



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
CAMPUS II – CAMPINA GRANDE

AVALIAÇÃO DA PLASTICIDADE DE SOLOS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO  
CONE DE PENETRAÇÃO  
POR  
MÁRCIA SUELY BATISTA DINIZ

CAMPINA GRANDE

MAIO/1994

**AVALIAÇÃO DA PLASTICIDADE DE SOLOS ATRAVÉS  
DA UTILIZAÇÃO DO CONE DE PENETRAÇÃO**

MÁRCIA SUELY BATISTA DINIZ

**AVALIAÇÃO DA PLASTICIDADE DE SOLOS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO  
CONE DE PENETRAÇÃO**

Dissertação Apresentada ao Curso de  
Mestrado em Engenharia Civil da  
Universidade Federal da Paraíba, em  
Cumprimento às Exigências para Ob-  
tenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

: GEOTECNIA

ORIENTADORES

: HEBER CARLOS FERREIRA

LUIZ CARLOS SAMPAIO DA SILVEIRA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA  
MAIO / 1994



D585a      Diniz, Márcia Suely Batista.  
Avaliação da plasticidade de solos através da utilização do cone de penetração / Márcia Suely Batista Diniz. - Campina Grande, 1994.  
117 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1994.  
Referências.  
"Orientação : Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira, Prof. M.Sc. Luiz Carlos Sampaio da Silveira".

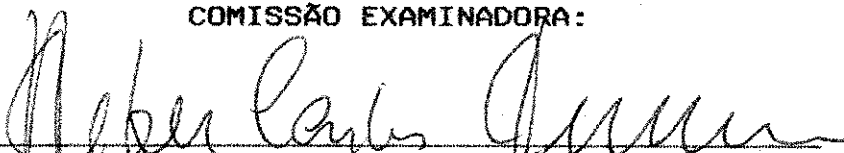
1. Mecânica do Solo. 2. Secagem. 3. Linguagem Pascal. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Ferreira, Heber Carlos. II. Silveira, Luiz Carlos Sampaio da. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

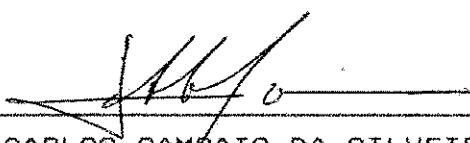
CDU 624.131(043)

AVALIAÇÃO DA PLASTICIDADE DE SOLOS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO  
CONE DE PENETRAÇÃO

MÁRCIA SUELY BATISTA DINIZ

COMISSÃO EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
PROFº HEBER CARLOS FERREIRA - Doutor  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
PROFº LUIZ CARLOS SAMPAIO DA SILVEIRA - M.Sc.  
Co-orientador

  
\_\_\_\_\_  
PROFº FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA - M.Sc.  
Membro

  
\_\_\_\_\_  
PROFº ADEMIR MONTES FERREIRA - M.Sc.  
Membro

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA  
MAIO / 1994

**DEDICATÓRIA**

**Aos meus pais: João e Terezinha,  
e à minha irmã: Socorro.**

## AGRADECIMENTOS

- A Deus.
- À minha família, pelo apoio e incentivo.
- Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo suporte financeiro.
- Aos orientadores: Heber Carlos Ferreira e Luiz Carlos Sampaio da Silveira.
- Aos professores do Departamento de Engenharia Civil - Área de Geotecnia.
- Aos funcionários do Laboratório de Solos II do Departamento de Engenharia Civil, em especial: João Dantas de Mattos, Ronildo Alcântara Pereira e Rui Pereira de Oliveira, pela valiosa colaboração.
- A Dr. Paulo Lacerda de Oliveira, Dr. Melquíades José de Brito e Dr. Jorge Avelino Pereira, pelo apoio, atenção e dedicação.
- A Joselito Araújo Souto e Josenira dos Santos França.
- Ao Professor Ramdayal Swarnakar do Departamento de Engenharia Química, pela presteza, dispor do seu conhecimento científico, experiência e atenção para comigo.
- Ao Sr. Washington Franklin Pedreira da Silva, Secretário do Departamento de Engenharia Civil, em colaborar na digitação deste trabalho.

## Í N D I C E

|   | Páginas |
|---|---------|
| RESUMO.....   | viii    |
| ABSTRACT.....   | x       |
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....  | 1       |
| CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 3       |
| 2.1 - Introdução.....   | 3       |
| 2.2 - Principais Fatores que Influem na Propriedade de Plasticidade dos Solos.....  | 4       |
| a) Granulometria, Área Específica, Forma dos Grãos e Espécie Mineralógica.....      | 4       |
| b) Água.....  | 6       |
| c) Capacidade de Troca de íons.....   | 8       |
| d) Matéria Orgânica.....  | 9       |
| 2.3 - Principais Fatores que Influenciam nos Ensaios de Plasticidade dos Solos..... | 10      |
| a) Manipulação e Remoldamento do Solo....   | 10      |
| b) Secagem da Amostra.....  | 12      |
| c) Aditivos.....  | 13      |
| d) Condições Ambientais.....  | 14      |
| e) Água de Amassamento.....   | 14      |
| f) Tempo de Execução do Ensaio.....   | 15      |



|       |   | Páginas |
|-------|---|---------|
| 2.3.1 | - Aspectos Relacionados ao Ensaio Convencional de Limite de Liquidez.....                                       | 15      |
|       | a) Condições do Aparelho.....   | 15      |
|       | b) Regulagem do Aparelho.....   | 16      |
|       | c) Material Constituinte da Base do Aparelho.....   | 16      |
|       | d) Cinzel.....  | 17      |
|       | e) Liquefação para Solos sem Coesão.....  | 18      |
|       | f) Sensibilidade do Operador.....   | 19      |
| 2.3.2 | - Aspectos Relacionados ao Ensaio Convencional de Limite de Plasticidade.....                                   | 19      |
|       | a) Certeza da Desintegração do Cilindro de Solo.....  | 19      |
|       | b) Pressão Exercida pelo Operador.....  | 20      |
|       | c) Superfície Absorvente.....   | 20      |
|       | d) Igualdade entre LL e LP.....   | 21      |
| 2.3.3 | - Aspectos Relacionados aos Ensaios de Plasticidade Executados através da Utilização do Cone de Penetração..... | 21      |
|       | a) Critério de Resistência.....   | 21      |
|       | b) Reprodutibilidade e Repetibilidade...  | 24      |
|       | c) Agudez da Extremidade do Cone.....   | 25      |
|       | d) Ângulo da Extremidade do Cone.....   | 26      |
|       | e) Rugosidade da Superfície do Cone.....  | 26      |

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
|                   | f) Dimensões do Recipiente de Solo.....   | 27        |
|                   | g) Conteúdo de Argila no Solo.....  | 27        |
|                   | h) Velocidade de Aplicação da Deformação<br>Cisalhente.....   | 28        |
|                   | i) Aplicabilidade a Solos de Baixa Plas-<br>ticidade.....   | 28        |
| 2.4               | - Comparações de Resultados de Ensaios de<br>Plasticidade Executados Através dos Mé-<br>todos Convencionais e dos Procedimentos<br>que Utilizam o Cone de Penetração..... | 29        |
| <b>CAPÍTULO 3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>33</b> |
| 3.1               | - Materiais.....  | 33        |
| 3.1.1             | - Seleção e Identificação das Jazidas.....  | 33        |
| 3.1.2             | - Localização das Jazidas.....  | 34        |
| 3.2               | - Metodologia Utilizada na Pesquisa.....  | 44        |
| 3.2.1             | - Ensaios Realizados.....   | 44        |
| 3.2.1.1           | - Análise Granulométrica.....   | 44        |
| 3.2.1.2           | - Massa Específica Real.....  | 46        |
| 3.2.1.3           | - Determinação dos Parâmetros de Atterberg  | 46        |
| 3.2.1.3.1         | - Limite de Liquidez.....   | 46        |
| 3.2.1.3.2         | - Índice de Plasticidade.....   | 47        |
| 3.2.2             | - Classificação dos Solos.....  | 51        |
| 3.2.3             | - Programas Desenvolvidos.....  | 51        |
| 3.2.3.1           | - Programa Ensaio.....  | 52        |

|                    |  |            |
|--------------------|--|------------|
| 3.2.3.2            | - Programa Linear.....   | 52         |
| <b>CAPÍTULO 4</b>  | <b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS...</b>  | <b>53</b>  |
| 4.1                | - Introdução.....  | 53         |
| 4.2                | - Caracterização dos Solos.....  | 53         |
| 4.2.1              | - Análise Granulométrica.....  | 53         |
| 4.2.2              | - Determinação dos Parâmetros de Atterberg   | 65         |
| 4.2.2.1            | - Limite de Liquidez.....  | 65         |
| 4.2.2.2            | - Índice de Plasticidade.....  | 68         |
| 4.2.3              | - Classificação dos Solos.....   | 77         |
| 4.3                | - Análise Estatística para Determinação da<br>Penetração Mais Adequada.....  | 79         |
| <b>CAPÍTULO 5</b>  | <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>CAPÍTULO 6</b>  | <b>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>   | <b>85</b>  |
|                    | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>87</b>  |
| <b>APÊNDICE I</b>  | <b>PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO LIMITE<br/>DE LIQUIDEZ COM O CONE DE PENETRAÇÃO....</b>   | <b>95</b>  |
| <b>APÊNDICE II</b> | <b>PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO IP<br/>ATRAVÉS DO CONE DE PENETRAÇÃO, UTILIZANDO<br/>A INCLINAÇÃO DA RETA NO PLANO: <math>h \times \log p</math>.</b> | <b>101</b> |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| APÊNDICE III | PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO IP ATRAVÉS DO CONE DE PENETRAÇÃO, UTILIZANDO A EQUAÇÃO PROPOSTA POR WOOD E WROTH.....                       | 105 |
| APÊNDICE IV  | PROGRAMA EM LINGUAGEM PASCAL UTILIZADO PARA EXECUTAR OS CÁLCULOS REFERENTES AOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO..... | 110 |
| APÊNDICE V   | PROGRAMA EM LINGUAGEM PASCAL UTILIZADO PARA OBTER CORRELAÇÕES LINEARES.....   | 115 |

**RESUMO**

Esta pesquisa apresenta um estudo para determinação dos parâmetros de Atterberg para onze amostras de solos naturais, provenientes do Estado da Paraíba, utilizando-se os procedimentos convencionais, como também, os que utilizam o aparelho denominado cone de penetração (fall cone test).

As determinações dos valores de limite de liquidez através do cone de penetração foram executadas de acordo com a BS 1377 (1975), enquanto que os valores do índice de plasticidade foram determinados fundamentando-se no critério de resistência, obtidos de duas maneiras:

- usando-se a inclinação da reta no plano  $h \times \log p$ , sendo  $h$  o teor de umidade e  $p$  a penetração do cone;
- usando-se a equação proposta por Wood e Wroth, utilizando-se cone com haste de massas diferentes.

Tendo como base os resultados obtidos, concluiu-se que os procedimentos utilizados foram adequados aos tipos de solos ensaiados, pois os valores determinados, tanto para limite de liquidez quanto para índice de plasticidade, apresentaram repetibilidades consideradas como satisfatórias, sendo estas superiores para os procedimentos que utilizam o cone de penetração, em relação aos métodos convencionais.

Análises de regressão linear foram utilizadas, e, através destas, determinou-se correlações lineares simples significativas entre os valores de limite de liquidez e de índice de plasticidade obtidos pelos diferentes procedimentos comparados.

Com base no estudo estatístico, sugere-se penetrações na faixa de 14 mm a 16 mm como as mais adequadas para a determinação do LL das amostras estudadas, em substituição à penetração padrão do ensaio.

## ABSTRACT

This research presents a study of the determination of Atterberg parameters for eleven samples of natural soil of the State of Paraíba origin, making use of conventional procedures along with that using the apparatus called (cone fall test).

The determinations of the liquid limit values were performed through the cone fall test, according to BS 1377 (1975), and the plastic index values were obtained based on the resistance criteria in following two manners:

- using the inclination of the line in the plane:  
 $h \times \log p$ , where  $h$  is the humidity and  $p$  is the penetration of the cone;
- using the Wood and Wroth equation, making use of cone stem with different masses.

On the basis of the results obtained, it is concluded that the procedures used were adequate for the type of soils tested, because the values determined for the liquid limit as well as plastic index showed satisfactory reproducibility and that it was better for the cone fall test than the conventional procedures.

Linear regression analysis was used and a significant simple linear correlation was found between the liquid limit and the plastic index values, obtained by different procedures.

On the basis of statistical study, it is suggested that penetrations on the range of 14 mm to 16 mm are more adequate for the LL determination of the samples studied, in substitution to the standard penetration test.



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Além da distribuição granulométrica das partículas, os solos argilosos apresentam diferenças apreciáveis nas suas propriedades físico-químicas, tais como: capacidade de troca de cátions, natureza dos cátions trocáveis, área específica, composição mineralógica, e, entre outras, plasticidade.

Como investigado por Atterberg (1911), o solo é classificado de acordo com os limites mais alto e mais baixo de sua faixa plástica: o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), respectivamente.

Apesar desta definição de limites, verifica-se que a transição de um estado para outro é gradual e, embora não exista uma separação nítida entre os estados de consistência, estabeleceram-se procedimentos padronizados para fixação destes limites.

Estes ensaios de laboratório permitem a determinação dos dois parâmetros de Atterberg: o limite de liquidez e o índice de plasticidade (IP).

Sem dúvida, estes parâmetros apenas têm sentido para solos que apresentam um certo grau de plasticidade para alguma variação no seu teor de umidade, e a utilidade dos mesmos provém de que, devido à experiência acumulada em muitas determinações,

seus valores permitem a formação de uma idéia do tipo de solo. Eles são amplamente utilizados, juntamente com a análise mecânica de distribuição do tamanho dos grãos, para identificação e classificação de solos finos, como também, em especificações para julgamento da conveniência destes solos para usos em engenharia e para métodos semi-empíricos de projetos.

Os métodos convencionais utilizados para a determinação do LL e do LP têm recebido muita atenção por apresentarem alguns inconvenientes, além de levarem à investigação do cone de penetração como um método alternativo para realização dos ensaios de plasticidade dos solos.

Portanto, o objetivo desta pesquisa é comparar e obter relações entre os resultados dos parâmetros de Atterberg determinados pelos procedimentos tradicionais com os obtidos através da utilização do cone de penetração, utilizando-se amostras naturais de jazidas provenientes do Estado da Paraíba.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - Introdução

Em mecânica dos solos, plasticidade pode ser definida como a propriedade dos materiais que permite que eles sejam deformados rapidamente, sem ruptura, sem reação elástica e sem mudança de volume.

De maneira geral, entende-se por plasticidade a propriedade que alguns materiais apresentam de ficarem deformados, sem romper, pela aplicação de uma tensão, sendo que a deformação permanece quando a tensão é retirada. A plasticidade corresponde também à propriedade dos solos que permite a eles serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume.

Quando se reconheceu que existia uma relação específica entre a plasticidade e as propriedades físico-químicas determinantes do comportamento mecânico das argilas, a plasticidade deixou de ser uma qualidade puramente descritiva ou de trabalhabilidade em cerâmica, para se converter em uma propriedade de interesse científico para a engenharia.

## 2.2 - Principais Fatores que Influem na Propriedade de Plasticidade dos Solos

### a) Granulometria, Área Específica, Forma dos Grãos e Espécie Mineralógica

A razão pela qual o conhecimento da granulometria dos solos finos é insuficiente para que se possa prever o comportamento prático dos mesmos é que não só as dimensões das partículas, mas também as suas formas, influenciam decisivamente nas propriedades características de cada solo.

Segundo Spangler e Handy (1973), além da quantidade de argila presente em um solo, o tipo de argilomineral também afeta os valores de LL, LP e IP, pois as formas das partículas argilosas são dependentes do sistema no qual os microcristais do solo são cristalizados.

Devido à complexidade da estrutura cristalina dos minerais presentes nas argilas, as suas partículas apresentam formas mais complexas que as arredondadas e angulosas dos grãos de areias e pedregulhos.

Nas argilas, as partículas apresentam, entre outras, morfologias lamelares, escamosas ou filiformes. Como se sabe, a capacidade de moldagem sem variação consequente no volume é característica primordial da plasticidade de solos. De acordo com Vargas (1977), a propriedade de plasticidade de certas argilas é devida, além dos seus teores de umidade, à forma lamelar de suas partículas, a qual permite que haja deslocamentos relativos entre

as mesmas, sem haver correspondente variação no seu volume.

Por outro lado, para Souza Santos (1992), os minerais que possuem clivagens definidas apresentam maior plasticidade, devido ao fato das superfícies clivadas facilitarem a orientação das moléculas de água, e, de um modo geral, verifica-se que os minerais que apresentam forma lamelar são mais plásticos.

De acordo com Pichler (1951), como a estrutura cristalina é própria para cada espécie mineral e determina a forma das partículas constituintes do solo, deduz-se que, para cada tipo de mineral, a argila apresentará uma plasticidade diferente, sendo esta propriedade também dependente do teor de umidade. Assim, as caulinitas, que apresentam partículas de formas hexagonais, apresentam-se como as menos plásticas, as illitas, com plasticidade intermediária, e as montmorilonitas por apresentarem estruturas cristalográficas mais complexas, são as mais plásticas.

Para Whittaker (1939), quanto mais fino o solo, maior a sua área específica, o que constitui uma das razões da diferença entre as propriedades físicas dos solos arenosos e argilosos. Além disto, como a plasticidade está diretamente relacionada com a granulometria das partículas, é possível estabelecer-se correlações entre as propriedades de plasticidade e área específica.

Silveira (1985), apresentando os resultados de um estudo estatístico através de correlações lineares simples entre as propriedades de plasticidade e área específica para solos lateríticos, determinada por vários métodos, concluiu que o LL e

o IP apresentaram correlações aceitáveis com as áreas específicas determinadas pelos métodos BET e azul de metileno e que o LP apresentou correlações com as áreas específicas determinadas através do método BET.

Da mesma forma, Ferreira e Machado (1986) apresentaram uma análise estatística através de regressão linear simples e múltipla entre as áreas específicas de solos lateríticos das regiões Norte e Nordeste do Brasil e as características de plasticidade, após tratamento térmico em temperaturas ambiente ( $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ),  $60^{\circ}\text{C}$  e  $110^{\circ}\text{C}$ .

O estudo da interdependência entre as referidas propriedades forneceu como resultado algumas correlações estatísticas simples entre as áreas específicas determinadas pelos métodos azul de metileno, de BET e pelo método granulométrico (diâmetros médios de Mellor, geométrico e aritmético) e as propriedades de plasticidade.

#### b) Água

Nos solos arenosos, a água percola pelos canalículos sob a ação da gravidade ou permanece armazenada em equilíbrio eletrostático, devido à porosidade destes solos. No caso das argilas, devido à forma complexa de suas partículas, e ao pequeníssimo espaço entre estas, intervêm forças de natureza capilar e molecular entre a água e o solo.

Devido à baixa permeabilidade das argilas, a água é submetida a altas pressões e impedida de escapar destes solos,

dissolvendo em si a fase gasosa.

Para as argilas, esta água intersticial estará sujeita, então, à força atrativa das partículas, a qual decresce com a distância à superfície dos grãos.

Mesmo em temperaturas ambientes, sob pressões elevadíssimas, aparece a camada de água solidificada dos solos. Os filmes desta água interpenetram-se nos pontos de contato das partículas e estabelecem uma ligação forte entre as mesmas, contribuindo para a coesão verdadeira.

Sujeita à pressões de natureza capilar é a camada de água adsorvida, que também influencia a coesão verdadeira.

Segundo Grim (1965), a propriedade de plasticidade das argilas provém basicamente das forças resultantes da atração existente entre as partículas dos argilominerais e da ação lubrificante exercida pela água entre as partículas anisométricas lamelares. Assim, as formas destas partículas favorecem os deslizamentos das mesmas entre si, funcionando a água intersticial como lubrificante.

De acordo com Means e Parcher (1963), a plasticidade é devida à presença de partículas dos solos, finas como lâminas, que possuem cargas eletromagnéticas em suas superfícies. Como as moléculas de água são bipolares, orientam-se como se fossem ímãs magnéticos próximos da superfície das partículas, ou através dos cátions adsorvidos.

As referidas moléculas de água quando se encontram adjacentes às partículas do solo são compelidas pelo campo magnético em um estado imóvel, tornando-se uma fina camada de

água aderida à partícula. Além da superfície desta partícula, a água é viscosa, desenvolvendo menos viscosidade com a distância. Então, quando a água presente é suficiente, as partículas, separadas por água, são permitidas deslizarem passando mutuamente para novas posições, sem mudança no volume de vazios e sem enfraquecimento da coesão. Quanto mais água for evaporada do solo, esta água mais viscosa, que separa as partículas, aumenta a coesão e reduz a plasticidade.

### c) Capacidade de Troca de íons

Uma importante propriedade correspondente aos argilominerais é a capacidade de troca iônica, já que os íons trocáveis apresentam influência considerável sobre as propriedades físico-químicas e tecnológicas dos argilominerais. As partículas de argila, pelo menos quando dispersas em água, são carregadas negativamente e à sua superfície podem existir cátions adsorvidos.

Para Souza Santos (1992) a capacidade de troca iônica varia conforme a espécie mineral. As argilas do grupo da montmorilonita apresentam capacidade de troca de cátions (CTC) maior do que as do grupo da caulinita. As ílitas apresentam capacidade intermediária entre os dois grupos referidos.

Vale salientar o fato de nem todos os cátions serem trocados com a mesma energia. Alguns cátions trocáveis podem ser:  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ . A matéria orgânica contida nas argilas e solos pode ter CTC elevada.



