

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

EFEITO DA DEFLOCULAÇÃO NO ENSAIO  
DE GRANULOMETRIA DE ALGUNS SOLOS  
UTILIZADOS EM OBRAS VIÁRIAS NO  
ESTADO DE SÃO PAULO

JOSÉ LEOMAR FERNANDES JÚNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. MANOEL HENRIQUE ALBA SÓRIA



DEDALUS - Acervo - EESC



31100017830

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA DE  
ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DA UNIVER  
SIDADE DE SÃO PAULO PARA A OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE MESTRE EM TRANSPORTES.

SÃO CARLOS  
1989

JOSÉ LEOMAR FERNANDES JÚNIOR

Engenheiro Civil - Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo - 1984

EFEITO DA DEFLOCULAÇÃO NO ENSAIO  
DE GRANULOMETRIA DE ALGUNS SOLOS  
UTILIZADOS EM OBRAS VIÁRIAS  
NO ESTADO DE SÃO PAULO

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Mestre em  
Transportes.

Orientador: Prof. Dr. MANOEL HENRIQUE ALBA SORIA

São Carlos  
1989

## DEDICATORIA

Este trabalho é dedicado a Isabel,  
Fernando, Léo, Olga e Paulo Henrique,  
minha família

## AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Manoel Henrique Alba Sória, orientador sempre solícito a resolver as minhas dúvidas, pelo constante incentivo e apoio;
  
- Aos Professores José Bernardes Felex, Glauco Túlio Pessa Fabbri e Eiji Kawamoto pelas sugestões e estímulos na realização deste trabalho;
  
- Aos Professores Tarcísio Barreto Celestino e João Baptista Nogueira pela orientação e incentivo na fase inicial de meu Programa de Mestrado;
  
- Aos Srs. Antônio Carlos Gigante, Roberto Antônio Morasco, José Luís Guerra, Benedito Osvaldo de Souza e Milton Tadeu Bogno pelos auxílios na execução dos ensaios e na coleta das amostras;
  
- Aos Srs. Angelo Leoni e Vicente Rafael Daló pela elaboração de gráficos e figuras;
  
- A Heloísa Helena Morgado Belo, Sueli Aparecida de Lima Chinaglia, Antônio João Tessarin e Antônio Carlos Mariano pelos inúmeros auxílios;
  
- Aos empresários Sérgio Grande e Fábio Grande pela cessão de equipamento para realização de ensaios de laboratório;
  
- A todos os amigos de trabalho, atuais e do início de minha carreira profissional, que muito me incentivaram;
  
- As bibliotecárias da Themag Engenharia e da EESC-USP pelo eficiente atendimento e orientação.

## RESUMO

A análise granulométrica de solos ainda apresenta muitos aspectos não devidamente explicados e quantificados, como por exemplo, os efeitos do tipo de defloculante químico, do tempo de dispersão mecânica e da secagem prévia da amostra. Neste trabalho, analisa-se, particularmente, o ensaio de granulometria por sedimentação pelo método do densímetro, principal objeto desta dissertação. São abordados aspectos teóricos e metodológicos relacionados à validade e representatividade dos seus resultados, destacando-se as propriedades físico-químicas da fração argila e as hipóteses e condições requeridas para a utilização da Lei de Stokes. A avaliação dos fatores intervenientes no ensaio de sedimentação é feita mediante programação fatorial de ensaios e respectivo tratamento estatístico. São avaliadas, também, alterações no método de preparação de amostras para ensaios de caracterização e no ensaio de massa específica dos sólidos, visando, particularmente, o ensaio de sedimentação. Comentam-se, ao final, os resultados da análise estatística e são feitas sugestões para trabalhos futuros.

## ABSTRACT

The grain size analysis of soils still presents a lot of aspects not well explained and quantified, as for example, the effects of the chemical deflocculating type, the time of mechanical dispersion and previous drying of the sample. It is analysed in this work, particularly, the grain size analysis by sedimentation using the method of the densimeter, the main subject of this dissertation. Theoretical and methodological aspects related with the validity and representativeness of their results are mentioned, standing out the properties of clay's fraction and the hypothesis and conditions required by the Stokes' Law. The evaluation of the factors related with the sedimentation test is done by a factorial program of tests and statistical analysis. It is also evaluated alterations in the methods of preparation of samples for characterization tests and specific mass test of the solids, looking particularly for the sedimentation test. Finally, the results from statistical analysis are commented and suggestions for future works are introduced.

## INDICE

CAPITULO I - INTRODUÇÃO .....	1
CAPITULO II - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS ..	7
2.1 - Importância da Análise Granulométrica .....	7
2.1.1 - Erodibilidade de materiais argilosos .....	7
2.1.2 - Determinação da superfície específica ...	8
2.1.3 - Estudos dos processos sedimentares .....	9
2.1.4 - Estudo de argilas expansivas .....	10
2.1.5 - Estudos sobre erosão .....	11
2.2 - Métodos de Análise .....	12
2.2.1 - Sedimentação sucessiva .....	13
2.2.2 - Água límpida na coluna de sedimentação ..	13
2.2.3 - Elutriadores de fluxo ascendente (decantação) .....	13
2.2.4 - Observação da quantidade total de solo em suspensão em uma altura determinada .....	14
2.2.5 - Sedimentômetro fotoelétrico .....	14
2.2.6 - Sedimentação com utilização de equipamento para pesagem automática ...	14
2.2.7 - Método da pipeta .....	15
2.2.8 - Centrífugas .....	15
2.3 - Representação Gráfica da Análise Granulométrica .....	16
2.4 - Escalas Granulométricas .....	19
2.4.1 - Escalas granulométricas reportadas na literatura agrônômica .....	20
2.4.2 - Escalas granulométricas reportadas na literatura de engenharia .....	22
2.4.3 - Escalas granulométricas reportadas na literatura geológica .....	25

CAPITULO III - PROPRIEDADES FISICO-QUIMICAS DA FRAÇÃO ARGILA .....	27
3.1 - Estrutura dos Solos Finos .....	28
3.2 - Água Adsorvida .....	32
3.3 - Troca Catiônica.....	33
3.4 - Natureza Mineralógica .....	34
3.5 - Plasticidade .....	37
3.6 - Viscosidade .....	38
CAPITULO IV - DISPERSÃO DOS SOLOS .....	39
CAPITULO V - LEI DE STOKES .....	43
CAPITULO VI - MÉTODO DO DENSÍMETRO .....	49
6.1 - Princípios do Método do Densímetro .....	49
6.2 - A Ação do Densímetro.....	53
6.3 - Correções .....	56
6.4 - Fatores que Contribuem para a Não Padronização do Ensaio de Sedimentação pelo Método do Densímetro .....	62
6.4.1 - Tipo de defloculante químico .....	62
6.4.2 - Tempo de dispersão mecânica .....	62
6.4.3 - Secagem prévia da amostra .....	62
6.4.4 - Tempo de imersão da amostra em solução com água mais defloculante .....	63
6.4.5 - Fração granulométrica ensaiada por sedimentação .....	63
6.4.6 - Massa da amostra ensaiada .....	64
6.4.7 - Rotação da hélice do dispersor .....	64
6.5 - Considerações Complementares .....	65
6.5.1 - Perturbação causada pela inserção do densímetro .....	65

6.5.2 - Efeito da variação do comprimento e do diâmetro do cilindro de sedimentação .....	65
6.5.3 - Reprodutibilidade de resultados .....	65
CAPITULO VII - ENSAIOS REALIZADOS.....	66
7.1 - Amostras de Solos Utilizadas .....	66
7.2 - Ensaio para Determinação da Massa Específica dos Sólidos .....	69
7.3 - Ensaio de Granulometria .....	71
7.4 - Programação dos Ensaios de Sedimentação pelo Método do Densímetro .....	72
7.4.1 - Primeira fase .....	72
7.4.2 - Segunda fase .....	74
CAPITULO VIII - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS REALIZADOS .....	93
8.1 - Primeira Etapa de Experimentação .....	93
8.1.1 - Análise como blocos casualizados .....	93
8.1.2 - Análise como ensaios fatoriais .....	102
8.2 - Segunda Etapa de Experimentação .....	108
CAPITULO IX - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	117

#### ANEXOS

ANEXO A - ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS .....	124
A.1 - Amostra (S) .....	125
A.2 - Amostra (R) .....	126
A.3 - Amostra (J) .....	127
A.4 - Amostra (B) .....	128

A.5 - Amostra (R) - Procedimento alternativo	129
A.6 - Amostra (B) - Procedimento alternativo	130
A.7 - Amostra (C)	131
A.8 - Amostra (D-S-L)	132
A.9 - Amostra (D-S-S)	133
A.10 - Amostra (D-C-L)	134
A.11 - Amostra (D-C-S)	135

ANEXO B - CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS  
UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO . 136

B.1 - Curva de Calibração do Picnômetro P-1	137
B.2 - Curva de Calibração do Picnômetro P-2	138
B.3 - Curva de Calibração do Densímetro 48 para as Provetas 11, 12, 13, 14, 15 e 111	139
B.4 - Curva de Calibração do Densímetro 26 para as Provetas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,9, 10 e 17	140
B.5 - Curva de Calibração do Densímetro 48 com o Defloculante Hexametáfosfato de Sódio	141
B.6 - Curva de Calibração do Densímetro 48 com o Defloculante Silicato de Sódio	142
B.7 - Curva de Calibração do Densímetro 48 com o Defloculante Soda Cáustica	143
B.8 - Curva de Calibração do Densímetro 48 com o Defloculante Trifosfato de Sódio	144
B.9 - Curva de Calibração do Densímetro 26 com o Defloculante Hexametáfosfato de Sódio	145
B.10 - Curva de Calibração do Densímetro 26 com o Defloculante Soda Cáustica	146

ANEXO C - TABELAS UTILIZADAS NA ANÁLISE  
ESTATÍSTICA DO EXPERIMENTOS . 147

C.1 - Limites Unilaterais de F (de Snedecor) ao nível de 5%	148
C.2 - Limites Unilaterais de F (de Snedecor) ao nível de 1%	149

C.3 - Amplitude Total Studentizada (q) ao nível de 5% de probabilidade .....	150
C.4 - Amplitude Total Studentizada (q) ao nível de 1% de probabilidade .....	150

## CAPITULO I - INTRODUÇÃO

Na natureza, existem grandezas impossíveis de se medir diretamente ou cuja medição direta é difícil ou de custo elevado; nestes casos, busca-se uma grandeza de fácil medição, que apresente uma correlação conhecida com a grandeza incógnita. Em engenharia geotécnica, tais correlações devem, pelo menos, ser suficientemente confiáveis para as etapas iniciais de um projeto (orientação da exploração e amostragem para ensaios de laboratório). Nada impede, porém, que possibilitem a inferência de outras propriedades de engenharia.

Em obras lineares, sendo estas as que apresentam grande extensão, relativamente à sua largura, como as rodovias, as ferrovias e as linhas de transmissão de energia elétrica, a identificação e classificação de solos revestem-se de grande importância. Nessas obras, embora o número absoluto de ensaios mais elaborados possa ser elevado, a densidade destes ensaios mais específicos e onerosos é baixa, sendo, via de regra, usados apenas no início dos trabalhos, para a obtenção de valores numéricos de cálculo, e, durante o avanço dos serviços, para a aferição dos processos de identificação e classificação adotados. Nas obras rodoviárias, em particular, a identificação e classificação de solos têm múltiplas funções: selecionam jazidas, dão destino aos diferentes materiais encontrados ao longo do eixo projetado e auxiliam na verificação do atendimento às especificações técnicas por parte dos materiais previamente selecionados.

Existem, no entanto, grandes divergências de opinião entre os engenheiros geotécnicos, em relação à importância das classificações de solos e à utilização de ensaios simples de uma forma mais ampla. Segundo VARGAS (1979), um sistema de classificação de solos, baseado em métodos simples de identificação, é de grande conveniência em qualquer projeto rotineiro de engenharia geotécnica, sendo a utilização de classificações de solos indispensável, uma vez que todo o trabalho posterior é dela dependente. Para outros autores, como MEANS e PARCHER (1964), TSCHBOTARIOFF (1967) e RODRIGUEZ e DEL CASTILLO (1974), a utilização de classificações de solos deve ficar restrita a servir de instrumento de comunicação entre profissionais, não se justificando uma preocupação excessiva com a técnica dos ensaios índices.

Na verdade, tudo irá depender do uso a ser dado às classificações, uma vez que, como os sistemas de arquivo, elas são apenas formas convenientes de agrupar. Parece ser inevitável a existência, em qualquer classificação, de solos que possam pertencer a dois ou mais grupos de uma vez; da mesma forma, se um grande número de solos é agrupado por classes, de acordo com um determinado sistema, alguns destes solos irão, inevitavelmente, se agrupar sob forma diferente em alguma outra classificação. A idéia do desenvolvimento de um sistema prático e aceitável de classificação, que resolva os problemas em qualquer trabalho de engenharia, mediante a

simples consulta a um manual, é extremamente pretenciosa. Qualquer classificação poderá não ter valor algum e, em certos casos, será até perigosa, a menos que as características nas quais ela se baseia sejam as mais importantes para o problema considerado. As classificações granulométricas, por exemplo, são sumamente convenientes, podendo ser usadas com grande vantagem, se os que delas se utilizarem não esquecerem que elas fornecem apenas os tamanhos dos grãos, os quais, embora em algumas situações possam ser a característica mais marcante, não são o único fator de interesse.

A classificação de solos de acordo com o tamanho das partículas é das mais simples possíveis, tendo como limitante à sua utilização indiscriminada o fato de que sua relação com as principais propriedades de engenharia dos solos é muito tênue. De um modo geral, o conhecimento do tamanho dos grãos de um solo transmite apenas uma idéia de algumas de suas propriedades potenciais. Quanto aos ensaios para determinação da granulometria, eles são particularmente úteis nos levantamentos preliminares, baseados em rápido reconhecimento e identificação de solos. Quando comparados com os ensaios táctil-visuais, os ensaios granulométricos apresentam a vantagem de proporcionarem uma base numérica para classificação mais precisa dos grupos fronteirços. Não implicam, porém, na substituição das importantes informações imediatas que o exame táctil-visual fornece.

A granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade são adotados, como índices classificatórios, pelas classificações geotécnicas mais tradicionais (USCS, BPR-AASHTO e outras, destas derivadas), tendo em vista os três atributos principais que toda classificação geotécnica deve possuir: simplicidade (utilizar grandezas de fácil medição), utilidade (possibilitar a inferência de propriedades de engenharia) e reprodutibilidade (base para a generalização de seu uso). No Brasil, em função de muitos dos nossos solos tropicais apresentarem grande dispersão de resultados desses ensaios índices, aliado à falta de correspondência entre os resultados desses ensaios com as propriedades de engenharia previstas pelas classificações tradicionais, houve necessidade de estudos críticos sobre a representatividade e aplicabilidade das classificações geotécnicas, com destaque para os empreendidos por NOGAMI (1976), NOGAMI (1978) e NOGAMI e VILLIBOR (1981). Explicitando o problema, para os solos lateríticos, as previsões de comportamento, feitas a partir de classificações baseadas no índice de plasticidade, no limite de liquidez e na granulometria, são por demais pessimistas, ou seja, esses solos, apesar de não satisfazerem às especificações para bases, sub-bases e reforço do subleito, têm sido utilizados com sucesso para essas finalidades, quando o trânsito é de leve a médio, reduzindo sobremaneira os custos de construção de estradas vicinais, conforme atestam os resultados apresentados por VILLIBOR et alli (1974), UTIYAMA et alli (1977) e VILLIBOR (1981). Existem, também, inúmeros exemplos de investigações experimentais detalhadas (incluindo resultados de pistas experimentais, processos de estabilização e rupturas típicas), realizadas em outros continentes, a

respeito das propriedades de engenharia dos solos lateríticos. Dentre esses, destacam-se os trabalhos apresentados por LNEC, LEA, LEMMS e JAEA (1969), MOH E MAZHAR (1969), SANTOS (1969), PERSONS (1970), GIDIGASU (1976) e SAHASRABUDHE e VAIDYANATH (1979).

Muitos pesquisadores, como HABIB (1973) e VILLIBOR e NOGAMI (1982), consideram que a identificação dos solos e a classificação dos materiais devem ser feitas, sempre, de forma suficientemente clara, para que se possa comparar dois materiais diferentes em processos de construção análogos, ou para que se comparem dois estados de um mesmo material. Outros pesquisadores, com destaque para VARGAS (1982) e VARGAS (1987), continuam entendendo a granulometria e os limites de consistência como propriedades índices para classificação da "natureza" dos solos, que embora nada digam a respeito dos estados em que os materiais se encontram, servem para classificação e identificação de "qualquer" tipo de solo de granulagem fina, inclusive os tropicais. Segundo VARGAS (1982), eliminando-se tudo o que possa refletir propriedades de estado e obtendo-se apenas as características naturais do solo, uma delas a de ser susceptível de adquirir um estado, a classificação e a identificação permitirão a previsão do que resultará se um determinado solo adquirir um certo estado. Para tanto, na execução dos ensaios índices, recomenda que toda característica de estado (estrutura, compactidade, cimentação etc) seja previamente destruída. Tendo por objetivo o estudo dos fatores que afetam a floculação e a dispersão dos solos no ensaio de sedimentação (tipos de defloculantes, tempo de dispersão, secagem prévia da amostra etc), a presente dissertação pode fornecer importantes subsídios a investigações futuras a respeito do assunto.

A não reprodutibilidade dos ensaios índices tradicionais é bem visualizada nos resultados obtidos pelo Programa Interlaboratorial gerenciado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), conforme apresentado por GOBARA et alli (1986). Neste programa, que na área de solos conta com a participação de 32 laboratórios nacionais, a análise dos dados acumulados, enfocando os ensaios de caracterização, constata níveis de dispersão mais acentuados que os obtidos por programa semelhante conduzido pelo National Bureau of Standards (NBS-EUA). Ou seja, nas determinações do limite de plasticidade e da granulometria (fase de sedimentação), houve maior e mais errática dispersão de resultados no programa interlaboratorial brasileiro em relação ao programa gerenciado pelo NBS, sendo que, para os demais parâmetros, a dispersão de resultados nos dois programas é da mesma ordem. Segundo GOBARA et alli (1986), decorrem naturalmente as seguintes questões: os laboratórios nacionais não estão adotando procedimentos uniformes e os devidos cuidados na fase de sedimentação da análise granulométrica? Ou os solos brasileiros apresentam maior grau de floculação natural que os solos americanos e, portanto, os procedimentos contidos em nossas normas de ensaios podem ser considerados inadequados? Ou coexistem os dois fatores? De certeza, tem-se apenas que os níveis de dispersão encontrados refletem um quadro preocupante e mostram

que ensaios realizados por vários laboratórios, sobre uma mesma amostra, podem afastar-se entre si mais do que seria normalmente esperado e aceitável.

Quanto à primeira questão, não só os laboratórios de campo (normalmente relegados a segundo plano, apesar de terem grande importância nas obras lineares), mas também laboratórios de organismos oficiais de pesquisa e fiscalização, adotam, no dia-a-dia, procedimentos inadequados (por razões geralmente econômicas). Exemplificando, já se tornou comum, em alguns laboratórios, a utilização de soda cáustica como defloculante químico, apesar de seu pequeno poder defloculante (conforme poder-se-á constatar neste trabalho), com o agravante de que a concentração de soda cáustica utilizada não é conhecida nem constante, variando em função das unidades de volume disponíveis nestes laboratórios (conchas, copos, xícaras etc).

Com relação às características intrínsecas dos solos tropicais, sabe-se que estas exigem procedimentos particulares no preparo das amostras e na execução dos ensaios. Diferenças de resultados de ensaios índices, com solos lateríticos, em função dos métodos de preparação das amostras e dos procedimentos adotados na execução dos ensaios, desde há muito tempo têm sido relatados. MOH e MAZHAR (1969) apresentam, a esse respeito, inúmeros relatos de outros pesquisadores, como por exemplo: Fruhauf (1946), Willis (1946), Hirashima (1948), Bawa (1957), Terzaghi (1958) e Frost (1967). No entanto, procedimentos e cuidados especiais não estão presentes em nossas normas técnicas, que são baseadas em normas estrangeiras, não preocupadas com o problema por razões óbvias. As condições existentes em países de clima temperado são tão distintas das nossas que, recentemente, algumas instituições normativas estrangeiras, em especial a ASTM (American Society for Testing and Materials), promoveram um afrouxamento nas imposições e restrições para se executar o ensaio de granulometria por sedimentação. A permissão para procedimentos anteriormente vetados, ou pelo menos não recomendados, foi justificada como uma tentativa de se facilitar a execução dos ensaios. Ficam esperando respostas, agora, as seguintes questões: estarão esses novos procedimentos corretos do ponto de vista teórico? Serão seus resultados aceitáveis para os solos tropicais, ainda que os procedimentos não sejam perfeitamente corretos? Ou as alterações devem ficar restritas aos ensaios realizados com os solos estáveis de regiões temperadas?

Segundo AREAS (1966), de todos os ensaios correntes em Mecânica dos Solos, o de granulometria por sedimentação pelo método do densímetro parece ser o de técnica menos padronizada e o que mais tem resistido a uma normalização da técnica de execução, sendo inúmeros os fatores que contribuem para esta situação: diferentes tipos de defloculantes químicos, diferentes tempos de dispersão mecânica, efeitos da secagem prévia da amostra etc, muitos dos quais serão analisados neste trabalho. É atual, ainda hoje, a sugestão de MELLO et alli (1958) para que fosse feita uma revisão ampla da técnica de

ensaio, uma vez que a normalização rigorosa é particularmente necessária nos ensaios muito difundidos, aceitos como simples e rotineiros, mas que escondem importantes pormenores arbitrários. A esse respeito, VARGAS (1982) também vê a necessidade de uma revisão total das atuais normas da ABNT de execução dos ensaios de limites de Atterberg, de análise granulométrica e de preparação de amostras para ensaios de caracterização, que deverão ser estudadas cuidadosamente face às particularidades próprias dos nossos solos. Ainda segundo Vargas, "essa revisão não poderá ser feita a partir de opiniões pessoais de membros de uma eventual comissão, e sim ser baseada em conclusões objetivas de pesquisas de laboratório bem planejadas e elaboradas".

As opiniões, de certa forma complementares, dos professores Milton Vargas e Victor de Mello, a respeito do tema da presente dissertação, ao mesmo tempo em que serviram de estímulo ao trabalho, também nortearam todo o seu desenvolvimento, desde a escolha dos solos a serem ensaiados (não se esquecendo da influência da evolução pedogenética), passando pela revisão do papel desempenhado pela análise granulométrica no âmbito da Geotecnia, pelo estudo das propriedades da fração argila, pela identificação dos fatores intervenientes no ensaio de granulometria (através de uma análise crítica dos métodos de ensaio normalizados e também da Lei de Stokes, base fundamental da utilização do método do densímetro), até à própria programação de ensaios fatoriais, elaborada para a análise dos principais fatores intervenientes.

No presente trabalho, que tem por objeto o ensaio de sedimentação pelo método do densímetro, o principal objetivo é a identificação e avaliação das causas da não reprodutibilidade desse ensaio. Procura-se, pois, avaliar em profundidade as normas técnicas que lhes dizem respeito, por entender-se que, no campo de estudo "classificações de solos", é imprescindível o completo conhecimento dos fatores intervenientes nos ensaios utilizados como índices de classificação.

A dissertação, em seu início, contém um breve relato histórico de alguns dos mais importantes processos de análise granulométrica. Descreve, com comentários, formas de representação gráfica da análise granulométrica, bem como as origens e utilidades das diferentes escalas granulométricas. Essa parte inicial é encerrada com uma apresentação de campos de estudo para os quais a análise granulométrica tem relativa importância.

Abordam-se, em continuação, as propriedades físico-químicas das argilas, principalmente as que dizem respeito aos fenômenos de "floculação" e "dispersão" dos solos. A Lei de Stokes, fundamental na análise granulométrica por sedimentação, tem suas hipóteses analisadas com base em diversos estudos críticos reportados na literatura. O ensaio de sedimentação pelo método do densímetro é apresentado por completo (histórico, hipóteses, cálculos, metodologia de

ensaio e suas variantes etc); os pontos controversos e aqueles que podem ser responsáveis pela não reprodutibilidade do ensaio são analisados um a um, sendo esta discussão prévia utilizada como critério de seleção dos parâmetros a serem ensaiados.

Quanto à parte experimental, foi executada uma programação fatorial de ensaios, com o objetivo principal de avaliar se as diferenças entre os tratamentos (tipos de defloculantes, tempos de dispersão, secagem prévia da amostra, fração granulométrica ensaiada, leituras iniciais) adotados na execução do ensaio de granulometria pelo método do densímetro, para os diferentes tipos de solo ensaiados, são significativas (e com que grau de significância) ou se podem ser simplesmente atribuídas ao acaso.

Das conclusões e sugestões para trabalhos futuros, em grande parte baseadas nos resultados da análise estatística dos 125 ensaios de sedimentação realizados, merece destaque prévio o fato de que muitos dos procedimentos ("tratamentos") testados podem ser estendidos a outros ensaios de caracterização. Dentre esses, notadamente aos limites de Atterberg, para os quais trabalho semelhante ao desenvolvido para o método do densímetro desde há muito é necessário, uma vez que suas normas de ensaio também carecem de ampla revisão, baseada em pesquisas de laboratório bem planejadas e elaboradas.

## CAPITULO II - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS

### 2.1 - Importância da Análise Granulométrica:

A Análise Granulométrica fornece uma primeira aproximação das qualidades geotécnicas de um solo. Enquanto as partículas grossas (pedregulhos e areias) determinam muitas das propriedades mecânicas, as partículas menores (siltes e argilas) determinam muitas das propriedades químicas e físico-químicas dos solos. Assim, além de servir como um importante ensaio para a identificação e classificação de solos, a análise granulométrica também contribui para o estudo de muitos outros tópicos. Dentre esses, serão destacados os que envolvem, direta ou indiretamente, fatores que também influenciam os resultados da Análise Granulométrica e que serão objeto de estudos detalhados nos capítulos seguintes.

#### 2.1.1 - Erodibilidade de materiais argilosos

As primeiras investigações sobre as argilas dispersivas procuraram relacionar a força de atração das partículas argilosas com a resistência ao cisalhamento, com os limites de Atterberg e com a granulometria. DUNN (1959), conforme relatado por HEINZEN e ARULANANDAN (1977), mostrou que a resistência à erosão dos solos argilosos diminui com o aumento da concentração de cátion Na solúvel na água intersticial. Tal observação concorda com o fato de que o sódio aumenta a camada de água adsorvida em torno dos grãos e, conseqüentemente, faz decrescer a força de atração entre as partículas, tornando possível que elas se separem da massa.

SHERARD et alli (1972), conforme relatos de HSU (1974) e HEINZEN e ARULANANDAN (1977), empreendeu, a partir do trabalho de Dunn, estudos sobre a resistência ao "piping" (fenômeno de erosão regressiva subterrânea) nos solos finos. A conclusão a que chegou foi de que o fenômeno envolve a dispersão das partículas coloidais do solo no ponto de emergência da água, com conseqüente carreamento progressivo. Portanto, a resistência ao "piping" é tanto menor quanto mais susceptível de defloculação for a estrutura do solo fino.

Sabe-se, atualmente, que os fatores que influenciam as tensões requeridas para se iniciar o processo erosivo são: quantidade e tipo mineralógico da argila; pH; presença de matéria orgânica; temperatura; teor de umidade; tipo e concentração de íons nos fluidos intersticiais; ou seja, todos os fatores que influenciam as forças de atração e repulsão entre partículas de argila. Com base nesta constatação, Sherard recomenda que a verificação do grau de dispersão de solos seja feita, apesar dos diferentes métodos existentes (ensaio do cilindro rotatório, ensaio "crumb", ensaio do furo de agulha, ensaio químico etc), por intermédio do Ensaio Comparativo de Granulometria.

Tal método consiste de um duplo ensaio de sedimentação: um, realizado de acordo com os procedimentos normalizados, em que é feita a dispersão prévia da amostra; e outro, com 25g de solo seco, diluídas em 125ml de água destilada, em que nenhuma dispersão prévia da amostra é realizada. Define-se "Índice de Dispersão" (ID) à relação entre as porcentagens de partículas menores que 0,005mm, obtidas, respectivamente, do ensaio com água destilada e do ensaio normal de sedimentação. Segundo indicações de Sherard:

- ID > 50 ..... argila altamente dispersiva
- 20 < ID < 50 ..... argila medianamente dispersiva
- ID < 20 ..... argila não dispersiva.

### 2.1.2 - Determinação da superfície específica

A superfície específica é definida como sendo a área superficial total das partículas existentes em uma massa unitária. É um importante parâmetro no estudo de reações químicas entre materiais em que pelo menos um deles se encontra na forma pulverulenta, uma vez que a reatividade química é restrita às moléculas que mantêm contato de superfície. Assim, é de grande importância para a agronomia, para o estudo da coesão das argilas, nos processos de estabilização dos solos com aditivos etc.

Os diversos métodos para determinação da superfície específica (método do permeâmetro - desenvolvido por Blaine e Fischer; adsorção em temperatura ambiente - azul de metileno, glicerol e etileno glicol; adsorção de gases em baixas temperaturas; métodos granulométricos - diâmetros médios aritmético, geométrico e de Mellor) apresentam grande dispersão de resultados, o que caracteriza como vantajosa a adoção de processos mais simples, como os granulométricos.

Quanto menor a dimensão das partículas, maior é a superfície específica. Por exemplo, a superfície específica da areia fina é da ordem de 0,03m<sup>2</sup>/g, a da caulinita 10m<sup>2</sup>/g e a da montmorilonita é 1000m<sup>2</sup>/g. A esse respeito, interessante abordagem da relação entre a superfície específica e a análise granulométrica foi apresentada por PURI (1949): como a superfície específica pode ser expressa pela fórmula:

$$S = (0,06 / \rho_s) \cdot \sum (p / D) \tag{2.01}$$

onde:  $\rho_s$  é a massa específica dos sólidos (g/cm<sup>3</sup>) e p é a porcentagem em peso de partículas de diâmetro médio D (mm), o valor da superfície específica varia em função do diâmetro limite inferior da análise granulométrica. Exemplificando: supondo que uma dada análise granulométrica tivesse fornecido os seguintes resultados:

Diâmetro (mm)	% que passa
0,002	58,8
0,001	57,8
0,00063	54,6
0,00004	26,4

Se a análise granulométrica houvesse parado em 0,002mm, a contribuição das partículas menores que esta dimensão, para a superfície específica, seria (considerando-se uma massa específica dos sólidos igual a 2,65g/cm<sup>3</sup> e o diâmetro de cálculo, para as partículas menores que o diâmetro limite da análise granulométrica, como sendo igual à metade do diâmetro limite):

$$S_1 = (0,06 / 2,65) \cdot (58,8 / 0,5 \cdot 0,002) = 1,33\text{m}^2/\text{g} \quad (2.02)$$

Analogamente, se a análise granulométrica tivesse parado em 0,001mm, 0,00063mm e 0,00004mm, as contribuições à superfície específica seriam, respectivamente,  $S_2 = 2,62\text{m}^2/\text{g}$ ,  $S_3 = 4,04\text{m}^2/\text{g}$  e  $S_4 = 31,8\text{m}^2/\text{g}$ .

Portanto, quando é utilizada a fórmula acima, que se utiliza da análise granulométrica para o cálculo da superfície específica, o valor obtido deve ser referenciado ao limite inferior da análise granulométrica. Outra observação importante é que a superfície específica dos solos excede, em muito, os valores calculados, já que os cálculos têm, via de regra, o diâmetro de 0,002mm como limite inferior da análise granulométrica.

### 2.1.3 - Estudos dos processos sedimentares

O estudo dos processos sedimentares (intemperismo, transporte, deposição e litificação) utiliza-se da análise textural como ferramenta, juntamente com a observação das estruturas. A granulometria dos sedimentos reflete a dinâmica do transporte, que é função da velocidade de sedimentação e das leis de movimento dos fluidos. Embora os minerais argilosos tenham a particularidade de refletirem mais as condições do sítio de intemperismo do que as do sítio de deposição, ainda assim as dimensões dos grãos sedimentados fornecem importantes informações acerca da energia do ambiente de deposição: sedimentos granulares indicam ambientes com alta energia e sedimentos finos indicam ambientes com baixa energia. Além disso, a Sedimentologia utiliza-se das curvas granulométricas para a obtenção de coeficientes que distingam os modos de transporte e os tipos de depósitos. A Figura 2.01,

de REINECK e SINGH (1973), exemplifica um método, baseado na análise granulométrica, de se distinguir entre os diferentes modos de transporte de sedimentos.

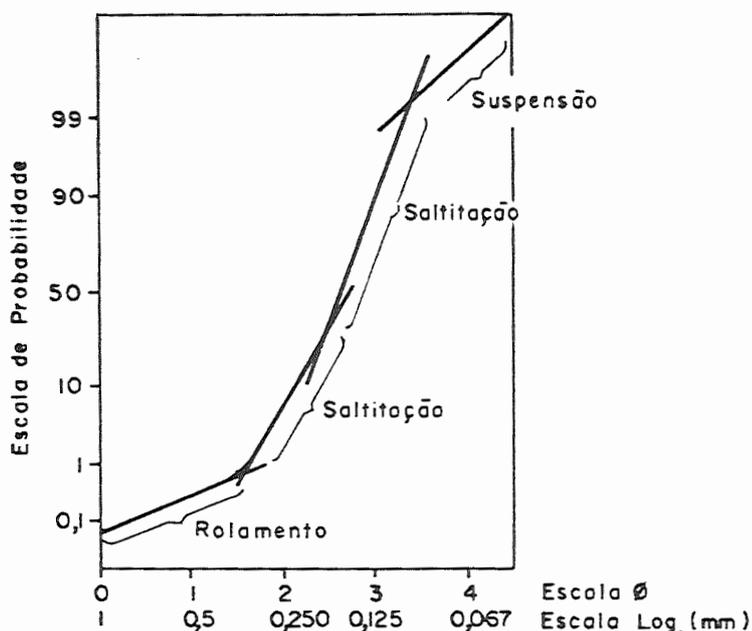


Figura 2.01: Distinção entre diferentes modos de transporte de sedimentos - REINECK e SINGH (1973).

#### 2.1.4 - Estudos de argilas expansivas

Ainda que as medidas diretas das propriedades expansivas sejam indispensáveis para o projeto de estruturas mais caras e arrojadas, a utilização de ensaios mais simples e baratos pode ser feita nas pequenas obras ou em obras com grande extensão. Nesse sentido, o trabalho apresentado por RAMA RAO e SMART (1980) à IV Conferência Internacional sobre Solos Expansivos mostrou haver, para os solos por eles ensaiados, boa correlação entre "famílias" de solos (definidas com base nas curvas granulométricas) e os valores de pressão de expansão e de potencial de expansão. Os autores sugerem, pois, que juntamente com a similaridade de história geológica e de composição mineralógica (índices atualmente utilizados), a similaridade de distribuição granulométrica também seja um pré-requisito essencial no desenvolvimento de equações para a previsão de propriedades expansivas, a serem utilizadas em obras de menor importância, em obras de grande extensão ou em estudos preliminares.

### 2.1.5 - Estudos sobre erosão

Como bem exemplifica o trabalho coordenado por BIGARELLA e MAZUCHOWSKI (1985), a Análise Granulométrica é muito utilizada, nos estudos de erosão, para a descrição detalhada dos perfis de solo. Isto porque a granulometria é uma das propriedades mais importantes do solo, pouco se modificando com o decorrer do tempo. Além disso, influi na capacidade do solo reter e infiltrar água, na aeração e na capacidade de retenção de nutrientes pelos solos. Uma mudança textural abrupta que ocorra entre os horizontes A e B, causada por um aumento considerável do teor de argila, pode afetar a velocidade de infiltração das águas, ocasionando uma rápida saturação da camada superficial e originando, conseqüentemente, enxurradas que incrementam o processo erosivo.

A lista de assuntos para os quais a Análise Granulométrica contribui, ainda que com importância limitada para alguns, é muito extensa. Merecem ser citados, no entanto, os seguintes:

- estudos de adequabilidade para estabilização: todos os processos de estabilização de solos se utilizam da Análise Granulométrica, quer na determinação de faixas aceitáveis de material passado em determinadas peneiras, como no caso da estabilização granulométrica, quer na indicação de faixa granulométrica em que a estabilização com cimento é economicamente bem sucedida, quer como instrumento auxiliar nos processos de dosagem de solo-cimento, ou ainda, no caso de estabilização química e injeções, onde a Análise Granulométrica auxilia no estudo de viabilidade do processo e ajuda na estimativa da extensão a ser alcançada pela injeção;
- seleção de materiais para aterros: como critério adicional no estudo de adequabilidade de solos para compactação em aterros e barragens;
- dimensionamento de filtros de proteção: utilizada para fixação da faixa granulométrica admissível;
- estudos de compactação dinâmica: fornece subsídios para análise de viabilidade do processo;
- susceptibilidade ao gelo: existem critérios que verificam esta susceptibilidade em função da porcentagem de partículas menores que 0,02mm;
- determinação da capacidade de retenção de água;
- estimativa da altura capilar.

## 2.2 - Métodos de Análise:

O processo que determina a granulometria de um solo, ou seja, a proporção relativa entre partículas de vários tamanhos, é conhecido como Análise Granulométrica. A história dos princípios e métodos de Análise Granulométrica remontam à Grécia Antiga, onde o método de decantação para separação das partículas já era conhecido, embora nenhuma aplicação a solos ou sedimentos tenha sido feita até 1692. Peneiras foram usadas para separar areias em 1704; a necessidade de conhecimento da composição das "terras", para posterior classificação, foi reconhecida em 1750, e a primeira divisão dos solos em três classes ocorreu em 1784. O primeiro elutriador com fluxo ascendente foi usado em 1839. Em 1851 a Lei de Stokes foi formulada e em 1867 ela foi aplicada à Análise Granulométrica. O uso de gráficos para representar os sedimentos foi introduzido em 1891. Neste mesmo ano a centrífuga foi aplicada à Análise Granulométrica. Em 1916 a balança de sedimentação surgiu e, neste mesmo ano, também foi desenvolvida uma teoria matemática para os sistemas de sedimentação. O Método da Pipeta foi desenvolvido em 1922 e o do Densímetro em 1926.

Para o estudo da textura dos solos (tamanho relativo dos grãos que formam a fase sólida), vários métodos podem ser utilizados. Para a análise granulométrica das areias e dos pedregulhos, o simples peneiramento, com peneiras padronizadas (aberturas de malhas rigorosamente estabelecidas), é o método mais usado. Nas malhas das peneiras ficam retidas porções de solo, porções estas cujos grãos têm diâmetros maiores que as malhas da peneira onde foram retidas e menores do que as peneiras por onde passaram. Alguns autores, principalmente em Sedimentologia, preferem usar elutriadores e tubos de sedimentação, em substituição às peneiras, para evitar dados baseados em princípios completamente diferentes. Argumentam que ocorre, na prática, uma descontinuidade no ponto de junção da curva resultante dos dados do peneiramento com a curva obtida por processos de sedimentação, quando da construção de curvas granulométricas cumulativas. Embora frequentemente sugeridos, tais métodos para análise granulométrica de areia, quando comparados com os resultados do peneiramento, acarretam erros relativamente maiores.

Para os solos mais finos, como as argilas e os siltes, o peneiramento é impraticável, pois as peneiras deveriam ter aberturas de malhas excessivamente pequenas, impossíveis de serem obtidas industrialmente e serem preservadas com o uso. Para a caracterização granulométrica em Engenharia Civil, o mais utilizado é o ensaio de sedimentação pelo método do densímetro, embora para outros usos, como por exemplo, em cerâmica, cimentos e geologia, sejam utilizados métodos mais acurados (métodos óticos, fotogramétricos e raio X - ENGELHARDT (1967)). Ainda assim, a base fundamental de todos os métodos de análise granulométrica das frações finas é a Lei de Stokes, que fornece a relação entre a dimensão da partícula e sua velocidade de sedimentação em água ou em qualquer outro líquido.

Portanto, o tamanho da partícula, se objeto do peneiramento, será baseado na dimensão lateral de um orifício quadrado, enquanto que, se a análise ocorrer por processos de sedimentação, o diâmetro da partícula será o diâmetro de uma esfera que se deposita à mesma velocidade da partícula considerada ("diâmetro equivalente").

Para a Análise Granulométrica mediante a utilização da Lei de Stokes existem vários processos, embora a maioria apresente somente interesse histórico. Destaque especial será dado ao Método do Densímetro, apresentando-se a seguir apenas uma breve descrição de alguns dos demais processos, a partir, principalmente, de relatos de PURI (1949) e SUGUIO (1973):

### 2.2.1 - Sedimentação sucessiva

Utilizada para determinar a porcentagem da fração mais grossa que um dado diâmetro. Calcula-se, primeiro, o tempo requerido por um grão com este diâmetro para cair da altura de um frasco de sedimentação. Dispersa-se a amostra de massa conhecida, deixando-a sedimentar pelo tempo calculado. O sedimento resultante conterá, então, todas as partículas de diâmetro maior e uma parte de partículas menores que o diâmetro de referência. A repetição do processo, somente com o material sedimentado, eliminará, sucessivamente, as partículas menores, até que o sedimento possa ser pesado e forneça um ponto da curva de distribuição granulométrica.

### 2.2.2 - Água límpida na coluna de sedimentação

Tem como princípio o fato de que, após um intervalo de tempo, pode-se determinar o menor diâmetro das partículas do sedimento, medindo-se a profundidade em que a água começa a apresentar alguma turbidez. A maior dificuldade consiste em garantir a ocorrência da efetiva sedimentação de todas as partículas até abaixo do ponto considerado como início da turbidez.

### 2.2.3 - Elutriadores de fluxo ascendente (decantação)

São baseados no princípio de que uma partícula, sedimentando-se em água com uma certa velocidade, pode vir a ficar estacionada se a água fluir ascensionalmente com a mesma velocidade com que a partícula estava caindo. Assim, se a água estiver fluindo com uma velocidade maior do que a velocidade de sedimentação da partícula, esta última começará a subir numa razão igual à diferença das duas velocidades. Se um número de partículas de diferentes tamanhos e, conseqüentemente, diferentes razões de sedimentação, é submetido a uma corrente ascendente de água, as menores começarão a subir a partir do momento em que for atingida uma dada velocidade crítica, a qual é ligeiramente maior que suas velocidades de sedimentação. Se a corrente ascendente for mantida com velocidade constante, todas as partículas menores

que um dado diâmetro serão separadas do resto ao final de um certo tempo. Se a velocidade da corrente for aumentada, um outro grupo de partículas, com maiores dimensões, será separado. Desta forma, um gradual aumento de velocidade da corrente ascendente acarreta a separação de várias frações com granulometria também crescente.

