37,5	33,0	34,5	32,5	54,0	13,5	32,5
6		62,5	20,0	17,5	50,7	31,8	17,5	57,0	27,0	16,0	72,5	11,5	16,0
		72,0	14,5	13,5	51,5	35,0	13,5	63,0	25,0	12,0	79,0	9,0	12,0
		60,0	25,0	15,0	49,7	35,5	15,0	54,5	31,5	14,0	67,0	19,0	14,0
		61,0	22,0	17,0	50,1	32,5	17,0	56,0	28,5	15,5	76,2	-	15,5
7		53,0	16,0	31,0	37,5	31,5	31,0	46,0	24,0	30,0	61,0	8,3	30,0
		53,0	13,0	32,0	37,6	30,4	32,0	46,0	23,5	30,5	61,0	8,5	30,5
		46,5	19,0	34,5	36,9	28,6	34,5	42,0	27,0	31,0	57,5	11,5	31,0
		52,0	18,0	30,0	36,9	33,1	30,0	45,0	28,0	27,0	63,5	9,5	27,0

NORMA	ABNT			DNER			BS			LCPC			
	Fra- ços So- tos	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.
8		52,0	31,5	26,5	44,1	39,4	26,5	50,0	26,5	23,5	63,0	13,5	23,5
		56,5	19,0	24,5	44,0	31,5	24,5	54,5	25,0	20,5	66,0	13,5	20,5
		57,0	18,5	24,5	43,9	31,6	24,5	52,0	27,5	20,5	66,0	13,5	20,5
		60,0	16,0	24,0	45,6	30,4	24,0	57,0	22,0	21,0	67,5	11,5	21,0
9		17,0	7,5	75,5	19,1	5,4	75,5	16,0	12,0	72,0	20,0	8,0	72,0
		18,5	7,0	74,5	19,2	6,3	74,5	17,0	22,5	70,5	24,5	5,0	70,5
		20,0	6,0	74,0	17,8	8,2	74,0	18,5	10,5	71,0	22,0	7,0	71,0
		22,0	4,0	74,0	20,0	6,0	74,0	21,0	9,0	70,0	23,5	6,5	70,0
10		21,0	20,0	59,0	27,1	15,9	59,0	20,0	25,0	55,0	30,0	15,0	55,0
		24,5	27,5	58,0	27,1	14,9	58,0	26,0	19,0	55,0	29,5	14,5	55,0
		23,0	19,0	58,0	27,6	14,4	58,0	25,0	20,0	55,0	32,0	13,0	55,0
		24,0	19,0	57,0	-		57,0	26,0	21,0	53,0	32,5	14,5	53,0
11		36,5	16,5	47,0	29,4	23,6	47,0	35,0	22,0	43,0	43,0	14,0	43,0
		38,0	18,5	43,5	28,1	28,2	43,5	36,5	21,5	42,0	47,5	10,5	42,0
		42,0	14,0	44,0	29,2	36,8	44,0	40,5	17,5	42,0	53,0	5,0	42,0
		42,0	14,0	44,0	28,7	27,3	44,0	41,0	19,5	39,5	51,0	9,5	39,5
12		72,0	5,5	22,5	59,4	18,2	22,5	71,5	7,0	21,5	75,0	3,5	21,5
		70,0	9,0	21,0	59,6	19,4	21,0	69,0	11,5	19,5	76,0	4,5	19,5
		67,5	10,5	22,0	59,3	18,7	22,0	63,5	16,5	20,0	76,5	3,5	20,0
		68,0	11,5	20,5	60,3	19,2	20,5	64,0	17,0	19,0	76,0	5,0	19,0
13		58,0	7,0	35,0	53,1	11,9	35,0	56,0	11,5	32,5	62,0	5,5	32,5
		56,0	7,0	37,0	52,3	10,7	37,0	54,5	13,5	32,0	61,0	7,0	32,0
		60,5	7,5	32,0	52,6	15,4	32,0	58,0	12,0	30,0	65,0	5,0	30,0
		50,9	15,1	34,0	54,1	11,9	34,0	57,0	10,5	32,5	65,0	2,5	32,5
14		-	9,5	90,5	-	9,5	90,5	-	48,0	52,0	-	48,0	52,0
		-	8,0	92,0	-	8,0	92,0	-	52,0	48,0	-	52,0	48,0
		-	9,0	91,0	-	9,0	91,0	-	45,0	55,0	1,5	43,5	55,0
		-	7,5	92,5	-	7,5	92,5	-	53,0	47,0	2,0	51,0	47,0