Em geral, a troca iônica causa efeitos profundos sobre as propriedades físicas das argilas e, em consequência, sobre as propriedades mecânicas, que interessam diretamente à engenharia civil.

O efeito da natureza dos cátions adsorvidos na plasticidade do sistema formado por argila e água pode ser verificado quando se executa o tratamento de um solo argiloso através da utilização de sais solúveis com o objetivo de modificar algumas propriedades por intermédio das mudanças causadas nas forças de ligação ou interação entre as partículas, como também, uma possível alteração na natureza da água adsorvida à superfície dos grãos dos argilominerais.

#### **d) Matéria Orgânica**

A matéria orgânica pode estar presente em diversos solos, e particularmente nas argilas, sob forma de partículas de madeira, folhas, ou degradada, ou sob forma de moléculas orgânicas adsorvidas nas faces menores dos argilominerais. Ela pode provir também da decomposição de restos animais pela ação de microorganismos.

Hosang e Locker (1971), citados por Queiroz de Carvalho (1975), afirmam que os valores de LL e de LP são incrementados com a porcentagem de matéria orgânica, entretanto, o IP tende a diminuir.

Estes autores também informam que a presença de matéria orgânica parece contribuir muito para a capacidade de reter água,

mas pouco para a plasticidade.

Por outro lado, Arman (1970), citado por Silveira (1984), verificou que é difícil a determinação de LL em solos que contenham mais de 30% de matéria orgânica, já que, ao contrário dos solos inorgânicos, a massa de solo orgânico não deforma nem rola. Por esta razão, antes de ocorrer o cisalhamento, a determinação do valor de LL verifica-se por intermédio de uma fricção entre a massa de solo e a concha do aparelho de Casagrande.

Para Souza Santos (1992) a plasticidade elevada das "ball-clays" é atribuída, isoladamente ou em conjunto com outros fatores, à presença de matéria orgânica na forma de sais de ácido húmico, que funcionam como colóides protetores das partículas lamelares de caulinita, permitindo a formação de películas de água adsorvida na superfície das partículas, que agem como agentes lubrificantes por facilitar o escorregamento das lâminas de caulinita, umas em relação às outras.

## **2.3 - Principais Fatores que Influenciam os Ensaios de Plasticidade dos Solos**

### **a) Manipulação e Remoldamento do Solo**

Segundo Spangler e Handy (1973), quando se adiciona água ao solo, à medida que se manipula a mistura, mudanças ocorridas na consistência da mesma são verificadas com relação ao volume do solo, através de suas características de inchamento ou

retração, como também, ao estado em que a mistura se encontra. Este estado dependerá das quantidades de água e solo presentes, bem como, da manipulação ou agitação da mistura.

Para Badillo e Rodriguez (1972), a intensidade desta manipulação afeta os limites de consistência de algumas argilas, sendo que o LP e o LL variam normalmente na mesma direção, entretanto, as variações do LP podem ser apenas da ordem de um terço do LL.

Terzaghi e Peck (1955) afirmam que a propriedade de perder resistência por abrandamento ao serem manipuladas a um teor de umidade constante é própria de algumas substâncias coloidais, principalmente das argilas. As causas prováveis do abrandamento são: a distribuição do ordenamento em que as moléculas das capas adsorvidas encontram-se dispostas e a distribuição da estrutura que é formada pelas partículas.

De acordo com Means e Parcher (1963), o LL e o LP são determinados em solos que têm sua estrutura natural completamente destruída pelo amassamento ou remoldagem. Logo, eles são indicativos de propriedades físicas de um solo remoldado. A estrutura, a origem geológica ou outras condições de um solo indeformado afetam as características de esforço-deformação. Assim, entende-se que esses limites não podem ser utilizados em substituição a métodos de ensaios que permitam medidas diretas da relação esforço-deformação-tempo.

Eles podem até não apresentar interesse primário, no entanto, são indicativos da referida relação, que apresenta interesse primordial para a engenharia.

Para Armstrong (1961), o inconveniente para os ensaios de plasticidade é que, apesar de serem executados com amostras de solos remoldadas, geralmente é desejável correlacionar-se os seus resultados com os de alguns ensaios, como os de cisalhamento, onde o material é ensaiado no seu estado indeformado.

#### **b) Secagem da Amostra**

Segundo Lambe (1951), a secagem de solos usados para determinação de LL e LP pode alterar o solo por causar subdivisões ou aglomerações das partículas, devido ao efeito da água adsorvida que não chega a ser completamente recuperada ou por efeito de mudanças químicas em alguma matéria orgânica do solo.

Estes efeitos podem, de forma significativa, alterar os limites de consistência, especialmente o LL, que para um solo orgânico seco em estufa tende a ser mais baixo do que o do não seco. Por outro lado, os efeitos de secagem em algumas argilas, particularmente aquelas compostas por minerais do grupo da montmorilonita, não podem ser previstos.

Da mesma forma, Means e Parcher (1963) também afirmam que os valores de LL para algumas argilas, especialmente aquelas contendo matéria orgânica, são afetados pela secagem. Em alguns casos, o LL é incrementado pela mesma, embora usualmente ele decresça.

Para Badillo e Rodriguez (1972), trocas irreversíveis nas características da fração coloidal orgânica de um solo podem

ser causadas pelo efeito da secagem. Na falta de outros meios, os solos orgânicos poderiam ser diferenciados dos inorgânicos de baixo valor de IP, executando-se as determinações de LL e LP com o material no seu estado natural, e depois com o mesmo seco em estufa, já que a secagem provoca uma apreciável diminuição dos limites de consistência do solo orgânico. Entretanto, para os solos inorgânicos, estes limites também são afetados, mas em muito menor escala, como também, eles podem aumentar ou diminuir, dependendo do tipo de solo.

Pena de Carvalho (1976), citado por Silveira (1984), realizando estudos em solos lateríticos, determinou maiores valores de LL para solos não secos previamente ao ar, sendo este fato mais acentuado em solos que apresentam maior conteúdo de argila.

### c) Aditivos

Badillo e Rodriguez (1972) descrevem estudos de estabilização de solos onde se tem investigado o efeito causado por algumas substâncias adicionais sobre os limites de consistência. Verificou-se que, geralmente, as que mais os afetam são as de base sódica, já que estas fazem estes limites aumentarem substancialmente.

Segundo Bertran (1969), na fase de preparo da amostra, quando há pouco tempo, para peneiramento por via úmida, despeja-se uma solução de sal comum (NaCl) gradativamente no recipiente. Isso provoca a sedimentação do material que se encontra em

suspensão. No entanto, esta operação poderá afetar os resultados dos ensaios de limites, pois o sal provoca diminuição no LL. Solos aparentemente semelhantes podem ser alterados de forma contrária por algumas outras substâncias.

#### **d) Condições Ambientais**

Segundo Lambe (1951), os ensaios para determinação dos limites de consistência dos solos devem ser executados em ambientes com atmosfera úmida, pois um ambiente seco afeta a exatidão do ensaio devido à evaporação da água durante o remoldamento e manipulação da amostra. Para o ensaio de LL isto é suficiente para que o número de golpes apresente um incremento demasiadamente rápido.

#### **e) Água de Amassamento**

De acordo com Mello e Teixeira (1971), um detalhe que ainda não está normalizado é a respeito da qualidade da água a ser utilizada nos ensaios de limites. A água normalmente usada é a comum da rede de abastecimento local. No entanto, as influências do teor eletrolítico da água intersticial da própria argila e da água de amassamento podem ser enormes em argilas altamente coloidais.

Lambe (1951) sugere a utilização da água destilada para minimizar a possibilidade de troca de íons entre o solo e algumas impurezas presentes na água de amassamento. Apesar das chances de tais trocas acontecerem serem mínimas, a dificuldade em se utili-

zar água destilada é pequena o bastante para justificá-la.

#### **f) Tempo de Execução do Ensaio**

Para Badillo e Rodriguez (1972), os valores dos limites de consistência também são influenciados pelo tempo durante o qual ocorre a preparação da pasta de solo e a execução do ensaio, devido a fatores, como, por exemplo, a evaporação da água de amassamento.

### **2.3.1 - Aspectos Relacionados ao Ensaio Convencional de Limite de Liquidez**

#### **a) Condições do Aparelho**

Segundo Bertran (1969), o aparelho de Casagrande deverá ser inspecionado antes de sua utilização para que se verifique se o mesmo apresenta boas condições para a execução de ensaios. Portanto, deve-se verificar primeiramente se o eixo da concha está gasto demais e se o mesmo permite movimento lateral, se os parafusos que prendem a concha ao suporte estão apertados e, ainda, se um sulco foi aberto na concha devido à utilização contínua, pois isto influiria nas dimensões da ranhura a ser feita no solo.

Lambe (1951) ainda adverte que pés de borracha no aparelho amortecem a base e ajudam a prevenir seu balanço sobre a mesa.

Além destes cuidados, o cinzel também deve ser inspecionado para que se verifique se suas dimensões conferem com as indicadas pelo método de ensaio considerado.

#### **b) Regulagem do Aparelho**

Badillo e Rodriguez (1972), afirmam que a altura de queda da concha é, por especificação, igual a 1 cm, sendo medida verticalmente a partir do ponto em que a concha toca a base ao cair. Também ressaltam a importância de que este ajuste seja feito cuidadosamente, usando-se, para isto, um prisma metálico de 1 cm de lado. É importante que se verifique se, nas conchas muito usadas, este ponto dilata-se em consequência do desgaste, provocando uma falsa altura de queda.

Para Armstrong (1961), é essencial que a calibração seja feita medindo-se a distância entre a base e a marca brilhante do lado de baixo da concha, já que este é o ponto de contato da mesma com a base do aparelho.

Segundo Bertran (1969), esta distância de queda deve ser conferida frequentemente com um calibre como os que alguns cinzéis trazem no cabo e ajustada com exatidão por meio de um parafuso de fixação.

#### **c) Material Constituinte da Base do Aparelho**

Além das investigações realizadas por Casagrande (1958) e Norman (1958), que pesquisaram materiais próprios para bases e



modificações detalhadas para o equipamento e seu uso, opiniões consideráveis têm sido dadas por necessidade da padronização internacional do aparelho e método de ensaio. Os principais pontos cuja atenção tem sido direta são: o material do qual a base é constituída e, particularmente, sua dureza e o efeito de transformação do material na relação entre a atividade da argila coloidal e sua resistência ao cisalhamento.

De acordo com Lambe (1951), devido à escassez de borracha durante a Segunda Guerra Mundial, aparelhos foram construídos com base de madeira em substituição à borracha dura do aparelho inicial. E, provavelmente, por diferenças restitutionais da borracha e da madeira, valores de LL executados nos dois tipos de aparelho não concordaram.

Parece, então, imprudente comparar ensaios de LL realizados em aparelhos de Casagrande que possuam bases de materiais distintos.

#### **d) Cinzel**

Uma outra dificuldade prática do ensaio convencional para determinação do LL apontada por Hovanyi (1958) é que ao se tentar abrir sulcos em areias finas siltosas ou argilosas, usando o cinzel padrão de Casagrande, o solo tenta quebrar o contato com a concha e escorregar para fora na frente do aparelho.

Estes solos arenosos podem requerer várias passagens do cinzel para evitar que se deformem as bordas do sulco. A profundidade do sulco deve ser aumentada em cada passagem do cinzel, somente a última passagem atingindo o fundo da concha, de modo a

abrir um sulco claro, bem definido e de dimensões adequadas.

Por outro lado, em alguns solos, especialmente solos orgânicos e não plásticos, o cinzel referido acima pode não cortar superfícies lisas quando puxado através da amostra na concha. Nestes casos, a ranhura pode ser aberta utilizando-se uma espátula limpa, sendo o sulco cuidadosamente conferido com o cinzel, em termos de tamanho e forma.

Segundo Salas (1954), devido a estas dificuldades em abrir a ranhura em alguns solos, um tipo de cinzel com seção trapezoidal tem sido adotado pela A.S.T.M. (American Society for Testing Materials), que pode ser pressionado no interior do solo na concha para formar o sulco. Este instrumento apresenta forma curva com a finalidade de ajustar-se à superfície interna da concha.

Entretanto, a forma pela qual o sulco é executado com este cinzel faz com que se rompa a aderência entre o solo e a concha e, durante o ensaio, há uma tendência para as duas partes da amostra escorregarem ao longo da superfície da concha, ao invés do sulco ser fechado pela deformação do solo. Para este caso, o fechamento da ranhura não corresponde a uma medida da resistência ao cisalhamento do solo.

Além disto, este tipo de cinzel não permite o controle da altura do sulco com precisão necessária.

#### **e) Liquefação para Solos sem Coesão**

Segundo Means e Parcher (1963), o valor de LL para solos sem coesão é menos significativo, embora um valor possa ser

encontrado para um solo fino sem coesão. Devido à capilaridade, a aparente coesão pode permitir a formação de uma ranhura. Entretanto, se o solo estiver no estado solto, pode ocorrer liquefação quando a concha cair.

Se for possível obter o valor do LL, a areia fina ou silte deve está no estado denso para que persista a resistência ao cisalhamento durante a deformação causada pelo golpe da concha. Desta forma, a resistência ao cisalhamento não é medida através da coesão e nem a plasticidade pode ser medida através do teor de umidade.

#### **f) Sensibilidade do Operador**

Pinto e Castro (1971), afirmam que a sensibilidade do operador também influencia na execução de um ensaio para determinação do LL, principalmente com relação a aspectos referentes à forma e dimensões do sulco, velocidade da operação, especialmente para os aparelhos manuais, e observação precisa do ponto de fechamento do sulco.

### **2.3.2 - Aspectos Relacionados ao Ensaio Convencional de Limite de Plasticidade**

#### **a) Certeza de Desintegração do Cilindro de Solo**

Para Armstrong (1961), é necessário que o operador apresente sensibilidade suficiente para assegurar que o cilindro de solo está realmente desintegrando-se devido apenas à mudança

no seu teor de umidade, pois o cilindro pode já estar fissurado antes mesmo do ensaio começar, ou se ele é oblíquo, fragmentando-se sem se ter atingido o LP.

#### **b) Pressão Exercida pelo Operador**

Means e Parcher (1963), afirmam que algumas tentativas têm sido feitas para idealizar um aparelho mecânico para substituir a manipulação do cilindro de solo para o ensaio de determinação do LP. Porém os resultados não foram satisfatórios, devido ao fato de que não se tem podido desenvolver nenhum aparelho em que a pressão exercida possa ser ajustada à tenacidade dos diferentes solos. Já que, na manipulação da amostra, devido novamente à sensibilidade do operador, que é guiado pelo tato, ajusta automaticamente a pressão requerida para rolar o cilindro.

#### **c) Superfície Absorvente**

O valor do LP de um solo é determinado rolando-se um cilindro do mesmo sobre uma placa de vidro até que este se fragmente. Também se utiliza uma superfície suavemente absorvente como uma folha de papel totalmente seca, para acelerar a perda de umidade do material. Para Salas (1954), o uso de papel de filtro deve ser feito tomando-se o cuidado para que este não seja do tipo que solte fibrilas, já que as mesmas alterariam a amostra de solo.

#### **d) Igualdade entre LL e LP**

Um solo pode exibir um IP igual a zero, isto é, os valores do LL e do LP são iguais. Assim, um solo é definitivamente plástico em caráter, embora a variação do teor de umidade dentro do qual ele exiba as propriedades de um solo plástico é tão pequena que a variação não pode ser medida pelos ensaios convencionais de laboratório para LL e LP. Solos tendo um IP igual a zero, determinado por estes ensaios, não deverão ser confundidos com solos não plásticos.

Para Silveira (1990), o ensaio tradicional para determinação do LP depende consideravelmente da experiência do operador, especialmente para solos que apresentem valores de LP baixos ou próximos do LL, onde se verificam dificuldades com relação à formação do cilindro de solo, e, em consequência, operadores inexperientes ou impacientes apresentam forte tendência em classificar estes solos como não plásticos.

### **2.3.3 - Aspectos Relacionados aos Ensaio de Plasticidade Executados Através da Utilização do Cone de Penetração**

#### **a) Critério de Resistência**

Os métodos convencionais universalmente aceitos para determinação do LL e do LP têm sido investigados por apresentarem algumas deficiências.

Além disto, Wood e Wroth (1978) argumentam que, como os limites de consistência podem ser considerados como teores de água associados com estados de resistência do solo na condição

remoldada saturada, a utilização de um ensaio que seja capaz de avaliar a resistência de forma simples, segura e mais direta tem recebido atenção especial.

Desta maneira, os índices de correlações essenciais entre propriedades de engenharia serão mais confiáveis se estes limites forem determinados por um ensaio de resistência ao cisalhamento, conduzindo, assim, à investigações de métodos alternativos. Entre estes métodos, encontra-se o que utiliza o cone de penetração.

As limitações do mecanismo do aparelho convencional utilizado para a determinação do LL descritas por Norman (1958) foram provadas por Casagrande (1958) que sugeriu que a principal desvantagem apresentada pelo tradicional ensaio de LL é o fato deste consistir de um ensaio dinâmico de cisalhamento, não podendo, portanto, produzir como resultado uma base uniforme para estabelecer-se comparações entre solos finos, pois os mesmos divergem em suas reações se submetidos a ensaios com vibrações. Neste sentido, um simples ensaio de cisalhamento direto ou um de cisalhamento indireto, como o cone de penetração, poderia eliminar muitas destas desvantagens, uma vez que este ensaio é do tipo estático.

Além dos aspectos relacionados ao ensaio convencional de LL já citados anteriormente neste capítulo, Sherwood e Ryley (1970), assim como Nagaraj e Jayadeva (1981) também citam imperfeições deste ensaio referentes a equipamentos, dificuldades relevantes com relação à execução do procedimento, especialmente para solos de baixa plasticidade, além da sensibilidade necessária ao operador durante a execução do ensaio.

Da mesma forma, Norman (1958) e Sowers *et al.* (1959) reconhecem que apesar de ser largamente utilizado por todo o mundo como um ensaio padrão para classificação de solos, este método tem apresentado alguns inconvenientes principalmente relacionados com a repetibilidade.

O ensaio utilizando o cone de penetração como aparelho padrão para determinar o LL tem sido extensamente usado por vários países. Recentemente, pesquisadores como: Belviso *et al.* (1985), Wasti e Bezirci (1986), Wasti (1987), Wood e Wroth (1978), Silveira (1990), Silveira (1990.a), entre outros, propõem o uso deste ensaio para determinar também o IP, redefinido nas bases de um critério de resistência.

Por outro lado, Whyte (1982), refere-se ao ensaio de LP como um ensaio de procedimento grosseiro e que apresenta variações consideráveis nos resultados. Belviso *et al.* (1985) também citam a influência do operador nos resultados obtidos.

Para Nagaraj e Jayadeva (1981), o número de golpes requerido para fechar a ranhura do solo talhado por um cinzel padrão, ou seja, a força resistente à deformação dos lados da ranhura, ou a profundidade de penetração do cone, representam uma medida relativa da resistência ao cisalhamento dos sistemas de solo em correspondentes teores de umidade.

Verifica-se que, enquanto o aparelho de Casagrande foi uma tentativa de padronizar o procedimento descrito por Atterberg (1911) com a finalidade de detectar o teor de umidade dos solos para uma transição entre os estados líquido e plástico, o cone penetrométrico é mais detector do teor de umidade em

que os solos apresentam uma determinada resistência.

Wood e Wroth (1978) têm proposto a melhor estimativa atual da resistência ao cisalhamento não drenada de todos os solos nos seus respectivos LL's e admitem que o LP poderia ser redefinido como o teor de umidade em que a resistência é cem vezes aquela obtida no LL, baseados em evidências experimentais de Skempton e Northey (1953).

Sendo, portanto, o IP também redefinido como o teor de umidade que produz uma variação de cem vezes a resistência não drenada no LL.

#### **b) Reprodutibilidade e Repetibilidade**

Para Marinho (1976), o estudo de repetibilidade é o conduzido em um laboratório com o mesmo equipamento e o mesmo operador, enquanto que o estudo de reprodutibilidade é o realizado através de laboratórios, operadores e equipamentos diferentes.

A reprodutibilidade dos resultados de um ensaio é um fator muito importante em qualquer método.

Segundo Sherwood e Ryley (1970), estudos foram realizados para analisar os fatores mais prováveis para afetar a reprodutibilidade dos ensaios que utilizam o cone de penetração.

Estes incluem:

- o tempo durante o qual o cone é deixado penetrar no solo;
- a agudez da extremidade do cone;
- a textura da superfície do cone;
- a técnica do operador.



No entanto, resultados de Hansbo (1957) foram confirmados, onde se verificou que a penetração do cone foi completada durante um segundo. O tempo escolhido entre soltar o cone e fazer a leitura é principalmente uma questão de conveniência com relação ao procedimento do ensaio.

Porém, apesar destes fatores, vários investigadores afirmam que os ensaios de plasticidade executados com o cone de penetração apresentam melhor repetibilidade do que os executados através dos procedimentos padrões, já que dependem em muito menor escala da sensibilidade do operador.

#### **c) Agudez da Extremidade do Cone**

Quando a extremidade do cone torna-se gasta, resultados de penetrações inferiores são obtidos.

De acordo com Houlsby (1982), é permitido na BS 1377 (1975) que a extremidade do cone seja rombuda até um limite especificado, quando da utilização do mesmo em ensaios para determinação do LL. Resultados obtidos por estes autores mostram que para cones com rombudez máxima permissível, o efeito é o incremento da resistência por aproximadamente 9,5%.