A forma mais simples de elutriador foi projetada por Schone, em 1867. Posteriormente, passou-se a usar elutriadores com múltiplos tubos, embora os métodos que se utilizam de elutriadores não sejam passíveis de muito refinamento. Dado o volume de água utilizado, o uso de água destilada é proibitivo, podendo haver a ação floculante dos sais presentes na água de uso comum. Outros pontos de imprecisão são a variação da velocidade ascendente da água na seção transversal do tubo e o turbilhonamento causado pela forma do cilindro. Comercialmente, certos tipos de elutriadores têm sido ainda usados para separar frações arenosas e para lavagem de areias com argila. Os elutriadores a jatos de ar, em razão do aprimoramento da técnica construtiva dos equipamentos, têm sido muito aplicados no tratamento prévio de minérios, no estudo de pigmentos, cimentos, materiais cerâmicos, sementes e outros materiais que excluem o uso de água.

#### 2.2.4 - Observação da quantidade total de solo em suspensão em uma altura determinada

Baseia-se no princípio de que a pressão, a uma dada profundidade, permite a quantificação do solo em suspensão acima do ponto considerado. Neste método, são utilizados cilindros manométricos, introduzidos por Wiegner em 1918, que registram mudanças na pressão hidrostática da suspensão devidas à sedimentação. Pelo registro do decréscimo da pressão, em função do tempo, obtém-se uma curva a partir da qual pode-se determinar o gradiente da densidade da suspensão e, pela Lei de Stokes, a curva granulométrica.

#### 2.2.5 - Sedimentômetro fotoelétrico

Este método, de forma incipiente, foi usado pela primeira vez por Wiegner, em 1933, para investigação de cimentos. Atualmente, existem vários métodos modernos e sofisticados, baseados nas mudanças de densidade ótica que ocorrem nas suspensões durante o processo de sedimentação, para determinação da superfície específica e da distribuição granulométrica de materiais argilosos.

#### 2.2.6 - Sedimentação com utilização de equipamento para pesagem automática

Um capítulo na história da análise granulométrica de solos foi a balança de sedimentação contínua, projetada por Oden, em 1916, posteriormente aperfeiçoada por Keen, conhecida como balança Oden-Keen. A balança Oden-Keen apresenta um prato que permanece livremente na suspensão, sobre o qual sedimentam-se as partículas, possibilitando o

registro automático dos pesos ao longo do tempo. Embora tenha surgido sob enorme expectativa, o projeto não correspondeu ao esperado por não conseguir eliminar certos erros e por necessitar de correções adicionais (por exemplo, o diâmetro do prato de recepção do material é menor que o diâmetro interno da proveta, estando suspenso alguns milímetros do fundo; assim, uma porcentagem do sedimento inicialmente pesado não se deposita sobre o prato da balança, além de só serem abrangidas as frações cuja totalidade de partículas sedimentem até à profundidade do prato durante o período de ensaio).

#### 2.2.7 - Método da pipeta

O desenvolvimento do Método da Pipeta, que consiste de observação da quantidade de sedimento por unidade de volume, em um dado ponto do tubo de sedimentação, foi realizado, independentemente, por Robinson, na Inglaterra, por Jennings, Thomas e Gardner, nos Estados Unidos, e por Krauss, na Alemanha. O de técnica mais simples e de uso mais generalizado nos ensaios de solos é o de Robinson, cujo aparato consiste de um cilindro de vidro de diâmetro uniforme e de uma pipeta com capacidade de amostrar em qualquer profundidade do cilindro, sendo este o método adotado pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSS) e pelas normas britânicas de ensaios de granulometria de solos.

Na análise por pipetagem, são obtidas amostras da suspensão a 10cm de profundidade (exceto para as duas pipetagens iniciais, tomadas a 20cm de profundidade), em intervalos de tempo determinados. Cada amostra de 10cm<sup>3</sup> é seca em estufa e depois pesada, possibilitando o cálculo da concentração, ou seja, da porcentagem de partículas menores que um determinado diâmetro (por exemplo, porcentagem de silte mais argila). Segundo procedimentos descritos por HANDY e DAVIDSON (1953), em trabalho que propunha a complementação das leituras do método do densímetro com o método da pipeta e apresentava um arranjo com possibilidade de execução de doze ensaios simultaneamente, pelo método da pipeta é possível a extensão das medidas até diâmetros menores que 0,001mm.

#### 2.2.8 - Centrífugas

As centrífugas tiveram a sua utilização na análise granulométrica de solos motivada pelo grande tempo necessário para a obtenção da porcentagem de fração argila pelos meios tradicionais, além do risco de imprecisões nos ensaios (por influência, por exemplo, de vibrações e correntes de convecção). Os métodos usuais de análise granulométrica de solos, incluindo o densímetro, têm sido usados para diâmetros até 0,001mm, que são superiores ao limite das partículas coloidais (aproximadamente 0,0005mm). É possível atingir este limite, com a sedimentação gravitacional, estendendo o tempo de observação a várias semanas. Outra possibilidade, no entanto, é a aceleração da sedimentação mediante centrifugação ou ultracentrifugação, que aumentam a força que age sobre as partículas.

No aparato original, com longos tubos girando horizontalmente, as partículas eram submetidas a um acréscimo de força à medida que se dirigiam à base do tubo de sedimentação. Uma modificação do aparato original foi desenvolvida por Norton, visando ensaiar argilas finas com grande porcentagem em peso de partículas menores que 0,001mm. No novo aparato, o recipiente se mantém suspenso, verticalmente, na extremidade de um braço que gira. Desta forma, a força centrífuga causada pela rotação introduz uma aceleração praticamente uniforme e muitas vezes maior que a gravidade, resultando em uma sedimentação muito mais rápida. Assim, consegue-se a distribuição granulométrica até 0,0005mm, ou menos, em poucas horas.

### 2.3 - Representação Gráfica da Análise Granulométrica:

A maneira mais usual de representação dos resultados de ensaios granulométricos, pelo menos para o engenheiro civil, é por intermédio de gráfico semilogarítmico, colocando-se em abscissa os logarítmos dos diâmetros dos grãos e em ordenada as porcentagens em peso dos grãos com diâmetros inferiores aos da abscissa correspondente (curva de frequência acumulada). As principais vantagens da representação semilogarítmica da distribuição granulométrica de um solo, como mostrado na Figura 2.02, são que solos com mesma graduação apresentam-se com curvas paralelas e a distribuição da fração fina torna-se mais adequada. Quando as abscissas são representadas em escala aritmética, obtem-se uma curva como a da Figura 2.03, na qual se notam as frações finas mal representadas, em espaço muito pequeno. Além disso, como será detalhado quando se tratar das escalas granulométricas, as propriedades das diferentes frações não obedecem a uma progressão aritmética; exemplificando: entre uma partícula de 0,001mm e outra de 0,011mm há uma grande diversidade (de argila para silte), enquanto que entre duas partículas arenosas de 0,20 e 0,21mm, a diferença de propriedades é imperceptível.

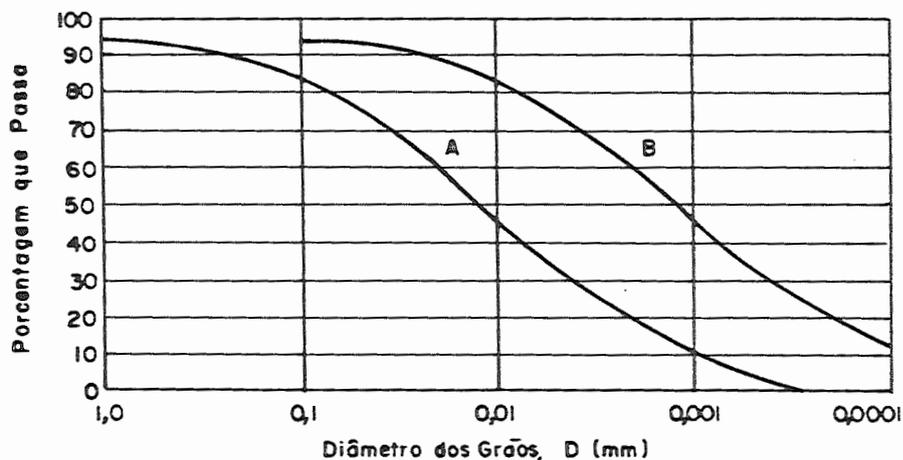


Figura 2.02: Curva granulométrica acumulativa em escala semilogarítmica - MEANS e PARCHER (1964).

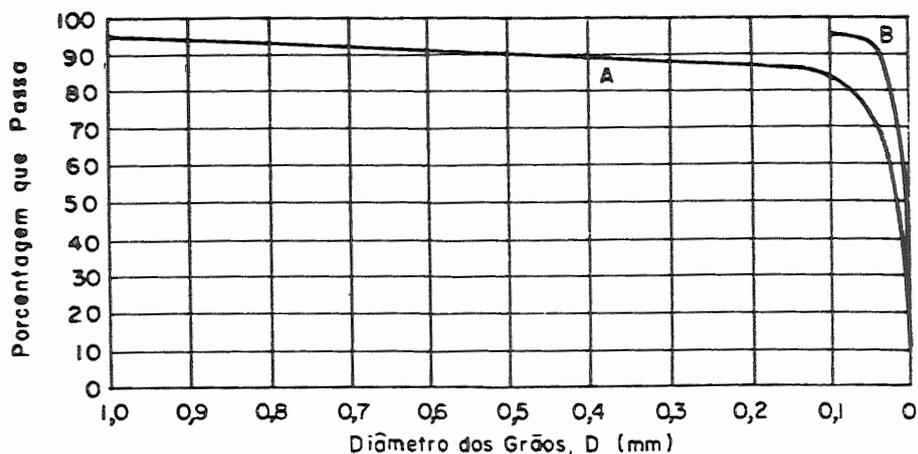


Figura 2.03: Curva granulométrica acumulativa em escala aritmética - MEANS e PARCHER (1964).

Outra possibilidade é a utilização de escala duplamente logarítmica, em cuja representação muitos solos naturais apresentam-se segundo uma reta. Pode-se, também, fazer a apresentação dos resultados da análise granulométrica por meio de histogramas de frequência, com os quais se apresentam a porcentagem de partículas entre determinados diâmetros. A Figura 2.04, apresentada por SCOTT e SCHOUSTRA (1968), mostra um histograma de um solo com predominância de partículas de tamanho próximo a 0,25mm. A soma das porcentagens de todos os intervalos do histograma é 100%, por representar a totalidade das partículas do solo. Os valores mais elevados do histograma correspondem a zonas com maior verticalidade na curva de frequência acumulada e os valores mais baixos correspondem a trechos com tendência à horizontalidade. Atualmente, o uso de histogramas nos laboratórios de Mecânica dos Solos está muito reduzido.

Em Sedimentologia, costuma-se representar a distribuição granulométrica através de histogramas, curvas de frequência e curvas cumulativas, dando-se um tratamento estatístico à análise granulométrica com vistas à obtenção de coeficientes que distingam os modos de transporte de sedimentos (suspensão, rolagem ou saltitação) e os tipos de depósitos (fluviais, eólicos ou marinhos). A esse respeito, SUGUIO (1973) comenta que, embora muitas informações possam ser obtidas por processos puramente gráficos, é mais conveniente expressar as características das curvas por meio de números, através das medidas estatísticas. Assim, as medidas de tendência central (diâmetro médio aritmético, diâmetro médio geométrico, diâmetro modal e mediana) dão a ordem de magnitude dos tamanhos das partículas; as medidas do grau de dispersão de diâmetros (desvio-padrão e desvio-médio) podem desvendar a natureza de depósitos sedimentares; e as medidas do grau de assimetria e do grau de agudez dos picos (curtose) ajudam a entender a ação seletiva do agente geológico.

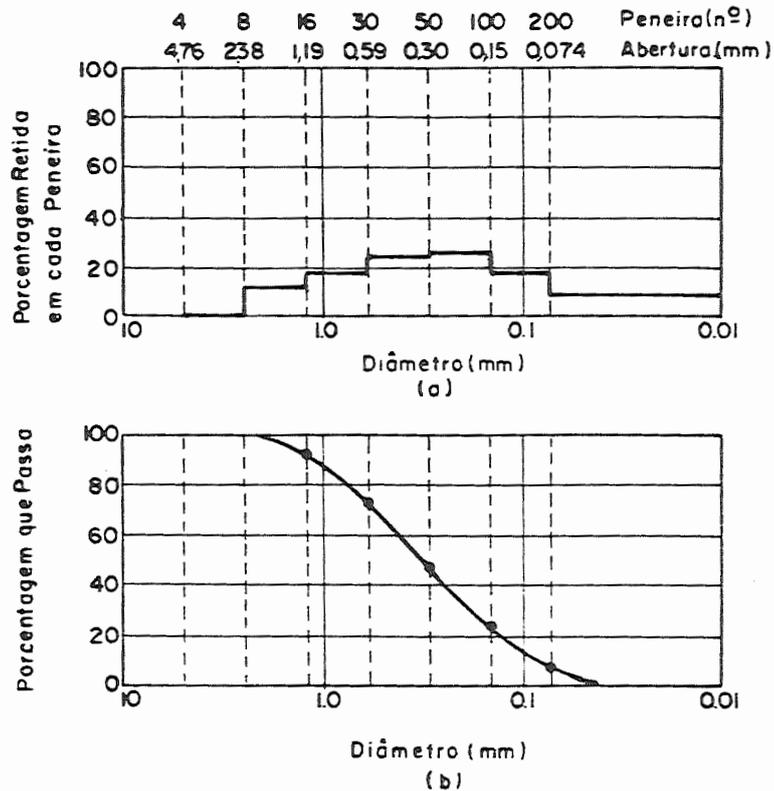


Figura 2.04: Distribuição de dimensões de partículas em um solo: (a) histograma de frequência de diâmetros; (b) frequência acumulada de diâmetros - SCOTT e SCHOUSTRA (1968).

Outra particularidade apresentada pelos estudos sedimentológicos é a utilização, nas ordenadas, de uma escala de probabilidades, que varia de (0,01) a (99,99). Com relação às abscissas, por outro lado, utiliza-se, alternativamente à escala aritmética, a escala " $\phi$ ". Tal escala foi introduzida na análise granulométrica por Krumbein, onde  $\phi = \log_2 D$  (para  $D = 1\text{mm}$ ,  $\phi = 0$ ; para  $D > 1\text{mm}$ ,  $\phi < 0$ ; para  $D < 1\text{mm}$ ,  $\phi > 0$ ). A vantagem da escala " $\phi$ " é que todos os intervalos são equidistantes entre si, possibilitando a interpolação aritmética direta e permitindo, também, que os cálculos de diâmetros sejam feitos com números inteiros. Apresentam-se, na Figuras 2.05, exemplos de representações utilizadas pela Sedimentologia. Para detalhes adicionais, sugerem-se REINECK e SINGH (1973) e SIMONS e SENTURK (1977).

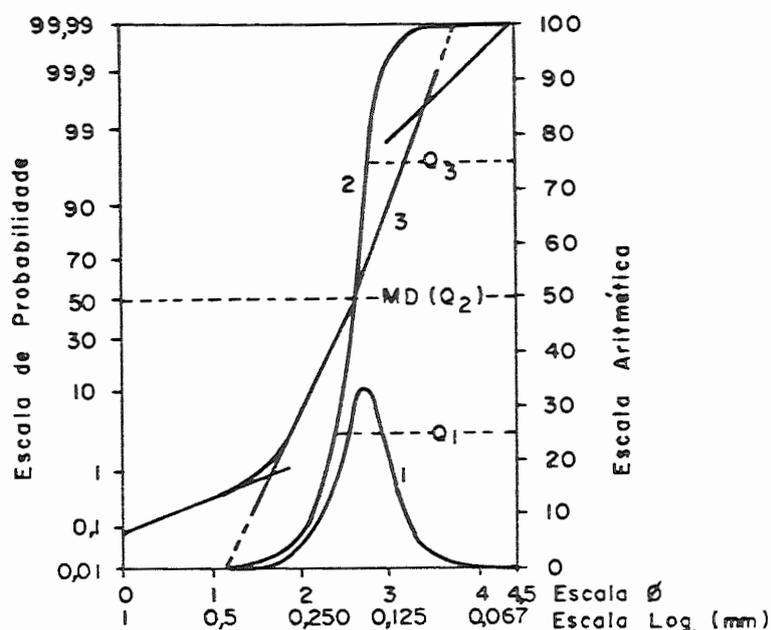


Figura 2.05: Curvas de distribuição granulométrica de sedimentos - (1) curva de frequência; (2) curva de frequência acumulada; (3) curva de probabilidade - REINECK E SINGH (1973).

#### 2.4 - Escalas Granulométricas:

Como os solos são formados por partículas minerais que cobrem um largo intervalo de tamanhos, há necessidade de adoção de limites para a denominação e descrição das diferentes frações. São as Escalas Granulométricas que permitem a obtenção da composição granulométrica, isto é, a porcentagem relativa das frações (pedregulho, areia, silte e argila) que compõem o solo. As Escalas Granulométricas têm por funções básicas, portanto, permitir uma nomenclatura padronizada e uniforme e relacionar seus limites com as propriedades dos solos e sedimentos.

Uma escala granulométrica é uma escala de grandezas dos diâmetros entre os quais se encontram os tamanhos dos grãos das diversas frações constituintes dos solos. Normalmente, em engenharia civil, na parte inferior do gráfico semilogarítmico, é desenhada uma Escala Granulométrica, que estabelece os "diâmetros limites" das diferentes frações de um solo. A análise granulométrica consiste, pois, da comparação entre uma curva granulométrica e uma escala adotada.

As muitas escalas granulométricas propostas e adotadas acarretam muitas discrepâncias, havendo, ainda hoje, termos que podem designar materiais muito diferentes, em função da escala granulométrica adotada. Todos os limites de frações granulométricas são arbitrários e suas origens foram influenciadas por fatores pertencentes, principalmente, à agricultura, à engenharia e à geologia. Dentre esses fatores, destacam-se os métodos e equipamentos de análise, a facilidade de apresentação dos dados e a conveniência para análise estatística. Alguns pesquisadores procuraram fazer com que os limites correspondessem às várias propriedades das frações dos solos; outros, por sua vez, preocuparam-se mais com a facilidade e conveniência da obtenção e apresentação de dados.

Neste trabalho, seguindo-se o adotado por RODERICK (1972), agruparam-se as escalas granulométricas de acordo com o campo de estudo de origem (agronomia, engenharia e geologia), como mostrado nas Figuras 2.06 a 2.08, de maneira a permitir a apresentação dos sistemas iniciais, bem como a evolução por eles sofrida até chegarem aos sistemas atualmente em uso.

#### 2.4.1 - Escalas granulométricas reportadas na literatura agronômica

A Figura 2.06 apresenta as mais importantes escalas reportadas na literatura de agronomia. As primeiras escalas européias (Wanschaffe, Wolf - 1891, Kuhn e do Comitê Germânico Permanente para Investigação do Solo - 1894) foram, aparentemente, baseadas em seleções arbitrárias. Em 1895, Willians, da Rússia, apresentou sistema classificatório baseado nas formas e dimensões dos grãos, que serviu de base para os trabalhos de Fadejeff, na Academia Agrícola Petroffskaja (URSS). Willians diferenciou areia de silte em razão deste último apresentar maior capacidade de retenção de água. O mesmo motivo, agora mais acentuadamente, delimitou a transição de silte para argila. De observação quanto à permeabilidade, obteve: a areia é muito permeável, o silte é muito menos que a areia e a argila às vezes é completamente impermeável. Além disso, Willians atentou para o fato de que as partículas grossas resultam da redução física do quartzo e outros minerais, enquanto a argila é produto de intemperismo químico.

Em 1887, Osborne, da Estação Experimental Agrícola de Connecticut (EUA), relatou os resultados de estudos de vários métodos de análise granulométrica (peneiramento, elutriação e sedimentação) e propôs limites que poderiam ser facilmente associados aos métodos de análise por ele utilizados. Whitney, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em 1892, modificou a escala proposta por Osborne, adotando 0,001mm como limite inferior da fração argila, em razão de suas observações de ensaios de sedimentação. Posteriormente, o Departamento de Solos dos Estados Unidos (USBS) combinou os dois grupos de silte em um único, de 0,05 a 0,005mm.

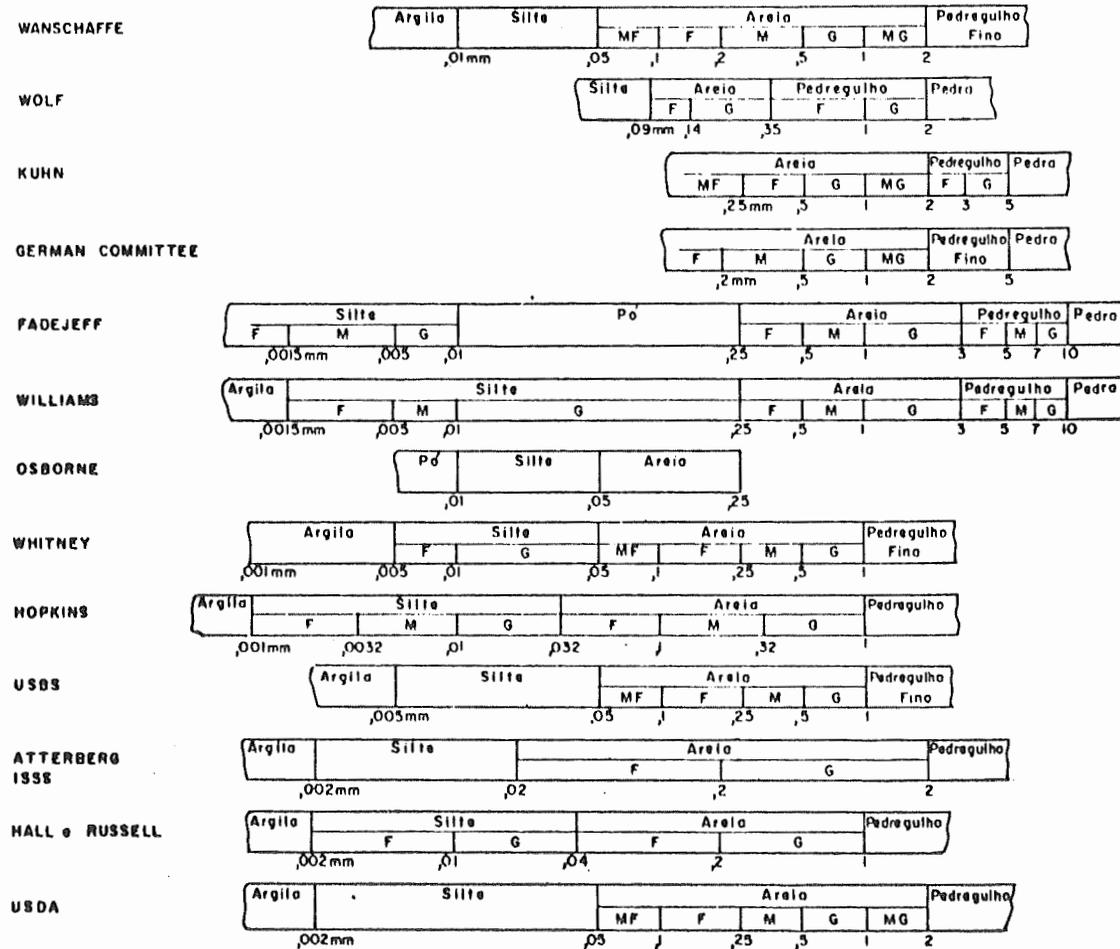


Figura 2.06 - Escalas granulométricas reportadas na literatura de Agronomia.

Em 1899, Hopkins, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - Divisão de Química, fez uma proposta para divisão mais científica das frações granulométricas. O método de Hopkins, como ficou conhecido, admitiu que, em uma composição teórica de um solo de graduação uniforme, há um fator comum para a passagem da menor à maior dimensão de todas as frações, cujo valor seria a raiz quadrada de 10 (aproximadamente 3,2).

Estudos de propriedades dos solos foram desenvolvidos por Atterberg, na Suécia, no início deste século. Atterberg classificou as partículas menores que 2mm em quatro grupos. O limite entre areia e pedregulho, igual a 2mm, foi em razão de que acima deste diâmetro a capilaridade é insignificante. O diâmetro limite entre areia grossa e areia fina, embora não muito nítido, foi adotado como sendo 0,2mm, em razão de que, de 0,5 a 0,2mm, a capilaridade atinge no máximo 30 cm, enquanto de 0,2 a 0,1mm a capilaridade pode chegar a 110cm. Atterberg adotou 0,02mm como limite entre areia e silte porque as partículas de 0,2 a 0,02mm possuem boa capilaridade e boa permeabilidade, enquanto as partículas menores que 0,02mm apresentam capilaridade muito alta mas baixa permeabilidade. O limite entre siltes e argilas foi fixado em 0,002mm em razão de as partículas menores que este diâmetro apresentarem baixíssima permeabilidade e acentuado movimento browniano. Além disso, Atterberg complementou observando que a maior parte das bactérias não podem se mover entre partículas de solos com diâmetros inferiores a 0,002mm. Posteriormente, Atterberg considerou vantajoso mudar os limites de 0,2; 0,02 e 0,002mm para 0,3; 0,03 e 0,003mm. Ironicamente, no entanto, os limites inicialmente propostos já estavam consagrados, sendo que em 1914 uma comissão internacional adotou, embora não por unanimidade, a escala de Atterberg (a inicialmente proposta) como Sistema Internacional.

Em 1911, Hall e Russell apresentaram um sistema cujas frações granulométricas foram determinadas com base na fertilidade. Em 1938 o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) adotou, após muitos conflitos entre pesquisadores, a fração menor que 0,002mm como fração argila.

#### 2.4.2 - Escalas granulométricas reportadas na literatura de engenharia

A Figura 2.07 mostra escalas granulométricas reportadas na literatura de engenharia. Em 1925, Terzaghi apresentou um sistema com quatro frações (argila, silte, mo e areia) e muitas subdivisões, cuja evolução resultou no Sistema Continental. O Bureau of Public Roads (BPR - EUA) utilizou a conveniência de separação pelos diferentes métodos (peneiramento, sedimentação e centrifugação) na definição dos limites entre as diferentes frações. Posteriormente, Hogentogler, em 1937, apresentou o significado físico das várias divisões adotadas pelo BPR:

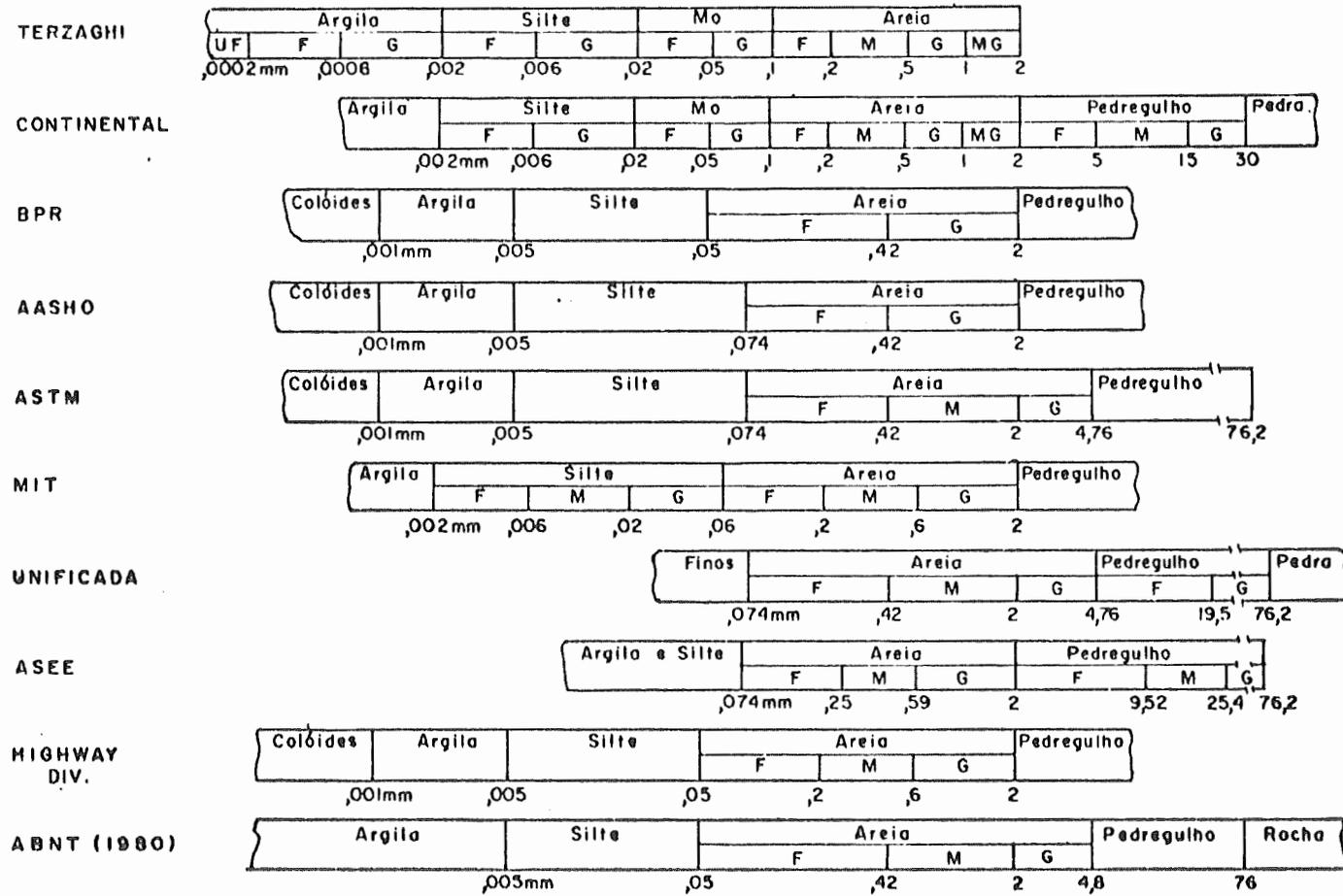


Figura 2.07 - Escalas granulométricas reportadas na literatura de Engenharia Civil.

- pedregulho: fragmento de rocha, geralmente arredondado pela ação da água e por abrasão, tendo o quartzo como seu principal constituinte;
- areia grossa: geralmente arredondada, com os mesmos minerais do pedregulho;
- areia fina: geralmente mais angulosa que a areia grossa;
- silte: similar à areia fina, exceto nas dimensões;
- argila: é a porção quimicamente reativa dos solos, sendo produto de intemperismo químico;
- colóides: partículas argilosas com pronunciado movimento browniano quando em suspensão.

A American Society for Testing and Materials (ASTM) e a American Association of State Highway Officials (AASHTO), inicialmente utilizaram os mesmos limites do Bureau of Public Roads. Posteriormente, mudaram os limites das frações grossas para que houvesse correspondência com as aberturas de peneiras normalizadas. Em 1930, Gilboy apresentou um sistema que ganhou corpo no âmbito da engenharia, o qual é comumente conhecido como escala MIT (do Instituto Tecnológico de Massachusetts - EUA).

Em 1947, a Sociedade Americana de Educação em Engenharia (ASEE) apresentou definições para várias frações granulométricas:

- a principal diferença entre areia e pedregulho é a dimensão dos grãos;
- a principal diferença entre silte e areia é que as partículas de silte não podem ser distinguidas a olho nú, além de o silte exibir acentuada capilaridade;
- a principal diferença entre argila e silte é que a argila tem propriedades plásticas, sendo dominante a influência da composição mineralógica e química.

O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e o US Bureau of Reclamation (atualmente BUREC) utilizam o Sistema Unificado de Classificação de Solo, baseado em proposta de Casagrande, e que é adotado, a menos de subdivisões na fração fina ( $D < 0,074\text{mm}$ ), também pela ASTM.

Em 1957, a Highway Division (da American Society of Civil Engineers - ASCE - EUA) apresentou uma escala idêntica à do Bureau of Public Roads, a menos de três subdivisões da fração areia no lugar das duas originalmente existentes, e que se baseou em peneiras normalizadas para efetuar a definição dos limites.

No Brasil, é a NBR 6502 (1980), da ABNT, quem define os termos técnicos relativos aos materiais da crosta terrestre inspecionáveis visualmente ou retirados por meio de sondagens, ou por outro processo, para fins de engenharia de fundações e obras de terra.

#### 2.4.3 - Escalas granulométricas reportadas na literatura geológica

A Figura 2.08 mostra escalas granulométricas reportadas na literatura de geologia. Os primeiros sistemas foram apresentados por Orth, Diller, Udden - 1898 e Keilhack. Na escala de Udden, todas as frações têm igual dimensão num gráfico semilogarítmico.

O sistema de Boswell foi usado para estudo de materiais em indústrias de vidro. Em 1913, Grabau fez várias alterações nas escalas de Diller e Keilhack. Em 1922, Wentworth propôs a utilização de séries geométricas para definição dos limites das frações, em virtude da facilidade de leitura e de interpretação. Considerou a razão 2 como mais conveniente e 1mm como o ponto de partida mais lógico.

Em 1943, Alling propôs a substituição da razão 2 pelo fator raiz quarta de 10 (aproximadamente igual a 1,8), dividindo cada uma das frações maiores (colóide, argila, silte, areia, pedregulho, pedra e matação) em quatro subdivisões (muito fina, fina, média e grossa). Em 1947, após pesquisa e consulta a especialistas, a AGU (American Geophysical Union) propôs a sua escala granulométrica.

Com uma escala granulométrica comum existiriam, segundo RODERICK (1972), óbvias vantagens. Em sua opinião, as bases lógicas dessa escala comum seriam propriedades naturais do solo, como a permeabilidade, a capilaridade, a plasticidade, a composição química e mineralógica. Em um passo seguinte, seriam definidos os significados dos termos usados para designar as várias frações granulométricas dos solos; primeiramente seriam definidos os limites entre os componentes principais (pedregulho, areia, silte e argila), e só então selecionar-se-iam os limites para as subdivisões. Roderick subestima, no entanto, o fato de que um limite, considerado óbvio por um determinado campo de trabalho, pode ser irrelevante para outro, e que a inclusão de todos os limites desejados pode acarretar a perda de um dos propósitos das escalas granulométricas, que é a facilidade de análise. Assim, apresenta-se como quase impossível a confecção dessa escala granulométrica única.

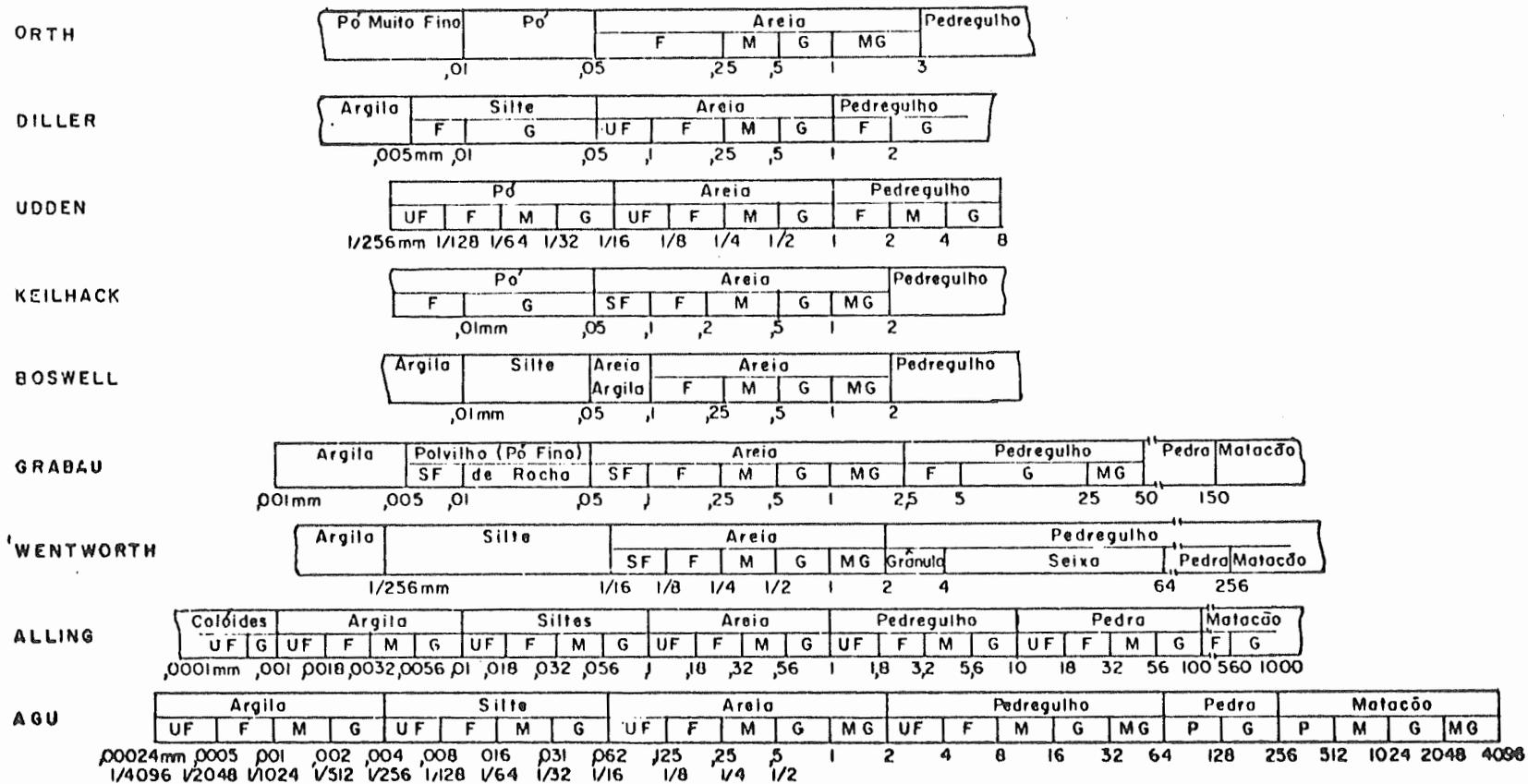


Figura 2.08 - Escalas granulométricas reportadas na literatura de Geologia.

### CAPITULO III - PROPRIEDADES FISICO-QUIMICAS DA FRAÇÃO ARGILA

O estudo das propriedades físico-químicas das argilas pode ajudar, em muito, o entendimento dos principais fatores intervenientes no ensaio de sedimentação. As argilas são constituídas, essencialmente, por partículas cristalinas extremamente pequenas, de um número restrito de minerais conhecidos como "argilominerais". Uma argila qualquer pode ser composta por partículas de um argilomineral ou por uma mistura de diversos argilominerais. Além dos argilominerais, as argilas contêm, geralmente, outros materiais e minerais, tais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita e dolomita, podendo conter também minerais amorfos.

Há variação considerável na terminologia das argilas e argilominerais, nos diversos setores científicos e tecnológicos que estudam ou se utilizam deste material. Quimicamente, as argilas são formadas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Como termo petrográfico, argila significa um material natural, terroso e de granulometria fina, que desenvolve plasticidade quando misturado com uma quantidade limitada de água. Como termo granulométrico, a "fração argila" é a fração que contém as partículas de menores diâmetros, geralmente inferiores a 0,002mm. Embora não exista uma divisão universalmente aceita sobre a granulometria dos argilominerais, um grande número de análises mostrou que há uma tendência geral de os argilominerais se concentrarem na fração de diâmetro inferior a 0,002mm.

A experiência mostra que os solos finos, aqueles cuja maioria dos grãos tem diâmetro inferior a 0,1mm não são perfeitamente identificáveis por meio de suas curvas granulométricas, ou seja, podem-se encontrar siltes, argilas e solos argilosos, com mesma curva granulométrica, cujos comportamentos não sejam semelhantes. Isto porque, nos solos finos, intervêm, além do tamanho, muitos outros fatores, todos eles relacionados com as forças moleculares, elétricas e eletromagnéticas que se desenvolvem nas superfícies das partículas: forma das partículas, espécies de argilomineral, estrutura em que se encontram etc.

São múltiplos os campos de pesquisa, além da Mecânica dos Solos, que têm as argilas por objeto de estudo. A "tecnologia do solo" - denominação empregada por LAMBE (1959) para designar esses campos de pesquisa - procura, com base em princípios físico-químicos, prever o comportamento de uma argila no tempo e com o meio ambiente. Dentre os campos de pesquisa que lhes dizem respeito, destacam-se: Química dos Cristais, Química Coloidal, Química Inorgânica, Mineralogia, Sedimentologia e Geologia Física.

Para um melhor entendimento da influência das propriedades físico-químicas do sistema argila-água no comportamento dos solos, especialmente no que diz respeito ao ensaio de granulometria por sedimentação, faz-se necessário abordar os seguintes aspectos:

### 3.1- Estrutura dos Solos Finos:

Chama-se de estrutura de um solo ao arranjo ou configuração das partículas. Trata-se de um fenômeno de grande importância para as propriedades geotécnicas, sendo condicionado pelas forças eletromagnéticas que atuam nas superfícies das partículas finas dos solos. As resultantes destas forças é que tenderão, por exemplo, a dispersar ou a flocular as partículas quando do ensaio de sedimentação.

Os arranjos possíveis dos grãos das argilas são muito complexos e variados. Para entendê-los deve-se partir da suposição de partículas argilosas em suspensão na água. As partículas de argila em água pura são carregadas negativamente, havendo em torno delas coroas de cátions, dos quais os mais comuns são sódio e cálcio. Próximo às partículas, esses cátions são adsorvidos; longe delas, circulam livremente. Dessa dupla camada elétrica resultam potenciais de repulsão e atração. Assim, numa suspensão de argila em água, as partículas podem ser mantidas dispersas pelos seus campos repulsivos, sedimentando-se separadamente: esse é o chamado estado disperso. Quando, entretanto, dá-se a ocorrência de potencial atrativo, elas podem ser captadas umas pelas outras e sedimentar em flocos: tem-se o estado floculado.

Um depósito de argila em água doce, por exemplo, terá suas partículas orientadas, pois elas, sedimentando-se isoladamente, tenderão a se disporem na posição de menor energia. Em água salgada, ao contrário, a existência de grande concentração de íons tende a flocular os grãos antes deles se sedimentarem. O resultado é a sedimentação, não de grãos isolados, mas de flóculos, dispendo-se ao acaso. A primeira é a estrutura dispersa e a segunda a floculada, conforme mostra a Figura 3.01, modificada de VARGAS (1979), por sua vez baseada em LAMBE (1953).

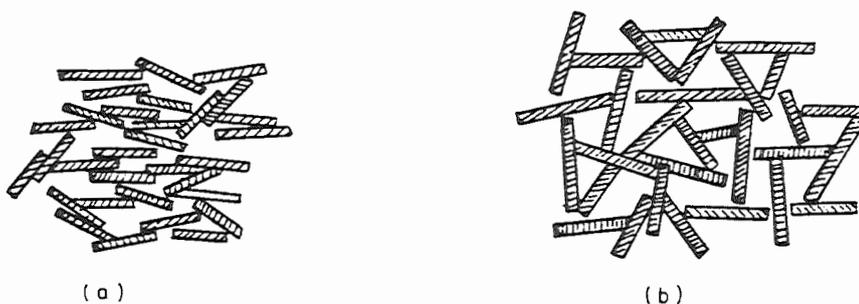


Figura 3.01: Estruturas típicas de deposição de argilas - (a) em água doce e (b) em água salgada com elevada concentração iônica - VARGAS (1979).