NORMA	ABNT			DNER			BS			LCPC		
Fra- So- los	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.	Ar.	S.	Ag.
15	9,7	0,0	90,3	9,7	0,0	90,3	9,7	5,3	85,0	9,7	5,3	85,0
	12,0	0,0	88,0	12,0	0,0	88,0	12,0	0,5	87,5	12,0	0,5	87,5
	14,0	0,0	86,0	14,0	0,0	86,0	14,0	9,5	76,5	14,0	9,5	76,5
	13,0		87,0	13,0	0,0	88,0	13,0	6,0	81,0	13,0	6,0	81,0
16	1,0	2,5	96,5	0,5	2,5	96,5	1,0	4,0	95,0	1,0	4,0	95,0
	7,0	2,0	91,0	7,0	2,0	91,0	7,0	4,5	88,5	7,0	4,5	88,5
	3,5	2,5	95,0	3,5	2,5	95,0	3,5	5,5	91,0	3,5	5,5	91,0
	6,0	0,0	94,0	6,0	0,0	94,0	6,0	3,0	91,0	6,0	3,0	91,0
	3,0	1,0	96,0	3,0	1,0	96,0	3,0	5,0	92,0	3,0	5,0	92,0
	6,5	1,0	92,5	6,5	1,0	92,5	7,5	4,5	88,0	9,5	2,5	88,0

APÊNDICE E

PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO LIMITE  
DE LIQUIDEZ COM O CONE DE PENETRAÇÃO.



## DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO, COM EMPREGO DO CONE DE PENETRAÇÃO

### MÉTODO DE ENSAIO

#### 1 - Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual se determina o limite de liquidez de solos, com emprego do CONE DE PENETRAÇÃO.

#### 2 - Definição

A penetração é a distância em décimos de milímetros, que um cone padronizado penetra verticalmente em uma amostra de solo, sob condições especificadas de peso, tempo e ângulo de penetração.

Quanto as condições de ensaio não foram mencionadas, o peso do cone com haste deslizante, seu ângulo, e o tempo que o mesmo deverá penetrar no solo serão, respectivamente:  $80,00 \pm 0,05g$ ,  $30 \pm 1$  grau e  $5 \pm 1$  segundo.

#### 3 - Aparelhagem

A aparelhagem necessária é a seguinte:

- a) penetrômetro
- b) cone de penetração
- c) recipiente cilíndrico, com fundo plano, de metal e com as seguintes dimensões internas:
  - Diâmetro - 55 mm
  - Altura - 40 mm.
- d) prato do penetrômetro com dispositivo pa-

- ra apoio sem balançar o recipiente com a amostra;
- e) cápsula de porcelana com capacidade de 500/ml;
  - f) espátula com lâmina flexível de cerca de 8 cm de comprimento e 2 cm de largura;
  - g) balança com capacidade de 200g, sensível a 0,01g;
  - h) estufa capaz de manter a temperatura entre 40°C e 110°C;
  - i) recipientes que permitem guardar amostras sem perda de umidade antes de sua pesagem;
  - j) cronômetro com precisão de 0,1 seg;
  - k) régua de aço biselada, com cerca de 10 cm de comprimento.

#### 4 - Amostras

Da amostra obtida, de acordo com o item 5 do método "Preparação de Amostras de Solos para Ensaio de Caracterização", DPT M-41, toma-se cerca de 200g da fração que passa na peneira de 0,42mm.