Hansbo (1957) sugeriu que, para um cone rombudo, a profundidade de penetração poderia ser medida pela posição imaginária da extremidade do cone ideal e não para a extremidade rombuda. Neste caso, os valores obtidos mostram que a mudança média na resistência é a redução de 0,5% e se estas correções forem adotadas poderão fornecer resultados mais consistentes.

#### **d) Ângulo da Extremidade do Cone**

Houlsby (1982), citado por Wood (1985), apresentou alguns de seus resultados teóricos e mostrou que a tolerância de  $1^{\circ}$  no ângulo do cone de  $30^{\circ}$  afeta a resistência que será determinada no limite de liquidez. Entretanto, os resultados foram obtidos somente para um cone estaticamente encravado no solo, e não podem ser convertidos para valores da resistência ao cisalhamento não drenada para o ensaio original de LL através do cone de penetração, já que o mesmo envolve um cone liberado para cair.

Hansbo (1957) correlacionou os resultados de muitos ensaios e concluiu que a penetração para um cone de 60 g e  $60^{\circ}$  seria 0,384 vezes o valor da penetração para um cone de 100 g e  $30^{\circ}$ , no mesmo solo.

#### **e) Rugosidade da Superfície do Cone**

Os resultados experimentais de Houlsby (1982) mostram que o significado da rugosidade da superfície do cone é consideravelmente maior que o do ângulo da extremidade e o da rombudez do cone.

A variação compreendida, ou seja, um cone perfeitamente liso para um perfeitamente rugoso, resulta num fator de cerca de 1,9 na resistência.

Uma especificação das propriedades da superfície do cone é requerida se o ensaio de limite de liquidez for utilizado como um indicador efetivo da resistência do solo.

A variação citada refere-se ao tipo de efeito que a adesão entre solo e cone pode apresentar. Esta adesão pode não ser uma característica constante e poderá variar ao longo da profundidade do cone.

#### **f) Dimensões do Recipiente de Solo**

Quando o cone penetra na superfície do solo algum levantamento ocorre em torno daquele quando o solo é deslocado.

Segundo Houlsby (1982), o raio máximo em que se espera ocorrer esta deformação é 21,4 mm. O recipiente utilizado para conter a amostra de solo, no ensaio de LL, é especificado pela BS 1377 (1975) como tendo aproximadamente 55 mm de diâmetro. Então, é adequado providenciar para que o ensaio seja executado com o cone penetrando no centro da amostra de solo para evitar que a proximidade das paredes do recipiente possam, de alguma forma, impedir o deslocamento do solo.

Sendo o ensaio realizado desta maneira, verifica-se que as dimensões do recipiente são adequadas para não influir no procedimento.

#### **g) Conteúdo de Argila no Solo**

A diferença entre valores de LL determinados pelo aparelho de Casagrande e cone de penetração pode ser devida ao comportamento da argila sob os diferentes métodos de deformação aplicados pelos dois aparelhos.

Resultados obtidos por Budhu (1985) mostram que quando os valores de LL obtidos através do cone de penetração são

superiores aos obtidos pelo aparelho de Casagrande britânico, de base menos rígida que o americano, o conteúdo de argila das amostras do solo são geralmente menores que 50%.

#### **h) Velocidade de Aplicação da Deformação Cisalhante**

O efeito da velocidade de aplicação da deformação cisalhante imposta ao solo pelo aparelho de Casagrande e pelo cone de penetração pode parcialmente justificar também a diferença observada em valores de LL determinados pelos dois aparelhos, particularmente para solos com alto conteúdo de argila.

#### **i) Aplicabilidade a Solos de Baixa Plasticidade**

De acordo com Wasti e Bezirci (1986), os resultados de ensaios executados através dos métodos de Casagrande e cone de penetração apresentam boa concordância para valores de LL até aproximadamente 100%, que é o máximo valor esperado para solos naturais. Para limites nas mais altas variações, o ensaio de cone dá valores muito menores de LL.

Como também, a comparação de valores de LP obtidos usando o ensaio convencional e o procedimento proposto por Wood e Wroth (1978) mostra algumas dispersões e não dá resultados razoáveis para solos com LL maiores que cerca de 150% para amostras de solos artificiais utilizadas para o referido estudo. E para quase todas as misturas de solo e bentonita, exceto algumas que apresentam valores relativamente baixos de LL, o método que utiliza o

cone de penetração apresentou resultados anômalos, com IP maiores ou iguais a LL, que foram descartados.

Em síntese, verifica-se, através das vantagens e desvantagens apresentadas por cada procedimento de ensaio, que análises teóricas mais profundas são necessárias para permitir que estes sejam cada vez mais analisados criticamente com a finalidade de aperfeiçoá-los para a obtenção de resultados mais consistentes.

#### 2.4 - **Comparações de Resultados de Ensaio de Plasticidade Executados Através dos Métodos Convencionais e dos Procedimentos que Utilizam o Cone de Penetração**

Embora não seja esperado que resultados de diferentes ensaios correspondam precisamente, correlações entre valores de limites de consistência determinados pelos métodos convencionais e através do cone de penetração para uma variedade de solos são consideradas satisfatórias.

Investigadores têm mostrado que as diferenças entre valores de LL determinados através dos dois métodos mencionados não foram grandes. Para Budhu (1985), evidências deveriam ser testadas para mostrar que alguns cones dariam resultados idênticos se a profundidade de penetração apropriada fosse especificada.

A seguinte correlação entre o LL determinado pelo método russo (LLr) e o aparelho de Casagrande (LLcg) foi obtida por Skopek *et al.* (1975):

$$LLcg = 0,71 LLr + 7,43 \quad (2.1)$$

Segundo Littleton e Farmilo (1977), para valores de LL variando no intervalo 20 - 100 %, a seguinte equação linear é uma aproximação aceitável para a relação entre os valores de LL determinados através do ensaio padrão com aparelho de Casagrande (LLcg) e por meio do cone de penetração (LLc):

$$LLcg = 1,03 LLc - 1,65 \quad (2.2)$$

Silveira (1984.a), utilizando solos lateríticos, verificou o grau de relacionamento entre os dois métodos através de um programa de correlação linear simples e obteve a equação:

$$LLcg = 0,93 LLc - 2,54 \quad (2.3)$$

Para Moon e White (1985) a equação de correlação obtida foi a seguinte:

$$LLcg = 0,85 LLc + 5,47 \quad (2.4)$$

De acordo com Wasti (1987), a equação da reta mais adequada, obtida pela análise de regressão linear usando o método dos mínimos quadrados foi:

$$LLcg = 0,99 LLc - 4,89 \quad (2.5)$$

E, no Quadro 2.1, várias relações entre valores de LL determinados pelos dois procedimentos já referidos, obtidos

através de determinações de resultados de ensaios de outros pesquisadores são apresentados.

#### QUADRO 2.1

Relações entre Valores de LL Determinados pelo Método de Casagrande e pelo Método do Cone de Penetração.

| AUTOR  | TIPO DE CONE | RELAÇÃO                |
|--|--------------|------------------------|
| Stefanoff (1957)                                     | Russo        | LLcg = 1,50 LLc - 7,4  |
| Bozinovic (1958), depois Sherwood e Ryley (1968)     | Russo        | LLcg = 1,20 LLc - 5,3  |
| Matschak e Reitschel (1965), Sherwood e Ryley (1968) | Russo        | LLcg = 1,20 LLc - 3,7  |
| Skopek e Ter-Stepanian (1975)                        | Russo        | LLcg = 1,40 LLc - 10   |
| Uppal e Aggarwal (1958)                              | Indiano      | LLcg = 1,07 LLc - 3,4  |
| Flaate (1964)  | Indiano      | LLcg = 1,05 LLc        |
| Sowers <i>et al.</i> (1959)                          | Georgiano    | LLcg = 1,25 LLc - 9,4  |
| Sherwood e Ryley (1968)                              | Britânico    | LLcg = 1,10 LLc - 3,0  |
| Budhu (1985)   | Britânico    | LLcg = 1,07 LLc - 4,3  |
| Belviso <i>et al.</i> (1985)                         | Britânico    | LLcg = 1,00 LLc - 4,29 |
| Sampson e Netterberg (1985)                          | Britânico    | LLcg = 0,99 LLc - 4,16 |

Dados de Wasti (1987).

Ainda segundo Wasti (1987), os valores de LP obtidos utilizando o ensaio padrão (LP) e o que usa o cone de penetração (LPc), seguindo o procedimento proposto por Wood e Wroth (1978) são comparados e a equação da reta mais adequada é:

$$LP = 1,31 LPc - 8,80 \quad (2.6)$$

Os únicos outros dados conhecidos pelo referido autor que fornece valores de LP determinados por estes dois métodos são fornecidos através do procedimento proposto por Belviso *et al.* (1985).

A reta relacionada ao cálculo dos resultados destes ensaios apresenta uma expressão muito similar:

$$LP = 1,23 LPc - 7,88 \quad (2.7)$$

Uma expressão que relaciona os valores de IP e LL, correspondente à equação da reta "A" no Gráfico de Plasticidade (A. Casagrande) é:

$$IP = 0,73 LL - 14,6. \quad (2.8)$$



## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - Materiais

##### 3.1.1 - Seleção e Identificação das Jazidas

O critério utilizado para a seleção das jazidas baseou-se no aproveitamento do potencial das mesmas para construção de barragens de terra, situadas no Estado da Paraíba, e que fazem parte do Projeto do Semi-Árido e do Projeto Canaã.

De acordo com este critério, selecionou-se onze jazidas localizadas nos seguintes municípios paraibanos: Curral Velho, Nova Olinda, Sapé, Santana de Mangueira e Desterro.

Os ensaios foram realizados com amostras de solos naturais, sem haver, portanto, nenhum tipo de mistura artificial.

Para a execução dos ensaios, utilizou-se água destilada para minimizar a possibilidade de troca de íons entre os solos e algumas impurezas na água.

As jazidas foram identificadas de acordo com o Quadro

3.1.

QUADRO 3.1

Identificação e Localização das Jazidas

| AMOSTRA | JAZIDA    | OBRA                  | MUNICÍPIO            |
|---------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 1       | Mumbuca   | Barragem Bruscas      | Curral Velho         |
| 2       | Lira      | Barragem Bruscas      | Curral Velho         |
| 3       | da Serra  | Açude Canoas          | Nova Olinda          |
| 4       | Odebrecht | Açude Canoas          | Nova Olinda          |
| 5       | Sapé      | Barragens S. Salvador | Sapé                 |
| 6       | * S.D.M.  | Açude Poço Redondo    | Santana de Mangueira |
| 7       | I         | Açude Jeremias        | Desterro             |
| 8       | IB        | Açude Jeremias        | Desterro             |
| 9       | II        | Açude Jeremias        | Desterro             |
| 10      | IV        | Açude Jeremias        | Desterro             |
| 11      | V         | Açude Jeremias        | Desterro             |

Nota: \* S.D.M.: Jazida Santana de Mangueira.

3.1.2 - Localização das Jazidas

A localização das jazidas estudadas nesta pesquisa é mostrada na Figura 3.1.

As Figuras 3.2 a 3.8, apresentam algumas plantas de situação das mesmas, conforme descrições a seguir:

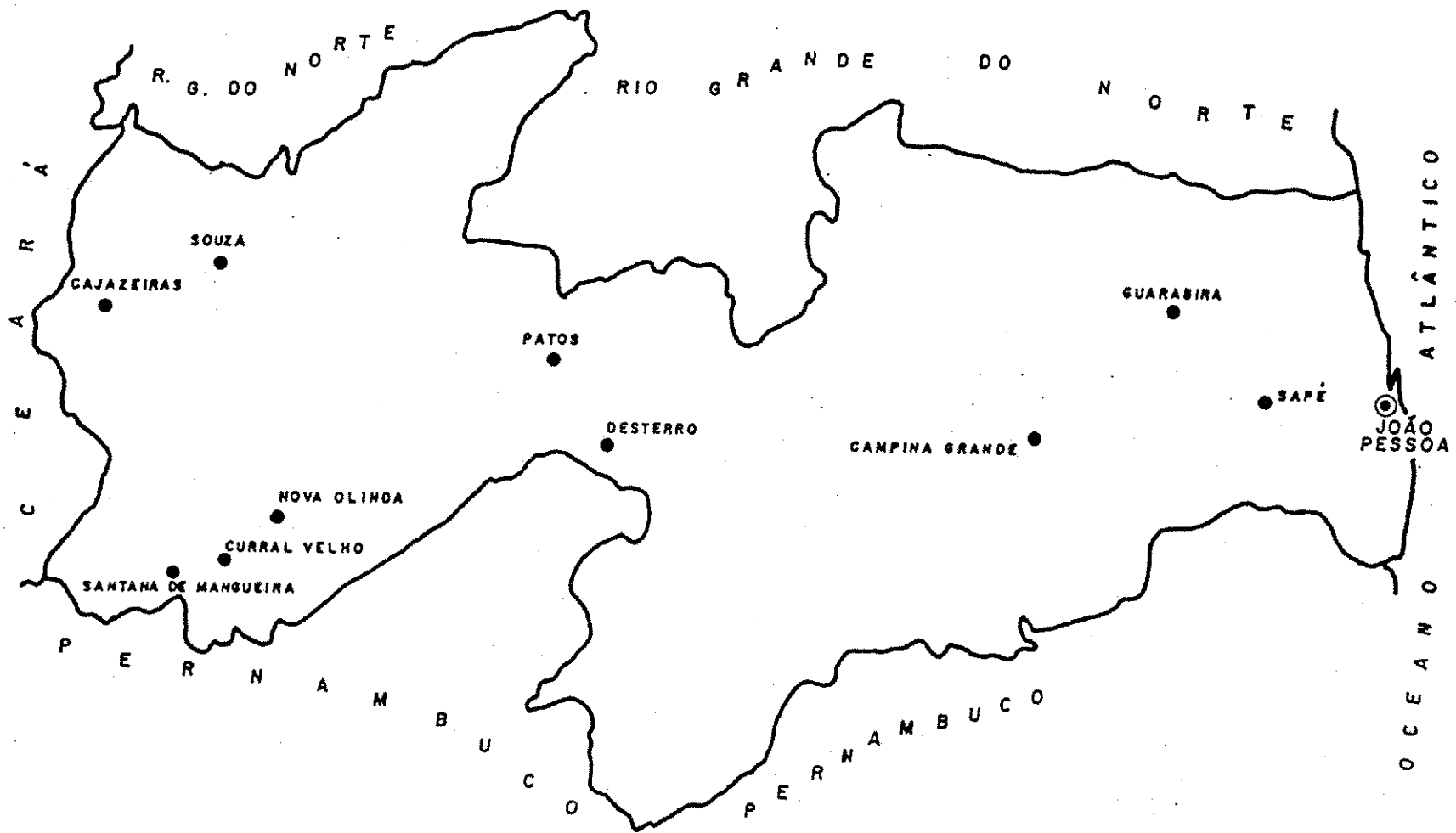


FIGURA 3.1 — LOCALIZAÇÃO DAS JAZIDAS

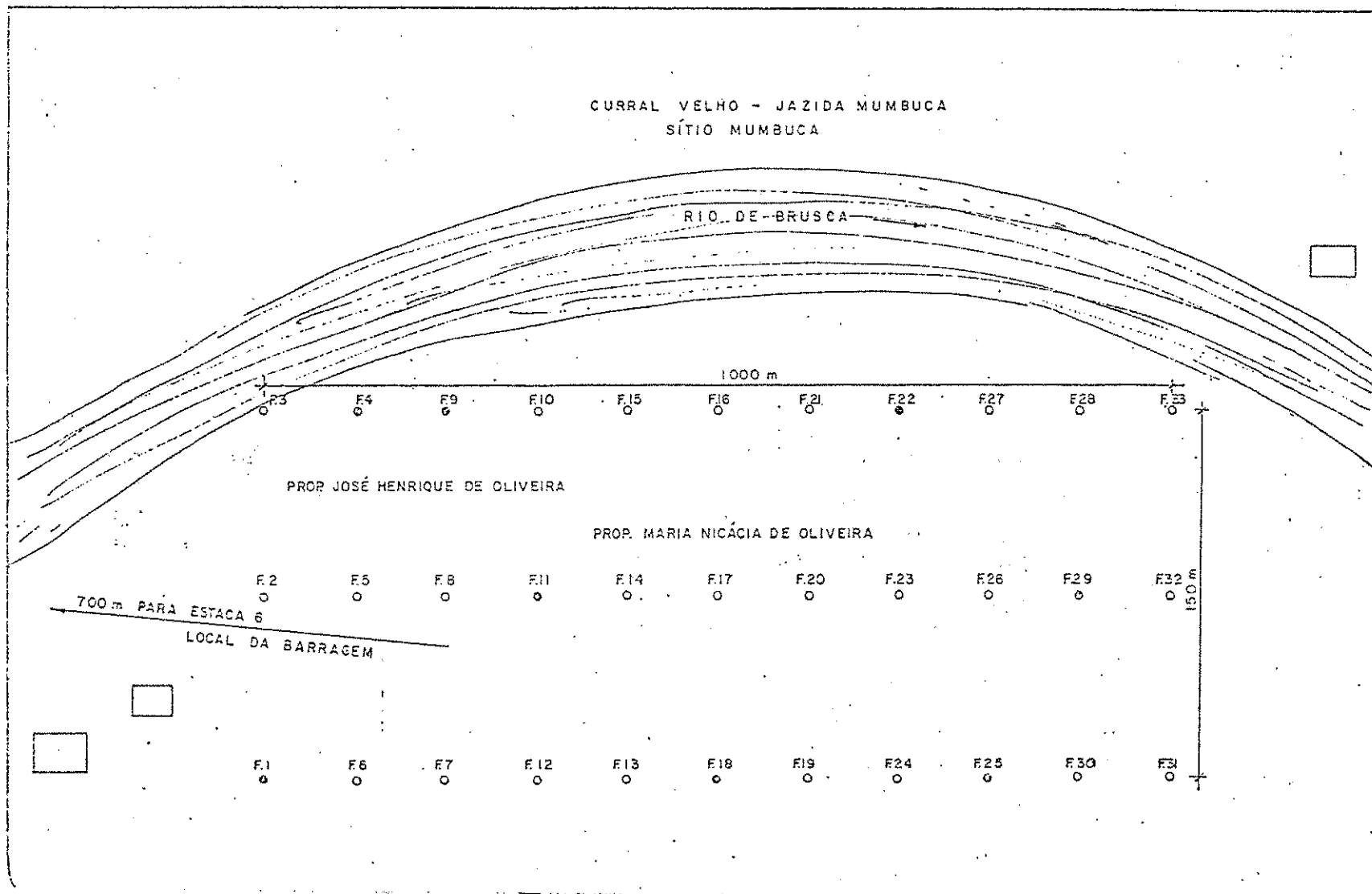


FIG. 3.2 - PLANTA DE SITUAÇÃO DA JAZIDA

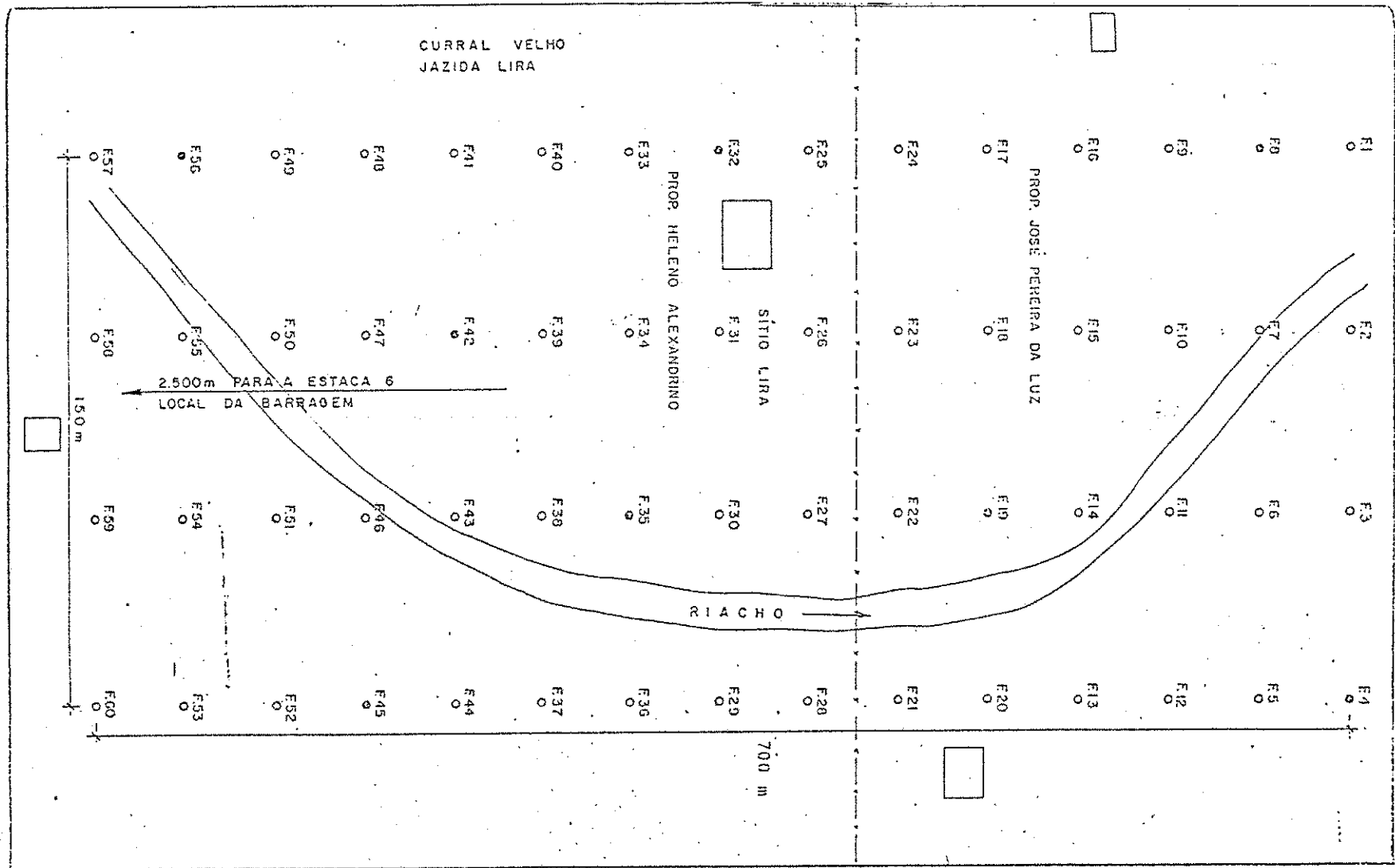
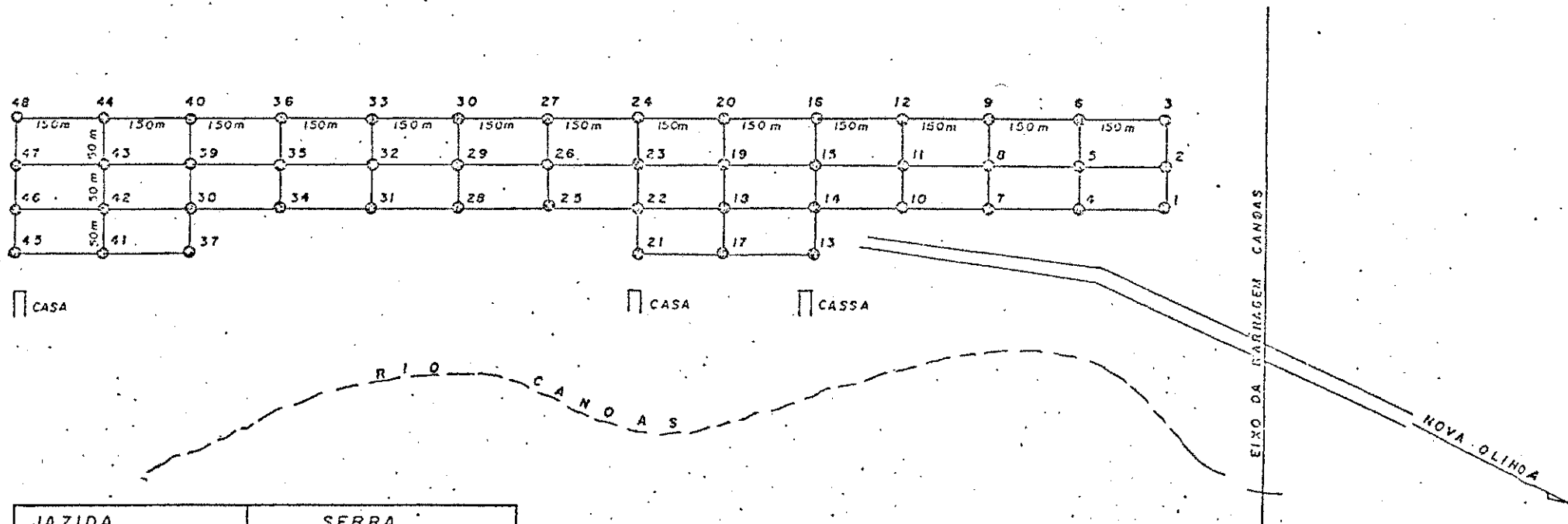


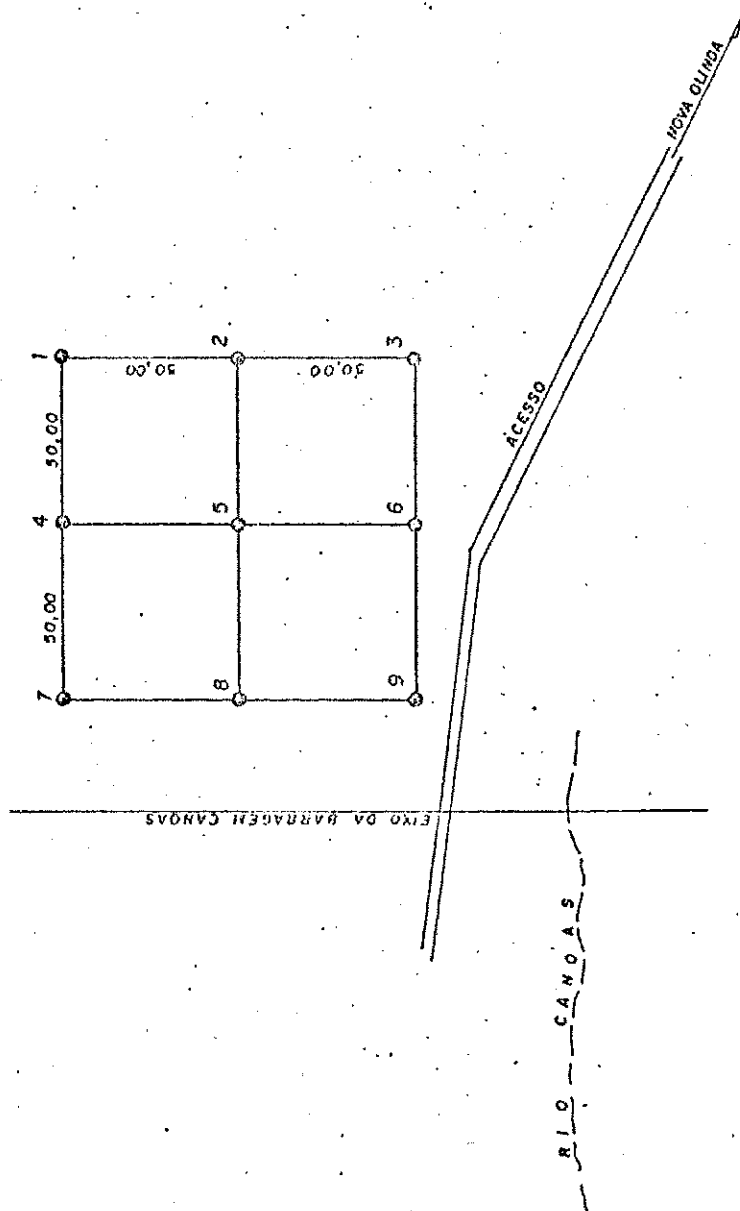
FIG. 3.3 - PLANTA DE SITUAÇÃO DA JAZIDA



| JAZIDA          | SERRA                     |
|-----------------|---------------------------|
| PROPRIEDADE     | SÍTIO CANHOTO             |
| PROPRIETÁRIOS   | ANTONIO PAULINO           |
|                 | FRANCISCO MARÇAL          |
|                 | SEVERINO SIMÃO            |
| ÁREA            | 225.000,00 m <sup>2</sup> |
| VOL. TEÓRICO    | 315.000,00 m <sup>3</sup> |
| VOL. UTILIZÁVEL | 286.650,00 m <sup>3</sup> |

FIG. 3.4 - PLANTA DE SITUAÇÃO DE JAZIDA

SANGRADOIRO DA BARRAGEM DO SACO



|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| JAZIDA          | ODEBRECHT                |
| PROPRIEDADE     | SÍTIO ZÉ RAMOS           |
| PROPRIETÁRIO    | GUATIM                   |
| ÁREA            | 10.000,00 m <sup>2</sup> |
| VOL. TEÓRICO    | 18.300,00 m <sup>3</sup> |
| VOL. UTILIZÁVEL | 18.300,00 m <sup>3</sup> |

FIG. 3.5 - PLANTA DE SITUAÇÃO DE JAZIDA.

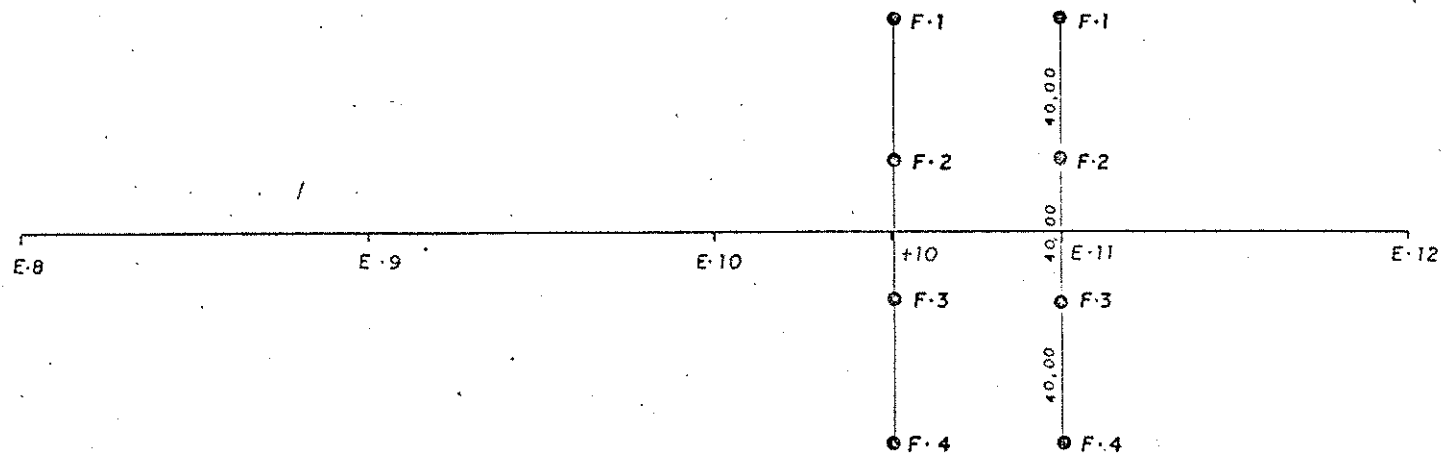


FIG. 3.6 — PLANTA DE SITUAÇÃO DA JAZIDA — BARRAGEM SÃO SALVADOR — SAPE



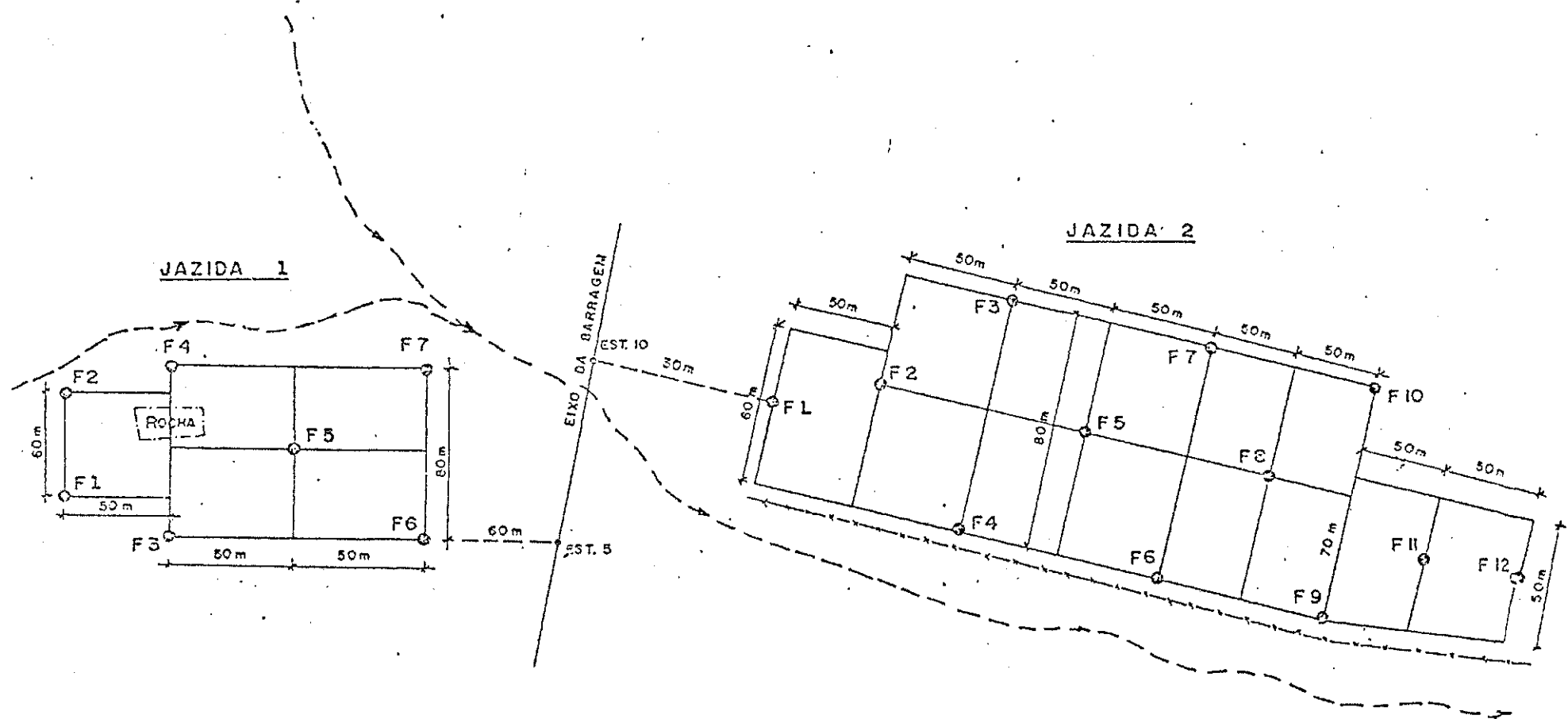
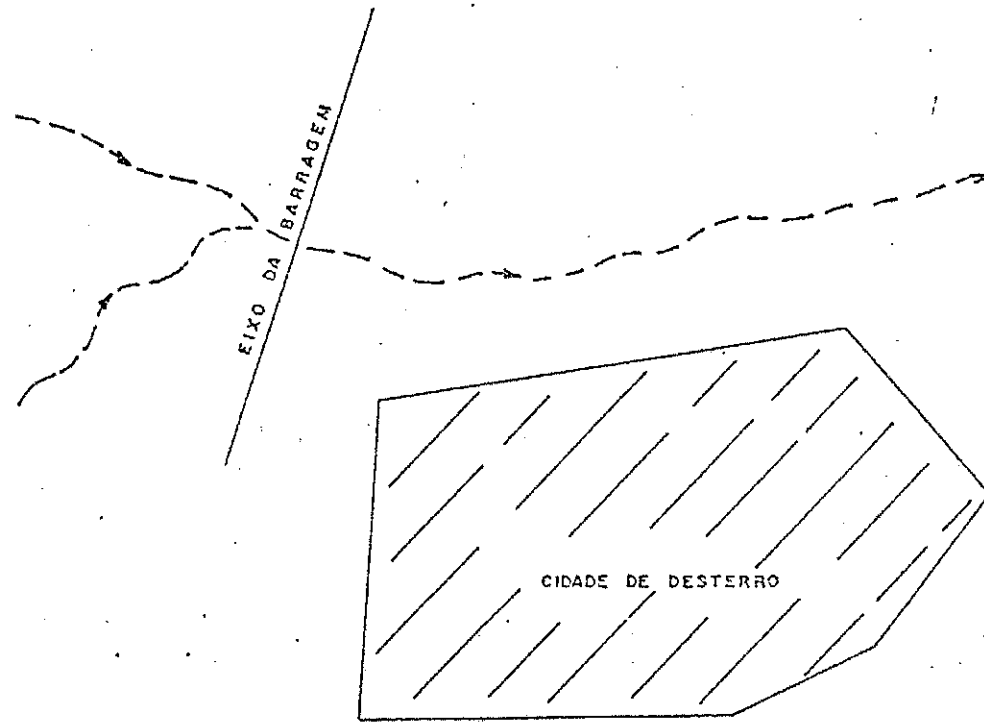


FIG. 3.7 - PLANTA DE SITUAÇÃO DAS JAZIDAS

|                 | JAZIDA 1                   | JAZIDA 2             |
|-----------------|----------------------------|----------------------|
| PROPRIETÁRIO    | ALVINO FERREIRA            | ALVINO FERREIRA      |
| UTILIZAÇÃO      | CORPO DA BARRAGEM/FUNDAÇÃO | CORPO DA BARRAGEM    |
| ÁREA            | 1,10 ha                    | 2,90 ha              |
| PROF. MÉDIA     | 1,37 m                     | 2,00 m               |
| VOL. TOTAL      | 15070 m <sup>3</sup>       | 58000 m <sup>3</sup> |
| VOL. UTILIZÁVEL | 12056 m <sup>3</sup>       | 46400 m <sup>3</sup> |



|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| JAZIDA            | DESTERRO 4            |
| PROPRIETÁRIO      | GERALDO VENTURA       |
| UTILIZAÇÃO        | CORPO DA BARRAGEM     |
| ÁREA              | 3.0 ha                |
| PROF. MÉDIA       | 0.60 m                |
| VOLUME UTILIZÁVEL | 14.400 m <sup>3</sup> |
| VOLUME TOTAL      | 18.000 m <sup>3</sup> |
| DISTANCIA         | 1.9 Km                |

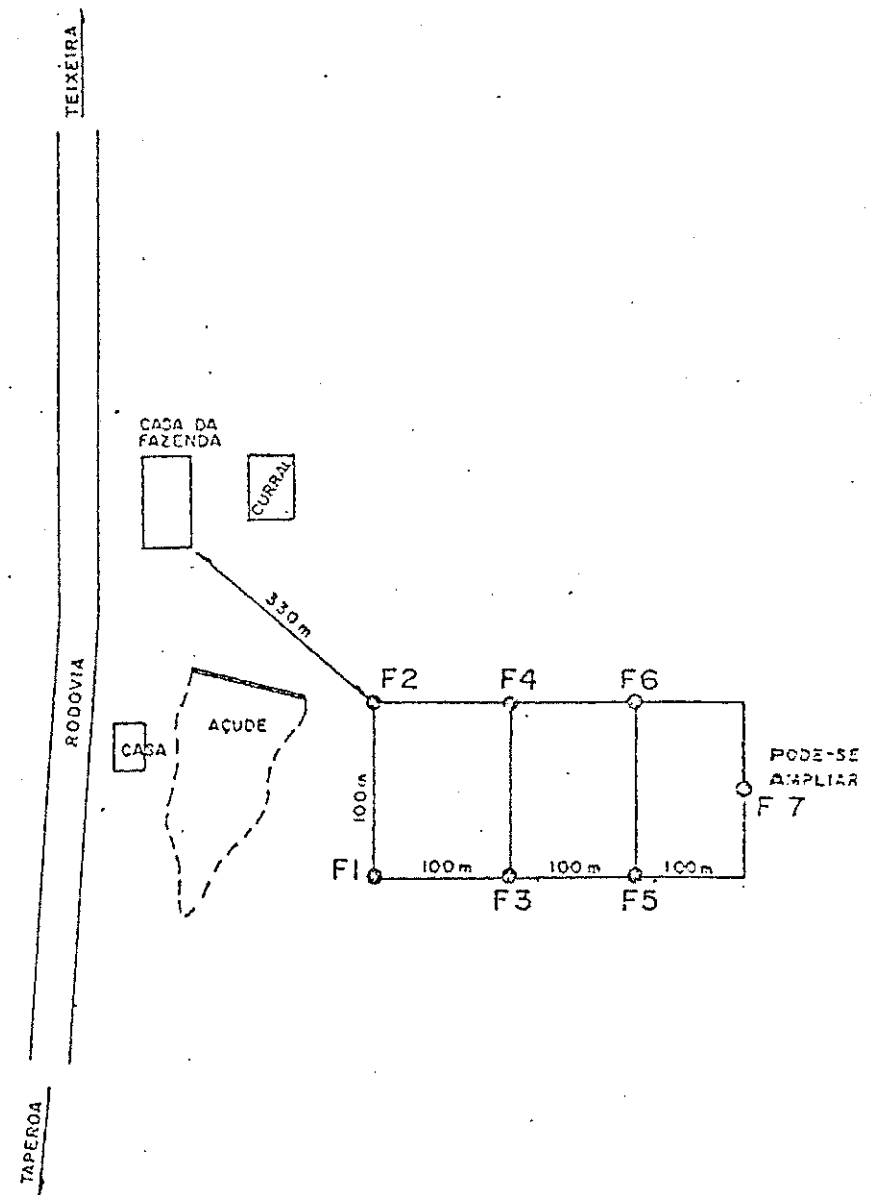


FIG. 3.8 - PLANTA DE SITUAÇÃO DA JAZIDA

### **Amostras 1 e 2**

A Barragem Bruscas foi construída no município de Curral Velho. As jazidas estudadas para execução da mesma apresentam material com predominância de solos finos e se situam a uma distância média de 1600 m do eixo da barragem.

### **Amostras 3 e 4**

O Açude Canoas localiza-se no município de Nova Olinda. As jazidas estudadas apresentam-se como materiais de granulação média a fina e se localizam nas proximidades do eixo da barragem.

### **Amostra 5**

O Açude Público São Salvador localiza-se no município de Sapé, distando cerca de 6,0 km da sede do mesmo. O referido açude está projetado para o abastecimento das populações das cidades de Sapé, Mari, Caldas Brandão e Mulungú. As jazidas foram estudadas dentro da bacia hidráulica do açude e se distribuíam de maneira estratégica, permitindo uma minimização das despesas decorrentes de desapropriação e distância de transporte.

### **Amostra 6**

O Açude Poço Redondo situa-se no município de Santana de Mangueira. A jazida localiza-se nas proximidades do eixo da barragem.