O fenômeno de floculação pode ser reconhecido na prática: coloca-se o material em suspensão aquosa dentro de uma proveta; após completar com água até cerca de 1000ml, deixa-se por alguns minutos em repouso. Quando ocorre o fenômeno da floculação, ao inclinar-se a proveta, a superfície da interface água-sedimento acompanha paralelamente a inclinação da interface água-ar; por outro lado, quando o sedimento não está floculado, este fenômeno não ocorre, conforme pode-se observar na Figura 3.02, apresentada por SUGUID (1973). Outra possibilidade é mediante a observação, ao microscópio, de gotas da suspensão: quando no estado floculado, a suspensão apresenta flóculos "nadantes"; quando dispersa, na gota da suspensão vê-se apenas uma turbidez uniforme.

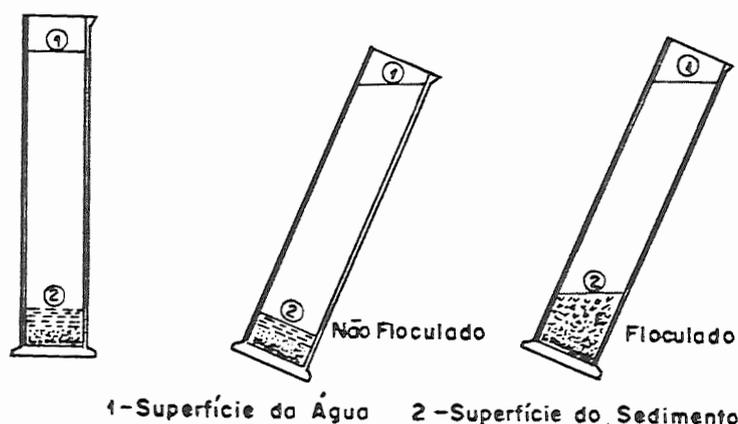


Figura 3.02: Fenômeno de floculação e método prático de reconhecimento em amostras de sedimentos - SUGUID (1973).

A atração entre partículas pode ser exercida por intermédio de uma única camada de cátions, adsorvidos entre duas partículas carregadas negativamente, funcionando como elemento de ligação. Também as moléculas de água, que funcionam como dipolos elétricos, podem servir como elementos de ligação entre grãos de argila. Além disso, atuam forças de atração entre moléculas e átomos (forças de Van der Waals), inversamente proporcionais à sétima potência da distância entre átomos, e forças eletrostáticas (coulombianas), inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre partículas. Quando a camada dupla difusa é pequena e as partículas aproximam-se suficientemente, de modo que as forças de Van der Waals atuem antes que ocorra a sobreposição das camadas duplas, tem-se a floculação.

Com relação à repulsão, o principal fator é que as partículas são, em geral, carregadas negativamente. Assim, quando as partículas se aproximam de forma a ocorrer a sobreposição das camadas duplas, tem-se repulsão eletrostática. Além disso, quando duas partículas adsorvem cátions, elas se repelem, pois as cargas dos cátions são de sinais iguais. Esta força repulsiva, no entanto, é de menor magnitude.

A presença de cátions trocáveis, adsorvidos à superfície das partículas, influencia consideravelmente a dispersão ou floculação das argilas. O potencial atrativo-repulsivo é influenciado pela concentração catiônica da água, pela valência desses cátions, pelo raio iônico, pela constante dielétrica do fluido, pelo pH do fluido e pela temperatura. Uma melhor visualização dos fatores que influenciam a dispersão e a floculação das argilas é dada pela Figura 3.03, de LAMBE (1958), que representa a floculação pela quantidade de material sedimentado no fundo dos recipientes.

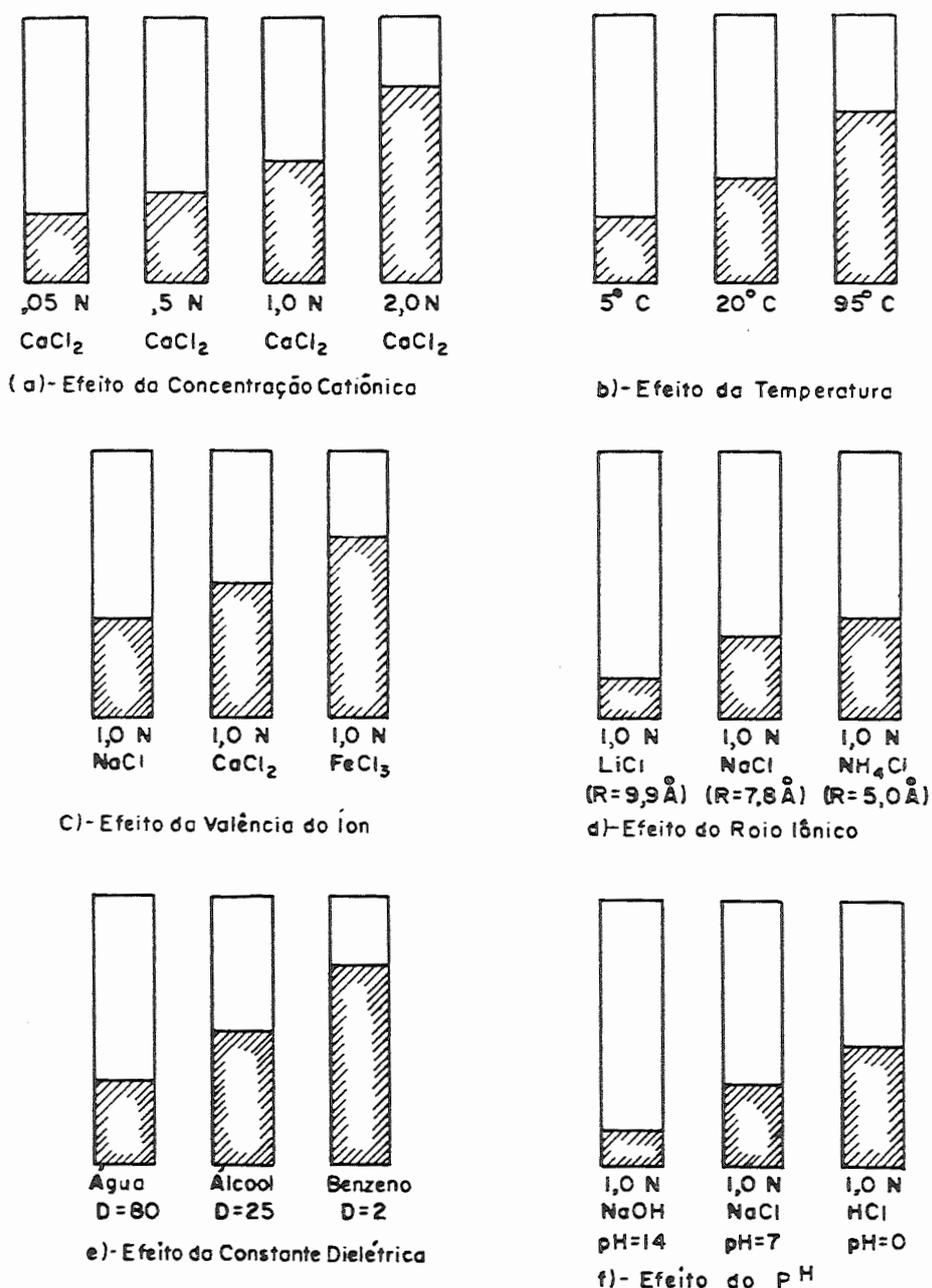


Figura 3.03: Fatores que influenciam a floculação e a dispersão dos solos - LAMBE (1958).

A troca de cátions de alta valência por cátions de menor valência aumenta a espessura da camada iônica, em razão da menor carga elétrica, e diminui a força das ligações de Van der Waals. Em termos numéricos, o poder flocculante relativo da valência é o seguinte: cátions monovalentes (1), divalentes (60) e trivalentes (800). Fenômeno análogo ocorre quando da troca de cátion de pequeno raio por cátion de grande raio. O aumento da temperatura acarreta uma diminuição da constante dielétrica do meio e, conseqüentemente, um aumento do poder flocculante, uma vez que a constante dielétrica (conforme MacINNES (1961), devido à presença de "momentos elétricos" causados por duas cargas elétricas, de uma dada magnitude, separadas por uma determinada distância), quando associada à Lei de Coulomb, é inversamente proporcional à força de atração entre partículas de sinais contrários (argilominerais e cátions do fluido intersticial). Finalmente, a redução do poder flocculante com o aumento do pH é em razão de que elevados potenciais hidrogeniônicos evitam cargas positivas (cátions).

A Figura 3.04, de DAS (1983), baseada em LAMBE (1953) e BOLT (1956), resume a variação das forças de atração e repulsão em função da distância entre partículas.

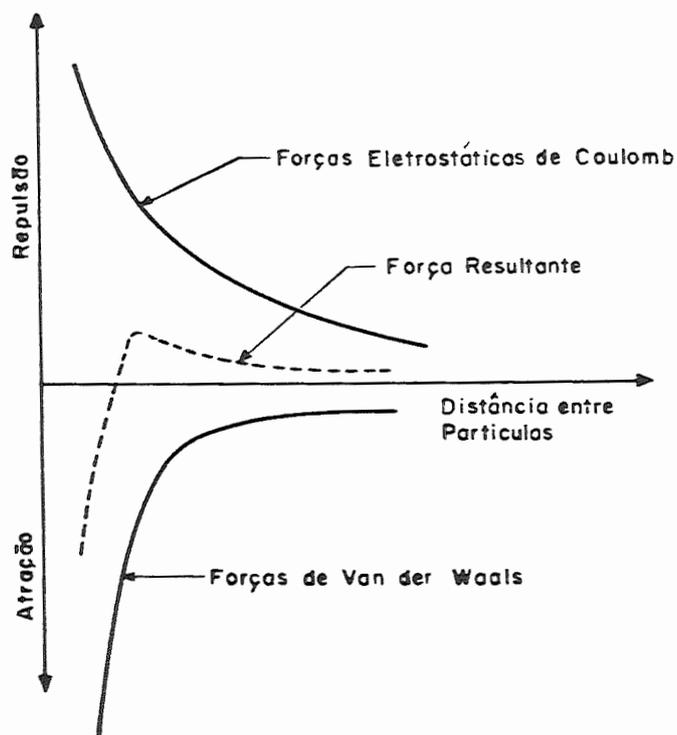


Figura 3.04: Dispersão e flocculação de argila em uma suspensão em função da distância entre partículas - DAS (1983).

A atração entre moléculas pode ser devida, ainda, à precipitação de material não-argiloso cimentante (óxidos e carbonatos). Segundo inúmeros autores, como MOH e MAZHAR (1966), YONG e WARKENTIN (1966), SALAS e ALPINES (1975), VARGAS (1982), MITCHELL e SITAR (1982) e MORIN (1982), tais ligações são bastante fortes e têm particular importância no estudo dos solos tropicais, em razão da grande quantidade de sesquióxidos presentes nestes solos. A matéria orgânica contida nos solos também forma ligações entre partículas: ligações elétricas podem ser formadas entre a carga negativa da partícula e a carga positiva da matéria orgânica (de proteínas, por exemplo), ou entre ácidos orgânicos negativos e cargas positivas dos cantos das partículas de argila.

### 3.2 - Água Adsorvida:

No estudo dos solos finos, há que se considerar, sempre, três elementos diferentes: as partículas sólidas (argilominerais), as substâncias adsorvidas e a água livre normal, como mostra a Figura 3.05, de YONG e WARKENTIN (1966), adaptada de LAMBE (1953). A água adsorvida e adjacente à superfície externa das partículas de argilominerais, conforme demonstração primeira de GRIM (1942), estrutura-se em camadas rígidas e orientadas, com o grau de rigidez e orientação dependendo da estrutura cristalina do argilomineral e da natureza dos cátions e dos ânions. Um modelo complementar admite um aumento da concentração de íons com a proximidade da superfície do reticulado cristalino e uma diminuição exponencial da concentração desses íons com o aumento da distância à superfície da partícula.

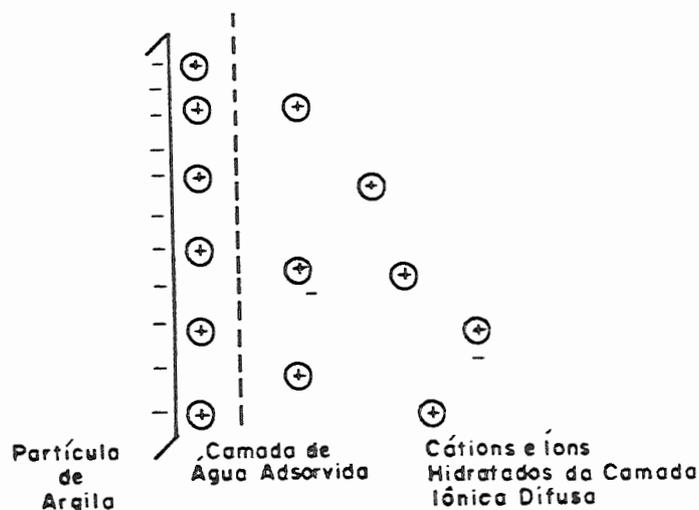


Figura 3.05: Diagrama esquemático de partícula de argila com água adsorvida e cátions na água livre - YONG e WARKENTIN (1966).

É o sistema argila-água (volume relativo das substâncias adsorvidas) que determina muitas propriedades, como a plasticidade, a tixotropia, o poder ligante (coesão) e até mesmo a permeabilidade, que pode ser alterada pela adição de um outro eletrólito à água intersticial. Assim, o uso de água destilada nos ensaios geotécnicos, em especial o de granulometria por sedimentação, é justificado em função de aspectos químico-coloidais. Embora a água destilada não apresente a mesma concentração iônica da água contida nos vazios da amostra, ao menos ela possibilita uma modificação padronizada. Cabe, no entanto, a observação de que o uso de água destilada pode alterar, significativamente, os resultados de ensaios susceptíveis às variações de espessura da água adsorvida e dos tipos de íons adsorvidos.

WU (1967) apresenta, na Figura 3.06, adaptada de LOW e LOVELL (1959), alguns mecanismos possíveis pelos quais a água seria adsorvida às partículas de argila. A Figura 3.06(a) ilustra que, embora as cargas negativas e positivas de uma molécula de água estejam balanceadas, a distribuição das mesmas não é uniforme, ou seja, tem-se um dipolo; em (b) a água está ligada a cátion atraído eletrostaticamente pela argila; em (c) há ponte de hidrogênio com um átomo de oxigênio do argilomineral; e em (d) o campo elétrico da argila interage com o dipolo da água molecular, havendo a orientação do polo positivo em direção à face do argilomineral.

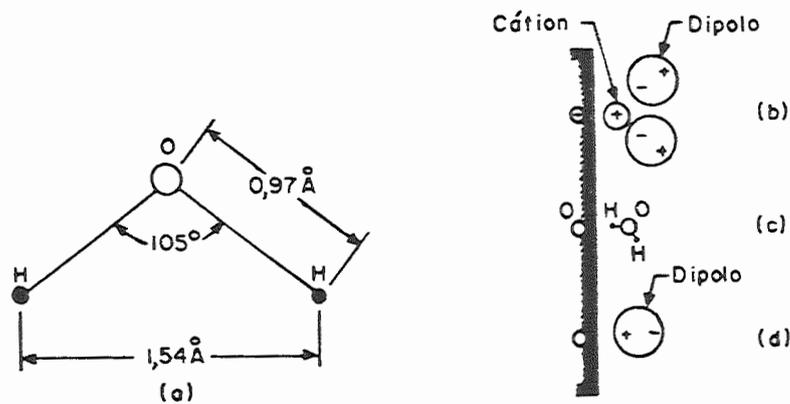


Figura 3.06: Adsorção de água às partículas argilosas - WU (1967).

### 3.3 - Troca Catiônica:

Os grãos de argila, pelo menos quando dispersos em água, têm carga elétrica negativa, podendo existir cátions adsorvidos à sua superfície. Os mais comuns são os de Sódio, Potássio, Magnésio e Cálcio, sendo que a natureza desses cátions determina muitas propriedades das argilas.

As argilas, quando em solução aquosa, têm a propriedade de trocar os íons adsorvidos por outros íons, sem modificação da estrutura cristalina, sendo a capacidade de troca iônica definida pela concentração, em miliequivalentes, dos cátions que podem ser adsorvidos na superfície de 100g de material sólido. Essa capacidade de troca iônica varia conforme a espécie mineral. As montmoriloníticas têm uma capacidade de troca iônica muito grande (de 60 a 100mieleq/100g), enquanto as caoliníticas só podem trocar íons na relação de 3 a 15 mieleq/100g. Sabe-se que a capacidade de troca iônica é inversamente proporcional ao tamanho do grão e que, por outro lado, o íon sódio é o mais fácil de ser trocável. A extensão da reação de troca iônica depende, também, da concentração de íons adsorvidos pelo argilomineral e da concentração de íons trocáveis da solução dispersiva.

Sobre a troca de ânions sabe-se muito menos do que sobre a de cátions, devido principalmente à instabilidade de alguns argilominerais no curso de muitas reações químicas de permuta aniônica. Alguns argilominerais, entre eles a caulinita, podem fixar ânions, como o fosfato, numa forma quase irreversível, tendo grande importância para a fertilidade dos solos.

A troca de íons pode resultar em efeitos profundos sobre as propriedades físicas das argilas que interessam à engenharia. É, por exemplo, um fenômeno de troca catiônica o que ocorre quando utilizamos defloculantes químicos no Ensaio de Sedimentação.

### 3.4 - Natureza Mineralógica:

A identificação mineralógica das argilas pode ser feita por vários processos:

a- Análise química e capacidade de troca de cátions: não permite uma avaliação completa da composição mineralógica, embora forneça dados de grande utilidade industrial e científica. As determinações usuais são: umidade, perda ao fogo, teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mn}$ , matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e identificação dos cátions trocáveis;

b- Análise térmica diferencial: o método da análise térmica diferencial (até 1050 °C) tem tido larga aplicação no estudo de argilas, desde os trabalhos de GRIM (1962). Segundo descrição de SANTOS (1975), o método consiste no aquecimento de uma argila, em velocidade constante, juntamente com uma substância termicamente inerte. A medida que ocorrem transformações endo e exotérmicas, registram-se as diferenças de temperatura entre o padrão inerte e a argila em estudo. Pela posição, forma e intensidade dos picos endo e exotérmicos dos termogramas, é possível a identificação da maioria dos argilominerais e minerais conhecidos, que

inclusive constam de atlas, livros e fichários. Contudo, a análise térmica diferencial é de uso restrito no caso de misturas de argilominerais, em razão da posição e intensidade dos picos de transformações endo e exotérmicas serem alteradas pelas misturas.

A análise termogravimétrica, que consiste no aquecimento gradual da argila, em ligação com uma balança, permite o registro das variações de massa em função da temperatura, sendo um instrumento de pesquisa muito útil. Já existem balanças termogravimétricas comerciais de registro automático; exemplo de aplicação da análise termogravimétrica é dado por QUEIROZ DE CARVALHO (1981), mediante a utilização do método para quantificação dos componentes da fração tamanho argila de solos lateríticos, visando o estudo da interação solo-aditivo. A Figura 3.07 apresenta curva termogravimétrica típica de um dos solos ensaiados por QUEIROZ DE CARVALHO (1981), observando-se que a área limitada por esta curva é proporcional à quantidade do mineral que a originou;

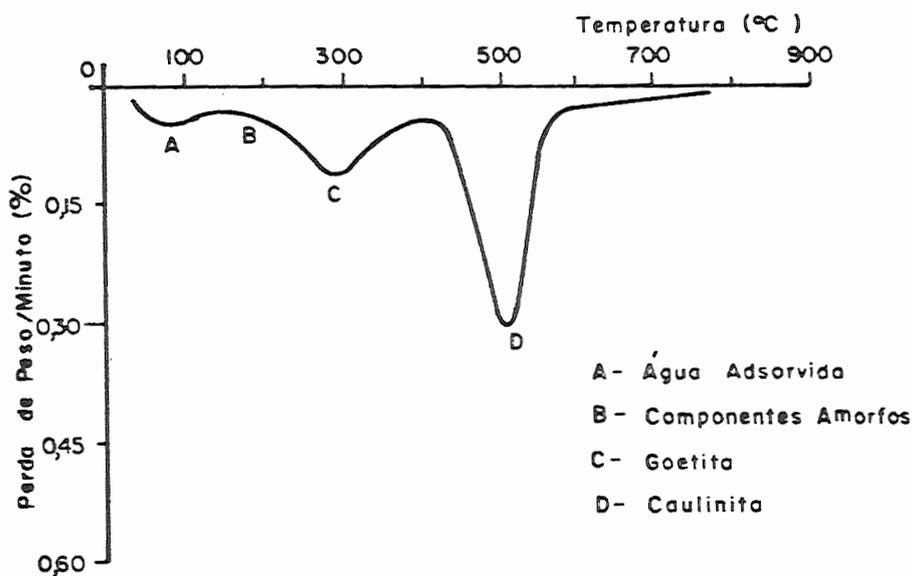


Figura 3.07: Curva termogravimétrica de solo laterítico ensaiado por QUEIROZ DE CARVALHO (1981).

c- Difração de raios X: a identificação dos argilominerais é obtida a partir do valor medido da distância interplanar basal do argilomaterial, executada em espécime orientado por secagem ou prensagem sobre o suporte para difração dos raios X. A Figura 3.08, obtida de SANTOS (1975), apresenta um difratograma no qual as reflexões basais da caulinita, da mica e da montmorilonita são facilmente identificáveis. Um difratograma semelhante ao apresentado pode ser obtido em cerca de 30 minutos;

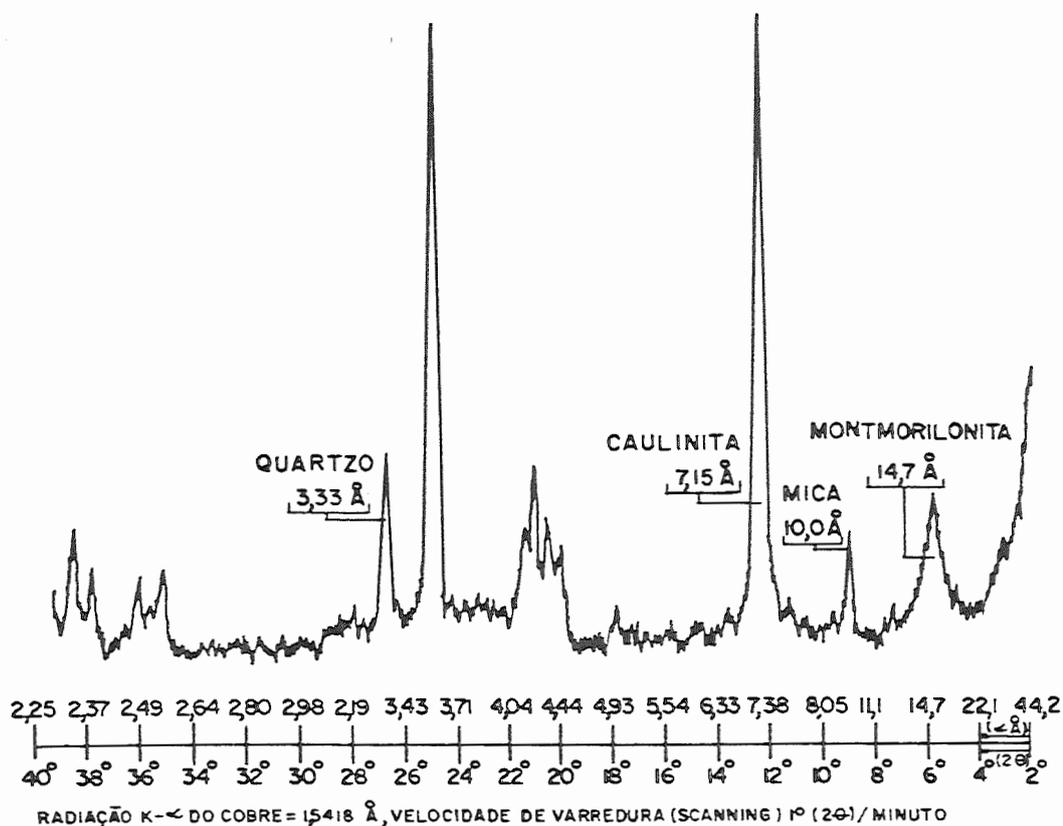


Figura 3.08: Difratoograma de raios X de mistura artificial de caulinita (70%), montmorilonita (20%), mica (5%) e quartzo (5%) - SANTOS (1975).

d- Microscopia eletrônica: as informações passíveis de serem obtidas do estudo de uma argila ao microscópio eletrônico são as seguintes: morfologia das partículas; identificação dos argilominerais presentes; dimensões das partículas para a determinação da distribuição granulométrica; detecção de pequenos teores de argilominerais não-detectáveis por difração de raio X; detecção de materiais amorfos; disposição e orientação das partículas no estado em que se encontram na natureza; determinação do sinal e da distribuição das cargas elétricas na superfície das partículas. A obtenção dessas valiosas informações, no entanto, têm custo elevado e são dependentes das técnicas de preparação dos espécimes;

e- Correlações com o "índice de atividade coloidal" de Skempton: SORIA (1985) mostrou que a afirmação ampla: "com a atividade coloidal pode-se inferir a composição mineralógica dos solos" deve ser refutada. Permanecem aceitáveis, no entanto, algumas asserções de menor abrangência: "solos com índices de atividade diferentes não têm a mesma composição mineralógica"; "solos de mesma composição mineralógica têm igual índice de atividade coloidal"; "índice de atividade maior que 0,8 implica em solos com teores apreciáveis de argilominerais expansivos" etc.

As espécies mineralógicas mais frequentes são as caolinitas, as ilitas, as montmorilonitas, as haloisitas e as gibsitas, sendo a primeira e as duas últimas constituintes de solos lateríticos. O principal membro do grupo das caolinitas é o caulim, que tem por composição química  $(OH)_4 Al_2 Si_2 O_{10}$ . Os outros minerais caolínicos diferem do caulim no maior ou menor teor em alumínio e sílica. A estrutura do caulim é constituída de uma camada de gibsita ( $6(OH) - 4 Al - 4 O + 2(OH)$ ) e uma camada de sílica ( $4 Si - 6 O$ ). As caolinitas apresentam diâmetros de até 0,0003mm, sendo placas de perfil hexagonal ou irregular, com pequena adsorção de íons e pequena absorção de água.

As montmorilonitas  $((OH)_4 Al_2 Si_4 O_{20} \cdot X H_2O)$  consistem de unidades estruturais de uma camada de gibsita entre dois grupos de sílica, havendo, porém, entre essas, X moléculas de água agregadas ao cristal. Assim, a estrutura expande-se com o aumento do teor de água. Apresentam diâmetros menores que 0,0002mm, sendo placas ou lâminas de perfil irregular, muito finas, com grande capacidade de adsorção de íons e de absorção de água. Em função disso, apresentam grandes expansões e contrações, baixa permeabilidade e grande plasticidade.

A estrutura das ilitas é semelhante à das montmorilonitas, exceto que grande parte do silício quadrivalente é substituído por Al trivalente, sendo a compensação de cargas feita por potássio monovalente. As ilitas apresentam perfil irregular e diâmetros de até 0,0001mm, com propriedades intermediárias às dos grupos caulinita e montmorilonita.

Os minerais argilosos apresentam fácil clivagem basal, resultando fragmentos de forma lamelar. Como essa clivagem é mais fácil nas montmorilonitas que nas caolinitas, explica-se o porque de os grãos dessas últimas, em geral, serem maiores que os da primeira, os quais podem ser quebrados em partículas ainda menores sob algum outro tipo de solicitação. Com relação à forma, de grande influência no Ensaio de Sedimentação, as partículas de argila, sendo de minerais cuja estrutura cristalina é complexa, têm forma lamelar, escamosa, acicular e outras ainda mais estranhas. Por exemplo, as caolinitas apresentam partículas em forma de placas hexagonais, enquanto as montmorilonitas, de estruturas cristalográficas complexas, têm partículas com formas também complexas.

### 3.5 - Plasticidade:

Plasticidade é a propriedade de o material úmido ficar deformado, sem romper, pela aplicação de uma tensão, sendo que a deformação permanece quando a tensão aplicada é retirada. A plasticidade em argilas é, essencialmente, resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e da ação lubrificante da água, estando diretamente relacionada com a granulometria das partículas, pois a superfície específica aumenta com a diminuição da granulometria. Pode-se admitir que a plasticidade se desenvolve quando a argila tem água

suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais com uma película de água rígida, além de um pouco de água não-orientada que age como lubrificante, facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras quando uma tensão tangencial é aplicada. Como as moléculas de água orientada estão presas na superfície dos argilominerais, elas também servem para ligar as partículas de argilominerais entre si, dando origem à resistência mecânica da argila na forma úmida.

### 3.6 - Viscosidade:

Para o transporte de fluidos, quanto menor a viscosidade, menores as perdas de carga nesse transporte. Assim, em tecnologia cerâmica, conforme relatado por SANTOS (1975), é importante o ensaio de defloculação da argila, visualizado na Figura 3.09, o qual consiste basicamente da determinação da concentração ótima do defloculante químico adotado, ou seja, da concentração que acarreta um valor mínimo para a viscosidade. Como observado na Figura 3.09, o ponto de mínima viscosidade (ou máxima dispersão) aumenta com a massa específica da dispersão. De uma maneira geral, a viscosidade de uma suspensão depende dos seguintes fatores: viscosidade do líquido dispersante; concentração da fase dispersa; dimensões e forma das partículas dispersas; forças de interação entre as partículas (estado de floculação da solução).

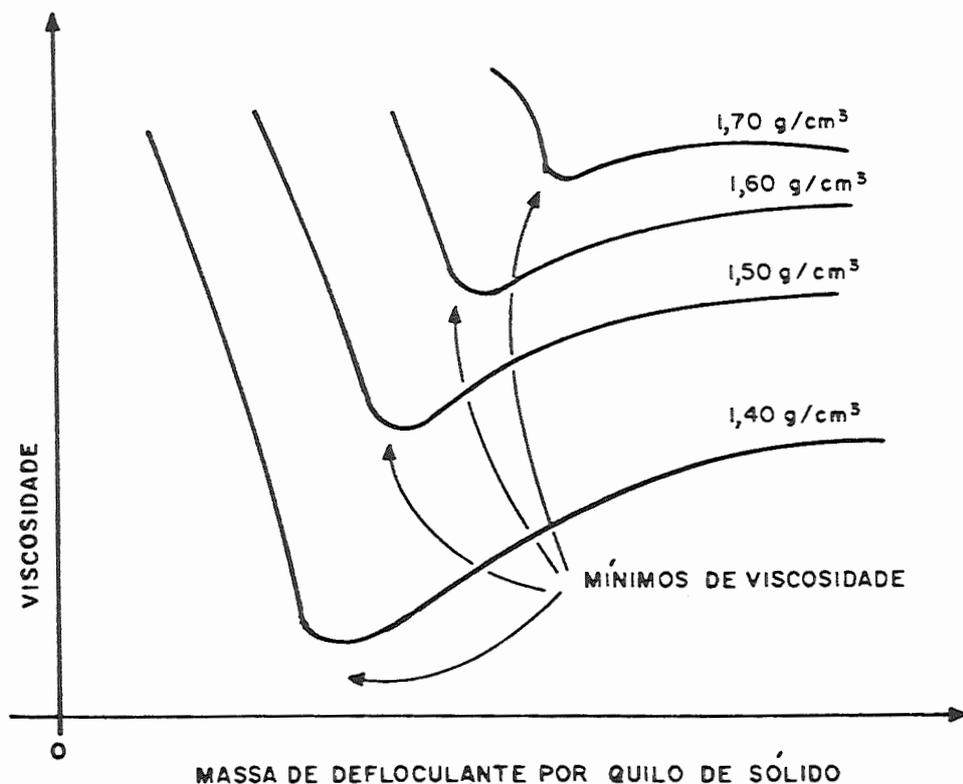


Figura 3.09: Ensaio de defloculação de argila - SANTOS (1975).

## CAPITULO IV - DISPERSAO DOS SOLOS

Antes de se focalizar o ensaio de sedimentação propriamente dito, deve-se analisar cuidadosamente a questão da dispersão das partículas: quando em suspensão, elas devem permanecer separadas e não floculadas. A dispersão das partículas é uma questão fundamental na análise granulométrica, pois os erros que se originam da falta desta condição superam em muito as diferenças entre os resultados dos diversos métodos utilizados. Portanto, o teor de argila obtido nos ensaios granulométricos é altamente dependente da dispersão mecânica, do tipo de defloculante químico e da secagem prévia da amostra, dentre outros fatores.

Houve, no passado, dada a dificuldade de individualização dos grãos, propostas de utilização de métodos suaves de dispersão, de modo a não destruir os grumos de solo, considerando-os como uma verdadeira partícula. Segundo SALAS e ALPAREZ (1975), a controvérsia durou anos, mas hoje considera-se indispensável a dispersão enérgica, pois com os métodos suaves de dispersão é obtida uma distribuição granulométrica que não corresponde a uma característica permanente do solo, mas a um estado. Também uma maior reprodutibilidade do ensaio é conseguida mediante a perfeita individualização das partículas. Além disso, com a dispersão enérgica, evita-se a reunião, em uma mesma qualificação, de partículas de areia e silte com grumos de argila.

Carece de maiores investigações, no entanto, a questão da desintegração das partículas, que pode vir a ser causada pelos agentes dispersores. A esse respeito, GRIM (1942) relata que algumas montmorilonitas e ilitas quebram-se quando agitadas em suspensão. Segundo LAMBE (1951), no que diz respeito aos solos residuais, o termo "partícula individual" é arbitrário, já que a dimensão da partícula depende do grau de desagregação que é imposto previamente ao ensaio.

Os processos mecânicos de dispersão são muito antigos, desde o almofariz para amostra imersa em água - Beam (1911), passando pela máquina vibratória de Whittles (1924) e as ondas supersônicas de Olmstead (1931), citados por PURI (1949), até chegar ao uso do "batedor de leite" elétrico, inicialmente utilizado por Bouyoucos (1927). Foi este dispersor mecânico, com alguns aperfeiçoamentos (hélices substituíveis e copos munidos de chicanas), que acabou sendo escolhido para efeito de normalização. Com relação à rotação da hélice do dispersor, os valores encontrados na literatura não coincidem exatamente, mas todos ficam em torno de 10.000 rpm, quando em rotação livre. A NBR 7181 (1984), por exemplo, impõe uma rotação não inferior a 9.000 rpm.

Outra forma de dispersão é a pneumática, adotada pela ASTM - D422-63 (1972) como alternativa ao dispersor mecânico, e que consiste da utilização de jatos de ar. A sequência seguida por este procedimento é basicamente a seguinte: conecta-se o tubo de dispersão ao ar comprimido; abre-se a

válvula até 7 KPa (para evitar que a suspensão penetre na entrada de ar); coloca-se a suspensão no tubo de dispersão; abre-se a válvula até 140 KPa; deixa-se dispersar pelo tempo determinado; reduz-se a pressão a 7 KPa; e, finalmente, transfere-se a suspensão para o cilindro de sedimentação. Exige compressores de médio porte, produzindo, especialmente em solos arenosos, uma menor degradação das partículas.

Os tempos de dispersão mecânica, impostos por normas ou recomendados por publicações técnicas, são muito variados, observando-se desde a fixação do tempo de dispersão em função do índice de plasticidade, até recomendações vagas do tipo "deve-se deixar que a dispersão se processe de modo mais conveniente". Dentre os tempos de dispersão mais citados, tem-se: 3, 5, 10 e 15 minutos.

Para uma acurada análise granulométrica é importante não só a dispersão inicial adequada, mas também que o estado de dispersão se mantenha estável. Como muitos solos são de difícil dispersão em água e apresentam tendência de flocularem após serem dispersos mecanicamente, agentes defloculantes químicos devem ser adicionados à suspensão solo-água com a finalidade de propiciar uma dispersão satisfatória. Assim, os agentes defloculantes executam duas funções importantes para o sucesso da análise granulométrica: fazem a separação inicial de partículas agregadas, juntamente com a dispersão mecânica, e previnem a floculação das partículas dispersas, mantendo a condição de defloculação.

Os agentes defloculantes podem ser eletrólitos (que normalmente provêem a suspensão de íons sódio com a finalidade de intercambiá-los com os cátions floculantes polivalentes), colóides protetores (que formam camadas ao redor das partículas de argila) e preparados orgânicos (que agem sobre o solo de forma a aumentar a repulsão entre as partículas). A completa dispersão deve resultar em remoção de sais solúveis que causam floculação (carbonatos, principalmente), remoção dos efeitos cimentantes de matéria orgânica, mediante oxidação com peróxido de hidrogênio, remoção dos efeitos da coagulação dos colóides do solo pelo secamento das amostras, e remoção, no caso dos solos lateríticos, dos efeitos cimentantes de óxidos de ferro e alumínio desidratados.

Como visto no estudo das propriedades das argilas, a dispersão pode ser auxiliada por diversas outras medidas, tais como: redução da concentração salina (que explica, por exemplo, a diferença de turbidez entre as águas dos mares e dos rios), aumento do pH (de modo a evitar cargas positivas), diminuição da temperatura e aumento da constante dielétrica do meio.

Se a dispersão com um dado defloculante, numa determinada concentração, resultar em dispersão incompleta, uma maior concentração do agente dispersante deve ser usada. Pode ser necessário, no entanto, um dispersante diferente. Inúmeros são os defloculantes citados na literatura. A relação seguinte,

feita principalmente a partir de WINTERMYER e KINTER (1954) e HEAD (1980), apresenta o nome usual e, quando possível, a fórmula química e a concentração com que os produtos são utilizados no ensaio de granulometria de solos:

- hexametáfosfato de sódio ( $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{21}$ ): 125 ml de solução na concentração de 45,7 g/l (deve-se tamponar com Carbonato de Sódio de forma a manter o pH entre 8 e 9, uma vez que a solução deste sal, se ácida, reverte vagarosamente para ortofosfato, com decréscimo na ação dispersante);
- silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ): 26 g/l;
- fosfato de trisódio ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ): 50,7 g/l;
- pirofosfato de tetrasódio ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ): 44,6 g/l;
- pirofosfato de sódio;
- metapolifosfato de sódio;
- tripolifosfato de sódio ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ): 29,4 g/l;
- trifosfato de sódio: 18,8 g/l;
- tetrafosfato de sódio ( $\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$ ): 35,1 g/l;
- polifosfato de sódio ( $\text{Na}_{12}\text{P}_{10}\text{O}_{31}$ ): 21,6g/l;
- oxalato de sódio ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ): 26,8 g/l;
- mistura de silicato de sódio com oxalato de sódio;
- oxalato de lítio ( $\text{Li}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ): 20,4 g/l;
- oxalato de amônia ( $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ): 28,4 g/l;
- carbonato de amônia;
- hidróxido de amônia;
- hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ): 16,0 g/l;
- hidróxido de lítio ( $\text{LiOH}$ ): 9,6 g/l;
- carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ): 21,2 g/l;
- bicarbonato de sódio;
- carbonato de lítio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ): 3,7 g/l;
- peróxido de hidrogênio: para digerir matéria orgânica;
- DAXAD número 23 (sais polimerizados de sódio);
- ácido tânico;

- ácido hidroclorídrico: para pré-tratamento de material calcáreo;
- ácido clorídrico: ataca as partículas de óxido de ferro;
- LOMAR PW e MARASPERSE CB: preparados orgânicos que produzem cargas negativas repelentes em partículas de suspensões;
- Goma Acácia e Goma Ghatti: complexos coloidais polissacarídeos ("colóides protetores") que provêm as partículas de uma camada de hidratação protetora, prevenindo a coagulação das partículas.

Foi a partir das pesquisas realizadas por CHU e DAVIDSON (1954) e WINTERMYER e KINTER (1954) que o hexametáfosfato de sódio passou a se destacar como um dos defloculantes mais utilizados. Os resultados dessas pesquisas mostraram ser o hexametáfosfato de sódio o mais eficiente dentre dezenove defloculantes pesquisados, incluindo o silicato de sódio, até então o mais adotado e recomendado.

O hexametáfosfato de sódio é um complexo químico também conhecido como metafosfato de sódio ou sal de Graham. Em função de diferentes indústrias químicas produzirem variedades de hexametáfosfato de sódio também diferentes, CHU e DAVIDSON (1954) pesquisaram a ação dispersante de diferentes variedades de metafosfato de sódio. Foram analisadas seis variedades de hexametáfosfato, fabricadas por diferentes laboratórios (algumas destas variedades, inclusive, eram distribuídas com nomes registrados: Calgon, Quadrafos, Metafos), sendo que exames em microscópio petrográfico constataram, dentre as variedades ensaiadas, algumas com estrutura cristalina e outras com estrutura vítrea. A conclusão a que chegaram CHU E DAVIDSON (1954) foi de que a variação de resultados dos ensaios de granulometria, com as diferentes variedades de hexametáfosfato de sódio, é muito pequena, não havendo, também, variações significativas em função do tipo de estrutura.

LAMBE (1954) estudou os efeitos dos dispersantes sobre outras propriedades geotécnicas. A título de curiosidade, enumeram-se algumas das ações dos dispersantes sobre os solos: reduzem o limite de liquidez; diminuem a resistência dos solos à compactação, aumentando com isso o grau de compactação; aumentam a densidade seca máxima e diminuem o teor de umidade ótima; diminuem a permeabilidade de solos compactados; diminuem a compressibilidade; reduzem a coesão do solo; na estabilização de solos, a diminuição da coesão facilita a incorporação de aditivos estabilizantes.

## CAPITULO V - LEI DE STOKES

A análise granulométrica de solos, pelo ensaio de sedimentação, é baseada na equação de Stokes, tradicionalmente conhecida como "Lei de Stokes", que expressa a relação entre a velocidade de sedimentação de partículas em um fluido e o diâmetro dessas partículas. Sir George G. Stokes, estudando as velocidades de queda de esferas dentro de cilindros com líquidos de diferentes viscosidades, na metade do século passado, formulou a equação que fornece o valor da resistência que um fluido oferece à movimentação em seu meio (Equação 5.01). A velocidade de queda de uma partícula aumenta, de início, rapidamente, sob a ação da gravidade; alguns segundos após, a partir do instante em que a força gravitacional (Equação 5.02) é igualada pela resistência do fluido, a velocidade de queda da partícula torna-se constante. A Lei de Stokes possibilita, assim, a determinação da velocidade terminal de uma esfera caindo livremente em um fluido viscoso infinito. As equações das forças atuantes são:

$$R = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v \quad (5.01)$$

onde R é a resistência exercida pelo fluido, r é o raio da partícula,  $\eta$  é a viscosidade cinemática do fluido e v é a velocidade de sedimentação da partícula;

$$F = m \cdot g = \rho_{\text{efetivo}} \cdot V \cdot g = (\rho_s - \rho_w) \cdot (4 / 3) \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \quad (5.02)$$

onde F é a força gravitacional, m é a massa de partículas em suspensão, g é a aceleração da gravidade, V é o volume das partículas,  $\rho_s$  é a massa específica das partículas (ou massa específica dos sólidos),  $\rho_w$  é a massa específica do fluido e r é o raio das partículas.