#### 5 - Ensaio

- a) Colocar a amostra na cápsula de porcelana e juntar água destilada em quantidade suficiente para se obter uma massa plástica. Adicionar água, aos poucos, misturando continuamente com a espátula, até completa homogeneização da massa;
- b) transferir com a espátula parte da massa assim obtida para o cilindro de metal, moldando-a de tal maneira que não se formem bolhas de ar. Rasar o excesso de amostra

com o lado biselado da régua de aço, com a finalidade de dar ao solo uma superfície polida;

- c) colocar o cone de penetração na haste do aparelho;
- d) colocar no prato do penetrômetro o cilindro de metal com a amostra;
- e) fazer coincidir a ponta do cone com a superfície livre da amostra, devendo riscá-la levemente;
- f) regular o penetrômetro de modo que o ponteiro indique o zero, ou então anotar a leitura inicial do mostrador com aproximação de 0,1mm;
- g) com o cronômetro em funcionamento, soltar a haste que segura o cone por um período de  $5 \pm 1$  segundo, e ao fim deste travar;
- h) fazer no mostrador a leitura da distância penetrada com aproximação de 0,1mm. A diferença entre a leitura no início e no fim do ensaio será registrada como a penetração do cone;
- i) levantar a haste com o cone, limpando-o cuidadosamente com um pano umedecido em água, depois com um pano limpo e seco;
- j) retirar o solo do cilindro de metal, colocar na cápsula, e homogeneizar a massivamente. Em seguida repetir as operações a partir do item 5.b. Se a diferença entre a primeira e a segunda penetração for menor que 0,5mm, registrar a média das duas e transferir imediatamente uma pequena quantidade do material de onde houve a penetração para o recipiente (item 3.i) e

terceira penetração. Se após esta penetração, a diferença entre ela, e qualquer das anteriores, não for maior de 1mm, transferir imediatamente uma pequena quantidade do material de onde houver a penetração para o recipiente (Ítem 3.1), determinar sua umidade e registrar a média das três penetrações. Porém, se for maior que 1mm, retirar o ensaio até se obter resultados coerentes;

- l) efetuar os ítems anteriores quatro vezes no mínimo, podendo usar a mesma amostra, adicionando em cada estágio água destilada. A quantidade de água adicionada deve ser tal que assegure uma variação das penetrações de 15 a 25mm (em relação ao primeiro ponto);
- m) ao fim de cada penetração, o recipiente metálico e o cone devem ser limpos e secos.

## 6 - Resultados

- a) com os resultados obtidos no ítem 5.j construir um gráfico, no qual as ordenadas são as penetrações e as abscissas são os correspondentes teores de umidade (escala aritmética);
- b) interpolar uma reta entre os pontos determinados no gráfico;
- c) o limite de liquidez é expresso pelo teor de umidade correspondente à interseção da reta, determinada no ítem 6.b, com a linha de calibração do penetrômetro.

APÊNDICE F

DEFINIÇÕES DE ALGUNS TERMOS USADOS NESTE TRABALHO  
E LISTA DE ABREVIACÕES.

### Definições de alguns termos usados neste trabalho

Exatidão (de um resultado) - a aproximação da concordância entre um valor experimental e o valor real.

Exatidão (de um método) - a medida da capacidade de um método para proporcionar resultados exatos, isto é, resultados os quais são precisos e livres de variação ("bias").

Variação ("bias") - a tendência para obter um valor que é ou persistentemente mais alto ou persistentemente mais baixo que o valor correto.

Precisão - a medida da capacidade de um método para fornecer resultados reproduzíveis. Não deve ser confundido com exatidão; a determinação pode ser feita com grande precisão porem os resultados serão exatos somente se eles estão livres de variação ("bias").

Intervalo - a diferença entre o maior e o menor valores em um grupo de medidas.

Repetibilidade - o intervalo dentro do qual se pode repetir as medidas feitas num ensaio pelo mesmo operador no mesmo aparelho.

Reproduzibilidade - o intervalo dentro do qual se fazem repetidas medidas dos valores de um ensaio por diferentes operadores, em diferentes aparelhos.

Desvio-padrão - a raiz quadrada do valor médio do somatório dos quadrados das diferenças entre a média e cada valor.

Coefficiente de variação - o desvio-padrão expresso como uma porcentagem da média.

LISTA DE ABREVIACOES

- IG - Índice de Grupo
- CBR - California Bearing Ratio
- ISO - International Standard Organization
- LCPC - Laboratoire Central de Ponts et Chaussées
- ASTM - American Society for Testing Materials
- RRL - Road Research Laboratory
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- BS - British Standards
- LL - Limite de Liquidez
- LP - Limite de Plasticidade
- IP - Índice de Plasticidade
- D.P. - Desvio-padrão
- C.V. - Coeficiente de Variação
- CCT - Centro de Ciências e Tecnologia