## **Amostras 7, 8, 9, 10 e 11**

O Açude Público Jeremias localiza-se na micro-região Serra do Teixeira e foi construído para barrar o rio Desterro, no município do mesmo nome, distando cerca de 0,5 km da sede deste município. Algumas jazidas localizam-se a montante ou a jusante da barragem, enquanto que outras situam-se a distâncias médias em torno de 1 a 2 km do eixo da barragem.

### **3.2 - Metodologia Utilizada na Pesquisa**

As atividades / ensaios desenvolvidos na pesquisa são mostrados esquematicamente na Figura 3.9.

#### **3.2.1 - Ensaios Realizados**

Para efeito de repetibilidade realizou-se três determinações para cada ensaio.

##### **3.2.1.1 - Análise Granulométrica**

A análise granulométrica representa a comparação entre as proporções relativas em que as dimensões das partículas dos solos são encontradas com uma escala granulométrica adotada.

Nesta pesquisa, a composição granulométrica dos solos foi determinada de acordo com a escala granulométrica do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem).

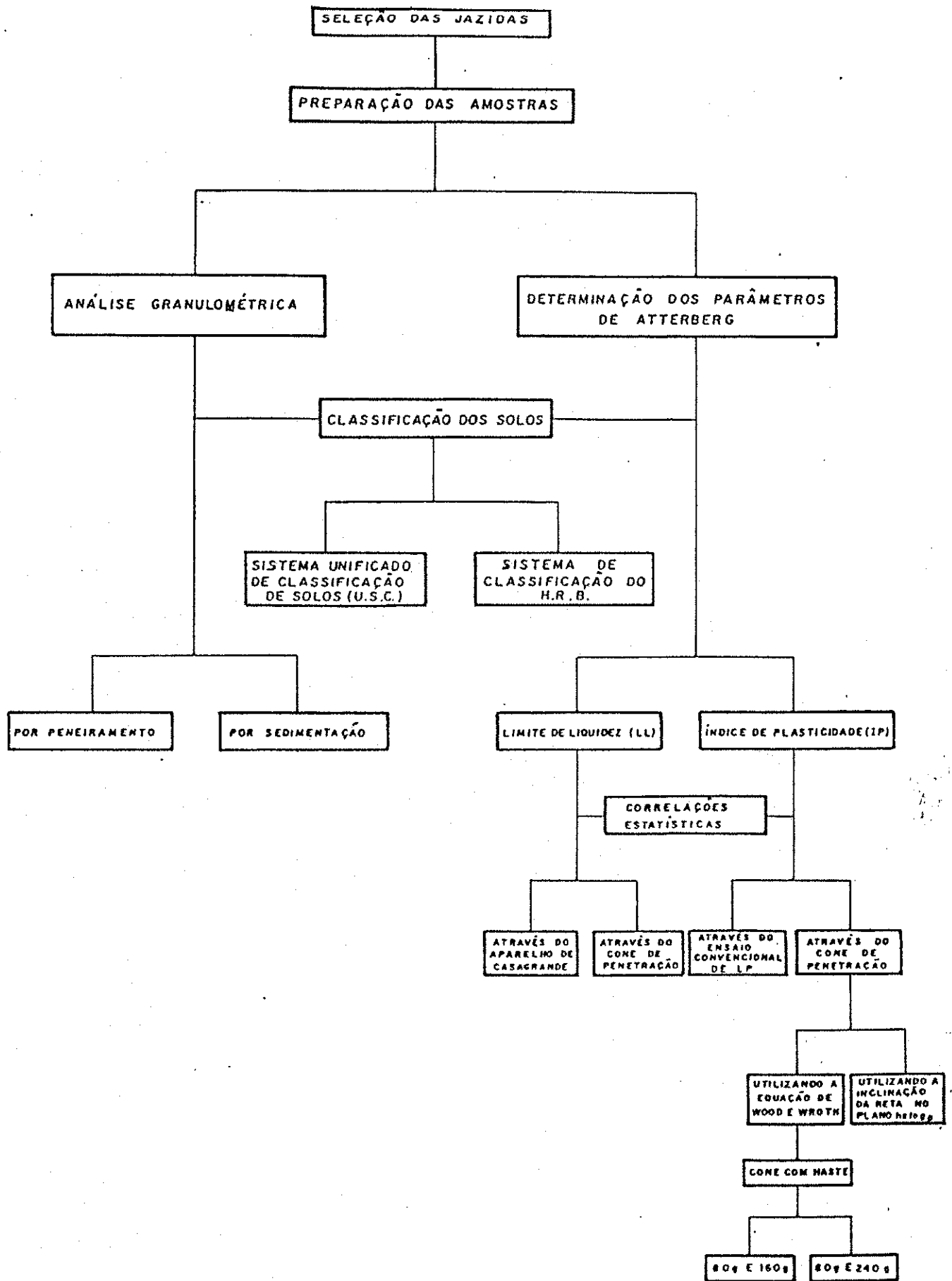


FIGURA 3.9 — FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES / ENSAIOS DESENVOLVIDOS NA PESQUISA

O ensaio de granulometria foi realizado por uma combinação de peneiramento e sedimentação de acordo com o método ABNT - NBR - 7181 (1984).

#### **3.2.1.2 - Massa Específica Real**

O conhecimento do seu valor foi necessário para a realização dos cálculos referentes ao ensaio de granulometria por sedimentação.

Para a execução deste ensaio foram adotadas as recomendações do método ABNT - NBR - 6508 (1984).

Foram realizadas três determinações para cada um dos ensaios de cada solo, sendo estas aceitas quando os seus resultados não apresentavam discrepâncias superiores aos limites especificados pelo método de ensaio considerado.

#### **3.2.1.3 - Determinação dos Parâmetros de Atterberg**

Os ensaios para as determinações de cada um destes parâmetros são o objeto da pesquisa e foram realizados seguindo dois procedimentos: o convencional e o que utiliza o aparelho denominado cone de penetração.

##### **3.2.1.3.1 - Limite de Liquidez**

O ensaio convencional para a determinação do LL foi executado através do aparelho manual de Casagrande de acordo com

o método ABNT-NBR-6459 (1984).

Por outro lado, as determinações do LL através do uso do cone de penetração foram realizadas utilizando-se o método recomendado pela norma inglesa BS 1377 (1975), onde o LL é definido como o teor de umidade em que um cone de ângulo de extremidade de  $30^{\circ}$  e massa do cone com haste igual a 80 g, penetra 20 mm na amostra de solo sob o efeito do seu próprio peso durante 5 segundos.

Para este método foi adotada uma modificação, pois não se deixou o material em cura por 24 horas. Isto se fez necessário porque o método da ABNT não menciona tempo de cura para obtenção do equilíbrio de distribuição da água na amostra.

A perspectiva do aparelho de Casagrande é mostrada na Figura 3.10.

Já a Figura 3.11, apresenta um esquema do penetrômetro, como também, as dimensões do cone.

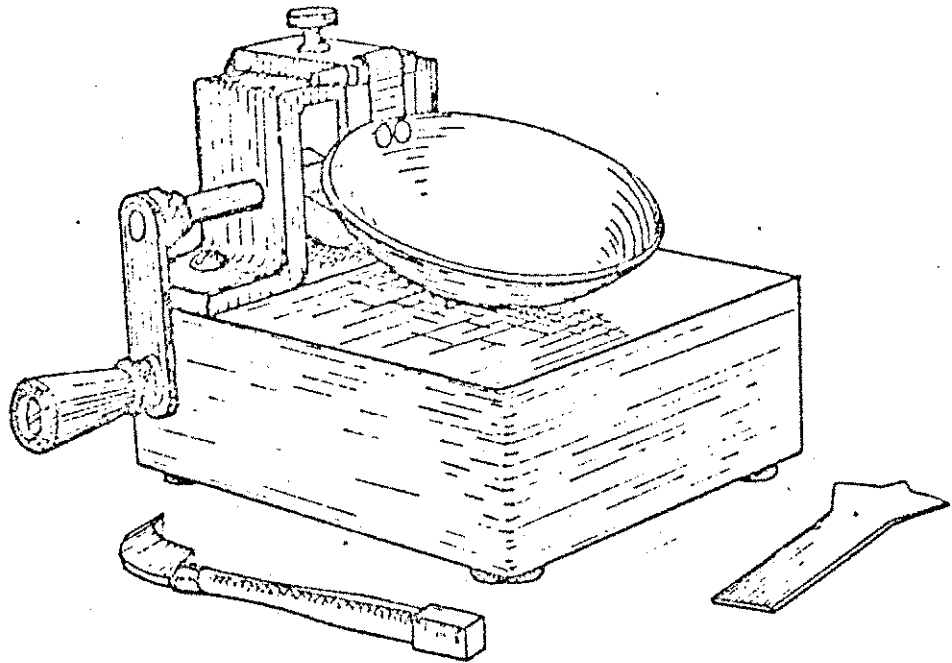
O procedimento recomendado pela norma inglesa para o ensaio de LL é apresentado no Apêndice I.

#### 3.2.1.3.2 - Índice de Plasticidade

O ensaio padrão para determinação do LP foi executado seguindo a orientação do método da ABNT-NBR-7180 (1984).

Neste ensaio, os valores de IP foram determinados indiretamente através da equação:  $IP = LL - LP$ .

Para as determinações do IP através do ensaio com o cone de penetração, utilizou-se o procedimento para obtenção do



3.10 - -PERSPECTIVA DO APARELHO DE CASAGRANDE



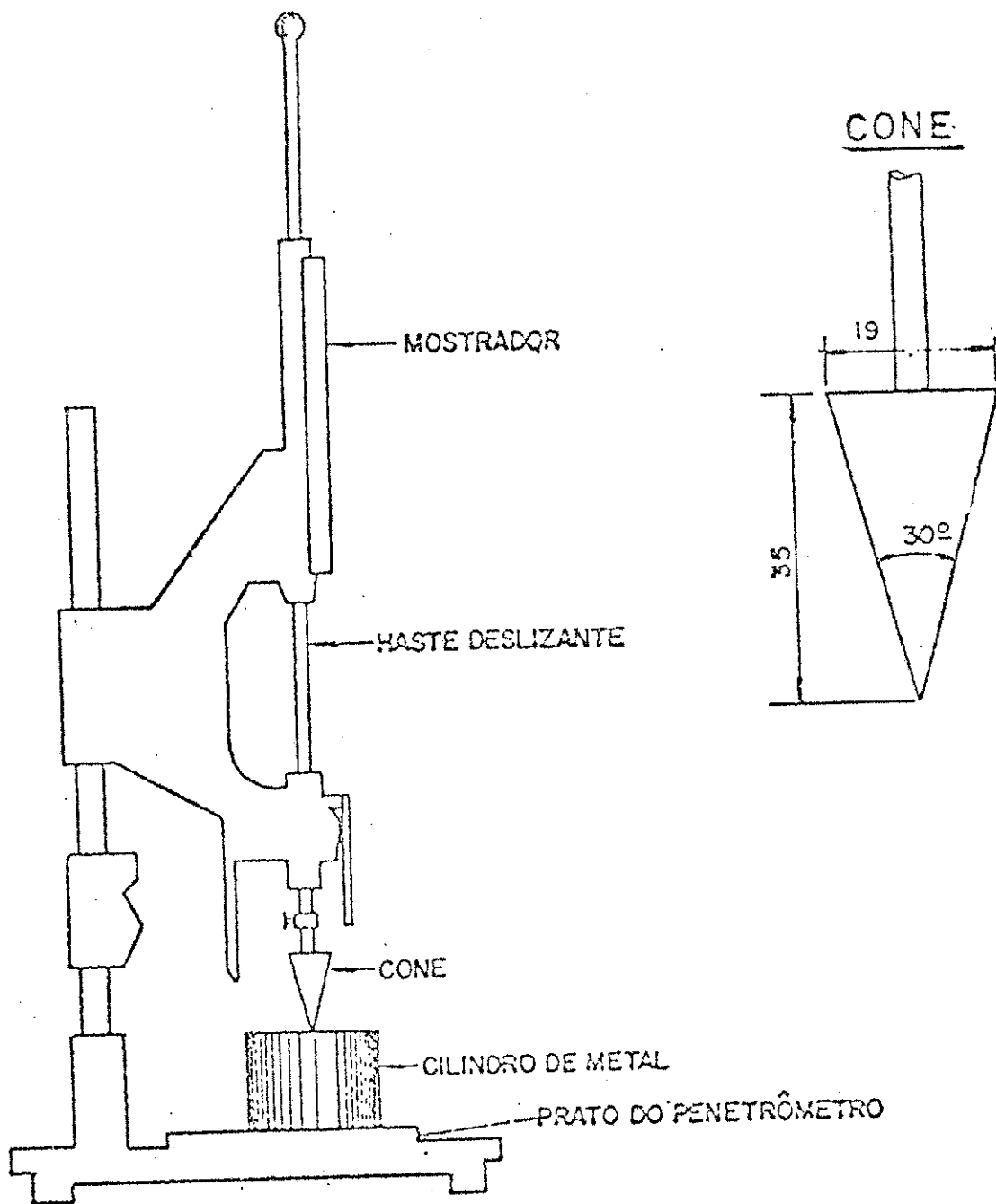


FIG. 3.11 - PENETRÔMETRO - ESQUEMA.

LL recomendado pela norma inglesa BS 1377 (1975), com as seguintes modificações:

- A referida norma recomenda quatro pontos por ensaio, desta forma, para cada ponto, executava-se a penetração utilizando-se cone com haste de massa igual a 80 g (correspondendo ao ensaio padrão), determinando-se os teores de umidade e as penetrações;
- A seguir, repetia-se a operação da penetração para cone com haste de massas iguais a 160 g e 240 g, respectivamente;
- Os resultados obtidos eram colocados em um único gráfico: penetração (escala logarítmica), correspondendo às abscissas, versus teor de umidade (escala aritmética), correspondendo às ordenadas, obtendo-se, assim, três retas, uma para cada massa (80 g, 160 g e 240 g).

Tomando-se por base o critério de resistência, determinou-se o IP de duas maneiras:

- i) empregando-se o procedimento proposto por Belviso *et al.* (1985), onde o IP corresponde à inclinação da linha reta (referente ao cone com haste de massa 80 g) no plano  $h \times \log p$ , sendo  $h$  o teor de umidade e  $p$  a penetração do cone. (Ver Apêndice II);
- ii) empregando-se o procedimento sugerido por Wood e Wroth (1978), o qual envolve séries de dois ensaios para cone com haste de massas diferentes, utilizando-se a equação:

$$IP = \frac{2 \times \Delta}{\log \frac{M2}{M1}}$$

onde,  $\Delta$  é a distância vertical entre as duas retas correspondentes às diferentes massas ( $M1$  e  $M2$ ), no esquema do gráfico de logaritmo da penetração do cone versus teor de umidade. (Ver Apêndice III).

### 3.2.2 - Classificação dos Solos

Com base nos resultados referentes aos ensaios de análise granulométrica e de determinações dos parâmetros de Atterberg, os solos foram classificados de acordo com os métodos do Sistema Unificado de Classificação de Solos (U.S.C.) e do Sistema de Classificação do Highway Research Board (H.R.B.).

### 3.2.3 - Programas Desenvolvidos

No decorrer deste trabalho, dois programas computacionais foram desenvolvidos na linguagem PASCAL, denominados Ensaio e Linear, cujas listagens são apresentadas nos Apêndices IV e V, respectivamente.

Estes programas foram executados utilizando-se um microcomputador do tipo SP - 16 da Prológica e uma impressora Rima.

### 3.2.3.1 - Programa Ensaio

Tem como objetivo efetuar os cálculos referentes ao ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação.

A sua execução é constituída de cálculos correspondentes às seguintes etapas: umidade higroscópica, peneiramento da amostra total, peneiramento da amostra parcial e sedimentação.

### 3.2.3.2 - Programa Linear

Seu objetivo é ajustar uma equação da forma  $y = ax + b$  a um conjunto de pontos dados, através da técnica estatística de regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados.

O programa recebe como dados de entrada as coordenadas de cada ponto e fornece como resultado: a referida equação e o coeficiente de correlação linear.

## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 4.1 - Introdução

Refere-se o presente capítulo à apresentação e comparação dos resultados obtidos através da execução dos ensaios de laboratório de acordo com os diferentes procedimentos propostos para caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa.

#### 4.2 - Caracterização dos Solos

##### 4.2.1 - Análise Granulométrica

As amostras foram submetidas a ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, sendo estes executados de acordo com o procedimento anteriormente citado. As proporções que passam na série de peneiras considerada em termos de porcentagens da amostra de solo, bem como, as suas composições granulométricas são apresentadas nas Tabelas 4.1.1 a 4.1.11.

TABELA 4.1.1

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 01                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 98                           | 98  | 98  | 98    |
| Nº 4                           | 4,8               | 96                           | 96  | 96  | 96    |
| Nº 10                          | 2,0               | 93                           | 93  | 93  | 93    |
| Nº 40                          | 0,42              | 86                           | 86  | 86  | 86    |
| Nº 200                         | 0,074             | 57                           | 57  | 57  | 57    |
| -                              | 0,009             | 20                           | 18  | 20  | 19    |
| -                              | 0,002             | 11                           | 12  | 12  | 12    |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 7                            | 7   | 7   | 7     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 7                            | 7   | 7   | 7     |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 29                           | 29  | 29  | 29    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 57                           | 57  | 57  | 57    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.2

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 02                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 98                           | 98  | 98  | 98    |
| Nº 4                           | 4,8               | 96                           | 96  | 95  | 96    |
| Nº 10                          | 2,0               | 94                           | 94  | 93  | 94    |
| Nº 40                          | 0,42              | 88                           | 89  | 87  | 88    |
| Nº 200                         | 0,074             | 64                           | 62  | 63  | 63    |
| -                              | 0,009             | 20                           | 15  | 18  | 18    |
| -                              | 0,002             | 12                           | 9   | 10  | 10    |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 6                            | 6   | 7   | 6     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 6                            | 5   | 6   | 6     |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 24                           | 27  | 24  | 25    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 64                           | 62  | 63  | 63    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.3

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 03                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 81                           | 92  | 92  | 88    |
| Nº 4                           | 4,8               | 73                           | 82  | 84  | 80    |
| Nº 10                          | 2,0               | 66                           | 72  | 74  | 71    |
| Nº 40                          | 0,42              | 56                           | 58  | 61  | 58    |
| Nº 200                         | 0,074             | 46                           | 47  | 47  | 47    |
| -                              | 0,009             | 14                           | 15  | 15  | 15    |
| -                              | 0,002             | 10                           | 10  | 10  | 10    |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 34                           | 28  | 26  | 29    |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 10                           | 14  | 13  | 13    |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 10                           | 11  | 14  | 11    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 46                           | 47  | 47  | 47    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |



TABELA 4.1.4

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 04                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 94                           | 100 | 100 | 98    |
| 3/8"                           | 9,5               | 86                           | 94  | 93  | 91    |
| Nº 4                           | 4,8               | 80                           | 87  | 85  | 84    |
| Nº 10                          | 2,0               | 75                           | 80  | 79  | 78    |
| Nº 40                          | 0,42              | 69                           | 71  | 69  | 70    |
| Nº 200                         | 0,074             | 55                           | 53  | 53  | 54    |
| -                              | 0,009             | 17                           | 13  | 15  | 15    |
| -                              | 0,002             | 11                           | 6   | 9   | 9     |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 25                           | 20  | 21  | 22    |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 6                            | 9   | 10  | 8     |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 14                           | 18  | 16  | 16    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 55                           | 53  | 53  | 54    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.5

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 05                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 99                           | 100 | 100 | 100   |
| Nº 4                           | 4,8               | 99                           | 99  | 99  | 99    |
| Nº 10                          | 2,0               | 95                           | 96  | 95  | 95    |
| Nº 40                          | 0,42              | 71                           | 75  | 72  | 73    |
| Nº 200                         | 0,074             | 52                           | 55  | 53  | 53    |
| -                              | 0,009             | 20                           | 18  | 18  | 19    |
| -                              | 0,002             | 14                           | 13  | 12  | 13    |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 5                            | 4   | 5   | 5     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 24                           | 21  | 23  | 22    |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 19                           | 20  | 19  | 20    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 52                           | 55  | 53  | 53    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.6

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 06                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| Nº 4                           | 4,8               | 100                          | 99  | 100 | 100   |
| Nº 10                          | 2,0               | 99                           | 99  | 99  | 99    |
| Nº 40                          | 0,42              | 95                           | 96  | 95  | 95    |
| Nº 200                         | 0,074             | 67                           | 69  | 67  | 68    |
| -                              | 0,009             | 18                           | 15  | 16  | 16    |
| -                              | 0,002             | 10                           | 7   | 9   | 9     |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 1                            | 1   | 1   | 1     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 4                            | 3   | 4   | 4     |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 28                           | 27  | 28  | 27    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 67                           | 69  | 67  | 68    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.7

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 07                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 100                          | 99  | 100 | 100   |
| Nº 4                           | 4,8               | 99                           | 98  | 99  | 99    |
| Nº 10                          | 2,0               | 98                           | 96  | 97  | 97    |
| Nº 40                          | 0,42              | 82                           | 80  | 82  | 81    |
| Nº 200                         | 0,074             | 35                           | 32  | 36  | 34    |
| -                              | 0,009             | 10                           | 10  | 10  | 10    |
| -                              | 0,002             | 6                            | 6   | 6   | 6     |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 2                            | 4   | 3   | 3     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 16                           | 16  | 15  | 16    |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 47                           | 48  | 46  | 47    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 35                           | 32  | 36  | 34    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.8