O enunciado da Lei de Stokes pode ser apresentado da seguinte forma: "a velocidade de sedimentação de pequena partícula esférica é diretamente proporcional à diferença entre a massa específica da partícula e a do fluido; inversamente proporcional à viscosidade do fluido; e diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula".

Igualando-se as duas forças que atuam em partículas que se sedimentam em um fluido viscoso, obtém-se a expressão para a velocidade final atingida pelas partículas (Equação 5.03):

$$v = g \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \cdot \eta} \cdot D^2 \quad (5.03)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $\rho_s$  e  $\rho_l$  são, respectivamente, as massas específicas dos sólidos e do líquido ( $Kg/m^3$ ),  $\eta$  é a viscosidade do líquido ( $mPa.s$ ),  $D$  é o diâmetro da partícula ( $m$ ) e  $v$  é a velocidade de sedimentação da partícula ( $m/s$ ).

A utilização da Lei de Stokes no cálculo do Ensaio de Sedimentação requer que sejam aceitas as seguintes hipóteses e condições:

a- a velocidade de queda das partículas é pequena, de modo que a resistência seja devida somente à viscosidade e que os movimentos do fluido se processem em regime laminar;

b- as partículas são pequenas esferas;

c- as partículas são suficientemente grandes de maneira a não termos movimento browniano, ou seja, as partículas são muito maiores do que a dimensão molecular ( $10^4$  a  $10^7$  vezes maiores);

d- as partículas são rígidas e lisas;

e- não há interferência de uma partícula sobre a outra (o fluido tem extensão infinita em relação às partículas em queda e as paredes do recipiente não interferem nas partículas);

f- é conhecida a massa específica das partículas e todas as partículas têm mesma massa específica.

As hipóteses apresentadas cabem muitas críticas e observações, podendo-se destacar as seguintes:

a- a partir de diâmetros da ordem de  $0,15mm$ , as partículas tornam-se demasiadamente grandes para que a velocidade de sedimentação seja regulada pela viscosidade do fluido, ou seja, as partículas não atingem velocidade constante em provetas de tamanho normal. Nessas condições, passa a ser válida a "Lei do Impacto", muito utilizada em Sedimentologia (vide SUGUIDO (1973), por exemplo), que pode ser enunciada da seguinte forma: "a velocidade de sedimentação é independente da viscosidade do fluido; diretamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro da partícula; diretamente proporcional à esfericidade da partícula; e diretamente proporcional à diferença entre a massa específica da partícula e a do fluido, dividida pela massa específica do fluido". Na Figura 5.01, de KRUMBEIN e SLOSS (1969), apresentam-se resultados experimentais que confirmam o fato de que a Lei de Stokes somente apresenta boa aproximação para

diâmetros menores que 0,15mm. Assim, a validade da Lei de Stokes, para a análise granulométrica de partículas maiores que este diâmetro (areia fina), está condicionada à utilização de um fluido muito viscoso e um recipiente com maiores dimensões. Para Oseen (1966), conforme relatado por SALAS e ALPINES (1975), para a velocidade terminal ser pequena e constante, nas condições usuais do ensaio de sedimentação, os diâmetros devem ser menores ainda (inferiores a 0,05mm).

Um ponto que pode ser aqui abordado refere-se à descontinuidade que se verifica entre a parte da curva granulométrica, determinada mediante peneiramento, com os pontos calculados pela Lei de Stokes. De acordo com o observado nos ensaios de granulometria realizados para este trabalho, tal descontinuidade é mais acentuada nos solos que apresentam granulometria mais grossa ou uma considerável quantidade de partículas maiores que o valor limite para aplicação da Lei de Stokes (0,15mm). As duas explicações mais frequentes para esta questão (dificuldade de se efetuar as leituras iniciais e turbulências causadas pelas partículas maiores, simulando uma pequena agitação e resultando em menores diâmetros) pode-se, agora, acrescentar uma terceira: as partículas mais grossas têm diâmetros tais que estão dentro do limite de validade da Lei de Impacto e não da Lei de Stokes;

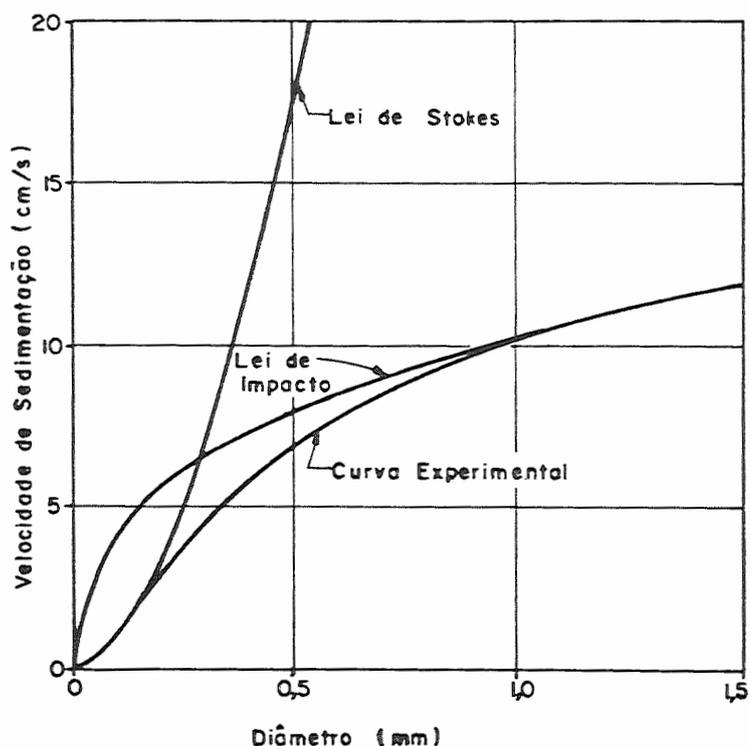


Figura 5.01: Velocidade de sedimentação calculada pela Lei de Stokes e pela Lei de Impacto: comparação com resultados experimentais - KRUMBEIN e SLOSS (1969).

b- a maior parte das partículas com diâmetros superiores a 0,005mm, segundo LAMBE (1951), pode ser representada por esferas. No entanto, partículas menores que 0,005 chegam a apresentar comprimento e largura de 5 a 300 vezes maiores que a espessura. A queda de uma partícula placóide é mais lenta, à semelhança da queda de uma folha de papel aberta, sendo o "diâmetro equivalente" da esfera que sedimenta à mesma velocidade que uma placa, portanto, muito menor que o comprimento ou largura desta placa. KÉZDI (1980) apresenta, conforme pode-se observar na Figura 5.02, como o conceito de "diâmetro equivalente" nos fornece uma falsa imagem das partículas lamelares e aciculares.

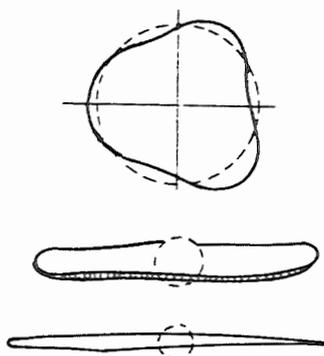


Figura 5.02: Imagens de partículas lamelares e aciculares fornecidas pela "esfera equivalente" - KÉZDI (1980).

Hofmann e East, segundo relato comentado de LAMBE (1951), fizeram observações de dimensões de partículas por microscopia eletrônica e compararam os resultados com ensaios de sedimentação calculados pela Equação de Stokes. A influência da forma das partícula ficou claramente demonstrada, pois para o quartzo (partículas de pequenas dimensões, mas esféricas) houve boa aproximação entre os resultados, enquanto que, para a caulinita, os diâmetros equivalentes foram menores que os observados ao microscópio. A forma das partículas é, portanto, uma razão para que duas curvas granulométricas iguais, correspondentes a dois solos diferentes, não indiquem necessariamente a similaridade entre ambos.

A velocidade de sedimentação é diretamente proporcional à esfericidade (definida como a relação entre a área de uma esfera e a área da partícula, para um dado volume), sendo que, para esfericidades maiores ou iguais a 0,7, a velocidade de sedimentação pode ser considerada igual à multiplicação do valor da esfericidade pela velocidade de sedimentação de uma esfera de mesmo volume (por exemplo: uma partícula com esfericidade de 0,8 sedimenta-se com uma velocidade de 0,8 vezes a de uma esfera de mesmo volume). Segundo SUGUIO (1973), estudos sedimentológicos permitem visualizar suspensões onde partículas pequenas com elevada esfericidade sedimentam antes

que partículas maiores, mas com menor esfericidade, dando a falsa impressão de aumento da granulometria no sentido do transporte dos sedimentos. Ainda a respeito da influência da forma das partículas de granulometria fina, SCOTT (1963) formulou uma sugestão no sentido de que fosse tentada a determinação de "fatores de forma" para cada argilomineral, já que o tipo de argilomineral é quem governa a forma das partículas;

c- segundo LAMBE (1951), diâmetros menores que 0,0002mm (0,0005mm ou 0,0001mm, de acordo com outros autores), devido aos efeitos dos movimentos brownianos e das correntes de convecção, resultantes de mudanças na temperatura da suspensão, embora não tornem inaplicável a lei de Stokes, fazem com que as velocidades de sedimentação sejam muito pequenas e as medidas pouco confiáveis;

d- as partículas de solo não são lisas, sendo que a rugosidade atua no sentido de diminuir a velocidade de sedimentação;

e- o corpo fluido não tem extensão infinita e, como se acham presentes muitas partículas, a queda de qualquer partícula é influenciada pela presença das outras; analogamente, as partículas que se encontram próximas às paredes do recipiente também são afetadas. Há que se considerar, também, a turbulência provocada pela queda, a diferentes velocidades, das partículas de diferentes diâmetros. Segundo LAMBE (1951), praticamente todas estas restrições são evitadas pela limitação da máxima concentração de solo na suspensão em 50g de partículas sólidas por litro. Para outros autores, como CAMBEFORT (1971), no entanto, este limite é mais rígido: a massa de sólidos ensaiada deve ser, no máximo, de 20g.

f- partículas de tamanho desigual, em um mesmo solo, podem ter origem mineralógica diferente e, portanto, massas específicas também diferentes. Empregando-se, nesses casos, o valor médio do conjunto da amostra pode-se estar cometendo um erro considerável. A Figura 5.03, obtida de KÉZDI (1980), mostra, claramente, o aumento da massa específica dos sólidos em função da diminuição do diâmetro das partículas, para cinco diferentes amostras de solos húngaros ensaiadas.

Por outro lado, toda partícula de solo é recoberta por um filme de água, quando em suspensão, além dos filmes de água adsorvidos às partículas argilosas. Trabalho de 1941, de Endell, também comentado por LAMBE (1951), sugere que o volume da partícula apresenta, na verdade, 2/3 de água. Resultaria, assim, uma significativa redução da massa específica das partículas e os diâmetros obtidos pela equação de Stokes, por mais uma razão, seriam menores que os reais.

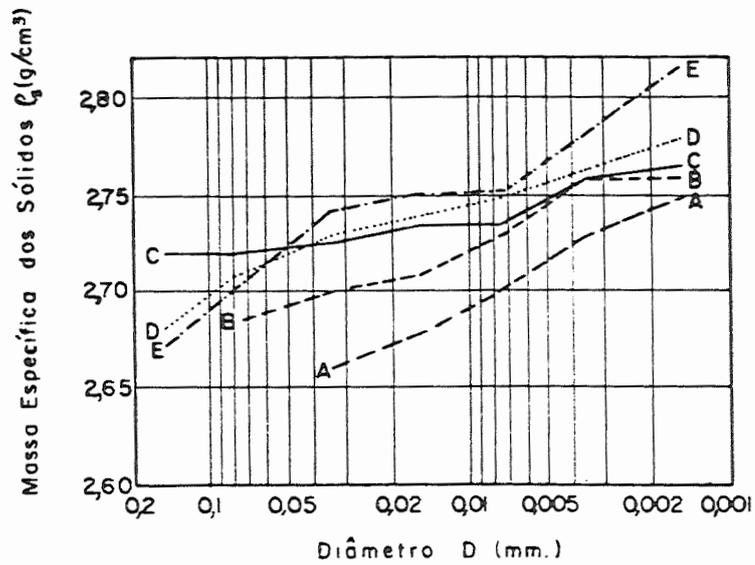


Figura 5.03: Variação da massa específica dos sólidos com o diâmetro das partículas - KÉZDI (1980).

Outra questão é que, no caso específico do método do densímetro, se tivermos solos muito plásticos, a viscosidade da suspensão pode retardar a descida do densímetro (por exemplo, para solos bentoníticos, deve-se trabalhar com apenas 15g de solo seco para evitar este problema).

Finalizando, embora a Lei de Stokes, quando utilizada em análises granulométricas, forneça resultados práticos altamente satisfatórios, é indispensável, aos que dela se utilizam, ter sempre em mente as hipóteses e condições requeridas para sua validade.

## CAPITULO VI - MÉTODO DO DENSÍMETRO

O método do densímetro foi desenvolvido, independentemente, por Goldschmidt (em 1926, na Noruega), e por George Bouyoucos (em 1927, no Michigan Agricultural Experiment Station - EUA), sendo este último o responsável pela popularização de seu uso na análise granulométrica de solos. Visando a aplicação do método em Mecânica dos Solos, Artur Casagrande pesquisou-o exaustivamente, sendo os seus estudos ainda hoje a base do ensaio granulométrico. O trabalho de CASAGRANDE (1931) foi comentado e enriquecido por TAYLOR (1948), sobre o qual será baseada a apresentação dos princípios que regem o Método do Densímetro.

O densímetro (ou hidrômetro) é empregado para a medição da densidade de líquidos e soluções. No ensaio de sedimentação, o seu princípio é estendido e o seu uso ampliado, passando a medir a massa específica variável de uma suspensão de solo, que ocorre em razão da sedimentação das partículas. Possibilita, mediante a utilização da Lei de Stokes, a determinação do diagrama de distribuição dos diâmetros das partículas. Em relação ao método da pipeta, por exemplo, o método do densímetro é mais rápido e permite, com pouco trabalho, a obtenção de muitos pontos da curva granulométrica. Daí o seu maior emprego na prática.

O densímetro inicialmente utilizado nos ensaios de granulometria por sedimentação era do tipo "Bouyoucos", graduado em gramas de solo por litro de suspensão - Figura 6.01(a), de DAWSON (1949). Desta forma, fornecia, diretamente, a concentração de solo à profundidade do centro de imersão (ou seja, a concentração de partículas menores que um dado diâmetro, determinado pela equação de Stokes). Atualmente, o densímetro utilizado é graduado de forma a fornecer a massa específica da suspensão à profundidade do centro de imersão. Este último, apresentado na Figura 6.01(b), pela forma de sua extremidade, é suposto mais preciso que o densímetro do tipo "Bouyoucos".

### 6.1 - Princípios do Método do Densímetro:

A primeira etapa, na apresentação deste método, é a obtenção da expressão para a massa específica de uma suspensão, em qualquer tempo e a qualquer profundidade. A suspensão de volume  $V$ , contendo uma massa total de solo  $M_s$ , é inicialmente uniformizada mediante agitação. No instante em que se inicia a sedimentação, todos os elementos de volume contêm a mesma concentração de solo em suspensão; por exemplo, uma suspensão de 1 litro que contém 50 gramas de solo terá 50 miligramas de solo em cada centímetro cúbico. A massa específica inicial da suspensão  $\rho_i$  é, portanto, facilmente calculada. Sendo  $M$  a massa total da suspensão,  $M_w$  a massa de água,  $V_s$  o volume de sólidos,  $\rho_w$  a massa específica da água, e  $\rho_s$  a massa específica dos sólidos, tem-se:

$$\rho_i = \frac{M}{V} = \frac{M_s + M_w}{V} = \frac{M_s + \rho_w (V - V_s)}{V} = \frac{M_s + \rho_w (V - M_s / \rho_s)}{V} = \rho_w + \frac{M_s}{V} \cdot \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \right) \quad (6.01)$$

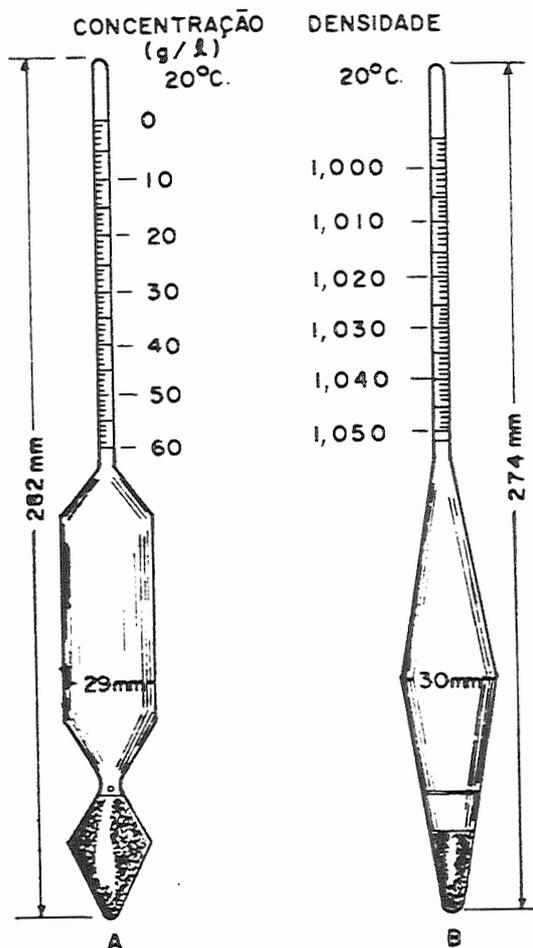


Figura 6.01: Tipos de densímetros utilizados em análises granulométricas de solos - DAWSON (1949).

Considerando-se um ponto qualquer, a uma profundidade  $z$  abaixo da superfície da suspensão, e designando-se por  $t$  o tempo transcorrido desde o início da sedimentação, o tamanho  $D$  da partícula que cairá desde a superfície até a profundidade  $z$ , no tempo  $t$ , pode ser facilmente calculado pela Lei de Stokes:

$$v = \frac{z}{t} = C \cdot D^2 \quad (6.02)$$

de onde obtém-se:

$$D = \sqrt{\frac{1}{C} \cdot \frac{z}{t}} \quad (6.03)$$

com

$$C = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_w)}{18 \cdot \eta} \quad (6.04)$$

A profundidade  $z$  não haverá partículas mais grossas que o diâmetro  $D$ , já que todas as partículas maiores terão caído a uma profundidade maior que  $z$ , durante o tempo  $t$ . Por isso,  $D$  é denominado "diâmetro limitante" ou "de referência". Em qualquer elemento de volume, à profundidade  $z$ , o peso de todas as partículas de menor tamanho que o diâmetro  $D$  é invariável, visto que as partículas foram inicialmente dispersas uniformemente e que a distância entre partículas de mesma dimensão (mesmo peso) permanece constante, em função de elas apresentarem a mesma razão de sedimentação. Em outras palavras, em função de as partículas com igual diâmetro apresentarem mesma velocidade de sedimentação, a mesma quantidade de partículas de diâmetro menor que  $D$ , que tenha entrado acima do elemento, já terá saído através da base do mesmo, como mostra a Figura 6.02. Dentro do elemento, portanto, todas as partículas mais grossas que  $D$  desaparecem e o conteúdo de partículas menores que  $D$  permanece constante. Assim, a concentração das partículas de um determinado diâmetro, em um determinado plano, permanece constante até elas descerem abaixo deste plano.

Chamando de  $N$  a relação entre a massa de partículas menores que  $D$  e a massa de todas as partículas na amostra inicial de solo, o peso de sólidos por unidade de volume, à profundidade  $z$  e no tempo  $t$ , será  $(N \cdot M_s / V)$ , e a massa específica será:

$$\rho = \rho_w + \frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot N \cdot M_s}{\rho_s \cdot V} \quad (6.05)$$

Portanto:

$$N = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \cdot \frac{V}{M_s} \cdot (\rho - \rho_w) \quad (6.06)$$

A relação N da equação acima representa a fração de solo mais fina que o diâmetro D. Portanto, a determinação da massa específica  $\rho$  (mediante emprego de densímetro), em uma dada profundidade e após certo tempo transcorrido, proporciona um ponto na curva de distribuição do tamanho das partículas (porcentagem que passa).

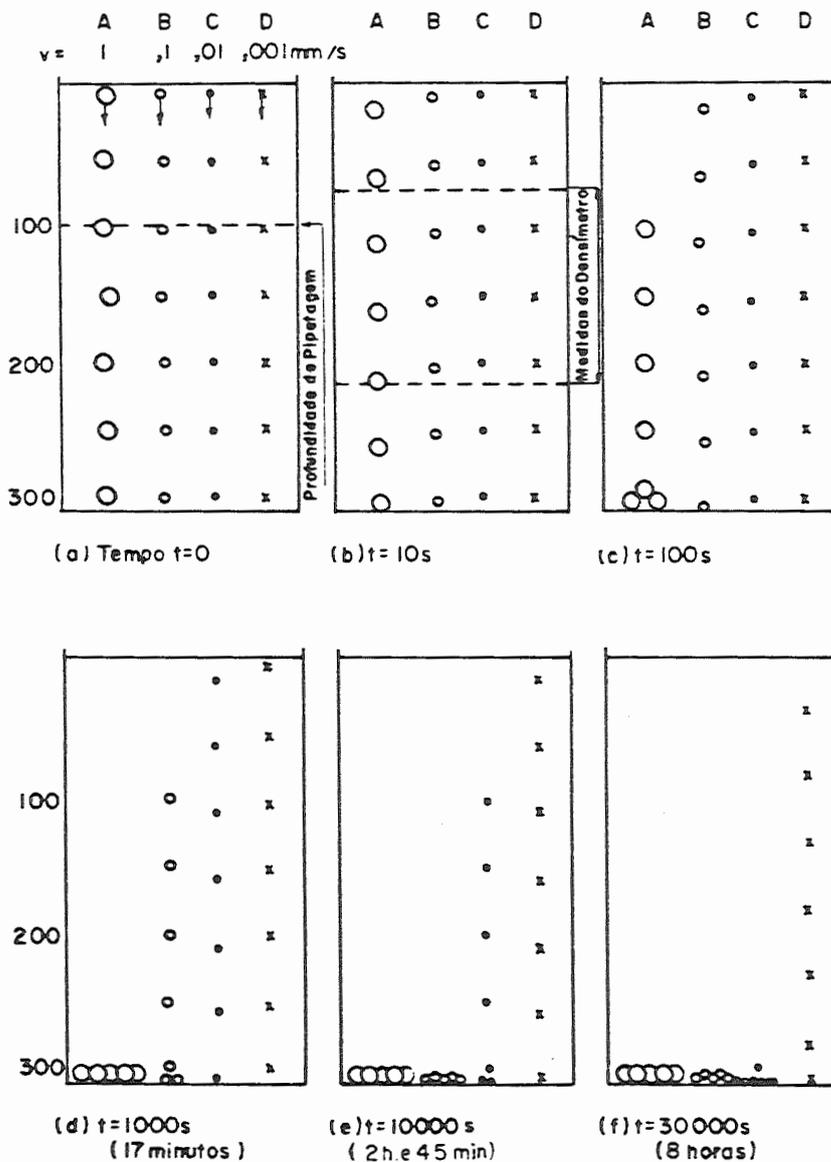


Figura 6.02: Representação do processo de sedimentação - HEAD (1980).

### 6.2 - A Ação do Densímetro:

Na Figura 6.03(a), apresenta-se um densímetro de linhas hidrodinâmicas, do tipo usado para a determinação das curvas granulométricas. A leitura  $r$  é observada na superfície do fluido, sobre a escala da haste do densímetro. Quando o densímetro é submerso em um líquido uniforme, esta leitura é a densidade do fluido (medida no centro de volume, quase sempre coincidente com o centro do bulbo). Tem-se, portanto:

$$r = \frac{\rho}{\rho_c} \quad \text{ou} \quad \rho = r \cdot \rho_c \quad (6.07)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $\rho_c$  é a massa específica da água à temperatura de calibração.

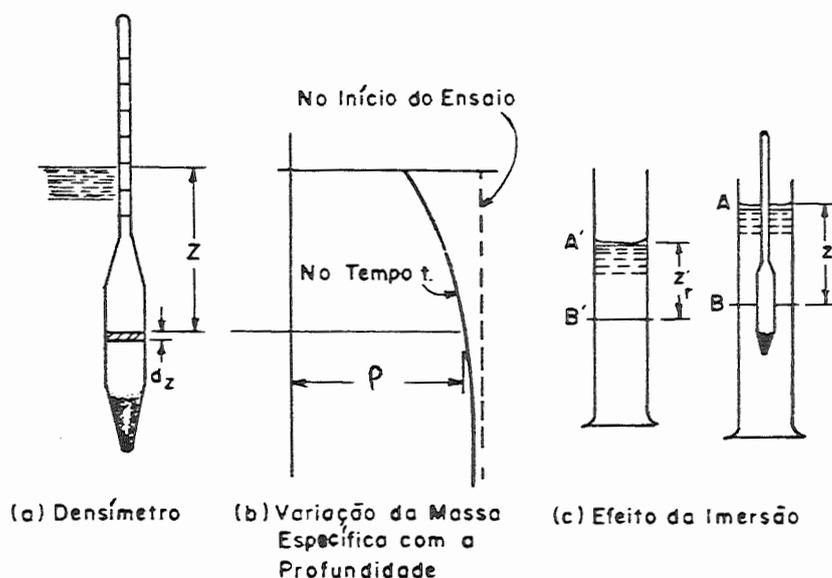


Figura 6.03: Detalhes da utilização do densímetro no ensaio granulométrico - TAYLOR (1948).

Quando o densímetro flutua em um fluido, seu peso  $W_d$  é suportado pelo empuxo, que é igual ao peso do líquido deslocado. Se o fluido tem massa específica constante:

$$\rho \cdot g \int A \cdot dz = W_d \quad (6.08)$$

onde a integral inclui a totalidade da altura submersa do densímetro,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $A$  é a área a uma profundidade  $z$ .

Depois que a sedimentação se processou por algum tempo, a massa específica da suspensão varia com a profundidade, tal como mostrado na Figura 6.03(b). Neste caso a integral do empuxo passa a ser a seguinte:

$$g \int \rho \cdot A \cdot dz = W_d \quad (6.09)$$

Sendo variável a massa específica da suspensão (menor massa específica acima do centro do bulbo do densímetro e maior abaixo), quando uma leitura  $\rho$  é obtida na suspensão, esta é uma massa específica média. A Figura 6.03(b) mostra que a densidade é menor na parte superior do densímetro e maior na parte inferior e que, em uma profundidade próxima ao centro do bulbo, deverá ser igual à leitura  $\rho$ . Se esta profundidade puder ser determinada, a leitura do densímetro dará a massa específica a uma profundidade conhecida.

Casagrande demonstrou que a consideração de que  $\rho$  varia linearmente com a profundidade não acarreta erros expressivos, em geral nunca superiores a 3%. A expressão para a variação linear da massa específica pode ser escrita da seguinte forma:

$$\rho = C_1 + C_2 \cdot z \quad (6.10)$$

A uma profundidade determinada, próxima do centro do bulbo, onde  $\rho$  é igual a ( $r \cdot \rho_c$ ), o valor de  $z$  será designado por  $z_r$ . Então:

$$r \cdot \rho_c = C_1 + C_2 \cdot z_r \quad (6.11)$$

Substituindo-se os valores de  $\rho$  nas integrais do peso do densímetro, pelas duas equações acima, chega-se à seguinte expressão:

$$z_r = \frac{\int A \cdot z \cdot dz}{\int A \cdot dz} \quad (6.12)$$

Esta equação expressa a distância ao centro de volume. Significa, portanto, que a profundidade na qual a massa específica da suspensão se iguala à leitura  $\rho$  do densímetro é a profundidade do centro de volume submerso, comumente chamado centro de imersão. A leitura do densímetro fornece, assim, a massa específica à profundidade do centro de imersão, o qual geralmente coincide com a altura média do bulbo.

As distâncias  $z_r$  podem ser obtidas, para todos os valores de  $r$ , através da calibração do densímetro. A Figura 6.04, de HEAD (1980), mostra as medidas que devem ser feitas: para a calibração do densímetro, deve-se determinar a distância de cada traço principal da graduação ao centro de volume do densímetro; ou seja, deve-se medir a distância de cada traço principal à base da haste ( $N + L$ ) e somar a essa distância metade da altura do bulbo ( $h / 2$ ), medida da base da haste à extremidade do bulbo. Tais curvas fornecem, pois, para qualquer leitura do densímetro, a profundidade do centro de volume do densímetro (distância entre a superfície da suspensão e o centro do bulbo). Apresentam-se, nas Figuras B.3 e B.4 (Anexo B), as curvas de calibração dos densímetros usados nos ensaios de granulometria do Laboratório de Estradas da EESC-USP.

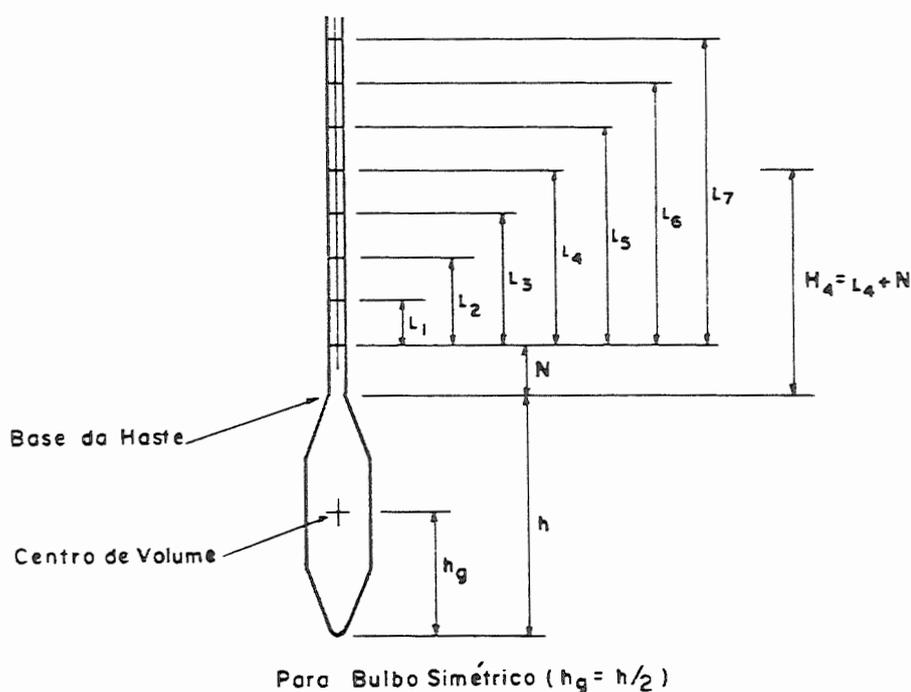


Figura 6.04: Medidas para calibração do densímetro - HEAD (1980).

Para cada observação do valor de  $r$ , a profundidade correspondente ( $z_r$ ) será dada pela calibração e o tempo será o observado; exceto pelas correções, que serão discutidas a seguir, estes valores são os utilizados como  $z$ ,  $\rho$  e  $t$  nas Equações 6.03 e 6.06, de modo a proporcionarem as coordenadas dos pontos da curva granulométrica.

### 6.3 - Correções:

As leituras iniciais dos densímetros são, normalmente, tomadas nos tempos de 1/2, 1 e 2 minutos, com o densímetro imerso na suspensão desde o início da contagem dos tempos. Estas leituras de  $z_r$  são usadas como valores de  $z$  na Equação 6.03, pois a profundidade do centro de volume do densímetro é equivalente à profundidade efetiva.

Para as leituras subsequentes, porém, o densímetro deve ser colocado imediatamente antes e retirado logo após cada leitura, pois, caso o densímetro permaneça mais que 2 minutos na suspensão, as partículas começam a se depositar sobre o bulbo, causando erro de leitura, além de ocorrer uma diminuição na velocidade de sedimentação, provocada pelo impedimento de as partículas caírem livremente. Assim, a profundidade efetiva do centro de imersão (até a superfície líquida anterior à colocação do densímetro) passa a ser calculada descontando-se metade do volume do densímetro, dividido pela área da proveta, ou seja, descontando-se metade da elevação da superfície líquida.

A razão para que se introduza a correção devida à posterior imersão do densímetro é ilustrada pela Figura 6.03(c). As partículas de diâmetro limite  $D$ , que estão no nível  $B$ , não caem toda a distância  $z_r$ , mas sim a distância  $A'B'$  ou  $z_r'$ , por existir uma diferença, devido à inserção do densímetro, que aumenta a distância  $A'B'$  para  $AB$ . A diferença entre estas duas distâncias é uma constante, aproximadamente igual à metade do volume do densímetro  $V_d$  dividido pela área do recipiente  $A_j$ . Desta forma, para as leituras em que o densímetro é colocado imediatamente antes e retirado logo após às mesmas, a distância de sedimentação realmente ocorrida é  $(z_r - V_d / 2 A_j)$ , a qual deve ser usada como  $z$  na Equação 6.03. As curvas de calibração das Figuras B.3 e B.4 (Anexo B) também apresentam a correção  $c$  ( $= V_d / 2 A_j$ ), utilizada na determinação da profundidade efetiva das leituras subsequentes às de 1/2, 1 e 2 minutos.

Os densímetros devem ser calibrados para todas e quaisquer provetas com as quais sejam utilizados, uma vez que a seção transversal ( $A_j$ ) é considerada nos cálculos da calibração. Na prática, para um mesmo lote de provetas, pequena diferença ocorre, o que não dispensa a verificação de uma a uma quanto à uniformidade de dimensões. Porém, é frequente a utilização de uma única curva de calibração (geralmente, a do primeiro lote de provetas recebido pelo laboratório) para todos os ensaios de sedimentação realizados, incluindo os que se utilizam de provetas recém compradas ou fabricadas por outras indústrias.

As leituras iniciais, principalmente as duas primeiras, quase sempre são inexatas. Existem recomendações no sentido de ignorá-las, quando não apresentarem boa concordância com a análise feita por peneiramento, e até mesmo para não executá-las. É desejável, portanto, que as leituras iniciais, quando efetuadas, se repitam pelo menos por duas vezes, antes que

seja executada a nova agitação completa da suspensão para as leituras subsequentes à de dois minutos. Em todas as leituras, porém, o densímetro deve ser introduzido e removido suave e lentamente, a fim de se evitar ao máximo as turbulências.

Outras três correções são requeridas:

a- correção do menisco: necessária em função de os densímetros serem fabricados de modo que as leituras sejam feitas na base dos meniscos, o que é impossível quando se tem uma suspensão opaca. A necessidade desta correção é facilmente visualizada na Figura 6.05;

b- correção pela expansão e contração do bulbo do densímetro, devidas à temperatura;

c- correção requerida quando a escala na haste do densímetro não está corretamente fixada.

Estas correções podem ser feitas simultaneamente ao ensaio, desde que um recipiente com água clara e limpa seja mantido junto ao recipiente com suspensão. Fazendo-se, de tempos em tempos, leituras da massa específica da água clara, pode-se converter o termo  $(\rho - \rho_w)$ , presente na Equação 6.06, em  $(r - r_w)$ , tendo como consequência a eliminação das três correções comuns a  $\rho$  e  $r_w$ .

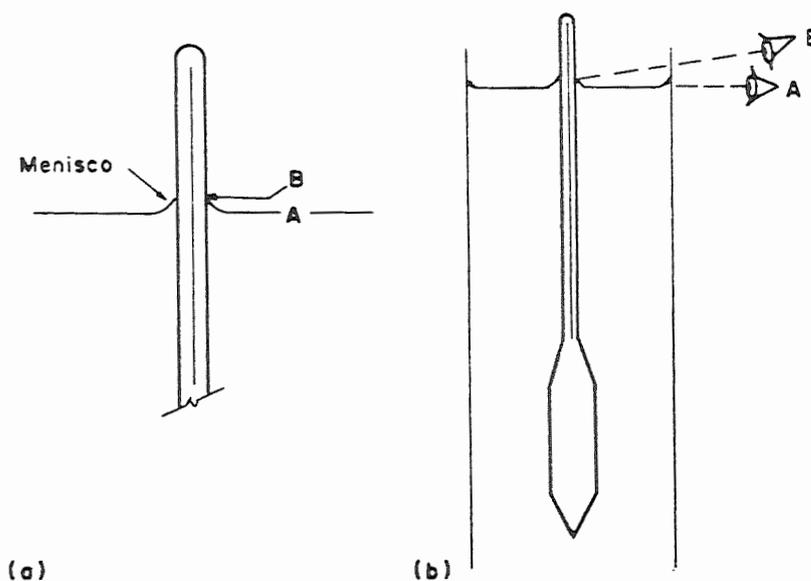


Figura 6.05: Leituras no densímetro - HEAD (1980).

Assim, a Equação 6.06 adquire a seguinte forma:

$$N = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \cdot \frac{V}{M_s} \cdot \rho_c \cdot (r - r_w) \quad (6.13)$$

Alternativamente, pode-se adotar um procedimento mais completo, mediante a prévia calibração do densímetro com o defloculante químico utilizado. Com esta curva de calibração obtêm-se as correções em função da temperatura da suspensão. Assim, além das três correções citadas, corrige-se, também, a massa específica da solução água-defloculante, a qual varia consideravelmente com a temperatura. Exemplos destas curvas de calibração, para os densímetros e defloculantes utilizados nos ensaios deste trabalho, são apresentados nas Figuras B.5 a B.10 do Anexo B.

Como visto, a adição de um defloculante químico à mistura solo-água destilada altera a massa específica da suspensão, afetando os cálculos dos ensaios de granulometria. A título de curiosidade histórica, apresenta-se o relato de CHU e DAVIDSON (1954) sobre a primeira curva de calibração de densímetro para a correção da leitura da massa específica da suspensão ensaiada (água, defloculante e solo). Tal correção era baseada na comparação das leituras, na suspensão, com leituras do densímetro em uma suspensão auxiliar, contendo apenas água destilada e solo. A correção do efeito do defloculante sobre a massa específica era obtida pela diferença entre as duas leituras. Tal procedimento tinha um único inconveniente: a suspensão auxiliar (solo-água) não era defloculada e, portanto, as leituras não eram representativas. Hoje, o procedimento utilizado na determinação de curvas de calibração de densímetros é análogo, havendo apenas uma sensível diferença: a "suspensão auxiliar" é uma solução de água mais defloculante, continuando, porém a serem feitas as leituras da massa específica da solução em várias temperaturas. A massa específica obtida das curvas de calibração é utilizada como  $\rho_w$  na Equação 6.06.

A temperatura da suspensão, além de alterar a massa específica da solução água-defloculante, também tem influência nos resultados do ensaio de sedimentação por outras razões:

- provoca correntes de convecção na suspensão;
- provoca uma variação de volume no recipiente de sedimentação;
- causa variação da viscosidade do meio, alterando a velocidade de queda das partículas.

A variação de volume do cilindro de sedimentação pode ser desconsiderada, em virtude de sua pequena magnitude. Devem ser evitadas, no entanto, as correntes de ar e, principalmente, insolação diferenciada, de modo a que não se tenha correntes de convecção na suspensão.

Relativamente à variação da viscosidade da água com a temperatura, porém, cabe uma abordagem mais detalhada. Nos procedimentos de ensaio adotados, o cálculo da viscosidade é feito a partir da tomada de temperatura no instante da respectiva leitura do densímetro. Trata-se de uma determinação pontual da viscosidade, desconsiderando inevitáveis variações que ocorrem no intervalo entre leituras. Dessa maneira, a viscosidade real da suspensão e, conseqüentemente, a velocidade de queda das partículas (que varia entre os instantes das leituras do densímetro), é simplesmente substituída pelo valor da viscosidade no instante da leitura. A velocidade de queda que uma dada partícula apresenta no instante da leitura é, portanto, tomada como a velocidade de queda ao longo de todo o intervalo de tempo entre leituras.

A Figura 6.06 mostra a variação da temperatura da suspensão em função do tempo, determinada em um dos dias de realização dos ensaios para este trabalho. Observa-se que, entre as leituras de 4 e 8 horas e entre as de 8 e 24 horas, a variação da temperatura foi significativa. Como podem ocorrer maiores oscilações de temperatura entre leituras do que as apresentadas na Figura 6.06 (em outras épocas do ano ou em outros laboratórios), conclui-se que providências deveriam ser tomadas, em todos os laboratórios, para minimizar este problema. Dentre as medidas possíveis, destacam-se:

- colocação das provetas dentro de um "banho maria", tomando-se providências no sentido de se manter constante a temperatura. Esta alternativa apresenta dois inconvenientes: para numerosos ensaios simultâneos, há dificuldade em se ter recipientes suficientes para atender a todos os ensaios; e a manutenção da temperatura exige equipamentos próprios e específicos, com acompanhamento por parte de técnico;

- utilização de temperaturas médias nas determinações da viscosidade da suspensão. Tal procedimento necessita, tão somente, da construção de curva ( $T \times t$ ) semelhante à apresentada na Figura 6.06. A consideração da temperatura média do intervalo entre leituras, apesar de não rigorosamente correta, possibilita que se trabalhe, sem custos ou complicações adicionais, com valores de viscosidade (e, conseqüentemente, de velocidade de sedimentação) mais próximos do real.

Nos cálculos dos diversos métodos de análise granulométrica, a viscosidade da suspensão é considerada igual à viscosidade da água destilada, existindo, inclusive, tabelas que fornecem os valores desta última em função da temperatura.