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 08                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 100                          | 99  | 100 | 100   |
| Nº 4                           | 4,8               | 99                           | 98  | 99  | 99    |
| Nº 10                          | 2,0               | 98                           | 97  | 98  | 98    |
| Nº 40                          | 0,42              | 83                           | 82  | 83  | 83    |
| Nº 200                         | 0,074             | 42                           | 42  | 39  | 41    |
| -                              | 0,009             | 14                           | 15  | 12  | 14    |
| -                              | 0,002             | 10                           | 10  | 8   | 9     |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 2                            | 3   | 2   | 2     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 15                           | 15  | 15  | 15    |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 41                           | 40  | 44  | 42    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 42                           | 42  | 39  | 41    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.9

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 09                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 100                          | 98  | 100 | 99    |
| Nº 4                           | 4,8               | 98                           | 97  | 99  | 98    |
| Nº 10                          | 2,0               | 95                           | 93  | 96  | 95    |
| Nº 40                          | 0,42              | 76                           | 77  | 78  | 77    |
| Nº 200                         | 0,074             | 34                           | 34  | 35  | 34    |
| -                              | 0,009             | 18                           | 18  | 19  | 18    |
| -                              | 0,002             | 14                           | 15  | 14  | 14    |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 5                            | 7   | 4   | 5     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 19                           | 16  | 18  | 18    |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 42                           | 43  | 43  | 43    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 34                           | 34  | 35  | 34    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.10

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 10                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 100                          | 99  | 100 | 100   |
| Nº 4                           | 4,8               | 100                          | 98  | 99  | 99    |
| Nº 10                          | 2,0               | 98                           | 96  | 98  | 97    |
| Nº 40                          | 0,42              | 87                           | 84  | 86  | 86    |
| Nº 200                         | 0,074             | 46                           | 43  | 44  | 44    |
| -                              | 0,009             | 25                           | 23  | 23  | 24    |
| -                              | 0,002             | 19                           | 17  | 17  | 18    |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 2                            | 4   | 2   | 3     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 11                           | 12  | 12  | 11    |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 41                           | 41  | 42  | 42    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 46                           | 43  | 44  | 44    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |

TABELA 4.1.11

## Distribuição Granulométrica

| AMOSTRA : 11                   |                   | % QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL |     |     |       |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----|-----|-------|
| PENEIRA                        | ABERTURA<br>EM mm | ENSAIO                       |     |     | MÉDIA |
|                                |                   | 1                            | 2   | 3   |       |
| 2"                             | 50,8              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 1"                             | 25,4              | 100                          | 100 | 100 | 100   |
| 3/8"                           | 9,5               | 100                          | 98  | 99  | 99    |
| Nº 4                           | 4,8               | 99                           | 97  | 98  | 98    |
| Nº 10                          | 2,0               | 97                           | 96  | 97  | 97    |
| Nº 40                          | 0,42              | 84                           | 82  | 83  | 83    |
| Nº 200                         | 0,074             | 48                           | 46  | 45  | 46    |
| -                              | 0,009             | 21                           | 18  | 19  | 19    |
| -                              | 0,002             | 16                           | 14  | 13  | 14    |
| CONSTITUINTES GRANULOMÉTRICOS  |                   |                              |     |     |       |
| PEDREGULHO (acima de 2,0mm)    |                   | 3                            | 4   | 3   | 3     |
| AREIA GROSSA (2,0mm a 0,42mm)  |                   | 13                           | 14  | 14  | 14    |
| AREIA FINA (0,42mm a 0,074mm)  |                   | 36                           | 36  | 38  | 37    |
| SILTE<br>+ (abaixo de 0,074mm) |                   | 48                           | 46  | 45  | 46    |
| ARGILA                         |                   |                              |     |     |       |



## 4.2.2 - Determinação dos Parâmetros de Atterberg

### 4.2.2.1 - Limite de Liquidez

A Tabela 4.2 apresenta os valores de LL referentes ao método convencional, como também, ao que utiliza o cone de penetração, para cada amostra de solo.

TABELA 4.2

Valores de LL Determinados pelo Método ABNT-NBR-6459 (1984)  
e pelo Método do Cone de Penetração, BS 1377 (1975)

| AMOSTRA<br>Nº | LL ABNT (%)<br>ENSAIO |      |      |       | LL CONE (%)<br>ENSAIO |      |      |       |
|---------------|-----------------------|------|------|-------|-----------------------|------|------|-------|
|               | 1                     | 2    | 3    | MÉDIA | 1                     | 2    | 3    | MÉDIA |
| 1             | 24,4                  | 23,4 | 24,8 | 24,2  | 25,1                  | 26,2 | 25,2 | 25,5  |
| 2             | 28,0                  | 28,0 | 27,1 | 27,7  | 30,4                  | 31,0 | 31,5 | 31,0  |
| 3             | 28,8                  | 28,0 | 28,7 | 28,5  | 31,5                  | 32,7 | 32,4 | 32,2  |
| 4             | 31,0                  | 32,4 | 32,8 | 32,1  | 33,5                  | 35,0 | 33,8 | 34,1  |
| 5             | 44,0                  | 43,2 | 44,4 | 43,9  | 45,3                  | 46,1 | 45,5 | 45,6  |
| 6             | 23,8                  | 26,2 | 25,8 | 25,3  | 28,3                  | 28,5 | 29,3 | 28,7  |
| 7             | 23,4                  | 22,8 | 22,7 | 23,0  | 24,1                  | 24,8 | 24,0 | 24,3  |
| 8             | 31,2                  | 31,8 | 29,0 | 30,7  | 30,1                  | 30,7 | 30,8 | 30,5  |
| 9             | 23,8                  | 25,4 | 25,4 | 24,9  | 31,2                  | 29,4 | 30,4 | 30,3  |
| 10            | 30,4                  | 29,6 | 28,6 | 29,5  | 37,4                  | 37,1 | 37,1 | 37,2  |
| 11            | 31,4                  | 32,8 | 32,7 | 32,3  | 37,5                  | 39,2 | 38,5 | 38,4  |

Na Tabela 4.3, encontra-se as variações absolutas entre os resultados dos dois tipos de ensaios de LL executados nesta pesquisa. Estas variações foram determinadas para as médias referentes aos três ensaios de cada amostra de solo.

TABELA 4.3

Variação Absoluta dos Valores Médios de LL Determinados Através do Método ABNT-NBR-6459 (1984) e do Método BS 1377 (1975)

| AMOSTRA     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    | 9   | 10  | 11  |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| NÁ          |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| LL CONE (%) |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
| -           | 1,3 | 3,3 | 3,7 | 2,0 | 1,7 | 3,4 | 1,3 | -0,2 | 5,4 | 7,7 | 6,1 |
| LL ABNT (%) |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |

Através da análise destes resultados, verifica-se que, para a maioria das amostras, o valor do LL determinado através do cone de penetração é superior ao obtido com o aparelho de Casagrande. Apenas a amostra de número 8 apresentou valores inversos, porém muito próximos. (Ver Tabelas 4.2 e 4.3).

Estes valores estão de acordo com dados experimentais obtidos por outros pesquisadores, como: Sherwood e Ryley (1968), Pinto e Castro (1971), Marinho (1976), Wasti e Bezirci (1985), Budhu (1985), Belviso et al. (1985), Wasti (1987) e Silveira (1990).

Uma das causas dos valores de LL determinados através do cone de penetração serem superiores aos obtidos convencionalmente é que a base do aparelho de Casagrande, de acordo com a BS 1377 (1975), é menos rígida que a do aparelho americano, usado nesta pesquisa, que permite a obtenção de valores inferiores. Vale salientar, então, que o cone de penetração foi projetado para obter valores equivalentes ao aparelho convencional inglês de base menos rígida, e, portanto, fornece valores superiores de LL.

A diferença em valores de LL entre os dois procedimentos referidos é relacionada também ao comportamento da argila sob diferentes métodos de deformação aplicados pelos dois aparelhos utilizados. O aparelho de Casagrande impõe choque ao solo quando a concha colide com a base, enquanto que o cone de penetração impõe deformação cisalhante estática, pois é um ensaio baseado na resistência do solo à penetração.

Observa-se, na Tabela 4.2, que os valores médios de LL determinados pelo método da ABNT variaram de 23,0 % (amostra nº 7) até 43,9 % (amostra nº 5), enquanto que os referidos resultados determinados pelo método inglês tiveram variação entre 24,3 % (amostra nº 7) até 45,6 % (amostra nº 5). Estes números estão, portanto, dentro da faixa de variação (menores que 100 %) que permite boa concordância entre valores de LL determinados pelos dois métodos utilizados nesta pesquisa.

Os 33 pares de valores de LL apresentados na Tabela 4.2 foram comparados estatisticamente para determinar a relação entre os valores determinados pelo método da ABNT (LL ABNT) e pelo

procedimento que utiliza o cone de penetração (LL CONE) e a equação da linha reta mais adequada, obtida pela análise de regressão linear, usando o método dos mínimos quadrados foi:

$$LL\ ABNT = 0,87\ LL\ CONE + 1,03 \quad (4.1)$$

com coeficiente de correlação linear (r) igual a 0,91.

#### 4.2.2.2 -Índice de Plasticidade

Os valores de LP são encontrados na Tabela 4.4.

Os valores médios e os resultados das três determinações de IP obtidos para cada amostra pelos diferentes procedimentos utilizados nesta pesquisa são apresentados nas Tabelas 4.4 , 4.5 e 4.6. As variações absolutas referentes às médias citadas são mostradas nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Para a análise das relações entre os valores de IP, as variáveis foram codificadas conforme descrições a seguir:

| CÓDIGO               | SIGNIFICADO   |
|----------------------|---|
| IP ABNT              | IP determinado a partir do método da ABNT;  |
| IP CONE (80g e 160g) | IP determinado pelo procedimento proposto por Wood e Wroth (1978), de cone com haste: 80g e 160g; |
| IP CONE (80g E 240g) | IP determinado pelo procedimento proposto por Wood e Wroth (1978), de cone com haste: 80g e 240g; |

**CÓDIGO**  
IP CONE (RETA)

**SIGNIFICADO**  
IP determinado através do procedimento proposto por Belviso et al. (1985), pela inclinação da reta no plano:  $h \times \log p$ .

TABELA 4.4

Valores de LP determinados pelo Método ABNT-NBR-7180 (1984)

| AMOSTRA<br>NO | LP (%) |      |      | MÉDIA |
|---------------|--------|------|------|-------|
|               | ENSAIO |      |      |       |
|               | 1      | 2    | 3    |       |
| 1             | 19,8   | 19,2 | 19,8 | 19,6  |
| 2             | 21,0   | 20,1 | 20,1 | 20,4  |
| 3             | 18,9   | 19,3 | 19,1 | 19,1  |
| 4             | 23,4   | 26,4 | 24,2 | 24,7  |
| 5             | 24,8   | 23,6 | 24,3 | 24,2  |
| 6             | 17,4   | 17,1 | 15,9 | 16,8  |
| 7             | 14,8   | 14,6 | 15,9 | 15,1  |
| 8             | 19,1   | 19,8 | 19,7 | 19,5  |
| 9             | 17,0   | 17,3 | 18,0 | 17,4  |
| 10            | 18,2   | 18,0 | 19,7 | 18,6  |
| 11            | 21,6   | 19,7 | 18,5 | 19,9  |

TABELA 4.5

Valores de IP Determinados pelo Método ABNT-NBR-7180 (1984)

| AMOSTRA<br>Nº | IP (%) |      |      | MÉDIA |
|---------------|--------|------|------|-------|
|               | ENSAIO |      |      |       |
|               | 1      | 2    | 3    |       |
| 1             | 4,8    | 4,2  | 5,0  | 4,6   |
| 2             | 7,0    | 7,9  | 7,0  | 7,3   |
| 3             | 9,9    | 8,7  | 9,6  | 9,4   |
| 4             | 7,6    | 6,6  | 8,6  | 7,4   |
| 5             | 19,2   | 19,6 | 20,1 | 19,6  |
| 6             | 6,4    | 9,1  | 9,9  | 8,5   |
| 7             | 8,6    | 8,2  | 6,8  | 7,9   |
| 8             | 12,1   | 12,0 | 7,3  | 11,1  |
| 9             | 6,8    | 8,1  | 7,4  | 7,4   |
| 10            | 12,2   | 11,6 | 8,9  | 10,9  |
| 11            | 9,8    | 13,1 | 14,2 | 12,4  |

TABELA 4.6

Valores de IP Determinados pelo Método do Cone de Penetração  
através da Equação Proposta por Wood e Wroth (1978)

| AMOSTRA | IP CONE (%)                       |      |      |       |            |      |      |       |
|---------|-----------------------------------|------|------|-------|------------|------|------|-------|
|         | EQUAÇÃO PROPOSTA POR WOOD E WROTH |      |      |       |            |      |      |       |
|         | CONE COM HASTE                    |      |      |       |            |      |      |       |
|         | 80g e 160g                        |      |      |       | 80g e 240g |      |      |       |
|         | ENSAIO                            |      |      |       | ENSAIO     |      |      |       |
| NO      | 1                                 | 2    | 3    | MÉDIA | 1          | 2    | 3    | MÉDIA |
| 1       | 8,0                               | 8,3  | 8,3  | 8,2   | 7,5        | 7,7  | 7,3  | 7,5   |
| 2       | 11,6                              | 11,3 | 11,6 | 11,5  | 10,3       | 10,5 | 10,7 | 10,5  |
| 3       | 11,3                              | 11,0 | 11,3 | 11,2  | 10,1       | 10,5 | 10,5 | 10,4  |
| 4       | 11,0                              | 10,6 | 10,6 | 10,7  | 10,5       | 10,5 | 10,5 | 10,5  |
| 5       | 19,9                              | 20,6 | 19,9 | 20,1  | 18,9       | 19,3 | 18,9 | 19,0  |
| 6       | 11,9                              | 12,3 | 11,6 | 11,9  | 10,9       | 11,9 | 11,3 | 11,4  |
| 7       | 8,3                               | 9,3  | 7,3  | 8,3   | 8,6        | 9,6  | 7,7  | 8,6   |
| 8       | 11,9                              | 12,3 | 11,9 | 12,0  | 11,5       | 11,9 | 11,7 | 11,7  |
| 9       | 11,6                              | 11,6 | 11,9 | 11,7  | 11,5       | 11,1 | 11,7 | 11,4  |
| 10      | 14,9                              | 15,6 | 14,0 | 14,8  | 15,7       | 16,1 | 14,7 | 15,5  |
| 11      | 16,3                              | 16,6 | 16,3 | 16,4  | 16,3       | 17,2 | 16,5 | 16,7  |

TABELA 4.7

Valores de IP Determinados pelo Procedimento que Utiliza o Cone de Penetração através da Inclinação da Reta no Plano :  $h \times \log p$ .

Belviso et al. (1985)

| AMOSTRA | IP CONE (%)                                     |      |      |       |
|---------|---|------|------|-------|
|         | INCLINAÇÃO DA RETA NO PLANO : $h \times \log p$ |      |      |       |
|         | ENSAIO  |      |      | MÉDIA |
|         | 1   | 2    | 3    |       |
| 1       | 7,0   | 8,8  | 7,0  | 7,6   |
| 2       | 11,0  | 10,8 | 11,2 | 11,0  |
| 3       | 11,8  | 11,8 | 11,5 | 11,7  |
| 4       | 10,3  | 10,0 | 10,0 | 10,1  |
| 5       | 19,1  | 19,9 | 19,1 | 19,4  |
| 6       | 10,5  | 11,0 | 11,5 | 11,0  |
| 7       | 8,0   | 8,8  | 8,0  | 8,3   |
| 8       | 11,8  | 12,3 | 12,0 | 12,0  |
| 9       | 11,0  | 11,4 | 11,0 | 11,1  |
| 10      | 15,3  | 15,8 | 14,9 | 15,3  |
| 11      | 16,1  | 17,1 | 16,9 | 16,7  |



TABELA 4.8

Variação Absoluta dos Valores Médios de IP Determinados pelo Método ABNT-NBR-7180 (1984) e pelos Procedimentos que Utilizam o Cone de Penetração

| AMOSTRA | IP CONE<br>(80g e 160g) | IP CONE<br>(80g e 240g) | IP CONE<br>(RETA) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| Nº      | IP ABNT                 | IP ABNT                 | IP ABNT           |
| 1       | 3,6                     | 2,9                     | 3,0               |
| 2       | 4,2                     | 3,2                     | 3,7               |
| 3       | 1,8                     | 1,0                     | 2,3               |
| 4       | 3,3                     | 3,1                     | 2,7               |
| 5       | 0,5                     | 0,6                     | 0,2               |
| 6       | 3,4                     | 2,9                     | 2,5               |
| 7       | 0,4                     | 0,7                     | 0,4               |
| 8       | 0,9                     | 0,6                     | 0,9               |
| 9       | 4,3                     | 4,0                     | 3,7               |
| 10      | 3,9                     | 4,6                     | 4,4               |
| 11      | 4,0                     | 4,3                     | 4,3               |

TABELA 4.9

Variação Absoluta dos Valores Médios de IP Determinados pelos  
Procedimentos que Utilizam o Cone de Penetração

| AMOSTRA | IP CONE<br>(80g e 160g) | IP CONE<br>(80g e 240g) | IP CONE<br>(RETA) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| Nº      | IP CONE<br>(80g E 240g) | IP CONE<br>(RETA)       | IP CONE<br>(RETA) |
| 1       | 0,7                     | 0,6                     | - 0,1             |
| 2       | 1,0                     | 0,5                     | - 0,5             |
| 3       | 0,8                     | - 0,5                   | - 1,3             |
| 4       | 0,2                     | 0,6                     | 0,4               |
| 5       | 1,1                     | 0,7                     | - 0,4             |
| 6       | 0,5                     | 0,9                     | 0,4               |
| 7       | - 0,3                   | 0,0                     | 0,3               |
| 8       | 0,3                     | 0,0                     | - 0,3             |
| 9       | 0,3                     | 0,6                     | 0,3               |
| 10      | - 0,7                   | - 0,5                   | 0,2               |
| 11      | - 0,3                   | - 0,3                   | 0,0               |

Observa-se por meio dos resultados obtidos (Tabelas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9) que, assim como para os valores de LL, os resultados de IP determinados através do método do DNER foram,

geralmente, inferiores aos obtidos através dos procedimentos que utilizam o cone de penetração.

Os resultados determinados através do cone penetrométrico apresentaram boa aproximação com os obtidos através do método da ABNT, com variação absoluta máxima de 4,6 % para a amostra nº 10, para o procedimento que utiliza cone com haste de massas 80g e 240 g. (Tabela 4.8).

Verifica-se também que os três procedimentos baseados na utilização do cone de penetração apresentaram resultados bem similares entre si, com variação absoluta máxima de 1,3 % para a amostra nº 3, quando se comparou o método que usa cone com haste de massas 80g e 240g com o que utiliza a inclinação da reta no plano  $h \times \log p$ . (Tabela 4.9).

Os resultados de IP obtidos concordam com valores determinados por: Belviso *et al.* (1985), Wasti e Bezirci (1986), Wasti (1987) e Silveira (1990).

Estes resultados também podem ser comparados através de equações de correlações lineares simples entre os valores de IP com respectivos coeficientes de correlação ( $r$ ), que são apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned} \text{IP ABNT} &= 1,04 \text{ IP CONE (80g e 160g)} - 3,30, && \text{com} \\ r &= 0,89. && (4.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP ABNT} &= 1,02 \text{ IP CONE (80g e 240g)} - 2,63, && \text{com} \\ r &= 0,87. && (4.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP ABNT} &= 1,02 \text{ IP CONE (RETA)} - 2,74, & \text{com} \\ r &= 0,89, & (4.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP CONE (80g e 160g)} &= 0,98 \text{ IP CONE (80g e 240g)} + 0,57 \\ \text{com } r &= 0,98. & (4.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP CONE (80g e 160g)} &= 0,96 \text{ IP CONE (RETA)} + 0,69, \\ \text{com } r &= 0,98. & (4.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP CONE (80g e 240g)} &= 0,97 \text{ IP CONE (RETA)} + 0,29, \\ \text{com } r &= 0,98. & (4.7) \end{aligned}$$

Algumas relações entre valores de IP e LL determinados através dos resultados dos ensaios executados pelos diferentes procedimentos comparados foram:

$$\begin{aligned} \text{IP ABNT} &= 0,62 \text{ LL ABNT} - 8,44, & \text{com} \\ r &= 0,88. & (4.8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP CONE (80g e 160g)} &= 0,54 \text{ LL CONE} - 5,10, & \text{com} \\ r &= 0,94. & (4.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP CONE (80g e 240g)} &= 0,53 \text{ LL CONE} - 5,27, & \text{com} \\ r &= 0,93. & (4.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IP CONE (RETA)} &= 0,55 \text{ LL CONE} - 5,66, && \text{com} \\ r &= 0,94. && (4.11) \end{aligned}$$

#### 4.2.3 - Classificação dos Solos

Em função dos resultados das análises granulométricas, bem como, de valores de LL e IP, determinados pelos diferentes procedimentos utilizados, a classificação dos solos foi realizada segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (U.S.C.) e o Sistema de Classificação do Highway Research Board (H.R.B.).

A Tabela 4.10 apresenta estas classificações.

Observa-se, nesta tabela, que a classificação dos solos, utilizando-se os parâmetros de Atterberg determinados pelos diferentes procedimentos comparados, através do U.S.C., apresentou-se coincidente praticamente para todas as amostras, enquanto que, através do H.R.B., verificou-se classificações coincidentes e em grupos vizinhos para aproximadamente todas as amostras analisadas.