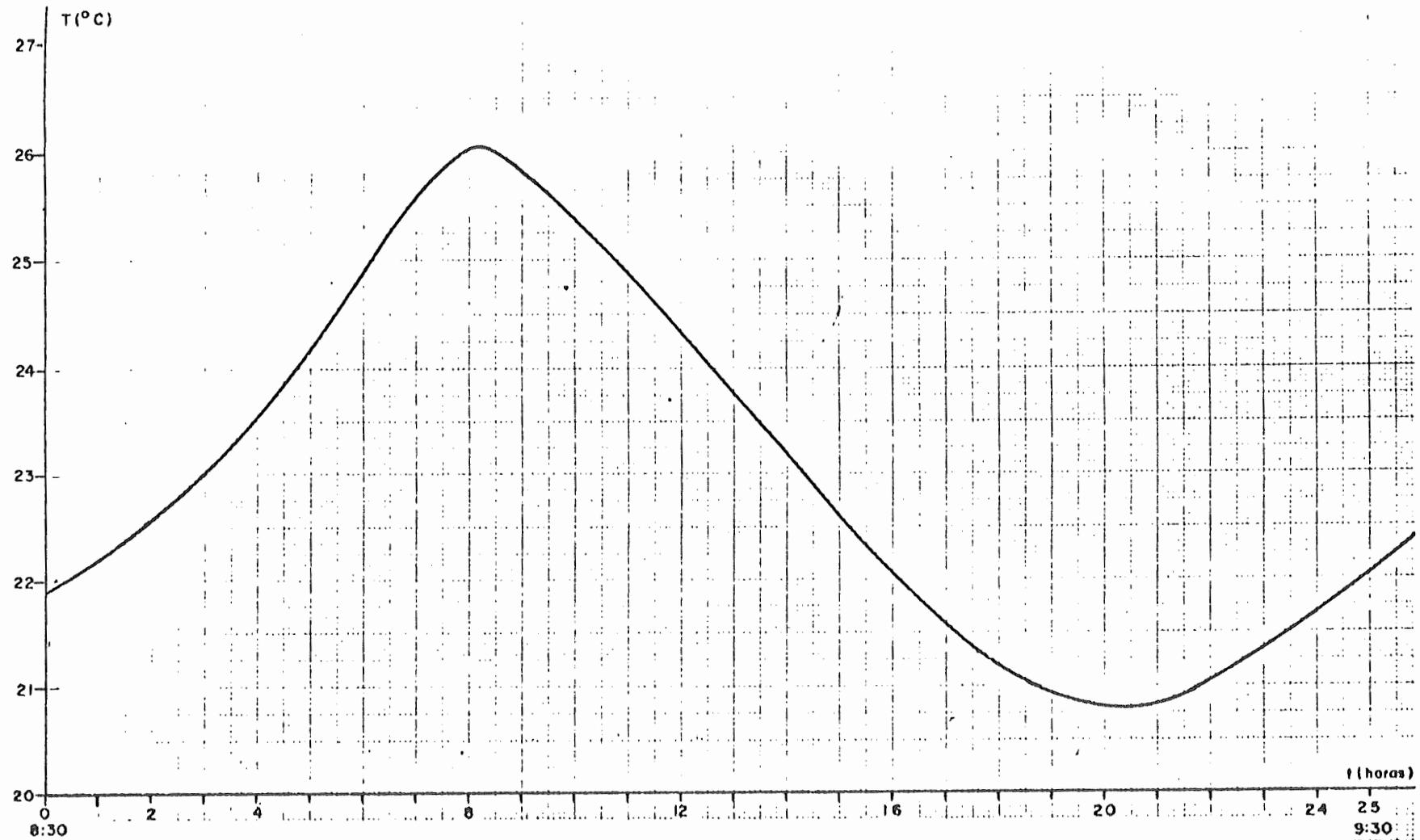


Figura 6.06 - Variação da temperatura da suspensão em função do tempo.

Quando, porém, um agente defloculante é utilizado, a suspensão passa a ser uma combinação de água destilada e solução defloculante, podendo a viscosidade resultante ter valor consideravelmente diferente da viscosidade da água destilada. O Quadro 6.01, obtido de WINTERMYER e KINTER (1954), ilustra numericamente essas diferenças.

Quadro 6.01: Comparação entre viscosidades dos seguintes meios: água destilada, água destilada com agente defloculante e suspensão com solo e defloculante - WINTERMYER e KINTER (1954).

LIQUIDO	VISCOSIDADE (mPa.s - 20°C)
A (Água Destilada)	1,004
B (Solução de Silicato de Sódio)	1,018
C (Solução de Hexametáfosfato de Sódio - 40ml - 0,5N)	1,025
D (Solução de Hexametáfosfato de Sódio - 100ml - 0,5N)	1,038
Suspensão de Solo Preparada com a fração mais fina que 0,001mm, nos seguintes meios:	
Líquido A	1,116
Líquido B	1,195
Líquido C	1,251
Líquido D	1,274

Também foi observado por WINTERMYER e KINTER (1954) que nem a viscosidade da água destilada nem a viscosidade da solução água-defloculante são rigorosamente corretas para serem usadas nos cálculos dos ensaios granulométricos: considerando-se uma suspensão contendo partículas siltosas e argilosas, o meio no qual a fração siltosa sedimenta-se é uma suspensão composta de água, agente defloculante mais material da fração argila. E, no Quadro 6.01, pode-se observar que a viscosidade de diferentes suspensões, preparadas com a fração menor que 0,001mm, chegam a ser até 27% maiores que a da água destilada (utilizada nos cálculos). Assim, as correções a serem aplicadas à viscosidade deveriam depender não somente da temperatura, mas também da granulometria do solo. Para tanto, uma possibilidade seria a determinação, para grupos de solos com características análogas, de correções em função da granulometria

#### 6.4 - Fatores que Contribuem para a Não Padronização do Ensaio de Sedimentação pelo Método do Densímetro:

De todos os ensaios correntes em Mecânica dos Solos, o de Granulometria por Sedimentação parece ser o de técnica menos padronizada. Dentre os muitos fatores que contribuem para esta situação, destacam-se:

##### 6.4.1 - Tipo de defloculante químico

Embora os mais citados sejam o hexametáfosfato de sódio e o silicato de sódio, existe uma infinidade de defloculantes químicos disponíveis no mercado, sendo que uma boa mostra foi dada no capítulo que trata da dispersão dos solos. Os diferentes defloculantes têm formas de atuação e efeitos dispersantes também diferentes. Uma análise mais detalhada deste fator, baseada em ensaios de laboratório, será apresentada nos capítulos seguintes, onde são avaliados quatro dos defloculantes mais importantes e mais utilizados em nosso meio técnico.

##### 6.4.2 - Tempo de dispersão mecânica

Encontram-se citados, mais comumente, os valores de 5, 10 e 15 minutos, embora outros valores não sejam raros. Como exemplo, tem-se a NBR - 7181 (1984), que estipula 15 minutos de dispersão, salvo exceções (por exemplo, material com grande porcentagem de mica), e a DNER - ME 51-64 (1964) que adota os tempos de dispersão em função do índice de plasticidade: para  $IP < 5$ , 5 minutos; para  $IP = 5$  a 20, 10 minutos; e para  $IP > 20$ , 15 minutos de dispersão.

É de fácil entendimento a maior dispersão das amostras que ocorre quando são utilizados maiores tempos de dispersão, não havendo dúvida, também, que o efeito do tempo de dispersão é limitado, ou seja, o ganho de defloculação vai diminuindo (assintoticamente) à medida em que cresce o tempo de dispersão. Mesmo assim, optou-se por analisar o fator "tempo de dispersão" de uma forma quantitativa, havendo, nos capítulos seguintes, uma discussão detalhada a respeito da programação seguida e dos resultados obtidos.

##### 6.4.3 - Secagem prévia da amostra

Embora a maioria das recomendações sejam no sentido de se utilizar, se possível, o material em suas condições naturais ou após secagem à sombra, também são encontradas sugestões para que o material seja completamente seco e depois desagregado - por exemplo, FILLIAT (1981). Como visto nos Capítulos III e IV, que tratam, respectivamente, das propriedades físico-químicas da fração argila e da dispersão

dos solos, a secagem das amostras pode resultar, principalmente no caso de solos tropicais (ricos em sesquióxidos), em efeitos aglutinantes de difícil remoção. Dada a sua importância, a condição de secagem das amostras também foi objeto do programa de ensaios desenvolvido, sendo analisada, com maiores detalhes, nos capítulos seguintes.

#### 6.4.4 - Tempo de imersão da amostra em solução com água mais defloculante

A respeito deste fator, existem diferentes recomendações, que vão desde que se faça a dispersão mecânica imediatamente após a adição de defloculante (ou com uma imersão de no máximo uma hora) - BROWN e O'HARRA (1970) - até que se mantenha a amostra em imersão por no mínimo 24 horas - FILLIAT (1981). Dentro deste intervalo, os tempos de repouso mais citados são 6, 12 e 18 horas. Por exemplo, a NBR - 7181 (1984) e a DNER - ME 51-64 (1964) estipulam 12 horas, enquanto a ASTM D422-63 (1972) recomenda 16 horas. Para os ensaios realizados neste trabalho, considerou-se suficiente o tempo de repouso de no mínimo 6 horas, adotado por STANCATI et alli (1981), não sendo realizada nenhuma investigação experimental específica deste fator.

#### 6.4.5 - Fração granulométrica ensaiada por sedimentação

A literatura técnica apresenta valores divergentes acerca da fração granulométrica a ser ensaiada por sedimentação, sendo que os efeitos dela decorrentes já foram discutidos, em detalhes, quando do estudo da Lei de Stokes. As NBR - 7181 (1984) e DNER - ME 51-64 (1964) adotam a peneira de 2,0mm (#10) como separação da fração ensaiada por peneiramento da ensaiada por sedimentação; a ASTM D422-63 (1972) permite que sejam ensaiados, por sedimentação, os materiais passados nas peneiras de 4,75mm (#4), 2,0mm (#10), 0,425mm (#40) ou 0,075mm (#200); DAWSON (1949) adota a peneira de 0,425mm (#40). Já os Laboratórios de Estradas e de Geotecnia da EESC-USP utilizam apenas o material passado na peneira de 0,15mm (#100) no ensaio sedimentação. Os procedimentos para separação das frações a serem ensaiadas, no entanto, são independentes da peneira de controle (como ilustra a Figura 6.07): mediante lavagem, é feita a separação das partículas a serem ensaiadas por sedimentação (material recolhido na proveta) das que serão peneiradas (material retido na peneira de controle).

Dada a relevância das dimensões das partículas, uma vez que elas podem provocar perturbações, além de estarem intimamente ligadas à validade da Lei de Stokes para os cálculos dos ensaios granulométricos, a influência deste fator também foi avaliada experimentalmente, sendo os resultados apresentados e discutidos nos capítulos seguintes.

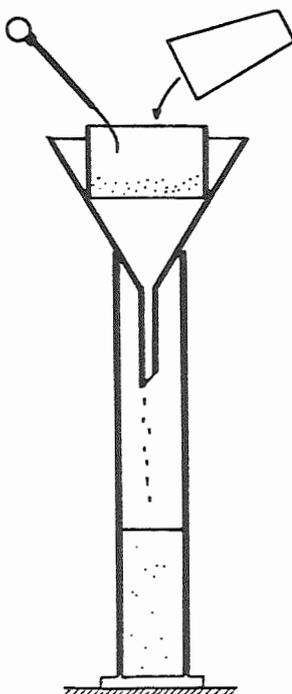


Figura 6.07: Separação das partículas a serem peneiradas das que serão objeto do ensaio de sedimentação.

#### 6.4.6 - Massa da amostra ensaiada

Tem influência na concentração da solução e, portanto, na queda das partículas. A maior parte das sugestões encontradas na literatura fornece a massa de material a ser ensaiada em função de uma classificação granulométrica expedita (com apenas três grupos: areia, silte e argila), de forma a se utilizar, por exemplo, de 40g (quando o material é argiloso) a 70g (quando o material é arenoso) de solo passado na peneira de controle. Algumas recomendações, no entanto, são mais rigorosas: baseadas nas restrições impostas pelos pesquisadores que avaliaram a Lei de Stokes, fixam este limite em, no máximo, 50g de material passado na peneira de controle (existem, inclusive, recomendações para se utilizar, no máximo, 20g de solo seco). Este fator também foi avaliado experimentalmente, sendo as análises efetuadas e os resultados obtidos apresentados, em detalhes, nos capítulos seguintes.

#### 6.4.7 - Rotação da hélice do dispersor

A maior ou menor agitação da suspensão, provocada pela rotação da hélice do dispersor, influencia a dispersão das partículas. A média dos valores encontrados na literatura considera como capaz de propiciar uma dispersão aceitável a rotação de 10000rpm, quando em situação de rotação livre. Embora, de início, quase todos os dispersores atendam a esta

imposição, a grande maioria, após pouco tempo de uso, passa a apresentar inúmeros problemas, dentre os quais a diminuição de rotação. Isto porque, em boa parte dos casos, tratam-se de "batedores de leite" improvisados de dispersores, apresentando, geralmente, baixa durabilidade.

Quando da realização dos ensaios para este trabalho, procurou-se aferir, de tempos em tempos, a rotação dos dispersores utilizados. Não foi, realizada, porém, uma investigação específica do efeito da rotação da hélice do dispersor na defloculação das partículas.

## 6.5 - Considerações Complementares:

### 6.5.1 - Perturbação causada pela inserção do densímetro

PURI (1949), visando quantificar a perturbação causada pela inserção do densímetro (o qual tem um bulbo relativamente largo) no cilindro de sedimentação, efetuou ensaios comparativos entre os métodos do densímetro e da pipeta, a qual tem haste bem mais fina. O resultado encontrado foi uma boa aproximação entre os resultados, com mais de 90% dos ensaios apresentando diferenças inferiores a 1%.

### 6.5.2 - Efeito da variação do comprimento e do diâmetro do cilindro de sedimentação

Estes fatores também foram avaliados por PURI (1949), cujos resultados mostraram que, em tubos maiores, mais partículas sedimentam em contato com as paredes, havendo menos material coletado no centro do tubo. Com isso, ensaios em provetas com maior altura resultam em menores valores para os diâmetros das partículas. Analogamente, os resultados mostraram que os tubos com menor diâmetro também apresentam menores valores de dimensões das partículas, em virtude de haver uma maior porcentagem de partículas que têm suas velocidades de sedimentação reduzidas pelo contato com as paredes da proveta.

### 6.5.3 - Reprodutibilidade de resultados

Quanto à reprodutibilidade de resultados, estudos comparativos feitos por PURI (1949), com 14 amostras de solos ensaiadas 5 vezes por cada método, mostraram haver maior reprodutibilidade de resultados com o método do densímetro do que com o método da pipeta. No presente trabalho, em razão da não existência de estudos mais recentes, também foram realizados ensaios com o intuito de se verificar a reprodutibilidade de resultados do Método do Densímetro. A Figura 7.10, do Capítulo VII, apresenta o resumo dos resultados obtidos com 9 repetições efetuadas com uma mesma amostra.

## CAPITULO VII - ENSAIOS REALIZADOS

## 7.1 - Amostras de Solos Utilizadas:

As amostras ensaiadas têm suas informações sumarizadas no Quadro 7.01. Tratam-se de solos utilizados em obras rodoviárias no Estado de São Paulo, notadamente em cidades localizadas próximas a São Carlos-SP. Foram selecionadas, para uma primeira fase de ensaios, 4 amostras que já se encontravam no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC-USP, as quais estavam sendo ou já haviam sido utilizadas em pesquisas do Departamento de Transportes (STT) e do Departamento de Geotecnia (SGS) da EESC-USP. O critério básico que norteou a escolha das 4 amostras de solo foi a granulometria: procurou-se trabalhar com dois solos argilosos - Santa Bárbara D'Oeste (S) e Ribeirão Preto (R) - e dois solos arenosos - Jardim Cruzeiro do Sul (J) e "Linha do Broa" (Ligação São Carlos - Usina do Lobo) (B).

A amostra argilosa coletada em Santa Bárbara D'Oeste-SP (S) classifica-se, segundo classificação granulométrica utilizando-se a escala ABNT, como uma argila siltoosa pouco arenosa. Pertence à unidade pedológica Latossolo Vermelho Escuro, sendo classificada, também, como um solo DL, segundo a Classificação Unificada, e como um solo A-7-6 pela Classificação BPR-AASHTO.

A amostra argilosa de Ribeirão Preto-SP (R) foi coletada na Rodovia SP 333, Km 320 + 150m (LE - corte), sendo classificada como uma argila silto-arenosa (escala ABNT), como um CL (Classificação Unificada) e como um A-7-6 (Classificação BPR-AASHTO). Pertence à unidade pedológica Latossolo Roxo (B Latossólico), apresentando a seguinte composição mineralógica: fração areia ( $D > 0,075\text{mm}$ ) constituída de quartzo e fração silte + argila ( $D < 0,075\text{mm}$ ) constituída de caulinita, gibsitita, hematita e quartzo.

A amostra arenosa do Jardim Cruzeiro do Sul (J), bairro da cidade de São Carlos-SP, é uma areia fina argilosa (escala ABNT), pertencendo à unidade pedológica Latossolo Vermelho Amarelo. De acordo com as classificações Unificada e BPR-AASHTO, caracteriza-se, respectivamente, como um SC e como um A-2-6.

A amostra arenosa coletada na jazida da Ligação São Carlos - Represa do Lobo (Broa) também pertence à unidade pedológica Latossolo Vermelho Amarelo, sendo uma areia fina argilosa (escala ABNT) que classifica-se como um SC, segundo a Classificação Unificada, e como um A-2-6 pela Classificação BPR-AASHTO. Trata-se de um solo de cor vermelho amarelado, cuja fração areia é composta essencialmente de quartzo. A amostra foi coletada na estaca 210 + 13m (LD) do trecho do Broa, local onde foi explorada a jazida para construção da Ligação São Carlos - Represa do Lobo, sendo esse tipo de solo de grande ocorrência no Estado de São Paulo, particularmente na região de São Carlos e circunvizinhanças.

QUADRO 7.01: AMOSTRAS ENSAIADAS.					
AMOSTRA	LOCALIDADE	CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL (Escala ABNT)	UNIFICADA (LL - LP)	BPR-AASHTO	UNIDADE PEDOLÓGICA
(S)	Santa Bárbara D'Oeste	argila siltosa pouco arenosa	OL (43 - 26)	A-7-6	Latossolo Vermelho Escuro
(R)	Ribeirão Preto	argila silto-arenosa	CL (49 - 32)	A-7-6	Latossolo Roxo (B latossólico)
(J)	Jardim Cruzeiro do Sul	areia fina argilosa	SC (25 - 13)	A-2-6	Latossolo Vermelho Amarelo
(B)	"Linhão do Broa"	areia fina argilosa	SC (28 - 17)	A-2-6	Latossolo Vermelho Amarelo
(C)	Rodovia Castelo Branco	silte arenoso pouco argiloso	MH (51 - 31)	A-5	-
(D-S-L)	Dois Córregos - Mineiros do Tietê	areia fina argilosa	SC (33 - 18)	A-2-6	Podzólico de Lins
(D-S-S)	Dois Córregos - Mineiros do Tietê	areia fina argilosa	SC (26 - 15)	A-2-6	Não Laterítico (*)
(D-C-L)	Dois Córregos - Guarapuã	argila arenosa	CL (48 - 29)	A-7-6	Latossolo Roxo (B latossólico)
(D-C-S)	Dois Córregos - Guarapuã	argila siltosa	OH (72 - 49)	A-7-6	Não Laterítico (*)

(\*) as unidades pedológicas não lateríticas foram amostradas abaixo da linha de seixos.

As duas amostras arenosas - (J) e (B) - incluem-se dentre os solos denominados "arenosos finos" pela terminologia rodoviária corrente no Estado de São Paulo. Apresentam, na composição mineralógica da fração menor que 0,075mm, minerais do grupo da caulinita, gibsitita, hematita, magnetita, quartzo e óxidos de ferro amorfos. São materiais comuns à pavimentação rodoviária, sejam como materiais de base e sub-base, sejam como reforço do subleito. UTIYAMA et alii (1977) relatam a inexistência de relação genética direta da camada de "solo arenoso fino" com a rocha subjacente, o que implica uma origem tipicamente sedimentar. São solos constituídos em mais de 50% pela fração areia, com predominância de areia fina; são enriquecidos por óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio, apresentando boas características de resistência mecânica.

Para a segunda fase de ensaios foram selecionadas 5 amostras de solos, especialmente coletadas para este trabalho, em locais de onde já haviam sido extraídas outras amostras para pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Estradas do STT. Procurou-se trabalhar com um solo de alteração de rocha granítica do Cristalino: Castelo Branco (C); com duas amostras de solos arenosos, uma acima e outra abaixo da "linha de seixos" (a qual, conforme SORIA e FAEBRI (1981), é uma camada constituída de seixos de quartzo e de concreções lateríticas, que quase sempre delimita os solos lateríticos dos não lateríticos, situados acima e abaixo dela, respectivamente): Dois Córregos (D-S-L) e (D-S-S); e com duas amostras de solos argilosos, uma laterítica e outra saprolítica: Dois Córregos (D-C-L) e (D-C-S).

A amostra coletada na SP 280 - Rodovia Castelo Branco, Km 34 + 100m (LE - corte), conforme NOGAMI e VILLIBOR (1978), é um solo saprolítico de granito. Trata-se de um silte arenoso pouco argiloso (escala ABNT), também classificado como MH (Classificação Unificada) e A-5 (Classificação BPR-AASHTO). É resultante da alteração "in situ" da rocha matriz; não é evoluído pedologicamente e apresenta macro-estruturas reliquias nítidas, herdadas da rocha matriz. Apresenta, em sua composição mineralógica, quartzo, caulinita, mica e feldspatos. Perfaz, geralmente, camadas espessas (dezenas de metros), constituindo uma parcela apreciável das camadas de subleito de nossas rodovias. Estes solos exibem, em geral, reduzida capacidade de suporte e/ou expansões consideráveis.

As amostras arenosas de Dois Córregos (D-S-L e D-S-C) foram coletadas na SP 225 - Ligação Dois Córregos - Mineiros do Tietê, Km 0 + 230m (LE - jazida), respectivamente acima (amostra laterítica - D-S-L) e abaixo (amostra saprolítica - D-S-C) da "linha de seixos". Ambas as amostras são classificadas como areia fina argilosa (escala ABNT), ou como um solo SC, segundo a Classificação Unificada, ou ainda como um solo A-2-6, segundo a Classificação BPR-AASHTO. Apenas a amostra laterítica (D-S-L) apresenta evolução pedológica, pertencendo à unidade Podzólico de Lins. A composição mineralógica da fração areia ( $D > 0,075\text{mm}$ ) é basicamente quartzo, sendo a mineralogia da fração silte + argila ( $D < 0,075\text{mm}$ ) composta de caulinita, gibsitita, hematita e quartzo.

As amostras argilosas de Dois Córregos (D-C-L e D-C-S) foram coletadas na Ligação Dois Córregos - Guarapuã, Km 0 + 440m, respectivamente acima e abaixo da "linha de seixos". A amostra laterítica (D-C-L) apresenta evolução pedológica, sendo classificada na unidade Latossolo Roxo (B latossólico). Pela classificação granulométrica (escala ABNT) é uma argila arenosa, sendo, também, classificada como CL (Classificação Unificada) e como A-7-6 (Classificação BPR-AASHTO).

A amostra não laterítica (D-C-S) classifica-se, conforme NOGAMI e VILLIBOR (1978), como um solo saprolítico de diabásio. Apresenta, em sua composição mineralógica, quartzo, caulinita e hematita. Pela classificação granulométrica (escala ABNT) é uma argila siltosa, classificando-se como um OH, segundo a Classificação Unificada, e como um A-7-6, segundo a Classificação BPR-AASHTO.

A maior parte das informações referentes às características e propriedades das amostras ensaiadas foi obtida das seguintes dissertações de mestrado realizadas nos Departamentos de Transportes e Geotecnia da EESC-USP: CORRÊA (1975), LIMA (1981), YSHIBA (1984), FABBRI (1986), FERREIRA (1987) e SERRA (1987).

## 7.2 - Ensaio para Determinação da Massa Específica dos Sólidos:

A massa específica dos grãos de um solo é utilizada, no ensaio de granulometria por sedimentação, tanto no cálculo das porcentagens de material em suspensão quanto na determinação dos diâmetros das partículas do solo em suspensão. O método de ensaio é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): "Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica - NBR 6508 (1984)".

Para a primeira fase dos ensaios de sedimentação, a massa específica dos sólidos foi determinada seguindo-se apenas parcialmente a NBR 6508 (1984), adotando-se, complementarmente, procedimentos particulares já consagrados pelo uso dentro do Laboratório de Estradas do STT. Dentre esses destacam-se:

- utilização de 150g de solo úmido, independentemente de sua granulometria;
- colocação do material dentro do picnômetro sem dispersão prévia em água destilada;
- obtenção, em um único ensaio, de vários valores de massa específica, apenas com o aquecimento ou resfriamento do picnômetro com a suspensão;

- não indicação do processo de preparação da amostra (se com secagem prévia ao ar ou sem secagem prévia), embora seja tradicional a secagem prévia ao ar.

Exemplos de determinação da massa específica dos sólidos, conforme os procedimentos acima descritos, encontram-se nos Anexos A.1 a A.4, onde são apresentados os ensaios realizados com as amostras (S), (R), (J) e (B).

Com base em considerações já efetuadas nos capítulos anteriores, especialmente no que trata das condições requeridas para a utilização da Lei de Stokes no ensaio de sedimentação, constata-se que os procedimentos adotados pelo Laboratório de Estradas do STT não são suficientes, existindo ainda aspectos a serem investigados. Dentre esses, destacam-se:

- ensaio de material com mesma granulometria do material ensaiado por sedimentação, uma vez que minerais diferentes podem apresentar tamanho, forma e massa específica diferentes. Assim, o material a ser ensaiado deveria ser passado na peneira de 0,15mm (#100) e não na de 4,8mm (#4), como recomenda a NBR 6508 (1984);

- ensaio de material em sua umidade natural, pois a secagem do solo pode provocar aglutinação de argilominerais que, além de resultar em uma granulometria mais grossa do que a real (partículas individualizadas), também reduz a massa específica da amostra, dado que o volume de um flóculo é maior que a soma dos volumes das partículas que o formam;

- utilização de dispersão mecânica (por 20 minutos, por exemplo) e de defloculante químico (hexametáfosfato de sódio), pois as partículas de solo, quando floculadas, apresentam menor massa específica do que se tivessem sido ensaiadas no estado disperso.

Tais alterações, que visam a investigação dos pontos julgados incompletos, exigem procedimentos adicionais, como a calibração de picnômetro com solução de água destilada mais defloculante químico (Anexos B.1 e B.2). Por propiciarem a determinação de massa específica apenas das partículas com dimensões da ordem de grandeza das ensaiadas por sedimentação, têm seu uso restrito aos cálculos do ensaio de sedimentação. Além disso, possibilitam a determinação de mais de um valor de massa específica por ensaio apenas quando há um resfriamento da suspensão (e, conseqüentemente, diminuição de volume, que permite a adição de água destilada com conta-gotas), já que o aquecimento, com posterior retirada da água excedente à marca do picnômetro, não é possível, pois também haveria a retirada de partículas da suspensão.

Foram ensaiados com as alterações propostas, inicialmente, os solos de Ribeirão Preto e do Broa (Anexos A.5 e A.6). Os valores de massa específica dos sólidos resultantes

destas modificações foram ligeiramente superiores aos obtidos pelos procedimentos tradicionais. Para o solo de Ribeirão Preto, na primeira determinação, obteve-se uma massa específica dos sólidos igual a  $3,201\text{g/cm}^3$ , enquanto que, pelo processo proposto, o valor subiu para  $3,250\text{g/cm}^3$ . Para o solo do Broa, os valores obtidos foram, respectivamente,  $2,683\text{g/cm}^3$  e  $2,715\text{g/cm}^3$ . Embora, percentualmente, a diferença seja pequena, optou-se pela extensão desses procedimentos aos ensaios de massa específica dos sólidos realizados na segunda etapa de experimentação (apresentados nos Anexos A.7 a A.11), uma vez que as operações adicionais são de fácil incorporação à rotina do ensaio.

### 7.3 - Ensaio de Granulometria:

Existem várias normalizações de métodos para a análise granulométrica de solos em nosso país, dentre as quais destacam-se a NBR 7181 (1984) - Solo - Análise Granulométrica, da ABNT, e as normas de organismos rodoviários, como o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP). Além dessas normas, procedimentos particulares são adotados por laboratórios de reconhecida capacitação e experiência, como o Laboratório de Estradas e o Laboratório de Geotecnia da EESC-USP.

Numa primeira fase de ensaios (continuação do trabalho desenvolvido por FERNANDES JR., SÓRIA e FABBRI (1984)), em que se procurou avaliar a influência do tempo de dispersão mecânica e do tipo de defloculante químico, os ensaios de granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação) foram realizados, a menos da variação dos fatores em estudo, segundo procedimentos apresentados por STANCATI et alii (1981), os quais são adotados pelos Laboratórios de Estradas e de Geotecnia da EESC-USP. Esses procedimentos diferem das NBR 7181 (1984) e DNER - ME 51-64 (1964) nos seguintes pontos:

- a sedimentação é realizada com o material passado na peneira de  $0,15\text{mm}$  e não na peneira de  $2,0\text{mm}$ , como nas NBR 7181 e DNER-ME 51-64;
- a sedimentação é realizada com amostras de solo que contenham de 40 a 70g de sólidos (em função de serem mais argilosas ou mais arenosas, respectivamente), em vez de 70 a 120g, como nas NBR 7181 e DNER 51-64;
- o período de repouso da amostra em solução com o defloculante é de no mínimo 6 horas, enquanto as NBR 7181 e DNER 51-64 recomendam um repouso mínimo de 12 horas;

- o tempo de dispersão usualmente adotado é de 10 minutos, devendo ser sempre superior a 5 minutos; as normalizações, por outro lado, impõem tempo mínimo de dispersão igual a 15 minutos (NBR 7181) ou fornecem os valores desses tempos em função do Índice de Plasticidade do solo (DNER-ME 51-64);

- embora permita a secagem da amostra à sombra, há recomendações no sentido de, se possível, ensaiar o material em suas condições naturais; a ABNT e o DNER têm normas específicas de preparação de solos para ensaios de caracterização, que recomendam se efetuar sempre a secagem ao ar. Cabe aqui ressaltar que, normalmente, nos Laboratórios de Estradas e de Geotecnia da EESC-USP, os ensaios são realizados, como o foram na primeira etapa de experimentos para este trabalho, com amostras secas ao ar.

Para uma segunda fase de experimentos, os ensaios foram efetuados, a menos das alterações para avaliação dos fatores em estudo, em conformidade com a NBR 7181 (1984). De acordo com a configuração de experimentos adotada ("ensaios fatoriais"), que possibilitou a avaliação dos fatores com um menor número de ensaios, foram analisados os efeitos de:

- secagem prévia da amostra;
- massa de solo ensaiado;
- perturbação causada pelas leituras do densímetro;
- diâmetro das partículas ensaiadas;
- tempo de dispersão mecânica.

Procurou-se, desta forma, submeter as nossas normas técnicas a uma investigação em seus pontos mais controversos, já que muitas dessas dúvidas vêm de longa data e tendem a se tornar mais numerosas, em função, principalmente, de simplificações recentemente adotadas por normas estrangeiras. Estas simplificações não atentam para os erros teóricos (como por exemplo, a utilização da Lei de Stokes para diâmetros fora do intervalo de sua validade) e nem para a inadequabilidade quando da utilização de outros tipos de solos que não os de regiões temperadas.

#### 7.4 - Programação dos Ensaios de Sedimentação pelo Método do Densímetro:

##### 7.4.1 - Primeira fase

Para a primeira etapa dos experimentos, foram selecionados quatro tipos de solos, dois argilosos e dois arenosos, respectivamente das seguintes localidades: Santa Bárbara D'Oeste-SP, Ribeirão Preto-SP, Jardim Cruzeiro do Sul e "Linha do Broa, estas últimas no município de São Carlos-SP.

Foram escolhidos quatro dos defloculantes mais utilizados em nosso meio técnico e dos mais citados na literatura: Hexametáfosfato de Sódio, Silicato de Sódio, Soda Cáustica e Trifosfato de Sódio. A inclusão da soda cáustica deve-se ao fato de a mesma, embora pouco recomendada por questões de eficiência, ser muito utilizada por questões econômicas. Como agravante à menor eficiência da soda cáustica, a concentração com que ela é utilizada, por não estar normalizada, varia de laboratório para laboratório. No lugar da fixação da concentração em gramas de soluto por litro de solução, simples e correta, alguns laboratórios adotam a igualdade de densidade entre a solução de soda cáustica e a solução de silicato de sódio. Em outras palavras, deixa-se de fixar a concentração, pois a densidade varia com a temperatura, e também não se consegue equivalência de eficiência, pois a igualdade de densidade entre duas soluções quimicamente nada significa.

As concentrações de defloculantes utilizadas nos ensaios estão apresentadas no Quadro 7.02. Cabe a observação de que foram calculadas de maneira a resultarem em um mesmo número de equivalentes-gramas que a solução de hexametáfosfato de sódio normalizada (45,7g/l). Em termos de concentração de soluções, é a Normalidade que representa o número de equivalentes-gramas por unidade de volume da solução. Assim, as concentrações de defloculantes adotadas apresentam a mesma Normalidade. No Quadro 7.02 pode-se observar, também, que as concentrações em (g/l), utilizadas para o Silicato de Sódio e para o Trifosfato de Sódio, são superiores aos valores constantes em normas.

DEFLOCULANTE	CONCENTRAÇÃO ADOTADA(g/l)	NORMALIDADE (N)	CONCENTRAÇÃO DE NORMA (g/l)
Hexametáfosfato de sódio	45,70	0,448	45,7
Silicato de sódio	27,35	0,448	26,0
Soda cáustica	17,92	0,448	-
Trifosfato de sódio	32,96	0,448	18,8

Com relação aos tempos de dispersão mecânica, são vários os fixados em normas ou recomendados por publicações técnicas. Há, inclusive, tentativas de correlacioná-los com os índices de consistência. Neste trabalho, em função de toda a pesquisa bibliográfica desenvolvida, optou-se por trabalhar com quatro diferentes tempos de dispersão: 5, 10, 15 e 20 minutos.

Para avaliação da eficiência dos diferentes tipos de defloculantes e dos diferentes tempos de dispersão mecânica, em cada uma das amostras escolhidas, os ensaios foram realizados obedecendo a uma configuração fatorial. Ou seja, cada amostra de solo foi ensaiada, para cada um dos defloculantes, com todos os tempos de dispersão. Esta configuração fatorial de ensaios resultou em um total de ( $4^3 =$ ) 64 ensaios. Para uma melhor visualização da programação dos ensaios da primeira fase, apresenta-se o Quadro 7.03.

Para a análise estatística dos ensaios, considerou-se como valor numérico mais representativo dos efeitos dos fatores em análise (tipos de defloculantes e tempos de dispersão), a exemplo de CHU e DAVIDSON (1954) e WINTERMYER e KINTER (1954), a porcentagem de partículas com diâmetro menor que 0,002mm (porcentagem de argila). Cabe lembrar que a fração menor que 0,002mm é adotada como fração argila pela maioria dos trabalhos e pesquisas geotécnicas embora, para a ABNT, a fração argila seja composta de partículas menores que 0,005mm.

As Figuras 7.01 a 7.09 permitem uma análise prévia dos fatores em estudo: nas Figuras 7.01 a 7.04 constata-se, claramente, o menor poder defloculante da soda cáustica, além da estranha forma das curvas granulométricas correspondentes a este defloculante; as Figuras 7.05 a 7.08 mostram o ganho na defloculação das amostras em razão do acréscimo no tempo de dispersão; finalmente, a Figura 7.09, para cada uma das amostras ensaiadas, apresenta as maiores diferenças de resultados observadas. Na Figura 7.09, além das grandes discrepâncias de resultados, fica claro, também, a influência do tempo de dispersão e do tipo de defloculante químico: para todas as amostras, a soda cáustica, com 5 minutos de dispersão, resultou em uma defloculação muito inferior à proporcionada pelos demais tratamentos.

#### 7.4.2 - Segunda fase

Para a segunda etapa de ensaios, conforme relatado anteriormente, foram selecionadas cinco amostras de solos, provenientes da Rodovia Castelo Branco (município de Barueri-SP) e de Dois Córregos-SP. Nesta segunda fase de pesquisas, baseada em algumas conclusões da primeira etapa de ensaios e nos estudos relatados nos capítulos anteriores, procurou-se avaliar os seguintes aspectos:

- temperatura de secagem da amostra: em virtude dos solos poderem apresentar mudanças de comportamento praticamente irreversíveis, em função da temperatura de secagem da amostra, várias publicações recomendam que o ensaio de sedimentação seja realizado com amostras secas ao ar e à sombra. Considerando-se que as condições de secagem das amostras, principalmente nos laboratórios de campo, fogem em muito do normalizado e recomendado, aproximando-se, dadas as nossas características climáticas, da condição de secagem em estufa, procurou-se avaliar três condições: secagem em estufa; secagem ao ar; amostra na umidade natural;

QUADRO 7.03: CONFIGURAÇÃO FATORIAL DA PRIMEIRA FASE DE ENSAIOS

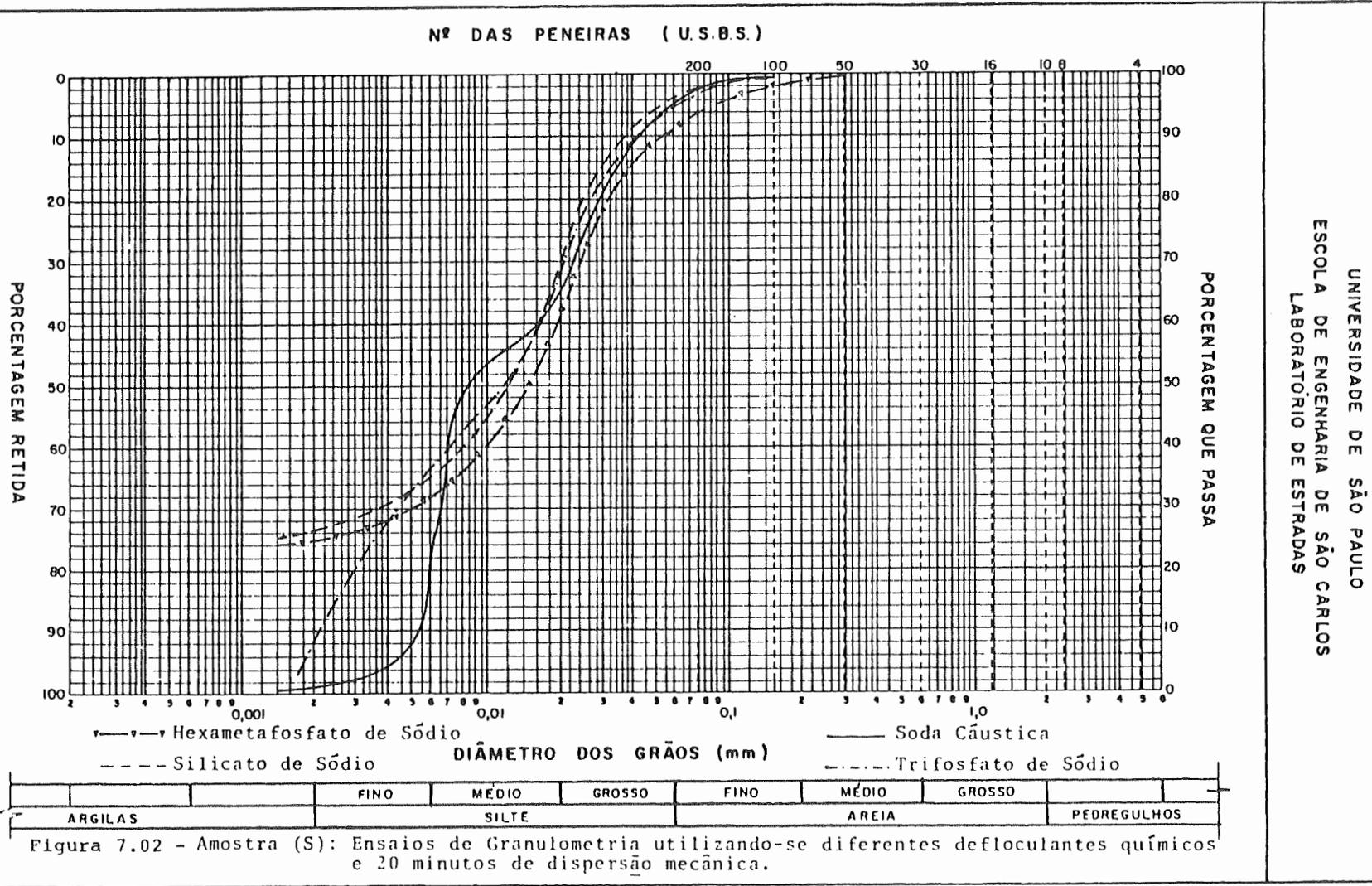
(Porcentagem em Peso de Partículas Menores que 0,002mm)

AMOSTRAS	HEXAMETAFOSFATO DE SÓDIO (d <sub>1</sub> )				SILICATO DE SÓDIO (d <sub>2</sub> )				SODA CAUSTICA (d <sub>3</sub> )				TRIFOSFATO DE SÓDIO (d <sub>4</sub> )				TOTAL
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	
(S)	21	24	24	25	25	27	22	26	1	0	0	1	4	5	4	8	217
(R)	36	43	47	44	26	47	49	51	5	9	10	12	23	25	38	48	523
(J)	19	20	19	20	19	23	22	23	21	21	22	20	22	21	23	21	336
(B)	20	22	22	22	21	24	23	24	17	20	23	21	20	21	22	22	344
TOTAIS	96	109	112	111	91	121	116	124	44	50	55	54	69	82	87	99	1420

Onde:

- t<sub>1</sub> = 5 minutos;
- t<sub>2</sub> = 10 minutos;
- t<sub>3</sub> = 15 minutos;
- t<sub>4</sub> = 20 minutos de dispersão mecânica.





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 LABORATÓRIO DE ESTRADAS

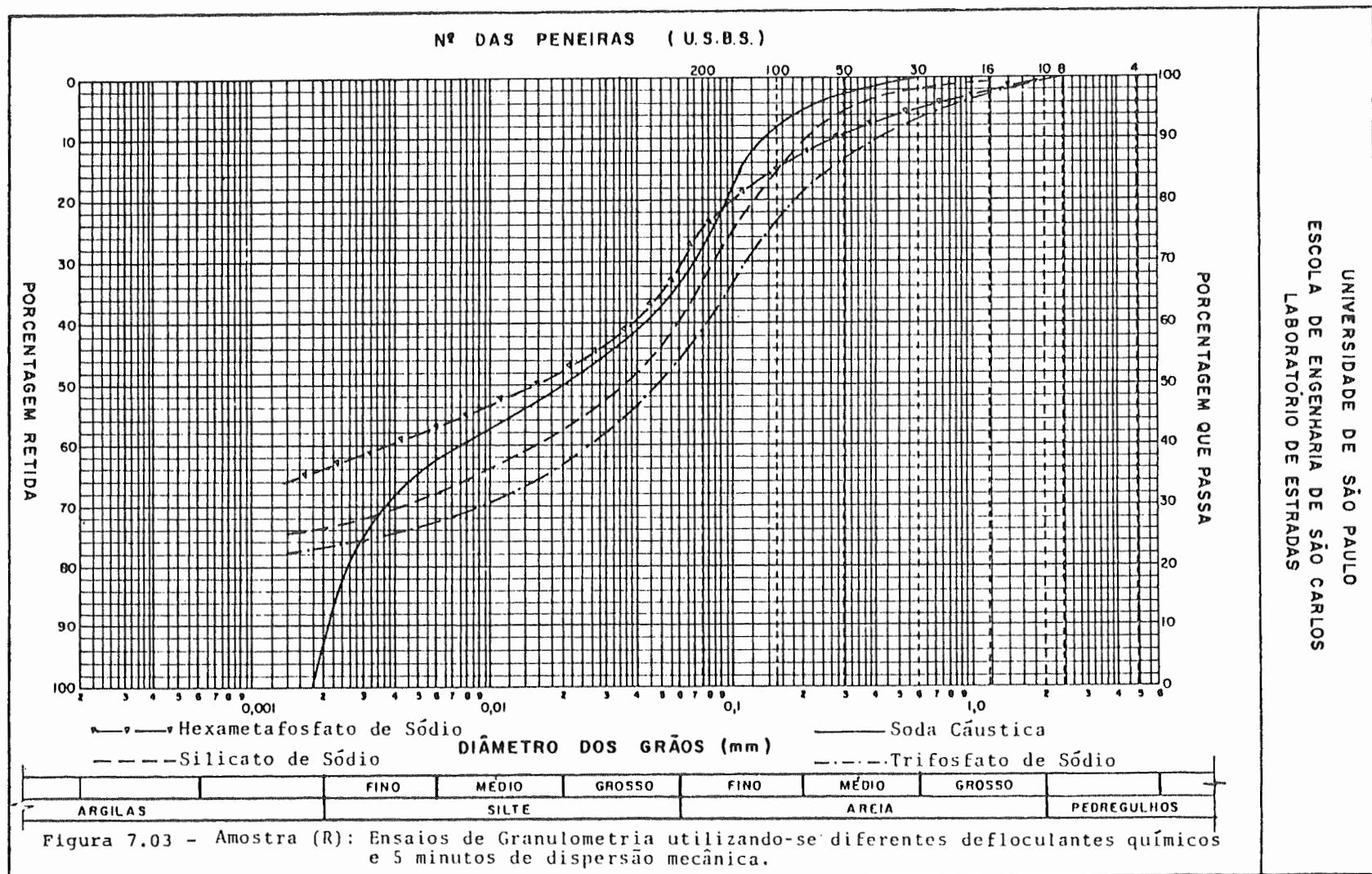
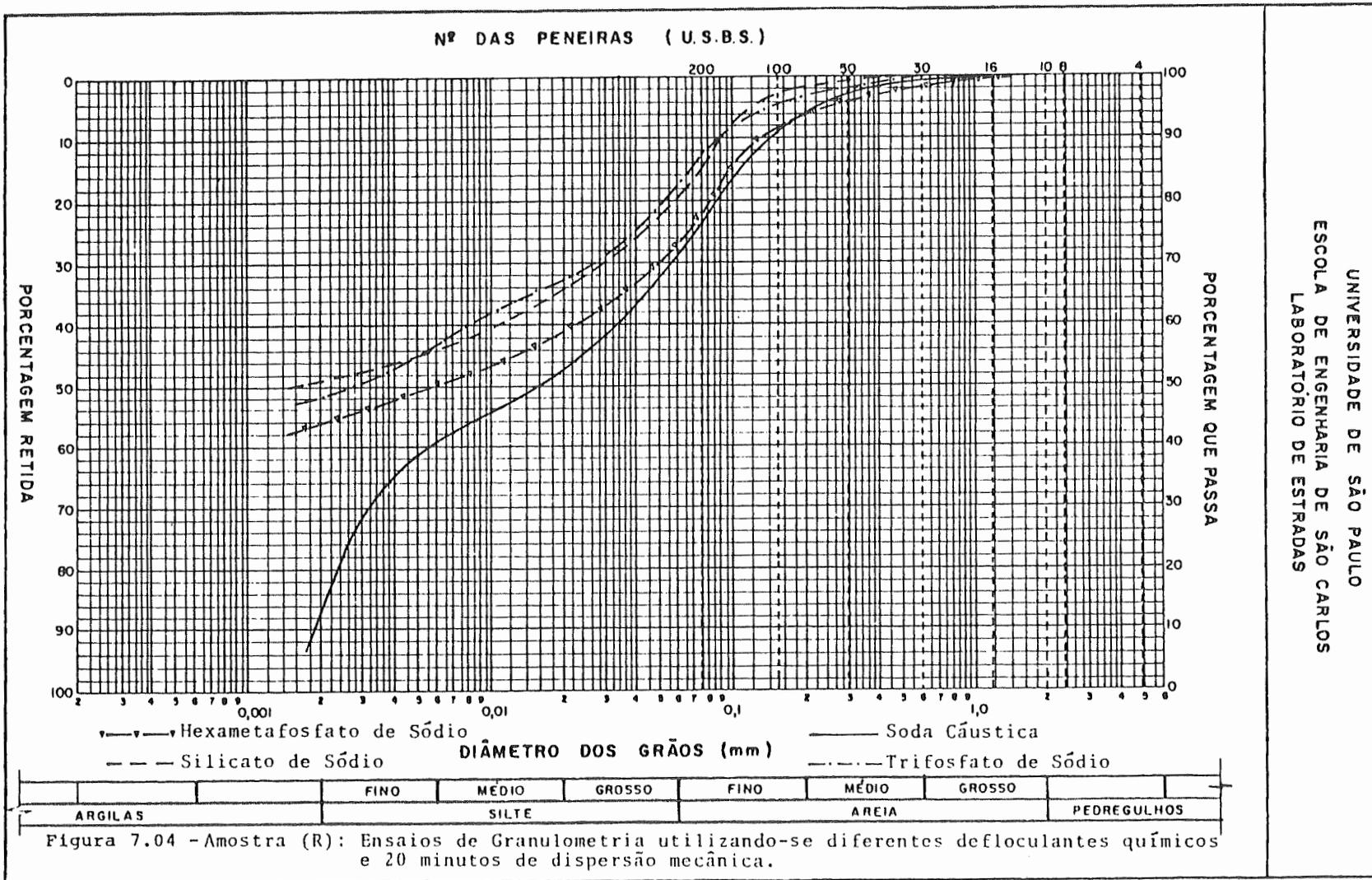


Figura 7.03 - Amostra (R): Ensaio de Granulometria utilizando-se diferentes defloculantes químicos e 5 minutos de dispersão mecânica.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 LABORATÓRIO DE ESTRADAS



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 LABORATORIO DE ESTRADAS

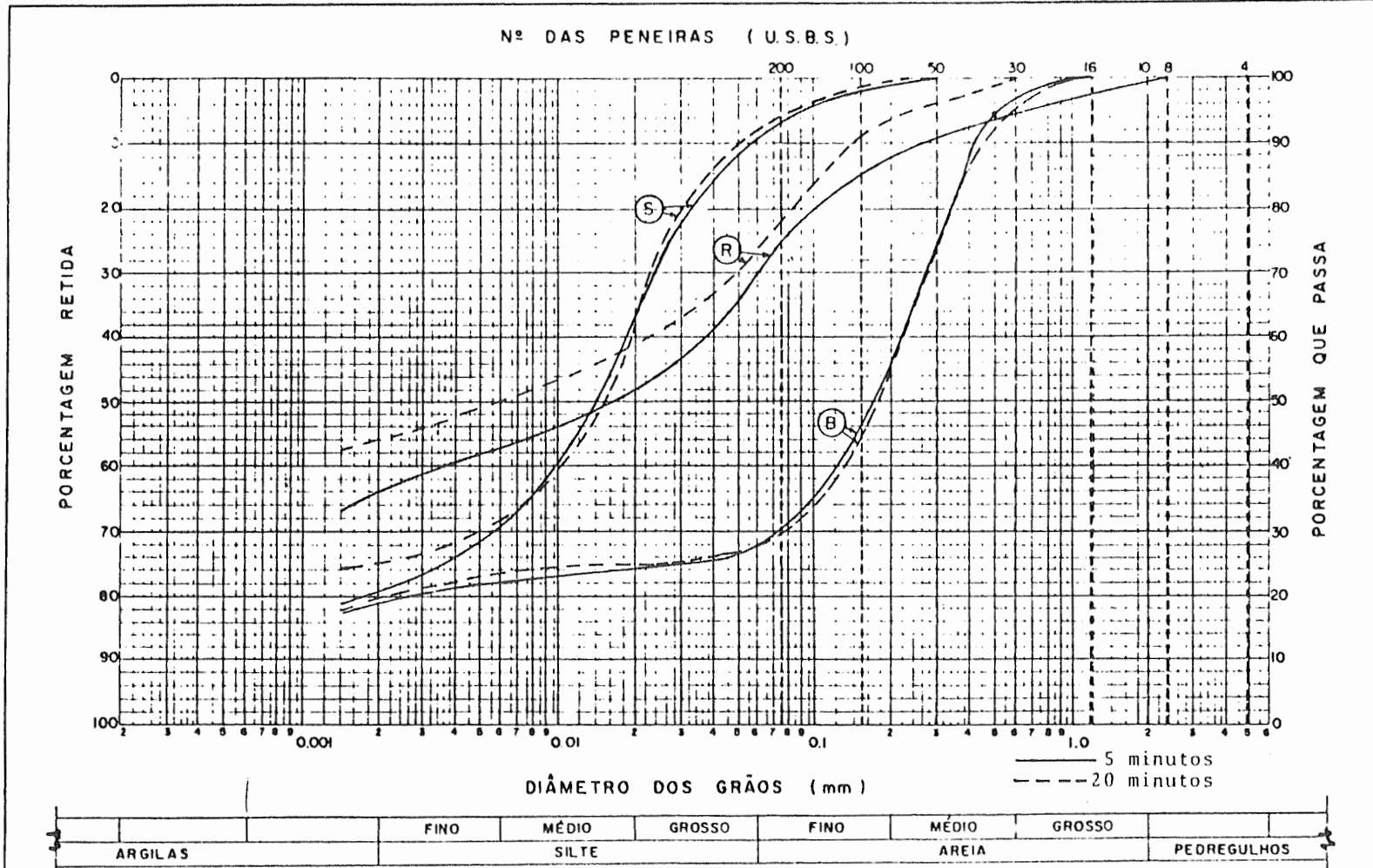


Figura 7.05 - Amostras (S), (R) e (B): Ensaios de Granulometria utilizando-se Hexametáfosfato de Sódio e Tempos de Dispersão 5 e 20 minutos.

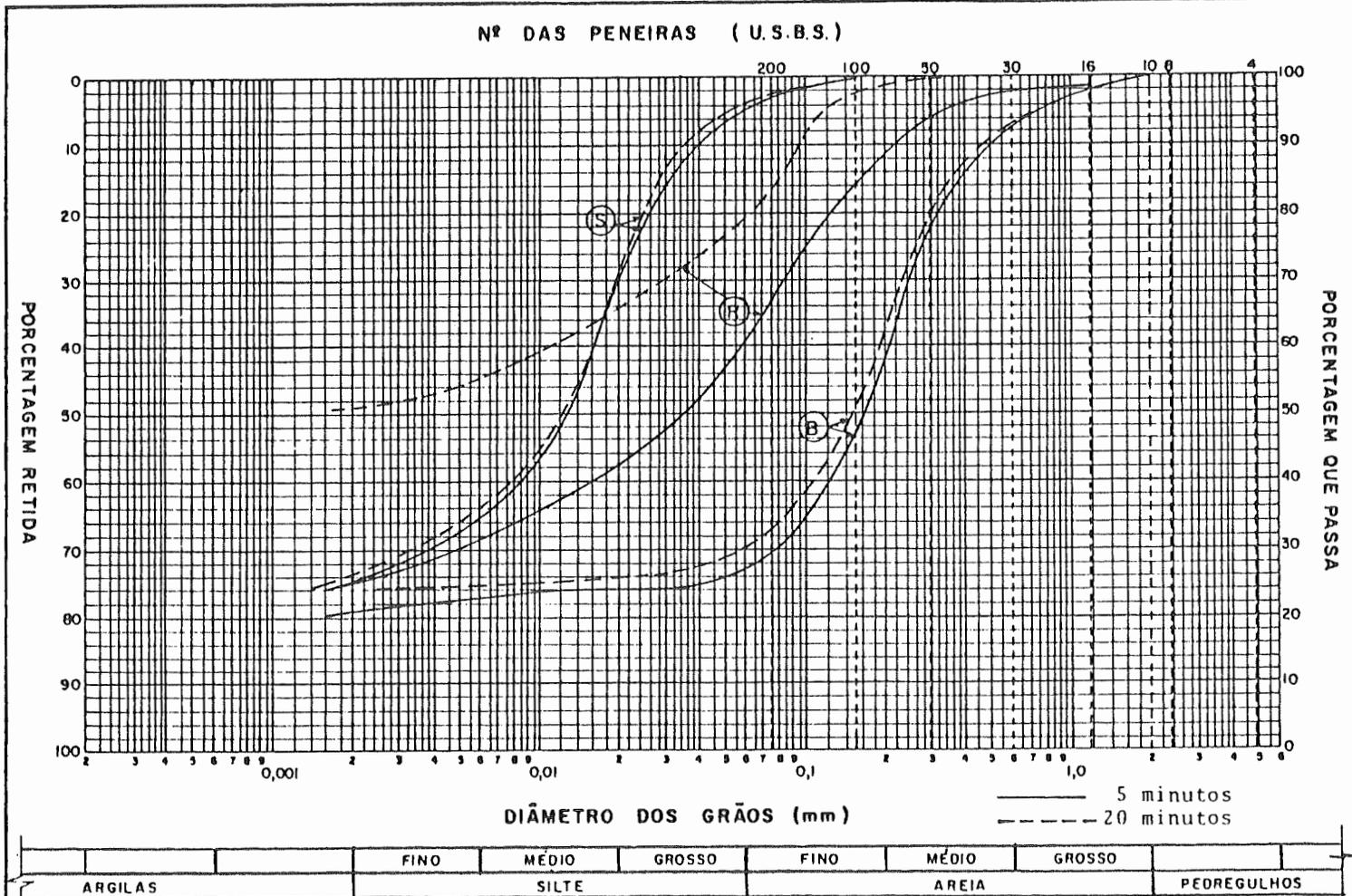


Figura 7.06 - Amostras (S), (R) e (B): Ensaio de Granulometria utilizando-se Silicato de Sódio e Tempos de Dispersão 5 e 20 minutos.

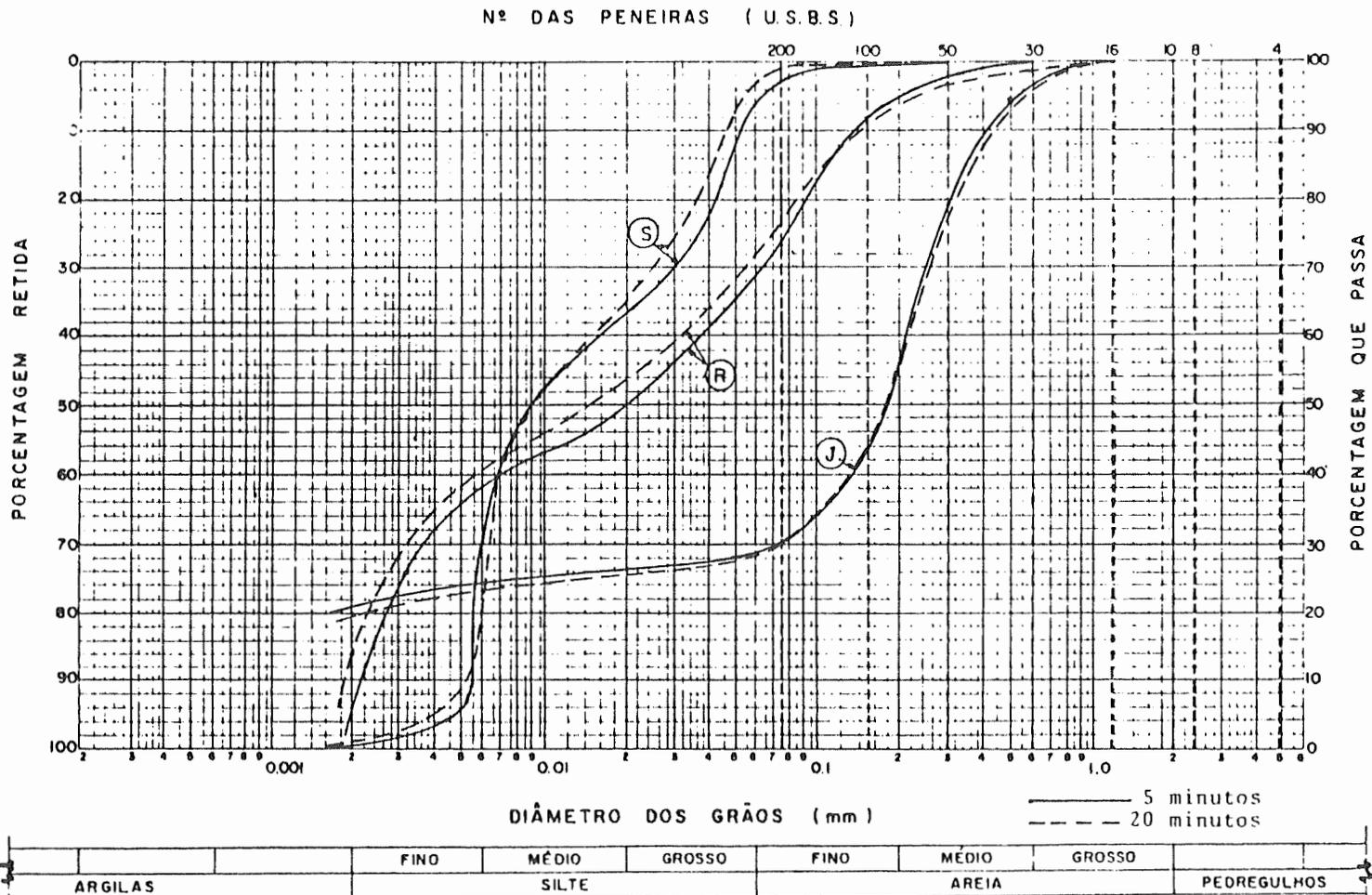


Figura 7.07 - Amostras (S), (R) e (J): Ensaio de Granulometria utilizando-se Soda Cáustica e Tempos de Dispersão 5 e 20 minutos.

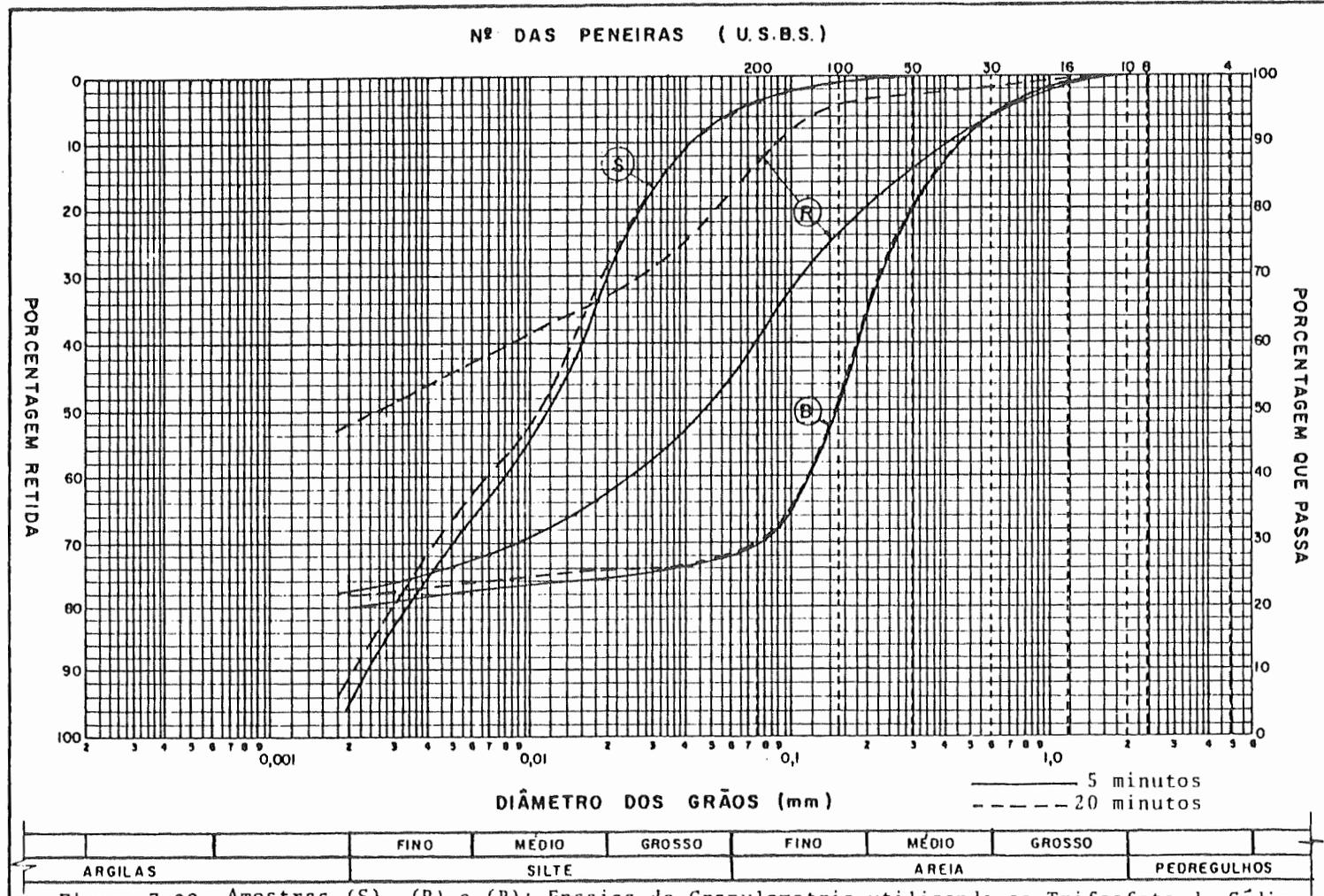


Figura 7.08 - Amostras (S), (R) e (B): Ensaios de Granulometria utilizando-se Trifosfato de Sódio e Tempos de Dispersão 5 e 20 minutos.

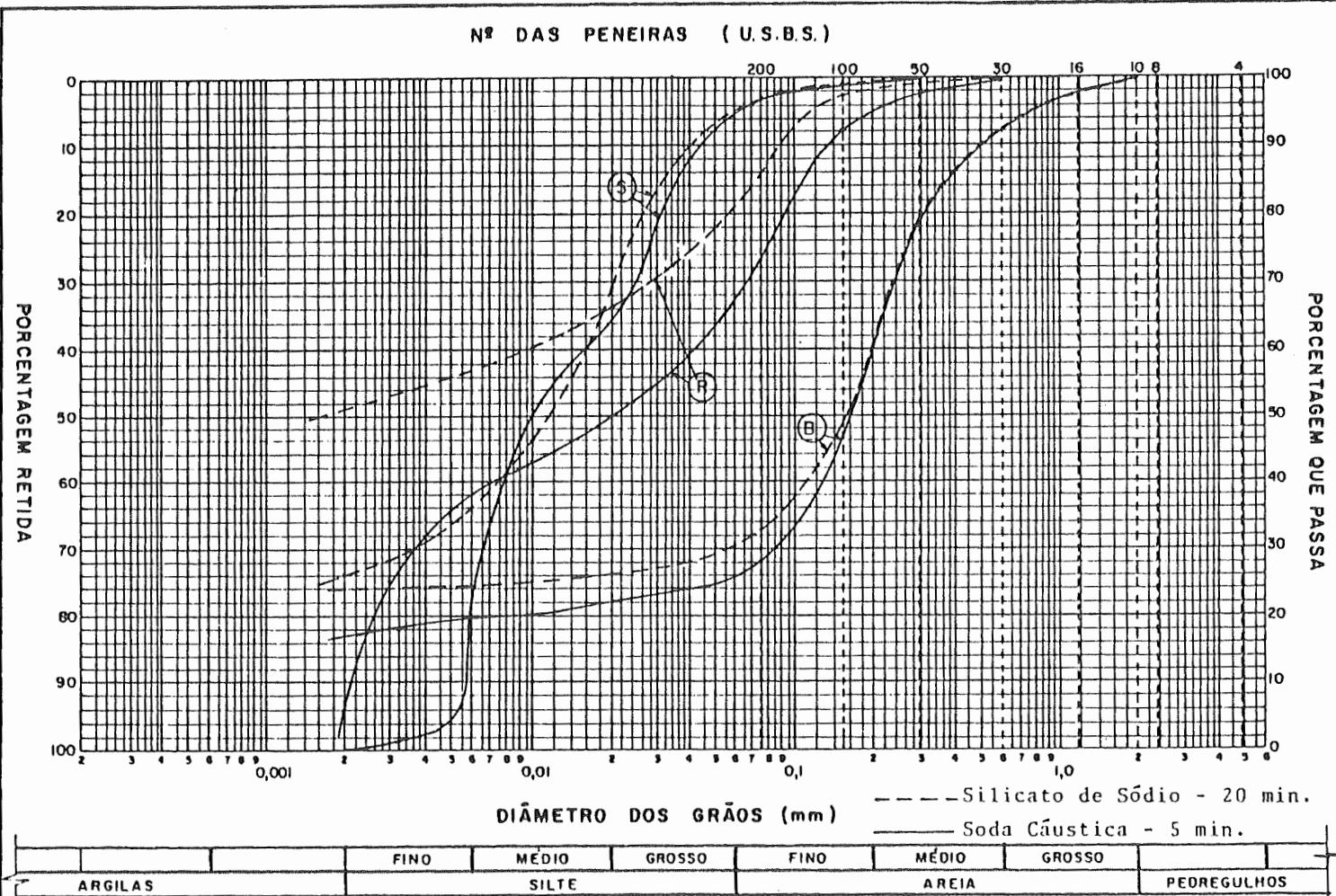


Figura 7.09 - Amostras (S), (R) e (B): Ensaio de Granulometria que apresentaram maiores discrepâncias de resultados.

- massa de material seco ensaiado: embora as normas técnicas recomendem que se trabalhe com 70 a 90 gramas para os solos argilosos e 90 a 120 gramas para os solos arenosos, observações acerca da validade e das limitações do ensaio de sedimentação apresentam o valor de 50g como limite para a massa seca a ser ensaiada, pois concentrações de partículas superiores a esse valor invalidariam as hipóteses de cálculo segundo a Lei de Stokes. CAMBEFORT (1971), por exemplo, recomenda a concentração de 20g/l, e somente de material passado na peneira de 0,1mm. Assim, foram ensaiadas amostras com dois valores de massa de material seco, um dentro do intervalo normalizado e outro no intervalo de 30 a 50g;

- dimensões do material a ser ensaiado: as normas brasileiras (ABNT, DNER, DER) permitem que o ensaio de sedimentação seja realizado com o material passado na peneira de abertura de 2,0mm (# 10). Existem, desde há muitos anos, recomendações no sentido de que partículas com estas dimensões causam grande turbulência ao sedimentarem, podendo comprometer os resultados dos ensaios. Aliado a esta consideração, tem-se outro agravante: o limite de validade da Lei de Stokes (considerando-se uma massa específica dos sólidos em torno de 2,700g/cm<sup>3</sup>) é de 0,1 a 0,2 mm. A partir deste diâmetro, mesmo que se tenha apenas uma partícula em sedimentação, a velocidade de queda da partícula obedece à Lei de Impacto (enunciada e discutida anteriormente). Neste trabalho, para verificação desse ponto de dúvida, ensaiaram-se as amostras utilizando-se os materiais passados na peneira de 2,0mm (# 10) e na peneira de 0,15 mm (# 100);

- leituras iniciais: em função de as leituras iniciais (30s, 1min e 2min) apresentarem menor precisão, podendo causar descontinuidade no traçado da curva granulométrica, e, principalmente, por exigirem que o densímetro permaneça imerso na suspensão por um tempo considerável, fazendo com que haja deposição de partículas sobre o bulbo, procurou-se avaliar os ensaios com e sem estas leituras;

- tempo de dispersão: embora já houvesse sido avaliado na primeira etapa dos experimentos, também foi incluído nesta fase, sendo considerados, agora, apenas os tempos de 10 e 20 minutos.

Para análise estatística dos ensaios, consideraram-se dois valores numéricos significativos: a porcentagem de partículas menores que 0,002mm (fração argila) e a porcentagem de partículas menores que 0,075mm (fração silte + argila). Cabe lembrar, novamente, que os limites destas frações estão de acordo com as escalas granulométricas mais utilizadas, embora sejam diferentes dos limites adotados pela ABNT. Um resumo da programação de ensaios executada está apresentado nos Quadros 8.08 e 8.09, do capítulo seguinte.

Com relação ao defloculante químico utilizado, optou-se pelo hexametáfosfato de sódio, que foi o que apresentou maior dispersão das amostras nos ensaios iniciais. No entanto, realizou-se, com apenas uma das amostras (D-C-S), uma série de ensaios utilizando-se, como defloculante, a soda cáustica. A utilização da soda cáustica foi devida ao fato de que o hexametáfosfato de sódio, por ser mais eficiente, poderia minorar os efeitos dos outros fatores, dificultando a análise.

Outras verificações foram efetuadas na segunda fase de experimentos, agora não mais obedecendo à configuração fatorial, mas visando apenas uma comparação direta dos resultados. Neste sentido, foram realizados os seguintes ensaios de sedimentação com a amostra (D-C-L):

- 9 repetições, visando a observação da reprodutibilidade do ensaio: seguiu-se a NBR- 7181 (1984), utilizando-se, porém, o material passado na peneira de 0,15 mm (# 100). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7.10;

- não utilização de defloculante químico e nem de dispersão mecânica: a comparação deste ensaio, com a média dos resultados segundo procedimentos normalizados, está apresentada na Figura 7.11;

- não utilização de defloculante químico, mas com dispersão mecânica: a Figura 7.12 apresenta a comparação deste ensaio com a média dos ensaios normalizados;

- utilização de defloculante químico e não utilização de dispersão mecânica: a comparação deste ensaio com a média dos resultados dos ensaios segundo procedimentos normalizados, está apresentada na Figura 7.13;

- colocação e retirada do densímetro para se fazer a leitura: comparou-se uma leitura após 8 horas, sem serem feitas leituras prévias, com os procedimentos normalizados, que apresentam em média 10 leituras anteriores à de 8 horas. A Figura 7.14 apresenta o resultado obtido.

Da simples observação das figuras, pode-se constatar que:

- o ensaio de sedimentação pelo método do densímetro apresenta boa reprodutibilidade de resultados;

- a defloculação química e a dispersão mecânica condicionam, sobremaneira, os resultados dos ensaios de sedimentação: pode-se passar, por exemplo, de uma argila arenosa a uma areia média a grossa quando estes dois procedimentos de dispersão são ignorados;

- é mais acentuado o efeito da defloculação química do que o da dispersão mecânica, embora para esta última as diferenças obtidas também tenham sido consideráveis (aproximadamente 10% de diferença no teor de argila);

- a influência das leituras prévias nos resultados pode, a priori, ser considerada pequena, dado que a leitura após 8 horas (sem leituras anteriores) diferiu em menos de 2% da curva obtida segundo sequência de leituras normalizadas.

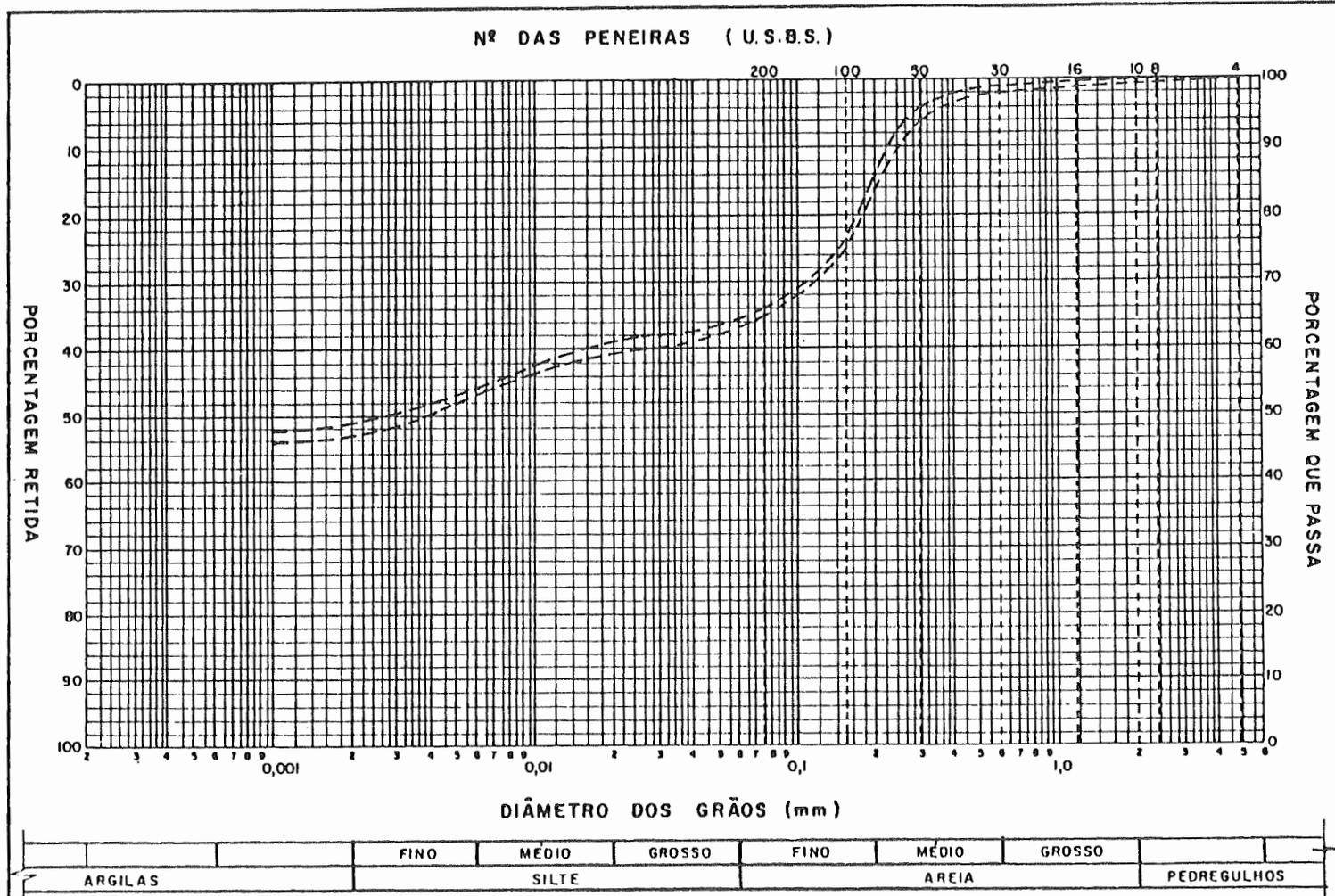
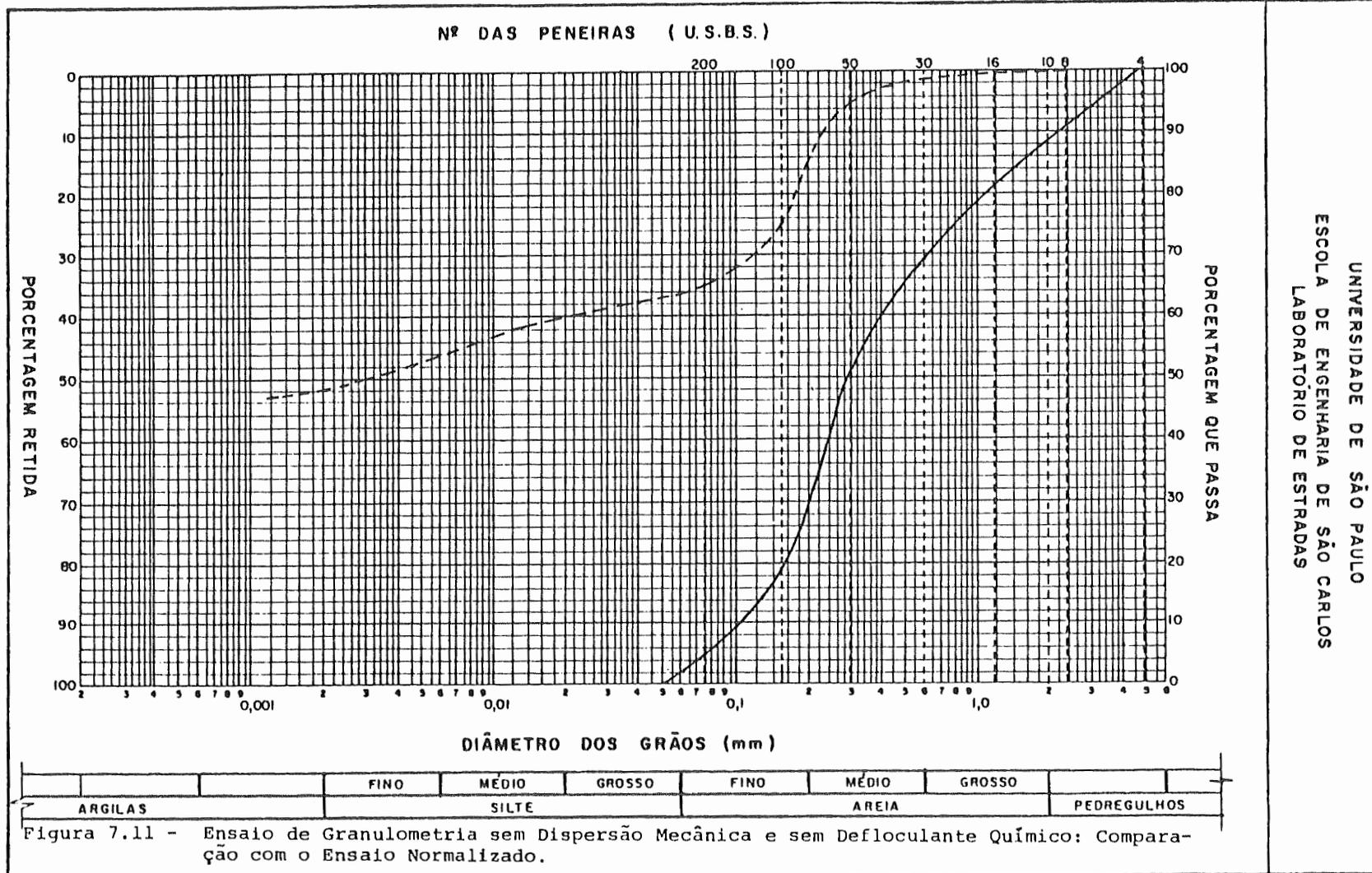
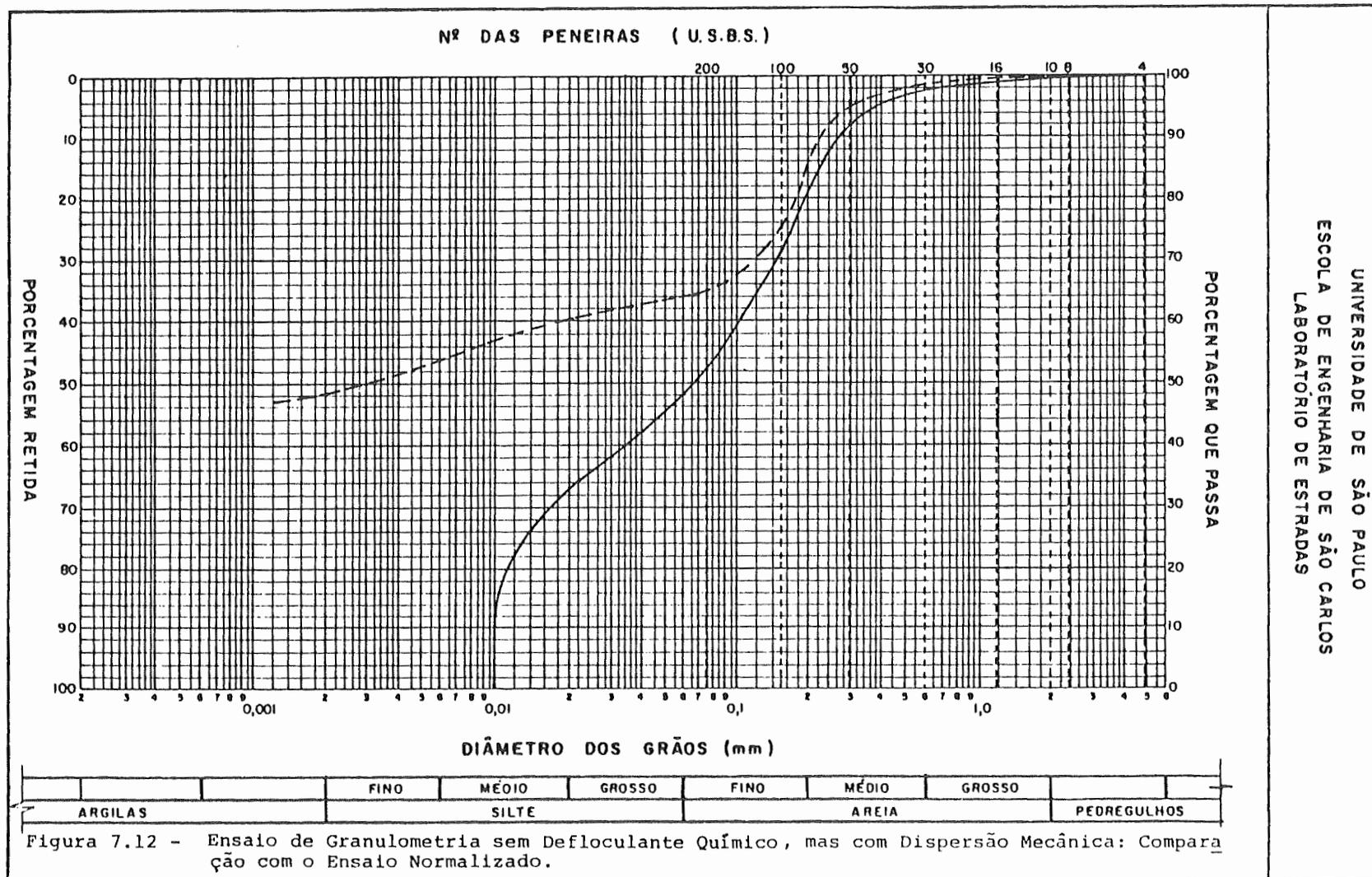


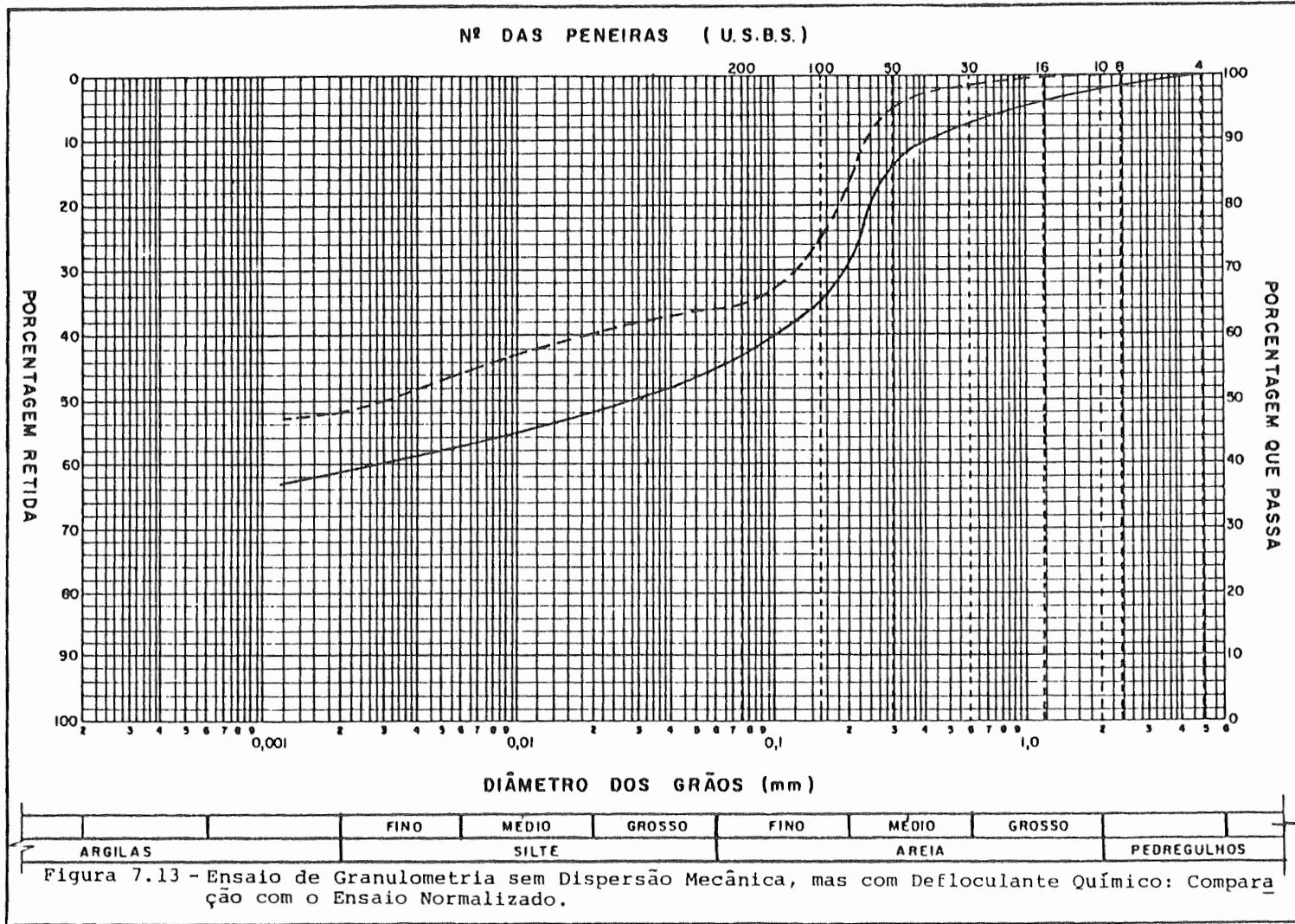
Figura 7.10 - Reprodutibilidade dos Resultados dos Ensaios de Sedimentação: Faixa de Resultados após 9 repetições.