TABELA 4.10

Classificação dos Solos com LL e IP Determinados Convencionalmente e através da Utilização do Cone de Penetração

| AMOSTRA | CLASSIFICAÇÃO    |                  |                  |                  |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|         | U.S.C.           |                  | H.R.B.           |                  |
|         | LL<br>ABNT<br>IP | LL<br>CONE<br>IP | LL<br>ABNT<br>IP | LL<br>CONE<br>IP |
| 1       | CL - ML          | CL               | A - 4            | A - 4            |
| 2       | CL               | CL               | A - 4            | A - 6            |
| 3       | SC               | SC               | A - 4            | A - 6            |
| 4       | CL               | CL               | A - 4            | A - 6            |
| 5       | CL               | CL               | A - 7 - 6        | A - 7 - 6        |
| 6       | CL               | CL               | A - 4            | A - 6            |
| 7       | SC               | SC               | A - 2 - 4        | A - 2 - 4        |
| 8       | SC               | SC               | A - 6            | A - 6            |
| 9       | SC               | SC               | A - 2 - 4        | A - 2 - 6        |
| 10      | SC               | SC               | A - 6            | A - 6            |
| 11      | SC               | SC               | A - 6            | A - 6            |

#### 4.3 - Análise Estatística para Determinação da Penetração Mais Adequada

Sabe-se que vários são os métodos que usam o cone de penetração para determinação do LL, por exemplo: método sueco, francês, russo, indiano e inglês. Entretanto, não existe ainda um único método padronizado como ocorre com o de Casagrande.

Por outro lado, verificou-se que os valores de LL, obtidos nesta pesquisa com o cone de penetração, apresentaram, de uma maneira geral, valores superiores aos obtidos com o aparelho de Casagrande, concordantes, portanto, com outros pesquisadores. Por este motivo, procurou-se através de análises estatísticas, encontrar um valor de penetração mais adequado para as amostras estudadas, de maneira a diminuir as variações dos resultados entre os dois métodos. Para isto, usou-se o seguinte procedimento:

Nos gráficos penetração x teor de umidade, para cada amostra, obteve-se os teores de umidades médios para as penetrações que variaram desde 10 mm até 20 mm (penetração padronizada para a determinação do LL). (Ver Tabela 4.11).

Com estes valores, usando-se todas as amostras, calculou-se os desvios padrões (DP) entre as umidades médias obtidas com o cone e o LL de Casagrande. (Ver Tabela 4.12).

Segundo Spiegel (1970), calcula-se o DP através da seguinte expressão:

$$DP = \sqrt{\frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

onde:

- $X_i$  - teor de umidade média das amostras às diversas penetrações (%);
- $\bar{X}$  - LL médio de cada amostra obtido com o aparelho de Casagrande (%);
- $N$  - número de amostras.

Observa-se, na Tabela 4.12, que, à medida que as penetrações aproximam-se dos valores extremos, 10 mm e 20 mm, os DP's aumentam e tendem a convergir para valores intermediários. Desta maneira, baseado nos resultados obtidos, sugere-se a faixa de penetração de 14 mm a 16 mm como a mais adequada para as amostras estudadas.



TABELA 4.11

Teores de Umidade Médios das Amostras Estudadas a Várias Penetrações

| PENE-<br>TRAÇÃO<br>(mm) | AMOSTRA Nº |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
| 10                      | 20,8       | 24,6 | 26,7 | 28,0 | 37,7 | 23,2 | 19,8 | 24,5 | 24,7 | 29,2 | 30,0 |
| 11                      | 21,6       | 25,3 | 27,1 | 28,8 | 38,4 | 23,8 | 20,3 | 25,1 | 25,4 | 29,9 | 30,9 |
| 12                      | 21,7       | 25,9 | 27,6 | 29,5 | 39,2 | 24,3 | 20,7 | 25,7 | 25,9 | 30,9 | 31,7 |
| 13                      | 22,2       | 26,5 | 28,2 | 29,8 | 40,0 | 24,9 | 21,2 | 26,2 | 26,2 | 31,6 | 32,5 |
| 14                      | 22,6       | 27,1 | 28,8 | 30,4 | 40,8 | 25,5 | 21,6 | 26,9 | 27,0 | 32,4 | 33,4 |
| 15                      | 23,2       | 27,8 | 29,3 | 31,0 | 41,6 | 26,0 | 22,1 | 27,5 | 27,5 | 33,2 | 34,2 |
| 16                      | 23,6       | 28,4 | 29,9 | 31,6 | 42,4 | 26,5 | 22,5 | 28,1 | 28,1 | 34,0 | 35,0 |
| 17                      | 24,1       | 29,1 | 30,4 | 32,3 | 43,2 | 27,0 | 23,0 | 28,7 | 28,8 | 34,8 | 35,8 |
| 18                      | 24,6       | 29,7 | 31,1 | 32,8 | 44,0 | 27,6 | 23,4 | 29,3 | 29,2 | 35,6 | 36,7 |
| 19                      | 25,1       | 30,3 | 31,6 | 33,5 | 44,8 | 28,1 | 24,0 | 29,9 | 29,8 | 36,4 | 37,5 |
| 20                      | 25,5       | 31,0 | 32,2 | 34,1 | 45,6 | 28,7 | 24,3 | 30,5 | 30,3 | 37,2 | 38,4 |

TABELA 4.12

Desvio Padrão (DP) das Amostras Estudadas  
a Várias Penetrações

| PENETRAÇÃO (mm) | DESVIDO PADRÃO (DP) |
|-----------------|---------------------|
| 10              | 3,54                |
| 11              | 3,00                |
| 12              | 2,59                |
| 13              | 2,25                |
| 14              | 2,04                |
| 15              | 1,99                |
| 16              | 1,94                |
| 17              | 2,50                |
| 18              | 2,92                |
| 19              | 3,41                |
| 20              | 3,95                |

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Tomando por base os resultados obtidos nesta pesquisa e experiências anteriores de outros investigadores, chegou-se às seguintes conclusões:

1) Com relação aos valores de IP, determinados através da utilização do cone de penetração e os obtidos pelos procedimentos convencionais, os resultados encontrados situaram-se numa faixa de variação aceitável.

2) Durante a realização dos ensaios, observou-se que o tempo gasto para a execução de um ensaio para determinação de LL e IP através do cone de penetração é praticamente o mesmo que seria necessário para executar os dois ensaios (LL e LP) através dos métodos convencionais.

3) Sendo os parâmetros, LL e LP, determinados por um único ensaio, pode-se, assim, diminuir a propagação de erros, já que o ensaio para determinação do IP consiste em dois procedimentos de ensaios separados, ambos dependentes da experiência do operador, enquanto que, no ensaio com o cone penetrométrico, estes parâmetros são determinados diretamente.

4) Para os solos analisados, verificou-se que a faixa de penetração de 14 mm a 16 mm, ao invés de 20 mm, corresponde a valores de LL mais próximos dos determinados através

do aparelho de Casagrande.

5) Com base nos resultados apresentados nesta pesquisa, apesar da pequena amostragem, concluiu-se que, tendo em vista os inconvenientes dos métodos convencionais e a redefinição de limites de consistência nas bases de um critério de resistência, o uso do cone de penetração para a execução dos ensaios de plasticidade dos solos parece ser uma opção racional. Isto sugere a utilização do cone de penetração como um método alternativo para determinação dos parâmetros de Atterberg.

## CAPÍTULO 6

### SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De acordo com as conclusões obtidas no presente estudo, sugere-se alguns tópicos que poderão ser de grande interesse em trabalhos futuros:

1) Com base nos resultados encontrados, sugere-se para a determinação de valores de LL através do cone penetrométrico, a continuação e verificação da execução de ensaios utilizando-se valores de penetração menores que 20 mm, para que se analise a possibilidade de diminuir a variação em relação ao método convencional.

2) Estudos semelhantes através da execução dos mesmos ensaios, utilizando-se, neste caso, solos de outras regiões, como também, solos estabilizados, para que se possa verificar a variabilidade destes ensaios para solos que apresentem plasticidades muito altas ou muito baixas.

3) Pesquisas sobre ensaios de LL determinados através do método UM-PONTO, tanto para ensaios executados com a utilização do aparelho de Casagrande quanto com o cone de penetração.

4) Estudos que permitam comparações de valores de resistência ao cisalhamento não drenada determinados pelo cone penetrométrico com aqueles do ensaio de palheta (vane test) de laboratório.

5) Verificação da variabilidade dos resultados destes ensaios através do aspecto de reprodutibilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). São Paulo.
- ARMAN, A. (1970). Engineering Classification of Organic Soil, H. R. R. nº 310, pp. 75-89.
- ARMSTRONG, C. F. (1961). Soil Mechanics in Road Construction. Edward Arnold (Publishers) Ltda., London, Second Edition.
- ATTERBERG, A. (1911). Über Die Physikalische Bodenuntersuchung und Über Die Plastizität der Tone. Int Mitt. Bodenk 1,10.
- BADILLO, E. J. & RODRIGUEZ, A. R. (1972). Mecânica de Suelos - Tomo I - Limusa - México.
- BELVISO, R., CIAMPOLI, S., COTECCHIA, V. & FREDERICO, A. (1985). Use of the Cone Penetrometer to Determine Consistency Limits. Ground Engineering, Vol. 18, nº 5, pp. 21-22.
- BERTRAN, G. E. (1969). Ensaios Fundamentais dos Solos para Construção, traduzido por Benjamin B. Fraenkel, Livro Ibero-Americano Ltda. - Rio de Janeiro.

BOZINOVIC, D. (1958). Versuch der Bestimmung der Fließgrenze der Methode des Balancierkegels. Samml. Arb. Montangeologischer Fak. Univ. Belgrad. 6, 173-175.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. (1975). Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes. BS 1377:1975. London:BSI.

BUDHU, M. (1985). The Effect of Clay Content on Liquid Limit from Fall Cone and British Cup Device, Geotechnical Testing Journal. Vol. 8, nº 2, pp. 91-95.

CASAGRANDE, A. (1958). Notes on the Design of the Liquid Limit Device. Geotechnique 8, nº 2, 84-91.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1977). Materiais para Obras Rodoviárias: Métodos e Instruções de Ensaios, Brasil.

FERREIRA, H. C. & MACHADO, E. C. C. (1986). Estudos de Correlação Entre a Área Específica da Fração Fina de Solos Lateríticos, Determinada por Diversos Métodos e as Características de Plasticidade Determinadas Após Tratamento Térmico em Três Diferentes Temperaturas, VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Porto Alegre, Partes 1 e 2, Vol. II, pp. 173-191.



- FLAATE, K. (1964). Liquid Limit Determination. A Comparison Between Casagrande Apparatus and Uppal's Penetrometer. Meddelelser Nr 18, Norwegian Road Laboratory, Oslo, Norway.
- GRIM, R. E. (1965). The Clay Mineral Concept, Amer. Cer. Soc. Bull. 44, 687.
- HANSBO, S. (1957). A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall-Cone Test. Proceedings. Swedish Geotechnical Institute, n<sup>o</sup> 14, pp. 5-47.
- HOSANG, J. R. & LOCKER, J. G. (1971). Discussion on the Paper of Skempton, A. W. and Petley, D. J. "Ignition Loss and Other Properties of Peats and Clays from Avonmouth, King's Lynn and Cramberry Moss", Geotechnique 21, n<sup>o</sup> 4, pp. 416-418.
- HOULSBY, G. T. (1982). Theoretical Analysis of the Fall Cone Test, Geotechnique 32, n<sup>o</sup> 2, pp. 111-118.
- HOVANYI, R. (1958). A New Grooving Tool. Geotechnique, 8-79. (facing).
- LAMBE, T. W. (1951). Soil Testing for Engineers, The Massachusetts Institute of Technology, New York, John Wiley & Sons Inc., London.
- LITTLETON, I. & FARMILO, M. (1977). Some Observations on Liquid Limit Values, Ground Engineering, Vol. 10, n<sup>o</sup> 5, pp. 39-40.

MARTINHO, R. L. (1976). Estudo da Variabilidade Estatística de Ensaios de Classificação de Solos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil do CCT da UFPB, Campina Grande.

MATSCHAK, H. & REITSCHEL, A. (1965). Vereinfach to Fliesssgenzen Bestimmungen an Bindungen Bodenart für Ingenierugeologisch Bodenmechanische Untersuchungen. Zeitschrift für Angeuandte Geologie. Vol. II, nº 3. pp.135-139.

MEANS, R. E. & PARCHER, J. V. (1963). Physical Properties of Soils. Copyright by Charles E. Merrill Books, Inc., Coumbs, Ohio.

MELLO, V. F. B. & TEIXEIRA, A. H. (1971). Mecânica dos Solos, Fundações e Obras de Terra. Vol. I, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos-SP.

MOON, C. F. & WHITE, K. B. (1985). A Comparison of Liquid Limit Results. Geotechnique, Vol. 35, nº 1, pp. 59-60.

NAGARAJ, T. S. & JAYADEVA, M. S. (1981). Re-examination of One-Point Methods of Liquid Limit Determination. Geotechnique 31, nº 3, pp. 413-425.

NORMAN, L. E. J. (1958). A Comparison of Values of Liquid Limit Determined with Apparatus Having Bases of Different Hardness. Geotechnique 8, nº 2, pp. 79-83.

PENA DE CARVALHO, J. P. (1976). Limite de Liquidez em Solos Tropicais. IPT, publ. nº 537, Rio de Janeiro, 15 p.

- PICHLER, E. (1951). Argilas. Anais Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. São Paulo. Vol. 1.
- PINTO, S. & CASTRO, P. F. (1971). Determinação do Limite de Liquidez pelo Método do Cone de Penetração, IPR/DNER, 24p.
- QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. (1975). Algumas Propriedades Físico-Químicas e de Engenharia de uma Argila Orgânica do Recife. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil do CCT da UFPB, Campina Grande-PB.
- SALAS, J. A. J. (1954). Mecânica del Suelo y sus Aplicaciones a La Ingeniería. Editorial Dossat S.A. - Madrid.
- SAMPSON, L. R. & NETTERBERG, F. (1985). The Cone Penetration Index: A Simple New Soil Index to Replace the Plasticity Index. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 2, pp.1041-1048.
- SCHOFIELD, A. N. & WROTH, C. P. (1968). Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill. London.
- SHERWOOD, P. T. & RYLEY, M. D. (1968). An Investigation of a Cone Penetrometer Methods for Determining the Liquid Limit of Soils. Geotechnique 20, nº 2, pp. 203-208.

- SILVEIRA, L. C. S. (1984). Plasticidade de Solos Lateríticos: Métodos de Ensaios e Efeito da Temperatura de Secagem. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil do CCT da UFPB, Campina Grande-PB.
- SILVEIRA, L. C. S. (1984.a). Avaliação do Limite de Liquidez de Solos Lateríticos. Anais da 19ª Reunião Anual de Pavimentação - ABPv. Rio de Janeiro/RJ, Vol. 1, pp. 179-187.
- SILVEIRA, L. C. S. (1985). Análise Estatística Computacional Através de Correlação Linear Simples entre a Plasticidade e as Áreas Específicas de Solos Lateríticos. 20ª Reunial Anual de Pavimentação - ABPv. Fortaleza/CE, Vol. 1, pp. 17-24.
- SILVEIRA, L. C. S. (1990). Aplicação do Cone de Penetração na Determinação da Plasticidade de Solos. 24ª Reunião Anual de Pavimentação - ABPv. Belém-PA, Vol. 1, pp. 214-222.
- SILVEIRA, L. C. S. (1990.a). Limites de Consistência de Solos Determinados Através do Cone de Penetração e Aparelho de Casagrande. Seminário Regional de Engenharia Civil. Vol. 1, pp. 431-441.
- SKEMPTON, A. W. & NORTHEY, R. D. (1953). The Sensibility of Clays. Geotechnique. Vol. 3, pp. 30-53.
- SKOPEK, J. & TER-STEPANIAN, G. (1975). Comparison of Liquid Limit Values Determined According to Casagrande and Vasilev. Geotechnique. Vol. 25, nº 1, pp. 135-136.

- SOUZA SANTOS, P. (1992). Ciência e Tecnologia de Argilas. Editora Edgard Blucher Ltda. Vols. 1 e 2. 20 edição. São Paulo-SP.
- SOWERS, G. F., VESIC, A. & GRANDOLFI, M. (1959). Penetration Tests for Liquid Limit, Papers on Soils - Meetings. STP 254. American Society for Testing and Materials, Philadelphia - EEUU, pp. 216-226.
- SPANGLER, M. G. & HANDY, R. L. (1973). Soil Engineering. Copyright by Intext Press, Inc. Third Edition.
- SPIEGEL, M. R. (1970). Estatística, Ao Livro Técnico, 2a. edição (1a. reimpressão). Rio de Janeiro, Brasil, 580 p.
- STEFANOFF, G. (1957). Discussion on Liquid Limit. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 3, Paris, p. 97.
- TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1955). Mecânica de Suelos en la Ingenieria Práctica. Copyright by Liberia El Ateneo. Editorial Buenos Aires.
- UPPAL, H. L. & AGRAWAL, H. R. (1958). A New Method of Determining the Liquid Limit of Soils. Road Research Paper. Nº 19, New Delhi, India.
- VARGAS, M. (1977). Introdução à Mecânica dos Solos. McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo.

WASTI, Y. & BEZIRCI, M. H. (1986). On the Determination of the Consistency Limits by Fall Cone Test. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 23, n<sup>o</sup> 2, pp. 241-246.

WASTI, Y. (1987). Liquid and Plastic Limits as Determined from the Fall Cone and the Casagrande Methods. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 10, n<sup>o</sup> 1, pp. 26-30.

WHITTAKER, H. (1939). Effect of Particle Size on Plasticity of Kaolinite, J. Amer. Soc. 22, 16.

WHYTE, I. L. (1982). Soil Plasticity and Strength a New Approach Using Extrusion. Ground Engineering. Vol. 15, n<sup>o</sup> 1, pp. 16-24.

WOOD, D. M. (1985). Some Fall Cone Tests, Geotechnique 35, n<sup>o</sup> 1, pp. 64-68.

WOOD, D. M. & WROTH, C. P. (1978). The Use of Cone Penetrometer to Determine the Plastic Limit of Soils. Ground Engineering. Vol. 11, n<sup>o</sup> 3, p. 37.

APÊNDICE I

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

BS 1377 (1975)

DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO, COM A UTILIZAÇÃO  
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.

Quando as condições de ensaio não forem mencionadas, o peso do cone com haste deslizante, seu ângulo, e o tempo que o mesmo deverá penetrar no solo serão, respectivamente:  $80,00 \pm 0,05$  g,  $30 \pm 1$  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 para 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 200 g, sensível a 0,01 g;
- h) estufa capaz de manter a temperatura entre 40<sup>o</sup>C e 110<sup>o</sup>C;
- i) recipientes que permitem guardar amostras sem perda de umidade antes de sua pesagem;
- j) régua de aço biselada, com cerca de 10 cm de comprimento.

#### **4 - Amostras**

Da amostra obtida, de acordo com o item 4.d do Método do DNER-ME 41-63 (1977), Preparação de Amostras de Solos para Ensaio de Caracterização, tomam-se cerca de 200 g da fração que passa na peneira de 0,42 mm.

## 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 com a espátula, até completa homogeneização da massa;

b) transferir com a espátula parte da massa assim obtida para o cilindro de metal, moldando-o 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 0,1 mm;

g) acionar o botão do aparelho para soltar a haste que segura o cone por um período de 5 ± 1 segundo, e, ao fim deste, travar;

h) fazer, no mostrador, a leitura da distância penetrada com aproximação de 0,1 mm. A diferença entre a leitura no início e no final do ensaio será registrada como a penetração do cone;

i) levantar a haste com o cone, limpando-o cuidadosamente com um pano umedecido com água, depois com um pano limpo e seco;

j) retirar o solo do cilindro de metal, colocar na cápsula, e homogeneizar a massa novamente. Em seguida, repetir as operações a partir do item 5.b. Se a diferença entre a primeira e a segunda penetração for menor que 0,5 mm, registrar a média das duas e transferir imediatamente uma pequena quantidade do material de onde houve a penetração para o recipiente (item 3.1) e determinar sua umidade. Se a diferença for maior que 0,5 mm e menor que 1 mm, fazer uma terceira penetração. Se após esta penetração, a diferença entre ela, e qualquer das anteriores, não for maior que 1 mm, transferir imediatamente uma pequena quantidade do material de onde houve a penetração para o recipiente (item 3.1), determinar sua umidade e registrar a média das três penetrações. Porém, se for maior que 1 mm, retirar o solo do recipiente de metal, homogeneizar e repetir o ensaio até se obter resultados coerentes;

l) efetuar os itens 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 25 mm (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 penetração de 20 mm.

## APÊNDICE II

PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO IP ATRAVÉS DO CONE DE PENETRAÇÃO,  
UTILIZANDO A INCLINAÇÃO DA RETA NO PLANO:

$$h \times \log p.$$

PROCEDIMENTO PROPOSTO POR BELVISO *et al.* (1985).

PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO IP ATRAVÉS DO CONE DE PENETRAÇÃO,  
UTILIZANDO A INCLINAÇÃO DA RETA NO PLANO:

$$h \times \log p.$$

PROCEDIMENTO PROPOSTO POR BELVISO et al. (1985)

Segundo Schofield e Wroth (1968), a teoria do estado crítico assume que há uma relação direta entre umidade,  $h$ , e resistência ao cisalhamento não drenada,  $R_{cu}$ :

$$h + A \log R_{cu} = \text{cte.} \quad (\text{II.1})$$

onde  $A$  é uma constante.