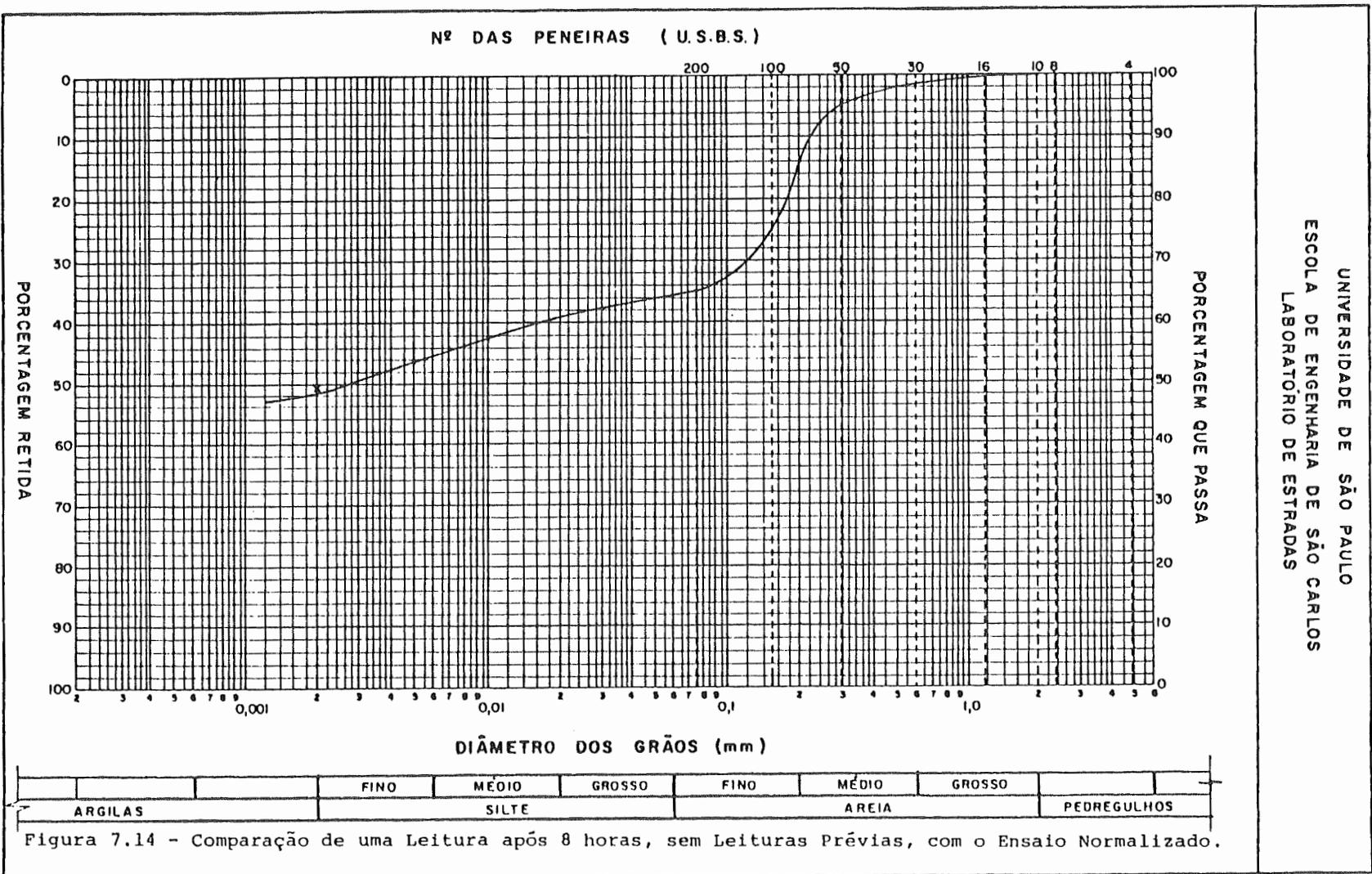
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 LABORATÓRIO DE ESTRADAS

Figura 7.12 - Ensaio de Granulometria sem Defloculante Químico, mas com Dispersão Mecânica: Comparação com o Ensaio Normalizado.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 LABORATÓRIO DE ESTRADAS

Figura 7.13 - Ensaio de Granulometria sem Dispersão Mecânica, mas com Defloculante Químico: Comparação com o Ensaio Normalizado.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 LABORATORIO DE ESTRADAS

Figura 7.14 - Comparação de uma Leitura após 8 horas, sem Leituras Prévias, com o Ensaio Normalizado.

## CAPITULO VIII - ANALISE ESTATISTICA DOS ENSAIOS REALIZADOS

Anteriormente aos cálculos e discussões, deve-se destacar que a análise estatística dos experimentos realizados, em especial os "ensaios fatoriais", foi baseada em SNEDECOR (1956), YATES (1957), COCHRAN e COX (1957), COX (1958), MILLER e FREUND (1967), YATES (1970), HOLMAN (1971), LEAVER e THOMAS (1974), PARADINE e RIVETT (1974) e BOX, HUNTER e HUNTER (1978).

### 8.1 - Primeira Etapa de Experimentação:

Para os estudos estatísticos dos ensaios realizados na primeira fase de experimentos, considerou-se, como resultado numérico mais significativo, a porcentagem de partículas menores que 0,002mm, obtida de cada um dos ensaios de sedimentação realizados. Da simples observação do Quadro 7.03 e das Figuras 7.01 a 7.09, percebe-se que houve maior diferenciação de resultados (maior influência dos fatores em estudo) para os solos argilosos - amostras (S) e (R) - do que para os solos arenosos - amostras (J) e (B). Dessa constatação resulta que as análises estatísticas podem se dar por "blocos casualizados" (consideração em separado dos solos argilosos e arenosos) ou por "experimentos fatoriais" (inclusão simultânea de todas as combinações).

#### 8.1.1 - Análise como blocos casualizados

Este tipo de delineamento caracteriza-se por apresentar controle local, representado pelos blocos, sendo que cada um dos blocos recebe todos os tratamentos. Nos experimentos geotécnicos, geralmente, cada bloco é constituído por uma determinada amostra de solo. O controle local produz, sempre, uma diminuição do número de graus de liberdade para o resíduo, o que é um mal. Quando, porém, há uma grande diminuição da variância residual, como em geral acontece, ganha-se em precisão.

No presente trabalho, quando do estudo dos tipos de defloculantes, os blocos serão os quatro diferentes tempos de dispersão (5, 10, 15 e 20 minutos); para o estudo dos tempos de dispersão, por outro lado, os blocos passarão a ser os quatro defloculantes químicos (hexametáfosfato de sódio, silicato de sódio, soda cáustica e trifosfato de sódio).

#### a) Solos Argilosos:

##### a.1) análise do fator defloculante químico

Com as porcentagens de partículas menores que 0,002mm, resultantes de ensaios de sedimentação com as amostras argilosas, pode-se construir o Quadro 8.01:

Quadro 8.01: Porcentagem em peso de partículas menores que 0,002mm - somatório dos resultados obtidos com as amostras (S) e (R).

CAUSA DE VARIAÇÃO	t <sub>1</sub> =5	t <sub>2</sub> =10	t <sub>3</sub> =15	t <sub>4</sub> =20	total
Hexametáfosfato de sódio	57	67	71	69	264
Silicato de sódio	51	74	71	77	273
Soda cáustica	6	9	10	13	38
Trifosfato de sódio	27	40	42	56	165
Totais dos blocos	141	190	194	215	740

Do Quadro 8.01 obtem-se:

$$\sum x^2 = (57)^2 + (67)^2 + \dots + (42)^2 + (56)^2 = 44202,0$$

$$\sum x = 740$$

$$C = (740)^2/16 = 34225,0$$

$$SQ_{total} = 44202,0 - 34225,0 = 9977,0$$

$$SQ_{tratamentos} = 1/4 \cdot ((264)^2 + \dots + (165)^2) - C = 8998,5$$

$$SQ_{blocos} = 1/4 \cdot ((141)^2 + \dots + (215)^2) - C = 735,5$$

$$SQ_{resíduo} = 9977,0 - 8998,5 - 735,5 = 243,0.$$

Para a análise de variância, onde GL é o número de graus de liberdade, SQ é a soma de quadrados, QM é o quadrado médio e F é o fator de Snedecor, tem-se:

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Blocos	3	735,5	245,2	
Tratamentos	3	8998,5	2999,5	111,1 **
Resíduo	9	243,0	27,0	
Total	15	9977,0		

O que dificulta o trabalho do experimentador e exige a análise estatística é a presença de efeitos de fatores não controlados. Esses efeitos, sempre presentes em todos os dados, não podem ser conhecidos individualmente e alteram,

pouco ou muito, os resultados obtidos. Tais efeitos são indicados pela designação geral de "variação do acaso" ou "variação aleatória". O efeito da variação do acaso é tal que pode alterar completamente os resultados experimentais. Cabe ao experimentador, pois, verificar (mediante, por exemplo, "testes de significância") se as diferenças observadas têm ou não têm valor, isto é, se são ou não significativas. Uma diferença não significativa aceita-se como possivelmente devida ao acaso, sendo deixada de lado até que novos resultados venham confirmá-la ou negá-la.

Dentre os inúmeros testes de significância existentes, considerou-se como adequados à análise dos ensaios realizados, o teste F (de Snedecor) e o teste de Tukey. O teste F, a exemplo do teste v (de Brieger), tem em vista a comparação dos "quadrados médios" ou "variâncias", utilizando-se da expressão:

$$F = QM_{\text{tratamento}} / QM_{\text{resíduo}} \quad (8.01)$$

As Tabelas C.1 e C.2, do Anexo C, obtidas de COSTA NETO (1977), fornecem os limites unilaterais de F, aos níveis de 5% e 1% de probabilidade, em função dos graus de liberdade dos tratamentos e do resíduo. Exemplificando: o valor limite de F, ao nível de 1% de probabilidade, significa que há uma probabilidade de 99% de se obter, por simples acaso, um valor de F igual ou inferior a este limite. Ou seja, é de 1% a probabilidade de se obter valores maiores que  $F_{\text{limite}}$ .

O teste de Tukey, por sua vez, é baseado na amplitude total Studentizada e pode ser utilizado para comparar todo e qualquer contraste entre duas médias de tratamentos. Calcula-se o valor  $\Delta = q \cdot \sqrt{QM_{\text{resíduo}} / r}$ , onde q é o valor da amplitude total Studentizada, ao nível de 5% ou ao nível de 1% de probabilidade (Tabelas C.3 e C.4, obtidas de COSTA NETO (1977) - Anexo C), e r é o número de repetições dos tratamentos. Toda diferença entre duas médias de tratamentos, do tipo  $(Y = m_1 - m_2)$ , que exceder ao valor  $\Delta$  calculado, será significativa. O teste é exato e de uso muito simples quando o número de repetições é o mesmo para todos os tratamentos. No caso de serem diferentes os números de repetições, o teste de Tukey pode ainda ser utilizado, sendo, no entanto, apenas aproximado.

É interessante notar que, embora raramente, pode acontecer que o teste F não tenha sido significativo na análise de variância e obtenha-se um ou mais contrastes entre médias significativos pelo teste de Tukey. Por outro lado, também pode ocorrer que o teste F seja significativo, sem que nenhuma das diferenças entre médias seja significativa pelo Teste de Tukey. Tais discordâncias se devem à aceitação de hipóteses diferentes nas deduções teóricas.

Retornando à análise de variância dos resultados apresentados no Quadro 8.01, o valor da Tabela C.2 (Anexo C) de limites unilaterais de F, ao nível de 1% de probabilidade e com 3 e 9 graus de liberdade (respectivamente dos tratamentos e do resíduo), é 6,99. Logo, o valor obtido ( $F = 111,1$ ) é significativo ao nível de 1% de probabilidade - o que se indica com dois asteriscos. Note-se que o efeito dos tratamentos é inteiramente independente de ser ou não significativo o efeito dos blocos.

Para a comparação das médias de tratamentos entre si, pelo teste de Tukey, precisa-se procurar o valor da amplitude total Studentizada ( $q$ ), com  $n = 4$  tratamentos e  $n' = 9$  graus de liberdade para o resíduo. Da Tabela C.4 obtém-se  $q = 5,96$ . Tem-se, pois, para o nível de 1%:

$$\Delta = q \cdot \sqrt{QM_{\text{resíduo}} / \text{número de blocos}} = 5,96 \cdot \sqrt{27 / 4} = 15,48$$

As médias dos tratamentos, em ordem decrescente, são:

- silicato de sódio.....68,25% |
- hexametáfosfato de sódio.....66,00% |
- trifosfato de sódio.....41,25% |
- soda cáustica.....9,50% |

Qualquer diferença entre duas dessas médias, superior a 15,48, é significativa ao nível de 1%. Observa-se, portanto, que os defloculantes hexametáfosfato de sódio e silicato de sódio resultam em uma maior dispersão das amostras (maior porcentagem de argila), diferindo estatisticamente do trifosfato de sódio (que ocupa uma posição intermediária) e da soda cáustica. Esta, confirmando as suspeitas iniciais quanto ao seu pequeno poder defloculante, resultou em baixíssima dispersão (representada pela pequena porcentagem de argila obtida), distinguindo-se, ao nível de 1% de probabilidade, dos outros três defloculantes químicos em estudo.

a.2) análise do fator tempo de dispersão

Analogamente à análise do fator tipo de defloculante químico, pode-se construir, para o fator tempo de dispersão, o Quadro 8.02, onde  $d_1$  = hexametáfosfato de sódio,  $d_2$  = silicato de sódio,  $d_3$  = soda cáustica e  $d_4$  = trifosfato de sódio:

Quadro 8.02: Porcentagem em peso de partículas menores que 0,002mm - somatório dos resultados obtidos com as amostras (S) e (R).

CAUSA DE VARIAÇÃO	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	total
5 minutos	57	51	6	27	141
10 minutos	67	74	9	40	190
15 minutos	71	71	10	42	194
20 minutos	69	77	13	56	215
Totais dos blocos	264	273	38	165	740

Obtêm-se os seguintes parâmetros:

$$\Sigma x^2 = 44202,0$$

$$\Sigma x = 740$$

$$C = 34225,0$$

$$SQ_{total} = 9977,0$$

$$SQ_{tratamentos} = 735,5$$

$$SQ_{blocos} = 8998,5$$

$$SQ_{resíduo} = 243,0$$

Tem-se, para a análise de variância:

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Blocos	3	8998,5	2999,5	
Tratamentos	3	735,5	245,2	9,08 **
Resíduo	9	243,0	27,0	
Total	15	9977,0		

Para o nível de 1% de probabilidade, o valor da tabela de limites unilaterais de F, com 3 e 9 graus de liberdade, é 6,99. Logo, o valor obtido (9,08) é significativo ao nível de 1% de probabilidade, o que se indica com dois asteriscos.

Para a comparação das médias entre si pelo teste de Tukey, com  $n = 4$  e  $n' = 9$ , o valor da amplitude total Studentizada é  $q = 5,96$ . Para o nível de 1% tem-se:

$$\Delta = 5,96 \cdot \sqrt{27 / 4} = 15,48.$$

As médias dos tratamentos, em ordem decrescente, são:

- 20 minutos.....	53,75%	
- 15 minutos.....	48,50%	
- 10 minutos.....	47,50%	
- 5 minutos.....	35,25%	

Qualquer diferença entre duas dessas médias, superior a 15,48, é significativa ao nível de 1%. Observa-se, portanto, que o maior tempo de dispersão estudado (20 minutos), de acordo com o esperado, acarreta uma maior dispersão das amostras, embora só se destaque significativamente do menor tempo considerado (5 minutos).

Ao nível de 5% tem-se:

$$\Delta = 4,42 \cdot \sqrt{27 / 4} = 11,48.$$

Agora, também o tempo de 15 minutos passa a se destacar significativamente do menor tempo de dispersão analisado, enquanto que o valor de 10 minutos, embora não difira, estatisticamente, do tempo de 5 minutos, nem dos tempos 15 e 20 minutos, apresenta resultado muito mais próximo dos obtidos com os maiores tempos de dispersão.

#### b) Solos Arenosos:

##### b.1) análise do fator defloculante químico

Com as porcentagens de partículas menores que 0,002mm, resultantes dos ensaios de sedimentação com as amostras arenosas, pode-se construir o Quadro 8.03:

Quadro 8.03: Porcentagem em peso de partículas menores que 0,002mm - somatório dos resultados obtidos com as amostras (J) e (B).

CAUSA DE VARIAÇÃO	t <sub>1</sub> =5	t <sub>2</sub> =10	t <sub>3</sub> =15	t <sub>4</sub> =20	total
Hexametáfosfato de sódio	39	42	41	42	164
Silicato de sódio	40	47	45	47	179
Soda cáustica	38	41	45	41	165
Trifosfato de sódio	42	42	45	43	172
Totais dos blocos	159	172	176	173	680

Obtem-se, pois:

$$\sum x^2 = (39)^2 + (42)^2 + \dots + (45)^2 + (43)^2 = 29006,0$$

$$\sum x = 680$$

$$C = (680)^2 / 16 = 28900,0$$

$$SQ_{total} = 29006,0 - 28900,0 = 106,0$$

$$SQ_{tratamentos} = 1/4 \cdot ((164)^2 + \dots + (172)^2) - C = 36,5$$

$$SQ_{blocos} = 1/4 \cdot ((159)^2 + \dots + (173)^2) - C = 42,5$$

$$SQ_{resíduo} = 106,0 - 36,5 - 42,5 = 27,00$$

Para a análise de variância tem-se:

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Blocos	3	42,5	14,2	
Tratamentos	3	36,5	12,2	4,1 *
Resíduo	9	27,0	3,0	
Total	15	106,0		

Ao nível de 5% de probabilidade, o valor da Tabela C.2, de limites unilaterais de F, com 3 e 9 graus de liberdade, é 3,86. Portanto, o valor obtido (4,1) é significativo ao nível de 5%, o que se indica com um asterisco.

A comparação das médias entre si, pelo teste de Tukey, fornece, ao nível de 5%, com  $n = 4$  tratamentos e  $n' = 9$  graus de liberdade para o resíduo,  $\Delta = 3,83$ .

As médias dos tratamentos, em ordem decrescente, são:

- Silicato de Sódio.....	44,75%
- Trifosfato de Sódio.....	43,00%
- Soda Cáustica.....	41,25%
- Hexametáfosfato de Sódio.....	41,00%

Não há, estatisticamente, distinção entre os tipos de defloculantes, quando utilizados nos ensaios das amostras arenosas. A destacar tem-se, somente, a menor dispersão ocasionada pelo hexametáfosfato de sódio, ainda que por pequena margem. Com base nos resultados obtidos, pode-se, apenas, atribuir as diferenças observadas como sendo devidas às "variações aleatórias". Para conclusões mais categóricas, do tipo, por exemplo, "o silicato de sódio é o defloculante mais eficiente para os solos arenosos ensaiados, enquanto que o hexametáfosfato de sódio é o menos eficiente dentre os quatro defloculantes analisados", são necessários novos ensaios, que poderão confirmar, ou não, a similaridade de atuação dos defloculantes quando de ensaios de amostras arenosas.

#### b.2) análise do fator tempo de dispersão

Com os resultados dos ensaios de sedimentação com as amostras arenosas, pode-se construir o Quadro 8.04:

Quadro 8.04: Porcentagem em peso de partículas menores que 0,002mm - somatório dos resultados obtidos com as amostras (J) e (B).					
CAUSA DE VARIAÇÃO	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	total
5 minutos	39	40	38	42	159
10 minutos	42	47	41	42	172
15 minutos	41	45	45	45	176
20 minutos	42	47	41	43	173
Totais dos blocos	164	179	165	172	680



Do Quadro 8.04, tem-se:

$$\Sigma x^2 = 29006,0$$

$$\Sigma x = 680$$

$$C = 28900,0$$

$$SQ_{total} = 106,0$$

$$SQ_{tratamentos} = 42,5$$

$$SQ_{blocos} = 36,5$$

$$SQ_{residuo} = 27,0$$

Para a análise de variância tem-se:

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Blocos	3	36,5	12,2	
Tratamentos	3	42,5	14,2	4,7 *
Resíduo	9	27,0	3,00	
total	15	106,0		

Ao nível de 5% de probabilidade, o valor do limite unilateral de F é 3,86. Logo, o valor obtido (4,7) é significativo ao nível de 5%, o que se indica com um asterisco.

Para comparação de médias entre si, pelo teste de Tukey, tem-se, ao nível de 5% de probabilidade,  $\Delta = 3,83$ . As médias dos tratamentos, em ordem decrescente, são:

- 15 minutos.....44,00% |
- 20 minutos.....43,25% |
- 10 minutos.....43,00% |
- 5 minutos.....39,75% |

A exemplo do observado com as amostras argilosas, o menor tempo de dispersão (5 minutos) distinguiu-se, ao nível de 5%, como o que provoca uma menor defloculação das partículas. Quanto aos outros tempos de dispersão, os resultados foram muito próximos, sendo que o maior valor de porcentagem de argila foi obtido com 15 minutos. Como, do ponto de vista estatístico, este tempo de dispersão não difere dos outros (20 e 10 minutos), pode-se atribuir este resultado como sendo uma simples "variação do acaso".

### 8.1.2 - Análise como ensaios fatoriais

Grande parte das investigações e experimentações é dirigida para descobrir os efeitos, individuais e de conjunto, de fatores julgados os mais importantes nos fenômenos investigados. Experimentos fatoriais são aqueles que incluem todas as combinações de vários conjuntos de tratamentos ou fatores. Geralmente, são mais eficientes que os experimentos simples (com um só conjunto de tratamentos), permitindo conclusões mais gerais.

Pode-se analisar, segundo este tipo de delineamento, o conjunto de dados (réplicas), pertencentes a  $(a \cdot b)$  condições experimentais, que representam todas as combinações possíveis dos níveis possíveis de dois fatores A e B. Pode-se, também, estender as análises de experimentos fatoriais ao caso de mais de dois fatores, ou seja, experimentos onde são representadas todas as combinações possíveis dos níveis de três ou mais fatores. Ilustra-se, a seguir, um experimento com muitos fatores e vários níveis:

FATOR	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
B	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	-
C	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	-
D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	-
E	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	-

Para o experimento fatorial exemplificado, há necessidade de 48 (= 3 . 2 . 2 . 2 . 2) condições experimentais em cada réplica.

Existem várias razões para o emprego frequente de experimentos fatoriais, com cada fator tendo apenas dois níveis. A principal delas é que o número de condições experimentais cresce com o número de níveis de cada fator. Assim, para a investigação simultânea de muitos fatores, pode ser economicamente impossível incluir mais de dois níveis para cada fator. Por outro lado, os ensaios fatoriais 2<sup>n</sup> apresentam alguns inconvenientes, como por exemplo, cada fator ser medido somente em dois níveis, o que torna impossível julgar se os efeitos produzidos pelas variações de um fator são lineares ou de outra forma. Por esta razão é que os experimentos fatoriais 2<sup>n</sup> são empregados, frequentemente, em "experimentos de filtração", seguidos por experimentos, com os fatores que resultaram significativos (individualmente ou em conjunto), agora com mais de dois níveis.

Em alguns experimentos, é impossível a realização de todas as condições experimentais requeridas. As limitações econômicas e práticas tornam necessária a busca de métodos nos quais o tamanho dos experimentos fatoriais se mantenha dentro de limites razoáveis.

Deve-se ter em mente, sempre, que um planejamento preliminar cuidadoso pode eliminar muitos fatores desnecessários. Muitas vezes, porém, é difícil evitar que sejam investigados até 10 fatores em um experimento. Uma forma de reduzir o tamanho de um experimento deste tipo é decompô-lo em várias partes, incluindo em cada parte a variação deliberada de um fator, enquanto os outros permanecem fixos. Tal procedimento tem por inconveniente impedir o estudo das interações entre fatores de uma parte com outra, embora, em muitos casos, nem todas as interações sejam de interesse do experimentador.

Não há dúvida, porém, de que os experimentos fatoriais são muito convenientes e de uso bastante comum em muitas áreas, notadamente na Agronomia. Embora seu método de computação dos dados, nas diversas referências consultadas, seja apresentado sob diferentes formas e arranjado em diferentes tipos de tabulação, o procedimento geral de cálculo (que independe do número de fatores) é simples, utilizando-se de aritmética elementar e senso comum, sendo bem exemplificado nos itens seguintes deste capítulo.

Com relação aos ensaios deste trabalho, os experimentos da primeira fase, conforme observado anteriormente, também podem ser analisados como "ensaios fatoriais". A análise a ser efetuada será baseada no delineamento fatorial apresentado no Quadro 7.03 e, a exemplo da análise em blocos casualizados, também tomará como valor numérico significativo a porcentagem de partículas menores que 0,002mm.

O Quadro 8.05 possibilita a obtenção dos dados para o cálculo da soma de quadrados dos tipos de solos, dos tipos de defloculantes e da interação dupla tipos de solos x tipos de defloculantes.

Tipos de solos	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	total
(S)	94	100	2	21	217
(R)	170	173	36	144	523
(J)	78	87	84	87	336
(B)	86	92	81	85	344
Totais	428	452	203	337	1420

Do Quadro 7.03, tem-se:

$$\sum x^2 = (21)^2 + (24)^2 + \dots + (22)^2 + (22)^2 = 40412,0$$

$$\sum x = 1420$$

$$C = (1420)^2 / 64 = 31506,3$$

$$SQ_{total} = 40412,0 - 31506,3 = 8905,8$$

Agora, com o Quadro 8.05, obtem-se:

$$SQ_{defloculantes} = (1/4^2) \cdot (428^2 + \dots + 337^2) - C = 2385,4$$

$$SQ_{solos} = (1/4^2) \cdot (217^2 + \dots + 344^2) - C = 2984,4$$

$$SQ_{solos \ e \ defloculantes} = 1/4 \cdot (94^2 + \dots + 85^2) - C = 8010,3$$

$$\circ^o \quad SQ_{solos \ e \ defloculantes} = 8010,3 - 2984,4 - 2385,4 = 2640,5$$

Analogamente, para os tipos de solos e tempos de dispersão pode-se construir o Quadro 8.06:

Tipos de Solos	t1	t2	t3	t4	Total
(S)	51	56	50	60	217
(R)	90	134	144	155	523
(J)	81	85	86	84	336
(B)	78	87	90	89	344
Totais	300	362	370	388	1420

Do Quadro 8.06, obtem-se:

$$SQ_{tempos \ de \ dispersao} = 1/16 \cdot (300^2 + \dots + 388^2) - C = 274,3$$

$$SQ_{solos \ e \ tempos \ de \ dispersao} = 1/4 \cdot (51^2 + \dots + 89^2) - C = 3635,4$$

$$\circ^o \quad SQ_{solos \ e \ tempos \ de \ dispersao} = 3635,4 - 2984,4 - 274,3 = 376,7$$

Para os tipos de defloculantes e tempos de dispersão, tem-se o Quadro 8.07:

Defloculantes	t1	t2	t3	t4	total
Hexametáfosfato	96	109	112	111	428
Silicato	91	121	116	124	452
Soda cáustica	44	50	55	54	203
Trifosfato	69	82	87	99	337
Totais	300	362	370	388	1420

Do Quadro 8.07, obtem-se:

$$SQ_{\text{defloculantes e tempos de dispersão}} = 2730,8$$

$$\begin{aligned} \text{O}^{\circ} SQ_{\text{defloculantes x tempos de dispersão}} &= 2730,8 - 2385,4 - \\ &- 274,3 = 71,1. \end{aligned}$$

Finalmente, para a análise de variância, tem-se:

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Solos	3	2984,4	994,8	154,7 **
Defloculantes	3	2385,4	795,1	123,7 **
Tempos de dispersão	3	274,3	91,4	14,2 **
Interação (s x d)	9	2640,5	293,4	45,6 **
Interação (s x t)	9	376,6	41,9	6,5 **
Interação (d x t)	9	71,1	7,9	1,2
Resíduo (s x d x t)	27	173,5	6,4	
Total	63	8905,8		

Os graus de liberdade das interações são obtidos pela subtração, do produto do número de tratamentos de cada um dos fatores menos um, dos números de graus de liberdade de cada um dos fatores da interação. Exemplificando, com a interação solos x defloculantes:

$$GL_{s \times d} = (4^2 - 1) - GL_s - GL_d = 15 - 3 - 3 = 9.$$

Para o nível de 1% de probabilidade, os valores de limites unilaterais de F (Tabela C.2), com 3 e 27 graus de liberdade (para os tratamentos) e com 9 e 27 graus de liberdade (para as interações), são 4,60 e 3,15, respectivamente. Da análise de variância, constata-se que existem diferenças significativas, ao nível de 1%, para os tratamentos em estudo (defloculantes químicos e tempos de dispersão mecânica) e suas interações.

Pode-se, também, comparar as médias dos resultados dos defloculantes e dos tempos de dispersão pelo teste de Tukey. Os valores da amplitude total Studentizada (q), com n = 4 tratamentos e n' = 27 graus de liberdade para o resíduo, são 3,87 e 4,85, respectivamente aos níveis de 5% e 1% de probabilidade.

Apresentam-se, a seguir, as médias do tratamento "defloculante químico", para cada amostra ensaiada:

TIPOS DE SOLOS	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
(S)	23,50	25,00	0,50	4,25
(R)	42,50	43,25	9,00	36,00
(J)	19,50	21,75	21,00	21,75
(B)	21,50	23,00	20,25	21,25

A diferença mínima significativa, para médias de defloculantes (ao nível de 1%), com um mesmo tipo de solo, é:

$$\Delta = 4,85 \cdot \sqrt{6,43 / 4} = 6,15$$

As médias do tratamento "defloculante químico", em ordem decrescente, são:

(S).....	<u>d<sub>2</sub> (25,00)</u>	<u>d<sub>1</sub> (23,50)</u>	<u>d<sub>4</sub> (4,25)</u>	<u>d<sub>3</sub> (0,50)</u>
(R).....	<u>d<sub>2</sub> (43,25)</u>	<u>d<sub>1</sub> (42,50)</u>	<u>d<sub>4</sub> (36,00)</u>	<u>d<sub>3</sub> (9,00)</u>
(J).....	<u>d<sub>2</sub> (21,75)</u>	<u>d<sub>4</sub> (21,75)</u>	<u>d<sub>3</sub> (21,00)</u>	<u>d<sub>1</sub> (19,50)</u>
(B).....	<u>d<sub>2</sub> (23,00)</u>	<u>d<sub>1</sub> (21,50)</u>	<u>d<sub>4</sub> (21,25)</u>	<u>d<sub>3</sub> (20,25)</u>

Para as duas amostras arenosas - (J) e (B) - não há, do ponto de vista estatístico, diferença entre os defloculantes estudados. Para as amostras argilosas, porém, é significativa (ao nível de 1%) a maior dispersão das partículas conseguida com o uso dos defloculantes hexametáfosfato de sódio e silicato de sódio. Observa-se, também, que para as amostras (S) e (R) o trifosfato de sódio ocupa uma posição intermediária, distinguindo-se significativamente da soda cáustica (decididamente o defloculante que resulta em uma menor dispersão).

As médias do tratamento "tempo de dispersão", para cada amostra ensaiada, são apresentadas a seguir:

TIPOS DE SOLOS	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>
(S)	12,75	14,00	12,50	15,00
(R)	22,50	33,50	36,00	38,75
(J)	20,25	21,25	21,50	21,00
(B)	19,50	21,75	22,50	22,25

Ao nível de 5%, a diferença mínima significativa para médias de tempos de dispersão, com um mesmo tipo de solo, é:

$$\Delta = 3,87 \cdot \sqrt{7,49 / 4} = 4,91$$

As médias do tratamento "tempos de dispersão", em ordem decrescente, são:

(S).....	t <sub>4</sub> (15,00)	t <sub>2</sub> (14,00)	t <sub>1</sub> (12,75)	t <sub>3</sub> (12,50)
(R).....	t <sub>4</sub> (38,75)	t <sub>3</sub> (36,00)	t <sub>2</sub> (33,50)	t <sub>1</sub> (22,50)
(J).....	t <sub>3</sub> (21,50)	t <sub>2</sub> (21,25)	t <sub>4</sub> (21,00)	t <sub>1</sub> (20,25)
(B).....	t <sub>3</sub> (22,50)	t <sub>4</sub> (22,25)	t <sub>2</sub> (21,75)	t <sub>1</sub> (19,50)

Embora seja perceptível a tendência (já esperada de antemão) de a defloculação das partículas aumentar com o tempo de dispersão, do ponto de vista estatístico só houve diferença significativa (ao nível de 5%) para a amostra argilosa (R). Para esta amostra, distinguiram-se três níveis de dispersão: um maior, com os tempos de 20 e 15 minutos; um intermediário, com o tempo de 10 minutos; e, finalmente, um nível de dispersão inferior, resultante da dispersão mecânica das amostras por 5 minutos apenas.

## 8.2 - Segunda Etapa de Experimentação:

Os estudos estatísticos da segunda fase de experimentos serão analisados como "delineamentos fatoriais em blocos casualizados". Cada uma das cinco amostras selecionadas constituirá um bloco, enquanto que os valores numéricos, a serem utilizados nos cálculos, serão as porcentagens de partículas menores que 0,075mm (silte + argila) e as porcentagens de partículas menores que 0,002mm (argila).

O Quadro 8.08 resume as porcentagens de partículas menores que 0,002mm, obtidas dos ensaios com os seguintes tratamentos:

- condição de secagem da amostra: secagem ao ar (1), secagem em estufa (A<sub>1</sub>) e amostra na umidade natural (A<sub>2</sub>);
- leituras iniciais: com leituras iniciais (1) e sem leituras iniciais (B);
- tempo de dispersão: 10 minutos (1) e 20 minutos (C);
- concentração do solo ensaiado: maior que 70 g/l (1) e menor que 50 g/l (D);
- granulometria do material ensaiado: passado na peneira de 2,0mm (1) e passado na peneira de 0,15mm (E).

Quadro 8.08: Segunda fase de ensaios - porcentagem em peso de partículas menores que 0,002mm.									
AMOSTRAS	(1)	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B	C	D	E	Int.	Total
(C)	5	4	6	5	7	5	6	7	45
(D-S-L)	21	20	21	21	21	21	21	23	169
(D-S-S)	17	13	18	17	18	17	15	18	133
(D-C-L)	46	34	45	46	47	47	46	47	358
(D-C-S) <sub>1</sub>	42	29	44	44	52	45	46	47	349
(D-C-S) <sub>2</sub>	39	36	41	42	52	38	42	43	333
Totais	170	136	175	175	197	173	176	185	1387

Como é usual neste tipo de análise, (1) representa a "testemunha", que no nosso caso é a parcela obtida segundo as recomendações normalizadas pela ABNT e pelos organismos rodoviários (DNER e DER-SP). Também será investigado o efeito da interação de todos os fatores (A<sub>2</sub>, B, C, D, e E), previamente julgados como capazes de promover uma maior

dispersão das amostras. Em função do comentado no capítulo anterior, a amostra (D-C-S) foi ensaiada com dois tipos de defloculante: hexametáfosfato de sódio - (D-C-S)<sub>1</sub> - e soda cáustica - (D-C-S)<sub>2</sub>.

Do Quadro B.08, tem-se:

$$\Sigma x^2 = (5)^2 + (4)^2 + \dots + (42)^2 + (43)^2 = 51779$$

$$\Sigma x = 1387$$

$$C = (1387)^2 / 48 = 40079$$

$$SQ_{total} = 51779 - 40079 = 11700$$

$$SQ_{tratamentos} = 1/6 \cdot (170^2 + \dots + 185^2) - C = 352$$

$$SQ_{blocos} = 1/8 \cdot (45^2 + \dots + 333^2) - C = 11062$$

$$SQ_{residuo} = 11700 - 352 - 11062 = 286$$

Para a análise de variância, tem-se:

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Blocos	5	11062		
Tratamentos	7	352	50,3	6,1 **
Resíduo	35	286	8,2	
Total	47	11700		

Ro nível de 1% de probabilidade, o valor do limite unilateral de F, com 7 graus de liberdade para tratamentos e 35 graus de liberdade para o resíduo, é 3,21. Logo, o valor obtido (6,1) é significativo ao nível de 1%, o que se indica com dois asteriscos.

Para a comparação das médias dos tratamentos, pelo teste de Tukey, tem-se, com  $n = 8$  tratamentos e  $n' = 35$  graus de liberdade para o resíduo,  $q = 4,56$ . Ao nível de 5% de probabilidade, tem-se:

$$\Delta = 4,56 \cdot \sqrt{8,2 / 6} = 5,3$$

As médias dos tratamentos, em ordem decrescente, são:

- (C).....32,8%
- Interação.....30,8%
- (E).....29,3%
- (A<sub>2</sub>).....29,2%
- (B).....29,2%
- (D).....28,8%
- (1).....28,3%
- (A<sub>1</sub>).....22,7%

Qualquer diferença entre duas destas médias, superior a (5,3), é significativa ao nível de 5%. Observa-se, portanto, que apenas a secagem em estufa difere, estatisticamente, dos outros tratamentos.

O Quadro 8.09 apresenta as percentagens de partículas menores que 0,075mm, obtidas de experimentação com os mesmos fatores analisados anteriormente:

Quadro 8.09: Segunda fase de ensaios - percentagem em peso de partículas menores que 0,075mm.

AMOSTRAS	(1)	A1	A2	B	C	D	E	Int.	Total
(C)	69	63	64	60	66	66	64	72	524
(D-S-L)	29	28	30	27	28	29	28	30	229
(D-S-S)	26	26	27	27	27	27	26	27	213
(D-C-L)	64	63	65	66	65	65	65	66	519
(D-C-S) <sub>1</sub>	82	72	85	83	92	89	88	88	679
(D-C-S) <sub>2</sub>	79	79	84	84	88	80	85	87	666
Totais	349	331	355	347	366	356	356	370	2830

Tem-se:

$$\sum x^2 = (69)^2 + (63)^2 + \dots + (85)^2 + (87)^2 = 193758$$

$$\sum x = 2830$$

$$C = (2830)^2 / 48 = 166852$$

$$SQ_{total} = 193758 - 166852 = 26906$$

$$SQ_{tratamentos} = 1/6 \cdot (349^2 + \dots + 370^2) - C = 169$$

$$SQ_{\text{blocos}} = 1/8 \cdot (524^2 + \dots + 666^2) - C = 26441$$

$$SQ_{\text{resíduo}} = 26906 - 169 - 26441 = 296$$

Para a análise de variância, tem-se:

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM	F
Blocos	5	26441	5288,0	
Tratamentos	7	169	24,1	2,84 *
Resíduo	35	296	8,5	
Total	47	26906		

Ao nível de 5% de probabilidade o valor do limite unilateral de F, com 7 e 35 graus de liberdade, é 2,29. Logo, o valor obtido (2,84) é significativo ao nível de 5% de probabilidade, o que se indica com um asterisco.

Para comparação das médias dos tratamentos pelo teste de Tukey, ao nível de 5% ( $q = 4,56$ ), tem-se:

$$\Delta = 4,56 \cdot \sqrt{8,5 / 6} = 5,4$$

As médias dos tratamentos, em ordem decrescente, são:

- Interação.....	61,7%
- (C).....	61,0%
- (E).....	59,3%
- (D).....	59,3%
- (A <sub>2</sub> ).....	59,2%
- (1).....	58,2%
- (B).....	57,8%
- (A <sub>1</sub> ).....	55,2%

Qualquer diferença entre duas destas médias superior a 5,4 é significativa ao nível de 5%. Observa-se, agora, resultado um pouco diferente do obtido considerando-se a porcentagem de partículas menores que 0,002mm como medida da influência dos diferentes fatores. Ou seja, a secagem em estufa (A<sub>1</sub>), para a porcentagem de silte + argila, difere, significativamente, somente da interação (A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>E<sub>2</sub>) e da dispersão mecânica por 20 minutos (C).