Como Wood e Wroth (1978) consideraram que a resistência ao cisalhamento não drenada do solo no seu respectivo LP ( $R_{culp}$ ) corresponde aproximadamente a cem vezes o valor da referida resistência no LL ( $R_{cull}$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} LL + A \log R_{cull} &= LP + A \log R_{culp} & \dots \\ LL + A \log R_{cull} &= LP + A \log (100 R_{cull}) & \dots \\ LL - LP &= A [\log (100 R_{cull}) - \log R_{cull}] & \dots \\ IP &= A (\log 100 + \log R_{cull} - \log R_{cull}) & \dots \\ IP &= A \log 100 \quad \text{ou} \quad IP = 2A \quad \text{ou} \quad A = IP/2 & (\text{II.2}) \end{aligned}$$

Ainda segundo Wood e Wroth (1978), a profundidade de penetração,  $p$ , e a resistência ao cisalhamento não drenada do solo,  $R_{cu}$ , em ensaios de penetração, utilizando-se cones com hastes de massa,  $M$ , diferentes e para umidades também distintas, são correlacionadas através da equação.

$$\frac{R_{cu} p^2}{M} = \text{cte.} \quad (\text{II.3})$$

Hansbo (1957) derivou a mesma expressão. Para cones com hastes de massa constante, esta relação pode ser expressa como:

$$R_{cu} = \frac{K}{p^2}, \text{ sendo } K \text{ o valor de uma constante.}$$

$$\text{Daí: } R_{cu} p^2 = K \quad \text{e} \quad \frac{R_{cu}}{K} = \frac{1}{p^2} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Então: } \log \frac{R_{cu}}{K} = \log \frac{1}{p^2}$$

$$\log R_{cu} - \log K = \log 1 - \log p^2$$

$$\log R_{cu} - \log K = 0 - \log p^2$$

$$\log R_{cu} = \log K - \log p^2 \quad (\text{II.5})$$

Se, na equação (II.1), substituir-se as equações (II.2) e (II.5), tem-se:

$$h + A \log Rcu = cte.$$

$$h + A(\log K - \log p^2) = cte.$$

$$h + A \log K - A \log p^2 = cte.$$

$$h + A \log K - 2 A \log p = cte.$$

$$h - 2 A \log p = C, \text{ sendo } C \text{ o valor de sua constante.}$$

$$h - 2 \frac{IP}{2} \log p = C$$

$$h - IP \log p = C$$

$$h = IP \log p + C \tag{II.6}$$

Através da equação (II.6), verifica-se que IP corresponde à inclinação da reta no plano:  $h \times \log p$ . (Ver Figura II.1).



APÊNDICE III

PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO IP ATRAVÉS  
DO CONE DE PENETRAÇÃO, UTILIZANDO A EQUAÇÃO

PROPOSTA POR WOOD E WROTH (1978).

PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO IP ATRAVÉS DO CONE DE PENETRAÇÃO,  
UTILIZANDO A EQUAÇÃO PROPOSTA POR WOOD E WROTH (1978).

Substituindo-se a equação (II.5) na (II.1):

$$h + A \log Rcu = cte.$$

$$h + A (\log K - \log p^2) = D, \text{ sendo } D \text{ uma constante.}$$

$$h + A \log K - A \log p^2 = D$$

$$h - A \log p^2 = E, \text{ sendo } E \text{ o valor de uma constante.}$$

Para duas profundidades de penetração,  $p_1$  e  $p_2$ , diferentes, a teores de umidade,  $h_1$  e  $h_2$ , tem-se:

$$h_1 - A \log p_1^2 = E \quad (\text{III.1})$$

$$h_2 - A \log p_2^2 = E \quad (\text{III.2})$$

Para encontrar a distância,  $\Delta$ , entre as duas retas que representam cones com hastes de massas diferentes, subtrai-se a equação (III.2) da (III.1):

$$h_1 - A \log p_1^2 - (h_2 - A \log p_2^2) = 0$$

$$h_1 - A \log p_1^2 - h_2 + A \log p_2^2 = 0$$

$$h_1 - h_2 = A (\log p_1^2 - \log p_2^2)$$

Fazendo  $h_1 - h_2 = \Delta$ , então:

$$\Delta = A (\log p_1^2 - \log p_2^2)$$

$$\Delta = A \log \frac{p_1^2}{p_2^2} \quad (\text{III.3})$$

Considerando a equação (III.3) para dois cones com haste de massas diferentes,  $M_1$  e  $M_2$ , e penetrações também distintas, verifica-se o seguinte:

$$\frac{Rcu \ p_1^2}{M_1} = K \quad \text{e} \quad \frac{Rcu \ p_2^2}{M_2} = K$$

Logo:

$$\frac{Rcu \ p_1^2}{M_1} = \frac{Rcu \ p_2^2}{M_2}$$

$$\frac{p_1^2}{M_1} = \frac{p_2^2}{M_2} \quad \dots \quad \frac{p_1^2}{p_2^2} = \frac{M_1}{M_2} \quad (\text{III.4})$$

Substituindo as equações (III.4) e (II.2) na equação (III.3), tem-se:

$$\Delta = A \log \frac{p_1^2}{p_2^2} \quad \dots \quad \Delta = A \log \frac{M_1}{M_2}$$

$$\Delta = \frac{IP}{2} \log \frac{M1}{M2} \quad \dots \quad 2\Delta = IP \log \frac{M1}{M2} \quad \dots$$

$$IP = \frac{2\Delta}{\log \frac{M1}{M2}} \quad , \quad \text{com } M1 > M2 \quad \text{(III.5)}$$

(Ver Figura III.1).

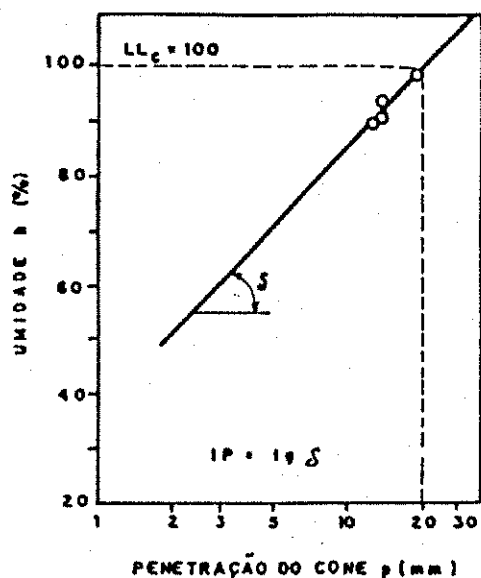


FIG. II.1 - MODELO DE GRÁFICO PARA DETERMINAÇÃO DO IP ATRAVÉS DA INCLINAÇÃO DA RETA NO PLANO :  $h \times \log p$   
BELVISO ET. AL (1985)

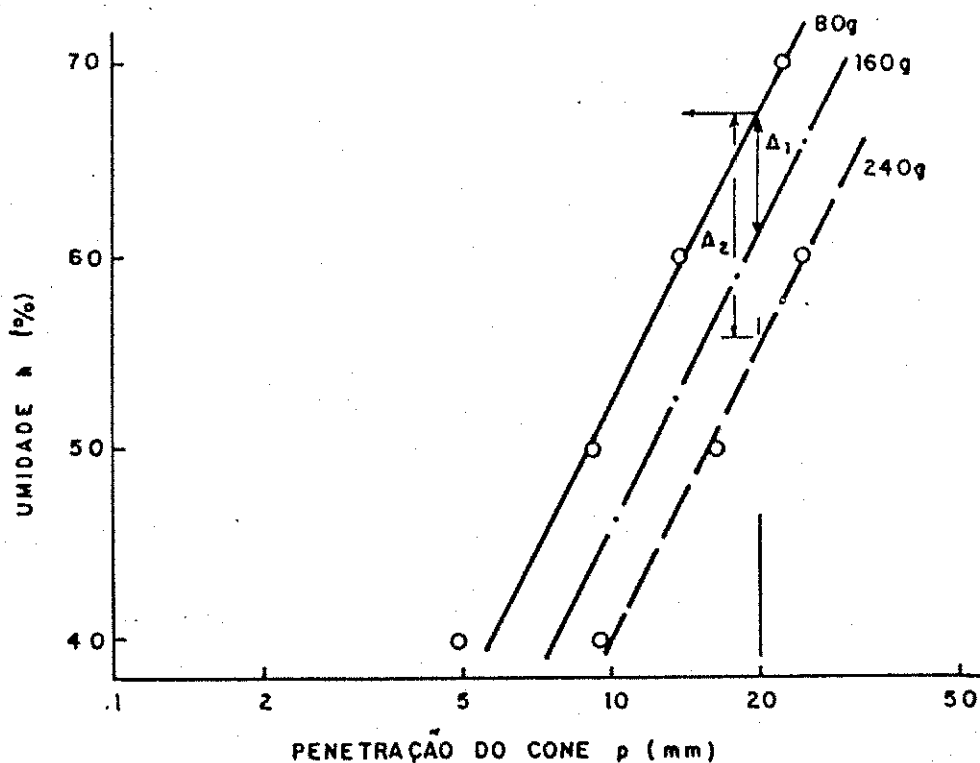


FIG. III.1 - MODELO DE GRÁFICO PARA DETERMINAÇÃO DO IP UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE WOOD E WROTH PARA CONE COM HASTE DE MASSAS: 80g - 160g E 80g - 240g  
WOOD E WROTH (1978)

APÊNDICE IV

PROGRAMA EM LINGUAGEM PASCAL UTILIZADO PARA EXECUTAR OS CÁLCULOS  
REFERENTES AO ENSAIO DE GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E  
SEDIMENTAÇÃO

ELABORADO POR: MARCIA SUELY BATISTA DINIZ

PROGRAM ENSAIO;

USES CRT, DOS;

{este programa tem como objetivo efetuar os cálculos referentes}  
{ao ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação}

{ criado por: Márcia Suely Batista Diniz }

{declaração das variáveis}

VAR hm, {umidade higroscópica do material passando na peneira de 2.0 mm}  
Ms, {massa total da amostra seca}  
Mt, {massa da amostra seca ao ar}  
Mq, {massa do material seco retido na peneira de 2.0 mm}  
Mh, {massa do material úmido submetido ao peneiramento fino ou a}  
{sedimentação}  
d, {massa específica dos grãos do solo}  
dc, {massa específica da água, a temperatura de calibração do}  
{densímetro}  
dd, {massa específica do meio dispersor, a temperatura do ensaio}  
V, {volume da suspensão}  
SOMA: {soma das umidades}  
REAL;

N, {porcentagem de material que passa na peneira de 2.0 mm}  
I, {contador}  
AMOSTRA: {numero da amostra}  
INTEGER;

Mbh, {massa bruta úmida}  
Mbs, {massa bruta seca}  
T, {tara da cápsula}  
Ma, {massa da água}  
Mss, {massa do solo seco}  
h: {umidade}  
ARRAY [1..2] OF REAL;

L, {leitura do densímetro na suspensão}  
Ld, {leitura do densímetro no meio dispersor}  
c, {coeficiente de viscosidade do meio dispersor, a temperatura}  
{do ensaio}  
tm, {tempo de sedimentação, em minutos}  
ts, {tempo de sedimentação, em segundos}  
a, {altura de queda das partículas}  
Ds: {diâmetro das partículas de solo em suspensão}  
ARRAY [1..12] OF REAL;

M: ARRAY [1..13] OF REAL: {massa do material retido em cada peneira}  
Mi: ARRAY [0..13] OF REAL: {massa do material retido acumulado em}  
{cada peneira}  
Qg: ARRAY [1..7] OF INTEGER: {porcentagem que passa da amostra total}  
Qf: ARRAY [8..13] OF INTEGER: {porcentagem que passa da amostra total}  
Qs: ARRAY [1..12] OF INTEGER: {porcentagem de material em suspensão}  
TEMP: ARRAY [1..12] OF INTEGER: {temperatura em cada leitura}  
JAZIDA: STRING [20]; {nome da jazida}

```

BEGIN
SOMA := 0;          tm[1] := 0.5;          tm[7] := 30.0;
dd := 1.000;       tm[2] := 1.0;          tm[8] := 60.0;
V := 1000;         tm[3] := 2.0;          tm[9] := 120.0;
dc := 1.000;       tm[4] := 4.0;          tm[10] := 240.0;
Mt := 1000;        tm[5] := 8.0;          tm[11] := 480.0;
Mh := 100;         tm[6] := 15.0;         tm[12] := 1440.0;

WRITELN ('ENSAIO DE GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO');
WRITELN;
WRITE ('JAZIDA : ');
READ (JAZIDA);
WRITE ('AMOSTRA : ');
READ (AMOSTRA);
WRITELN;
                {cálculo da umidade higroscópica}
WRITELN ('          UMIDADE HIGROSCÓPICA');
WRITELN;
WRITELN ('MASSA BRUTA UMIDA  MASSA BRUTA SECA  TARA DA CAPSULA');
FOR I := 1 TO 2 DO
  BEGIN
    READLN (Mbh[I], Mbs[I], T[I]);
    Ma[I] := Mbh[I] - Mbs[I];
    Mss[I] := Mbs[I] - T[I];
    h[I] := (Ma[I] / Mss[I]) * 100;
    SOMA := SOMA + h[I];
  END;
WRITELN;
WRITELN ('MASSA DA ÁGUA  MASSA DO SOLO SECO  UMIDADE');
FOR I := 1 TO 2 DO
  WRITELN (Ma[I]:9:2, Mss[I]:18:2, h[I]:14:3);
  hm := SOMA / 2;
  WRITELN ('UMIDADE HIGROSCÓPICA = ', hm:6:3);
WRITELN;
                {cálculo do peneiramento da amostra parcial}
WRITELN ('PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL');
WRITELN;
Mi[0] := 0;
WRITELN ('MASSA DO MATERIAL RETIDO NAS PENEIRAS: 50, 38, 25.4, 19.1, 9.5');
WRITELN ('4.8 E 2.0 mm, RESPECTIVAMENTE');
WRITELN ('MASSA (g)');
FOR I := 1 TO 7 DO
  BEGIN
    READLN ( M[I] );
    Mi[I] := Mi[I - 1] + M[I];
  END;
Mg := Mi [7];
WRITELN;
WRITELN ('MASSA DO MATERIAL SECO RETIDO NA PENEIRA DE 2.0mm: Mg = ', Mg:6:2);
WRITELN;
Ms := ((( Mt - Mg ) / ( 100 + hm )) * 100 ) + Mg;
WRITELN ('MASSA TOTAL DA AMOSTRA SECA: Ms = ', Ms:6:2);
WRITELN;
WRITELN ('          Mi          Qg');

```



```

FOR I := 1 TO 7 DO
  BEGIN
    Qg[I] := ROUND ((( Ms - Mi[I] ) / Ms ) * 100 );
    WRITELN ( Mi[I]:15:2, Qg[I]:11 );
  END;
N := Qg[7];
WRITELN;
WRITELN ( 'PORCENTAGEM DE MATERIAL QUE PASSA NA PENEIRA DE 2.0mm: N = ', N );
WRITELN;
Mi[7] := 0;
      {cálculo do peneiramento da amostra parcial}
WRITELN ( 'PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL' );
WRITELN ( 'MASSA DO MATERIAL RETIDO NAS PENEIRAS: 1.2, 0.6, 0.42, 0.25,' );
WRITELN ( '0.15 E 0.074 mm, RESPECTIVAMENTE' );
WRITELN ( 'MASSA (g)' );
FOR I := 8 TO 13 DO
  BEGIN
    READLN ( M[I] );
    Mi[I] := Mi[I - 1] + M[I];
    Qf[I] := ROUND ((( Mh * 100 - Mi[I] * ( 100 + hm ) ) / ( Mh * 100 ) ) * N );
  END;
WRITELN ( '          Mi          Qf' );
FOR I := 8 TO 13 DO
  WRITELN ( Mi[I]:15:2, Qf[I]:11 );
      {cálculo da sedimentação}
WRITELN ( 'SEDIMENTAÇÃO' );
WRITE ( 'MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DO SOLO (d) : ' );
READLN ( d );
WRITELN;
WRITELN ( 'TEMPERATURA VERIFICADA PARA CADA LEITURA DENSIMÉTRICA' );
FOR I := 1 TO 12 DO
  BEGIN
    READLN ( TEMP[I] );
    CASE TEMP [I] OF
      10 : c[I] := 13.36E-6;          25 : c[I] := 9.13E-6;
      11 : c[I] := 12.99E-6;          26 : c[I] := 8.92E-6;
      12 : c[I] := 12.63E-6;          27 : c[I] := 8.72E-6;
      13 : c[I] := 12.30E-6;          28 : c[I] := 8.52E-6;
      14 : c[I] := 11.98E-6;          29 : c[I] := 8.34E-6;
      15 : c[I] := 11.68E-6;          30 : c[I] := 8.16E-6;
      16 : c[I] := 11.38E-6;          31 : c[I] := 7.98E-6;
      17 : c[I] := 11.09E-6;          32 : c[I] := 7.82E-6;
      18 : c[I] := 10.81E-6;          33 : c[I] := 7.66E-6;
      19 : c[I] := 10.54E-6;          34 : c[I] := 7.50E-6;
      20 : c[I] := 10.29E-6;          35 : c[I] := 7.45E-6;
      21 : c[I] := 10.03E-6;          36 : c[I] := 7.20E-6;
      22 : c[I] := 9.80E-6;           37 : c[I] := 7.06E-6;
      23 : c[I] := 9.56E-6;           38 : c[I] := 6.92E-6;
      24 : c[I] := 9.34E-6;           39 : c[I] := 6.79E-6;
    END
  END;
WRITELN;
WRITELN ( 'ALTURA DE QUEDA DAS PARTÍCULAS, CORRESPONDENTES AS 12 LEITURAS' );

```

```

WRITELN ('DO DENSÍMETRO');
WRITELN (' a');
FOR I := 1 TO 12 DO
  BEGIN
    READLN ( a[I] );
    ts[I] := tm[I] * 60;
  END;
WRITELN;
WRITELN ('LEITURAS DENSIMÉTRICAS NA SUSPENSÃO');
WRITELN (' L');
FOR I := 1 TO 12 DO
  READLN ( L[I] );
WRITELN;
WRITELN ('LEITURAS DENSIMÉTRICAS NO MEIO DISPERSOR');
WRITELN (' Ld');
FOR I := 1 TO 12 DO
  READLN ( Ld[I] );
WRITELN;
FOR I := 1 TO 12 DO
  BEGIN
    Ds[I] := SQRT((( 1800 * c[I] ) / ( d - dd ) ) * ( a[I] / ts[I] ));
    Qs[I] := ROUND((N*(d/(d-dd))*((V*dc*(L[I]-Ld[I]))/(Mh/(100+hm))*100)));
  END;
WRITELN (' DIÁMETRO (mm) Qs');
FOR I := 1 TO 12 DO
  WRITELN ( Ds[I]:13:3, Qs[I]:11 );
END.

```

APÊNDICE V

PROGRAMA EM LINGUAGEM PASCAL UTILIZADO PARA OBTER CORRELAÇÕES

LINEARES

ELABORADO POR: MÁRCIA SUELY BATISTA DINIZ

```
PROGRAM LINEAR;
```

```
USES CRT, PRINTER;
```

```
{este programa tem como objetivo ajustar uma equacao linear, da  
{forma  $y = ax + b$ . a um conjunto de pontos dados, atraves da}  
{tecnica estatistica de regressao linear, usando o metodo dos}  
{minimos quadrados}
```

```
{criado por Marcia Suely Batista Diniz}
```

```
{declaracao de constantes e variaveis}
```

```
CONST n = 33;
```

```
VAR x, {abscissa de cada ponto}  
y : ARRAY [1..n] OF REAL; {ordenada de cada ponto}  
sx, {somatorio das abscissas}  
sy, {somatorio das ordenadas}  
sxx, {somatorio dos quadrados das abscissas}  
syy, {somatorio dos quadrados das ordenadas}  
sxy, {somatorio do produto das coordenadas}  
r, {coeficiente de correlacao linear}  
a,b, {coeficientes da equacao linear}  
den : REAL;  
i : INTEGER; {contador}
```

```
BEGIN
```

```
sx := 0; sy := 0; sxx := 0; syy := 0; sxy := 0;
```

```
WRITELN ('digite a abscissa (x) para cada ponto');
```

```
FOR i := 1 TO n DO
```

```
READLN ( x[i] );
```

```
WRITELN ('digite a ordenada (y) para cada ponto');
```

```
FOR i := 1 TO n DO
```

```
BEGIN
```

```
READLN ( y[i] );
```

```
sx := sx + x[i];
```

```
sy := sy + y[i];
```

```
sxx := sxx + sqr(x[i]);
```

```
syy := syy + sqr(y[i]);
```

```
sxy := sxy + (x[i] * y[i])
```

```
END;
```

```
WRITELN (' x y ');
```

```
WRITELN;
```

```
WRITELN;
```

```
FOR i := 1 TO n DO
```

```
WRITELN ( x[i]:12:1, y[i]:12:1);
```

```
WRITELN;
```

```
WRITELN;
```

```
a := ((n * sxy) - (sx * sy)) / ((n * sxx) - (sqr(sx)));
```

```
b := ((sy * sxx) - (sx * sxy)) / ((n * sxx) - (sqr(sx)));
```

```
WRITELN (' y = ', a:6:4, ' x + ', b:6:4);
```

```
WRITELN;
```

```
WRITELN;
```

```
den := (sqrt ((n * sxx) - (sqr (sx)))) * (sqrt ((n * syy) - (sqr (sy))));
```

```
IF ( den <> 0 )
```

```
THEN BEGIN
```

```
      r := ((n * sxy) - (sx * sy)) / (den);  
      WRITELN ('          coeficiente de correlacao :   r = ', r:4:2)  
    END  
  ELSE WRITELN ('o denominador e igual a zero')  
ND.
```