Quanto aos outros fatores, não existem, do ponto de vista estatístico, diferenças significativas. No entanto, nas duas análises efetuadas (considerando-se a porcentagem de argila e a porcentagem de silte + argila) os fatores em estudo se arranjaram de forma semelhante: a interação e o tempo de dispersão (20 minutos) apresentaram as maiores porcentagens, enquanto que a secagem em estufa e a "testemunha" apresentaram os menores valores.

## CAPITULO IX - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As conclusões dos estudos efetuados e das análises dos resultados da experimentação desenvolvida são enumeradas a seguir:

- o ensaio de granulometria pelo método do densímetro apresenta boa reprodutibilidade de resultados, tendo em vista que, para 9 repetições efetuadas, a faixa de variação dos valores resultou em uma amplitude máxima de 2%;

- a defloculação química e a dispersão mecânica condicionam, sobremaneira, os resultados dos ensaios de sedimentação: pode-se passar, por exemplo, de 65% de silte + argila ( $D < 0,075\text{mm}$ ) e 48% de argila ( $D < 0,002\text{mm}$ ) a apenas 5% de silte + argila e 0% de argila, simplesmente executando-se ensaios granulométricos sem estes dois procedimentos básicos de dispersão das amostras;

- é mais acentuado o efeito da defloculação química do que o da dispersão mecânica: enquanto sem defloculação química obtiveram-se diferenças de até 48% no teor de argila, para a condição sem dispersão mecânica a diferença de resultados ficou em torno de 10%;

- para os solos argilosos, o tipo de defloculante químico condiciona, consideravelmente, os resultados do ensaio de sedimentação. Os defloculantes mais citados e recomendados (hexametáfosfato de sódio e silicato de sódio) confirmaram as expectativas e resultaram em uma maior dispersão das amostras. O trifosfato de sódio, embora seja recomendado por normas técnicas como a do DNER, por exemplo, e tenha sido utilizado com uma concentração maior do que a recomendada, apresentou resultados muito baixos, ainda que superiores aos obtidos com a soda cáustica, comprovadamente o menos eficiente defloculante dentre os analisados;

- o tempo de dispersão, para os solos argilosos, também é um fator que acarreta diferenças significativas no ensaio de sedimentação. Com 20 minutos obteve-se uma porcentagem de partículas menores que  $0,002\text{mm}$  (fração argila) maior do que a obtida com os demais tempos de dispersão ensaiados, principalmente em relação ao tempo de 5 minutos;

- os solos arenosos ensaiados se mostraram menos sensíveis às variações dos fatores tipo de defloculante e tempo de dispersão. A menos do tempo de dispersão de 5 minutos, que diferiu significativamente dos outros tempos de dispersão (10, 15 e 20 minutos), ao nível de 5% de probabilidade, os outros fatores apresentaram diferenças que podem ser atribuídas simplesmente às "variações aleatórias";

- da experimentação com os fatores condição de secagem da amostra, tempo de dispersão mecânica, execução ou não de leituras iniciais (com tempos inferiores a 2 minutos), massa de solo seco e fração granulométrica ensaiada por sedimentação, apenas a secagem em estufa destacou-se significativamente dos demais. Considerando-se a porcentagem de partículas menores que 0,002mm, a secagem em estufa diferiu, estatisticamente, de todos os fatores analisados, bem como da interação destes fatores. Considerando-se, agora, a porcentagem de partículas menores que 0,075mm, a secagem em estufa diferiu, significativamente, apenas da interação de todos os fatores e da dispersão mecânica por 20 minutos;

- as diferenças obtidas entre os resultados, considerando-se apenas a porcentagem de argila, dos resultados obtidos considerando-se a porcentagem de silte + argila, confirmam a maior susceptibilidade de aglutinação apresentada pelas partículas mais finas dos solos quando de secamento. Confirmam, também, o acerto em se tomar, quando da experimentação com os tempos de dispersão e tipos de defloculantes, a porcentagem de argila ( $D < 0,002\text{mm}$ ) como valor numérico representativo da influência dos fatores em estudo;

- a consideração da variação da temperatura durante o ensaio de sedimentação, principalmente para as leituras com intervalo de mais de duas horas, propicia uma determinação da viscosidade da suspensão (e, conseqüentemente, da velocidade de sedimentação das partículas) mais próxima do real. Além disso, como mostrado neste trabalho, a incorporação deste procedimento adicional em nada dificulta ou encarece o ensaio;

- deve-se efetuar o ensaio de massa específica dos sólidos, para ser utilizado nos cálculos do ensaio de granulometria pelo método do densímetro, com partículas pertencentes à mesma fração granulométrica ensaiada por sedimentação, uma vez que partículas com diâmetros diferentes podem ter origem mineralógica diferente e, conseqüentemente, massas específicas também diferentes. Os resultados obtidos neste trabalho, utilizando-se a alternativa recomendada, concordaram com as suspeitas teóricas previamente levantadas,

e com resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores. Neste sentido, os procedimentos da NBR 6508 (1984), que fornece o método de ensaio de massa específica dos sólidos para materiais com diâmetros inferiores a 4,8mm, podem continuar a ser adotados, apenas ficando restritos à fração granulométrica inferior ao diâmetro da peneira de controle (que separa a fração a ser peneirada da fração objeto da sedimentação). Por exemplo, os laboratórios de Estradas e de Geotecnia da EESC-USP deveriam utilizar, nos cálculos do ensaio de sedimentação, os valores de massa específica obtidos com a fração passada na peneira #100, uma vez que eles adotam os procedimentos recomendados por STANCATI et alli (ou seja, ensaiam, pelo método do densímetro, apenas a fração com diâmetro menor que 0,15mm);

- embora a Lei de Stokes, quando utilizada em análises granulométricas, forneça resultados práticos altamente satisfatórios, é indispensável, aos que dela se utilizam, ter sempre em mente as hipóteses e condições requeridas para sua validade.

Como sugestões para futuras investigações, podem ser enumeradas as seguintes:

- efetuar experimentos utilizando-se outros defloculantes químicos, especialmente os adotados pelas normas técnicas nacionais, tendo em vista os baixos resultados apresentados pelo trifosfato de sódio. Este defloculante, que é recomendado pela DNER ME - 51-64, foi ensaiado com uma concentração superior à recomendada pela norma e, ainda assim, diferiu significativamente do hexametáfosfato de sódio e do silicato de sódio;

- realizar ensaios de sedimentação com tempos de dispersão superiores a 30 minutos, visando estudar, simultaneamente, a variação da deflocação com o tempo de dispersão e a questão da degradação mecânica das partículas. Para tanto, apresenta-se como importante ferramenta a utilização de microscopia eletrônica por varredura;

- estudar a influência de outros fatores no ensaio de massa específica dos sólidos, além do aspecto granulométrico. Dentre os fatores, podem ser sugeridos, a priori, a condição de secagem (ensaio na umidade natural) e a utilização de deflocação química e dispersão mecânica, uma vez que a

adoção, para este trabalho, de procedimento alternativo (amostra na umidade natural, 20 minutos de dispersão mecânica e hexametáfosfato de sódio) resultou num acréscimo superior a 5% nos valores da massa específica;

- o melhor entendimento e a quantificação dos fatores intervenientes no ensaio de sedimentação podem auxiliar o desenvolvimento de uma programação de ensaios que vise quantificar a influência dos fatores de "estado" e de "natureza" (conforme sugestão do Prof. Milton Vargas) nos limites de consistência. Assim, sugere-se uma "programação fatorial" que avalie, quantitativamente, os efeitos dos fatores que tendem a eliminar propriedades de estado nos resultados dos de limites de liquidez e de plasticidade;

- a partir de um melhor entendimento dos fatores intervenientes no ensaio de sedimentação, pode-se, também, estender os estudos no sentido de se quantificar melhor a influência da granulometria nas diversas propriedades dos solos, bem como nos respectivos ensaios. Além disso, tais estudos podem contribuir para uma melhor quantificação da influência da granulometria no comportamento distinto dos solos tropicais, notadamente quando utilizados em obras de construção rodoviária.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABNT - Peneiras para Ensaio - Especificação - NBR 5734 - 1980
- ABNT - Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização - NBR 6457 - 1986
- ABNT - Rochas e Solos - Terminologia - NBR 6502 - 1980
- ABNT - Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica - NBR 6508 - 1984
- ABNT - Solo - Análise Granulométrica - NBR-7181 - 1984
- AREAS, O.M. - Algumas Considerações sobre o Ensaio de Granulometria - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS, III - Belo Horizonte - 1966 - Anais - Belo Horizonte - ABMS - 1966 - volume 1 - p. 87-96
- ASTM - Standard Method for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants - ASTM D421-58 - 1978
- ASTM - Particle Size Analysis of Soils - D422-63 - 1972
- BIGARELLA, J.J. e MAZUCHOWSKI, J.Z. - Visão Integrada da Problemática da Erosão - In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSAO, III - Maringá - 1985 - Anais - Maringá-PR - ABGE - ADEA - 1985
- BOLT, G.H. - Physico - Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays - Geotechnique - 6 - Londres - p. 86 - 1956
- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G. e HUNTER, J.S. - Statistics for Experimenters - John Wiley and Sons - 1978
- BROWN, H.H. e D'HARRA, W.G. - Suggested Method of Test for Amount of Material Finer than the n. 200 sieve in Aggregates and soils - STP-479 - ASTM - 1970
- CAMBEFORT, H. - Introduction a la Géotechnique - Eyrolles-Editeur - Paris - 1971
- CASAGRANDE, A. - The Hydrometer Method for Mechanical Analysis of Soils and Other Granular Materials - Report from Department of Civil and Sanitary Engineering - Massachusetts Institute of Technology - 1931 - Não Publicado
- CORREA, F.C. - Comportamento de Trechos Experimentais com Bases de Solo Arenoso Fino - Dissertação de Mestrado - EESC-USP - 1975
- COSTA NETO, P.L.D. - Estatística - Ed. Edgard Blucher - 1977

- CHU, T.Y. e DAVIDSON, D.T. - Deflocculating Agents for Mechanical Analysis of Soils - HRB - 95 - 15-26 - Jan. 1954
- COCHRAN, W.G. e COX, G.M. - Experimental Designs - John Wiley and Sons - 1957
- COX, D.R. - Planning of Experiments - Wiley International Edition - 1958
- DAS, B.M. - Advanced Soil Mechanics - Hemisphere Publishing - 1983
- DAWSON, R.F. - Laboratory Manual in Soil Mechanics - Pitman - 1949
- DNER - Análise Granulométrica de Solos - DNER-ME-51-64 - 1964
- DUNN, I.S. - Tractive Resistance of Cohesive Channels - Journal of the American Society of Civil Engineers - 55 (SM3) - 1959
- ENGELHARDT, W.V. - Sedimentary Petrology - Verlagsbuchhandlung - Stuttgart - 1967
- FABRI, G.T.P. - Drenagem de Baixo Custo Através de Canaletas de Solo-Cimento Plástico - Dissertação de Mestrado - EESC-USP - 1986
- FERNANDES JR., J.L.; SÓRIA, M.H.A. e FABBRI, G.T.P. - Efeito da Dispersão e do Defloculante no Ensaio de Sedimentação - III CICTE - EESC - USP - 1984
- FERREIRA, M.A.G. - Considerações sobre Misturas Solo-Agregado Compostas por Materiais Tropicais para Uso em Pavimentação - Dissertação de Mestrado - EESC-USP - 1986
- FILLIAT, - La Pratique des Sols et Foundations - Moniteur - 1981
- GIDIGASU, M.D. - Laterite Soil Engineering - Elsevier Scientific Publishing Co. - vol.9 - 1976
- GOBARA, W.; AUGUSTO JR., F. e BARROS, J.M.C. - Os Ensaio de Caracterização - 9 Anos de Programa Interlaboratorial - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, VIII - Porto Alegre - 1986 - Anais - Porto Alegre - ABMS - 1986 - vol.1 - p. 22-32
- GRIM, R.E. - Modern Concepts of Clay Minerals - Journal of Geology - L (3) - Abril-Maio - 1942
- GRIM, R.E. - Applied Clay Mineralogy - McGraw-Hill Book Co. - New York - 1962

- HABIB, P. - Précis de Géotechnique - Dunod - 1973
- HANDY, B.L. e DAVIDSON, D.T. - Pipette Method to Supplement Hydrometer Test for Particle Size Determination in Soils - HRB - 32 - p. 548-555 - 1953
- HEINZEN, R.T. e ARULANANDAN, K. - Factors Influencing Dispersive Clays and Methods of Identification - Dispersive Clays - Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects - STP-623 - ASTM - 1977
- HEAD, K.H. - Manual of Soil Laboratory Testing - Pentech Press-London - 1980
- HOLMAN, J.P. - Experimental Methods for Engineers - McGraw-Hill Kogakusha Ltd - 1971
- HSU, S.J.C. - Argilas Dispersivas - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS, V - São Paulo - 1974 - Anais - São Paulo - ABMS - 1974 - vol.II - p. 323-333
- KÉZDI, A. - Handbook of Soil Mechanics - 1 - Soil Physics - Elsevier - 1980
- KRUMBEIN, W.C. e SLOSS, L.C. - Stratigrafia y Sedimentación - Union Tipografica Editorial Hispano-Americana - 1969
- LAMBE, T.W. - Soil Testing for Engineers - John Wiley and Sons - 1951
- LAMBE, T.W. - The Structure of Inorganic Soil - Journal of the American Society of Civil Engineers - 79 (Separate 315) - outubro - 1953
- LAMBE, T.W. - The Improvement of Soil Properties with Dispersants - Journal of Boston Soc. of Civil Eng. - 41 (2) - p. 184-207 - 1954
- LAMBE, T.W. - The Structure of Compacted Clay and the Engineering Behaviour of Compacted Clay - Journ. S. Mech. Found. Div. - ASCE - maio - 1958
- LAMBE, T.W. - Physico-Chemical Properties of Soils - Journal of Soil Mech. and Found. Div. - ASCE - 85 (SM2) - April - 1959
- LEAVEN, R.H. e THOMAS, T.R. - Analysis and Presentation of Experimental Results - The MacMillan Press Ltd. - 1974
- LIMA, D.C. - Alqumas Considerações Relativas a Aspectos da Estabilização dos Solos, em Particular à Estabilização Solo-Cal - Dissertação de Mestrado - EESC-USP - 1981
- LNEC, LEA, LEMMS e JAEA - Portuguese Studies on Engineering Properties of Lateritic Soils - In: ICSMFE - Specialty Session - Engineering Properties of Lateritic Soils, VII - Bangkok - Thailand - Proceedings - Bangkok - ISSMFE - 1969

- LOW, P.F. e LOVELL, C.W. - The Factor of Moisture in Frost Action - HRB - 225 - 1959
- MacINNES, D.A. - The Principles of Electrochemistry - Dover Publications - New York - 1961
- MEANS, R.E. e PARCHER, J.V. - Physical Properties of Soils - Constable and Company Limited - 1964
- MELLO, V.F.B. de; SILVEIRA, E.B.S. e SILVEIRA, A. - Sugestões para Revisão das Normas de Execução de Ensaios de Limite de Liquidez e de Granulometria - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS, II - Recife - 1958 - Anais - Recife - ABMS - 1958 - volume I - p. 245-255
- MILLER, I. e FREUND, J.E. - Probabilidad y Estadística para Ingenieros - Editorial Reverté Mexicana - 1967
- MITCHEL, J.K. e SITAR, N. - Engineering Properties of Tropical Residual Soils - In: SPECIALTY CONFERENCE IN ENG. AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS - Hawaii - 1982 - Proceedings - Hawaii - ASCE - 1982
- MOH, Z.C. e MAZHAR, M.F. - Effects of Method of Preparation on Index Properties of Lateritic Soils - In: ICSMFE - Specialty Session - Eng. Properties of Lateritic Soils, VII - Bangkok - Thailand - 1969 - Proceedings - Bangkok - ISSMFE - 1969
- MORIN, J. - Characteristics of Tropical and Residual Soils - In: SPECIALTY CONFERENCE IN ENG. AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS - Hawaii - 1982 - Proceedings - Hawaii - ASCE - 1982
- NOGAMI, J.S. - Necessidade de Adequada Caracterização Genética dos Solos para Finalidades Rodoviárias - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, I - Rio de Janeiro - 1976 - Anais - Rio de Janeiro - ABGE - 1976 - Vol.I
- NOGAMI, J.S. - A Tecnologia Rodoviária e as Peculiaridades dos Nossos Solos - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - São Paulo - 1978 - Anais - São Paulo - ABGE - 1978 - volume I - p.95-103
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. - Propriedades dos Solos Lateríticos e Saprolíticos Compactados - Revista DER-SP - 14 p. - 1978
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. - Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias - In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA - Rio de Janeiro - 1981 - Anais - Rio de Janeiro - COPPE - CNPq - ABMS - 1981 - p. 30-41
- PARADINE, C.G. e RIVETT, B.H.P. - Métodos Estatísticos para Tecnologistas - Editora Polígono-EDUSP - 1974

- PERSONS, B.P. - Laterite - Genesis, Location, Use - Plenum Press - 1970
- PURI, A.N. - Soils - Their Physics and Chemistry - Reinhold Publishing Corp. - 1949
- QUEIROZ DE CARVALHO, J.B. - Um Método Simples para Quantificar os Componentes da Fração Tamanho Argila de Solos Lateríticos - In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA - Rio de Janeiro - 1981 - Anais - Rio de Janeiro - COPPE - CNPq - ABMS - 1981 - p. 179-186
- RAMA RAO, R. e SMART, P. - Significance of Particle Size Distribution Similarity in Prediction of Swell Properties - In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, IV - Proceedings - 1980 - volume I
- REINECK, H.E. e SINGH, I.B. - Depositional Sedimentary Environments Springer - Verlag-Berlin - 1973
- RODERICK, G.L. - Review of Particle-Size Classifications of Soils - HRB - 405 - p. 75-86 - 1972
- RODRIGUEZ, A.R. e DEL CASTILLO, H. - La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres - Editorial Limusa - 1974
- SALAS, J.A.J. e ALPAÑES, J.L.J. - Geotecnia y Cimientos - Editorial Rueda - 1975
- SAHASRABUDHE, Y.S. e VAIDYANATH, L.N. - Some Indian Plateau Laterites and their Engineering Properties - In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESS - Trivandrum - India - 1979 - Proceedings - India - IAGC - Working Group Laterites and Lateritisation - 1979
- SANTOS, J.C. - Utilization of Lateritic Soils for Construction Purposes - In: ICSMFE - Specialty Session - Engineering Properties of Lateritic Soils, VII - Bangkok - Tailândia - 1969 - Proceedings - Bangkok - ISSMFE - 1969
- SANTOS, P.S. - Tecnologia das Argilas - Editora Edgard Blucher - 1975
- SCOTT, R.F. - Principles of Soil Mechanics - Addison Wesley Publishing - 1963
- SCOTT, R.F. e SCHOUSTRA, J.J. - Soil Mechanics and Engineering - McGraw Hill Book Co. - 1968
- SERRA, P.R.M. - Considerações sobre Misturas de Solo-Agregado com Solos Finos Lateríticos - Dissertação de Mestrado - EESC-USP - 1987

- SHERARD, J.L.; DECKER, R.S. e RYKER, N.L. - Piping in Earth Dams of Dispersive Clay - In: SPECIALTY CONFERENCE ON THE PERFORMANCE OF EARTH AND EARTH SUPPORTED STRUCTURES - Proceedings - ASCE - 1972 - Vol.1 - p. 589-626
- SIMONS, D.B. e SENTURK, F. - Sediment Transport Technology - Water Resources Publications - Fort Collins - Colorado - USA - 1977
- SNEDECOR, G.W. - Statistical Methods - Iowa State College Press - 1956
- SORIA, M.H.A. - Reflexões Lógicas sobre Classificação de Solos - Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos - USP - 1985
- SORIA, M.H.A. e FABBRI, G.T.P. - Peculiaridades da Fração Areia de Solos Lateríticos Utilizados na Construção de Bases de Pavimentos - In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA - Rio de Janeiro - 1981 - Anais - Rio de Janeiro - COPPE - CNPq - ABMS - 1981 - p. 261-274
- STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B. e VILAR, D.M. - Ensaio de Laboratório em Mecânica dos Solos - Publicação 018/84 da Escola de Engenharia de São Carlos-USP - 1981
- SUGUID, K. - Introdução à Sedimentologia - Editora Edgard Blucher - 1973
- TAYLOR, D.W. - Fundamentals of Soil Mechanics - John Wiley and Sons - 1948
- TSCHEBOTARIOFF, G.P. - Mecánica del Suelo - Cimientos y Estructuras de Tierra - Aguilar - 1967
- UTIYAMA, H.; NOGAMI, J.S.; CORRÊA, F.C. e VILLIBOR, D.F. - Pavimentação Econômica: Solo Arenoso Fino - Revista DER-SP 124 - São Paulo - 1977
- VARGAS, M. - Introdução à Mecânica dos Solos - McGraw Hill do Brasil - 1979
- VARGAS, M. - O Uso dos Limites de Atterberg na Classificação dos Solos Tropicais - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, VII - Olinda/Recife - 1982 - Anais - Recife - ABMS - 1982 - volume V - p. 262-278
- VARGAS, M. - Identificação e Classificação de Solos Tropicais - In: SEMINARIO EM GEOTECNIA DE SOLOS TROPICAIS - Brasília-DF - 1987 - Anais - Brasília - ABMS-DF - 1987
- VILLIBOR, D.F.; CORRÊA, F.C. e NOGAMI, J.S. - Os Solos Arenosos Finos - Estado Atual de sua Utilização em Bases de Rodovias Paulistas - CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS, V - São Paulo - 1974 - Anais - São Paulo - ABMS - 1974 - Volume II - p.53-63

- VILLIBOR, D.F. - Pavimentos Econômicos: Novas Considerações - Tese de Doutorado - EESC-USP - 1981
- VILLIBOR, D.F. e NOGAMI, J.S. - Comparações de Solos: Nova Classificação - In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, VII - Olinda/Recife - 1982 - Anais - Recife - ABMS - 1982 - Volume V - p. 160-173
- WINTERMYER, A.M. e KINTER, E.B. - Dispersing Agents for the Particle Size Analysis of Soils - HRB - 95 - P. 1-14 - Jan. 1954
- WU, T.H. - Soil Mechanics - Allyn and Bacon - 1967
- YATES, F. - The Design and Analysis of Factorial Experiments - Imperial Bureau of Soil Science - Harpenden - 1957
- YATES, F. - Experimental Design - Griffin London - 1970
- YONG, R.N. e WARKENTIN, B.P. - Soil Properties and Behaviour - Elsevier-Scientific Publishing Co. - vol.5 - 1975
- YSHIBA, J.K. - Algumas Considerações Relativas a Solos Compactados, sob Esforços de Tração - Dissertação de Mestrado - EESC-USP - 1984

ANEXO A

ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

ANEXO A.1

USP - ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - STT		
DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A	
	TB.	

Classificação: <i>Argila silteosa</i>	Local: <i>SANTA BÁRBARA DOESTE</i>
<i>poço areoso</i>	Sond. nº: <i>(5)</i> Prof.:
	Operador: <i>José Lima</i> / /

UMIDADE		
Cápsula	nº	<i>590</i>
Sólidos + Tara + Água	(g)	<i>30,82</i>
Sólidos + Tara	(g)	<i>30,38</i>
Tara	(g)	<i>10,17</i>
Água	(g)	<i>0,44</i>
Sólidos	(g)	<i>20,24</i>
Umidade	(%)	<i>2,48</i>

MASSA DO SOLO SECO		
	Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	
Recipiente + Solo	(g)	
Recipiente	(g)	
Solo Úmido	(g)	<i>150,00</i>
Umidade	(%)	<i>2,48</i>
Solo Seco	(g)	<i>146,80</i>

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	<i>P-5</i>	<i>P-5</i>	<i>P-5</i>	
Picnômetro + Sólidos + Água = M <sub>1</sub>	(g)	<i>805,63</i>	<i>805,27</i>	<i>805,06</i>	
Temperatura = T	(°C)	<i>19,0</i>	<i>22,0</i>	<i>25,0</i>	
Picnômetro + Água = M <sub>2</sub>	(g)	<i>712,94</i>	<i>712,58</i>	<i>712,15</i>	
Massa dos Sólidos = M <sub>s</sub>	(g)	<i>146,80</i>	<i>146,80</i>	<i>146,80</i>	
Massa Esp. da Água a T°C = P <sub>w</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	<i>0,9984</i>	<i>0,9978</i>	<i>0,9971</i>	
Massa Esp. dos Sólidos = P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	<i>2,709</i>	<i>2,707</i>	<i>2,716</i>	
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,711 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

## ANEXO A.2

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB.

Classificação: <i>Argila</i>	Local: <i>Ribeirão Preto</i>
<i>Silte - arenosa</i>	Sond. nº: <i>(R)</i> Prof.:
	Operador: <i>José Lemos 1/1</i>

UMIDADE		
Cápsula	nº	<i>557</i>
Sólidos + Tara + Água	(g)	<i>29,65</i>
Sólidos + Tara	(g)	<i>28,36</i>
Tara	(g)	<i>11,35</i>
Água	(g)	<i>1,29</i>
Sólidos	(g)	<i>17,01</i>
Umidade	(%)	<i>7,58</i>

MASSA DO SOLO SECO		
	Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	
Recipiente + Solo	(g)	
Recipiente	(g)	
Solo Úmido	(g)	<i>150,00</i>
Umidade	(%)	<i>7,58</i>
Solo Seco	(g)	<i>139,43</i>

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	<i>P-5</i>	<i>P-5</i>	<i>P-5</i>	
Picnômetro + Sólidos + Água = M <sub>1</sub>	(g)	<i>808,64</i>	<i>808,05</i>	<i>807,60</i>	
Temperatura = T	(°C)	<i>20,8</i>	<i>26,5</i>	<i>29,0</i>	
Picnômetro + Água = M <sub>2</sub>	(g)	<i>712,70</i>	<i>711,95</i>	<i>711,62</i>	
Massa dos Sólidos = M <sub>s</sub>	(g)	<i>139,43</i>	<i>139,43</i>	<i>139,43</i>	
Massa Esp. da Água a T°C = P <sub>w</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	<i>0,9981</i>	<i>0,9967</i>	<i>0,9960</i>	
Massa Esp. dos Sólidos = P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	<i>3,200</i>	<i>3,207</i>	<i>3,196</i>	
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 3,201 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

## ANEXO A.3

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB.

Classificação: ARGILA FINA	Local: JARDIM CENTEIRO de São
ARGILOSA	Sond. nº: (J) Prof.:
	Operador: José Roma 1/1

UMIDADE		
Cápsula	nº	587
Sólidos + Tara + Água	(g)	37,08
Sólidos + Tara	(g)	36,74
Tara	(g)	10,78
Água	(g)	0,34
Sólidos	(g)	25,96
Umidade	(%)	1,31

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº		
Recipiente + Solo	(g)		
Recipiente	(g)		
Solo Úmido	(g)	150,00	
Umidade	(%)	1,31	
Solo Seco	(g)	148,06	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	P-5	P-5	P-5	
Picnômetro + Sólidos + Água = M <sub>1</sub>	(g)	805,68	804,54	804,08	
Temperatura = T	(°C)	23,0	31,0	35,0	
Picnômetro + Água = M <sub>2</sub>	(g)	712,42	711,35	710,82	
Massa dos Sólidos = M <sub>s</sub>	(g)	148,06	148,06	148,06	
Massa Esp. da Água a T°C = P <sub>w</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	0,9976	0,9954	0,9941	
Massa Esp. dos Sólidos = P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	2,695	2,686	2,686	
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,689 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO A.4

USP - ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB.

Classificação: ARGILA FINA	Local: BRGA
ARGILOSA	Sond. nº: (B) Prof.:
	Operador: José Lomana 1-1

UMIDADE		
Cápsula	nº	532
Sólidos + Tara + Água	(g)	34,53
Sólidos + Tara	(g)	33,68
Tara	(g)	11,13
Água	(g)	0,85
Sólidos	(g)	22,55
Umidade	(%)	3,77

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº		
Recipiente + Solo	(g)		
Recipiente	(g)		
Solo Úmido	(g)	155,00	
Umidade	(%)	3,77	
Solo Seco	(g)	144,55	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	P-5	P-5	P-5	
Picnômetro + Sólidos + Água = M <sub>1</sub>	(g)	803,21	802,48	801,82	
Temperatura = T	(°C)	23,0	29,5	35,0	
Picnômetro + Água = M <sub>2</sub>	(g)	712,42	711,56	710,82	
Massa dos Sólidos = M <sub>s</sub>	(g)	144,55	144,55	144,55	
Massa Esp. da Água a T°C = P <sub>w</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	0,9976	0,9958	0,9941	
Massa Esp. dos Sólidos = P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	2,682	2,684	2,683	
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,683 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO A.5

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB

Classificação: ARGILA SILTO -	Local: R. BARRÃO PRETO
- ARENOSAS	Sond. nº: (R) Prof.:
	Operador: José Romão 23 108 11988

Obs. - - material seco ao ar e passado na peneira de 0,15 mm (#100);  
 - dispersão mecânica por 20 minutos;  
 - 125 ml de Hexametáfosfato de Sódio (45,7 g/l).

UMIDADE		
Cápsula	nº	960
Sólidos + Tara + Água	(g)	62,80
Sólidos + Tara	(g)	62,06
Tara	(g)	25,29
Água	(g)	0,74
Sólidos	(g)	36,77
Umidade	(%)	2,01

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	9122	
Recipiente + Solo	(g)	42,07	
Recipiente	(g)	22,50	
Solo Úmido	(g)	19,57	
Umidade	(%)	2,01	
Solo Seco	(g)	19,18	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	P <sub>1</sub>			
Picnômetro + Sólidos + Água = M <sub>1</sub>	(g)	673,89			
Temperatura = T	(°C)	18,2			
Picnômetro + Água = M <sub>2</sub>	(g)	660,65			
Massa dos Sólidos = M <sub>s</sub>	(g)	19,18			
Massa Esp. da Água a T°C = P <sub>w</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	1,0065			
Massa Esp. dos Sólidos = P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	3,250			
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 3,250 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO A.6

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT	
DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
	TR

Classificação: ARGILA FINA	Local: BRSA
ARGILOSA	Sond. nº: (B) Prof.:
	Operador: <i>João Roberto</i> 23 108 11583

Obs. - material seco ao ar e passado na peneira de 0,15 mm (# 100);  
 - dispersão mecânica por 20 minutos;  
 - 125 ml de Hexametáfosfato de Sódio (45,7 g/l).

UMIDADE		
Cápsula	nº	φ 33
Sólidos + Tara + Água	(g)	43,26
Sólidos + Tara	(g)	43,00
Tara	(g)	24,07
Água	(g)	0,26
Sólidos	(g)	18,93
Umidade	(%)	1,37

MASSA DO SOLO SECO		
	Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	φ 174
Recipiente + Solo	(g)	68,00
Recipiente	(g)	22,77
Solo Úmido	(g)	45,23
Umidade	(%)	1,37
Solo Seco	(g)	44,62

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>		
Picnômetro + Sólidos + Água = M <sub>1</sub>	(g)	688,82	689,18		
Temperatura = T	(°C)	16,5	14,5		
Picnômetro + Água = M <sub>2</sub>	(g)	660,83	661,03		
Massa dos Sólidos = M <sub>s</sub>	(g)	44,62	44,62		
Massa Esp. da Água a T°C = P <sub>w</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	1,0069	1,0073		
Massa Esp. dos Sólidos = P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	2,702	2,729		
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,715 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO A.7

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB

Classificação: <i>Silt e Argiloso</i>	Local: <i>Rod. Castelo Branco</i>
<i>Argila Argilosa</i>	Sond. nº: <i>(C)</i> Prof.:
	Operador: <i>José Leonardo de 109188</i>

- Obs. -
- material passado na peneira de 0,42 mm (#40);
  - material na umidade natural;
  - dispersão mecânica por 20 minutos;
  - 125 ml de Hexametáfosfato de sódio (45,7 g/l)

UMIDADE		
Cápsula	nº	<i>910</i>
Sólidos + Tara + Água	(g)	<i>37,50</i>
Sólidos + Tara	(g)	<i>35,09</i>
Tara	(g)	<i>24,43</i>
Água	(g)	<i>2,41</i>
Sólidos	(g)	<i>10,66</i>
Umidade	(%)	<i>22,61</i>

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	<i>9152</i>	
Recipiente + Solo	(g)	<i>52,04</i>	
Recipiente	(g)	<i>23,98</i>	
Solo Úmido	(g)	<i>28,06</i>	
Umidade	(%)	<i>22,61</i>	
Solo Seco	(g)	<i>22,89</i>	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	<i>P1</i>	<i>P1</i>		
Picnômetro + Sólidos + Água = M1	(g)	<i>674,31</i>	<i>674,62</i>		
Temperatura = T	(°C)	<i>24,8</i>	<i>22,3</i>		
Picnômetro + Água = M2	(g)	<i>659,91</i>	<i>660,20</i>		
Massa dos Sólidos = Ms	(g)	<i>22,89</i>	<i>22,89</i>		
Massa Esp da Água a T°C = Pw	(g/cm³)	<i>1,00504</i>	<i>1,0050</i>		
Massa Esp. dos Sólidos = Ps	(g/cm³)	<i>2,710</i>	<i>2,718</i>		
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,714 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO A.8

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB

Classificação: <i>ARGILA FINA</i>	Local: <i>Deus Corrêas</i>
<i>ARGILOSA (LATERÍTEA)</i>	Sond. nº: <i>(D-5-L)</i> Prof.:
	Operador: <i>Di. Roman 16 10911987</i>

*CDM - material na umidade natural e passado na peneira de 0,42 mm (# 40).  
 - dispersão mecânica por 20 minutos;  
 - 125 ml de Heximetato de Sódio (45,7 g/l).*

UMIDADE		
Cápsula	nº	<i>5164</i>
Sólidos + Tara + Água	(g)	<i>59,27</i>
Sólidos + Tara	(g)	<i>55,41</i>
Tara	(g)	<i>21,02</i>
Água	(g)	<i>3,86</i>
Sólidos	(g)	<i>34,39</i>
Umidade	(%)	<i>11,21</i>

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	<i>497</i>	
Recipiente + Solo	(g)	<i>110,77</i>	
Recipiente	(g)	<i>43,02</i>	
Solo Úmido	(g)	<i>67,75</i>	
Umidade	(%)	<i>11,21</i>	
Solo Seco	(g)	<i>60,92</i>	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	<i>P1</i>			
Picnômetro + Sólidos + Água = M1	(g)	<i>638,54</i>			
Temperatura = T	(°C)	<i>20,0</i>			
Picnômetro + Água = M2	(g)	<i>660,46</i>			
Massa dos Sólidos = Ms	(g)	<i>60,92</i>			
Massa Esp. da Água a T°C = Pw	(g/cm³)	<i>1,0061</i>			
Massa Esp. dos Sólidos = Ps	(g/cm³)	<i>2,682</i>			
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,682 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO A.9

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB

Classificação: ARGILA FINA	Local: Dois Córregos
ARGILOSA (Saprolítica)	Sond. nº: (D-S-S) Prof.:
	Operador: José Carlos de 125188

- Obs - material na unidade natural e passado na peneira de 0,42 mm (#40);  
 - dispersão mecânica por 20 minutos;  
 - 125 ml de Hexametáfosfato de Sódio (45,7 g/l).

UMIDADE		
Cápsula	nº	624
Sólidos + Tara + Água	(g)	49,48
Sólidos + Tara	(g)	39,63
Tara	(g)	24,93
Água	(g)	9,85
Sólidos	(g)	14,70
Umidade	(%)	5,78

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	435	
Recipiente + Solo	(g)	105,65	
Recipiente	(g)	43,14	
Solo Úmido	(g)	62,51	
Umidade	(%)	5,78	
Solo Seco	(g)	59,09	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	P2			
Picnômetro + Sólidos + Água = M1	(g)	706,60			
Temperatura = T	(°C)	18,0			
Picnômetro + Água = M2	(g)	669,54			
Massa dos Sólidos = Ms	(g)	59,09			
Massa Esp. da Água a T°C = Pw	(g/cm³)	1,0066			
Massa Esp. dos Sólidos = Ps	(g/cm³)	2,700			
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,700 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO A.10

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB

Classificação: ARGILA	Local: Dois Córregos
ARGILOSA (LATERÍTICA)	Sond. nº: (D-C-L) Prof.:
	Operador: José Roman 16 109188

Obs: - material na umidade natural e passado na peneira de 0,15 mm (# 100).  
 - dispersão mecânica por 20 minutos.  
 - 125 ml de Hexametáfosfato de sódio (45,7 g/l).

UMIDADE		
Cápsula	nº	564
Sólidos + Tara + Água	(g)	51,10
Sólidos + Tara	(g)	47,36
Tara	(g)	25,47
Água	(g)	3,74
Sólidos	(g)	21,89
Umidade	(%)	17,09

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	490	
Recipiente + Solo	(g)	127,05	
Recipiente	(g)	44,63	
Solo Úmido	(g)	82,42	
Umidade	(%)	17,09	
Solo Seco	(g)	70,33	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	D2			
Picnômetro + Sólidos + Água = M <sub>1</sub>	(g)	715,05			
Temperatura = T	(°C)	22,0			
Picnômetro + Água = M <sub>2</sub>	(g)	669,20			
Massa dos Sólidos = M <sub>s</sub>	(g)	70,39			
Massa Esp. da Água a T°C = P <sub>w</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	1,0057			
Massa Esp. dos Sólidos = P <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> )	2,884			
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,884 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

## ANEXO A.11

USP · ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS · STT		
	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	A
		TB

Classificação: ARGILA SILTOSA	Local: Dois Córregos
(Soprolítica)	Sond. nº: (D-C-S) Prof.:
	Operador: José Roberto de 1091 88

Obs: - material na umidade natural e passado na peneira de 9,52 mm (# 40);  
 - dispersão mecânica por 20 minutos;  
 - 125 ml de Hexametáfosfato de Sódio (45,7 g/l).

UMIDADE		
Cápsula	nº	639
Sólidos + Tara + Água	(g)	37,40
Sólidos + Tara	(g)	33,49
Tara	(g)	22,74
Água	(g)	3,91
Sólidos	(g)	10,75
Umidade	(%)	36,70

MASSA DO SOLO SECO			
		Antes do Ensaio	Depois do Ensaio
Recipiente	nº	354	
Recipiente + Solo	(g)	90,36	
Recipiente	(g)	38,56	
Solo Úmido	(g)	51,80	
Umidade	(%)	36,40	
Solo Seco	(g)	37,98	

DETERMINAÇÃO		1	2	3	4
Picnômetro	nº	P1			
Picnômetro + Sólidos + Água = M1	(g)	684,87			
Temperatura = T	(°C)	20,0			
Picnômetro + Água = M2	(g)	660,46			
Massa dos Sólidos = Ms	(g)	37,98			
Massa Esp. da Água a T°C = Pw	(g/cm³)	1,0061			
Massa Esp. dos Sólidos = Ps	(g/cm³)	2,814			
Massa Específica dos Sólidos	$P_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \times P_w \Rightarrow P_s = 2,814 \text{ (g/cm}^3\text{)}$				

ANEXO B

CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS  
DE LABORATÓRIO

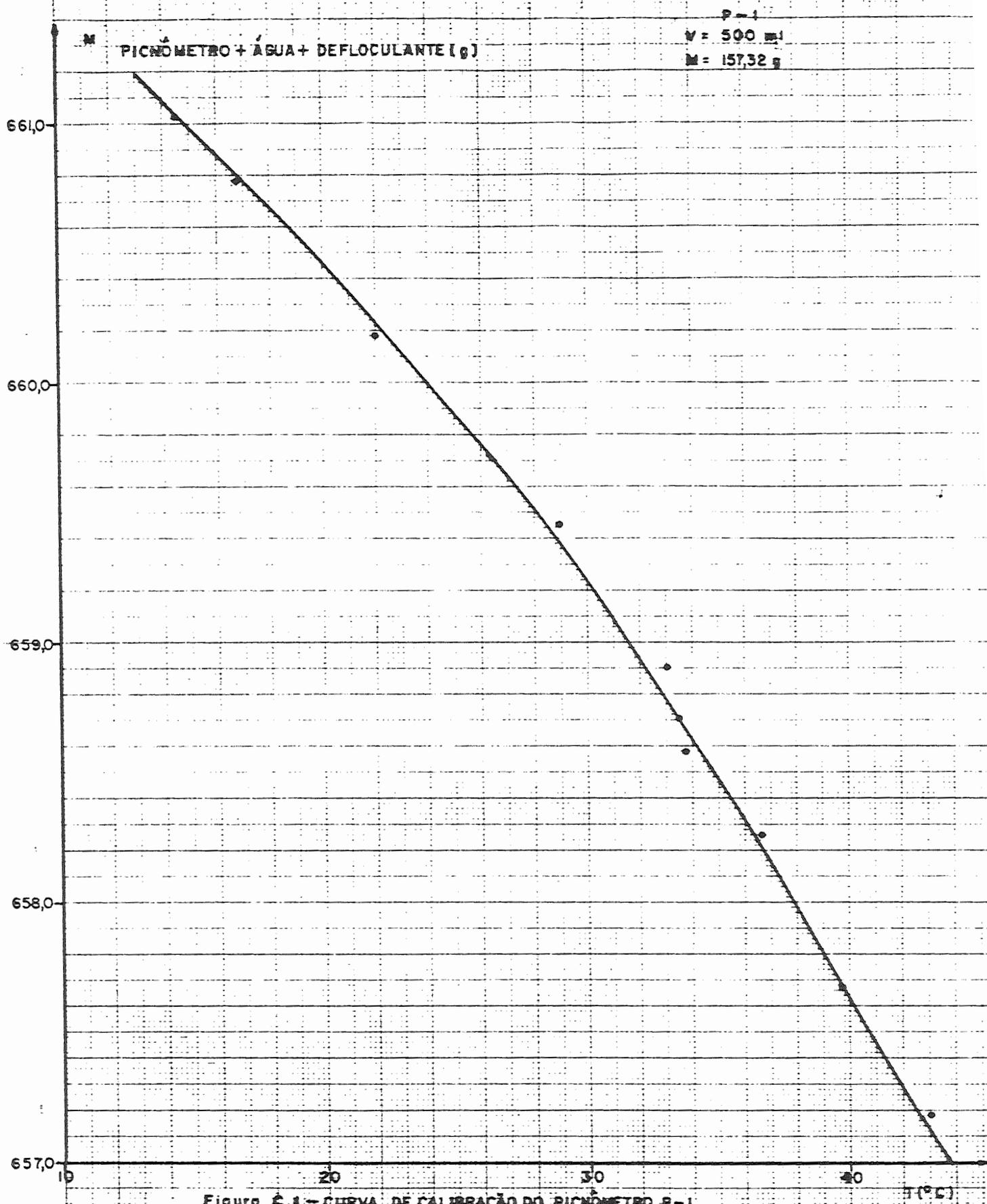


Figura 5.1 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO P-1

Determinação da Massa do Picnômetro mais Água Destilada mais Defloculante (Hexametafosfato de Sódio) em Função da Temperatura

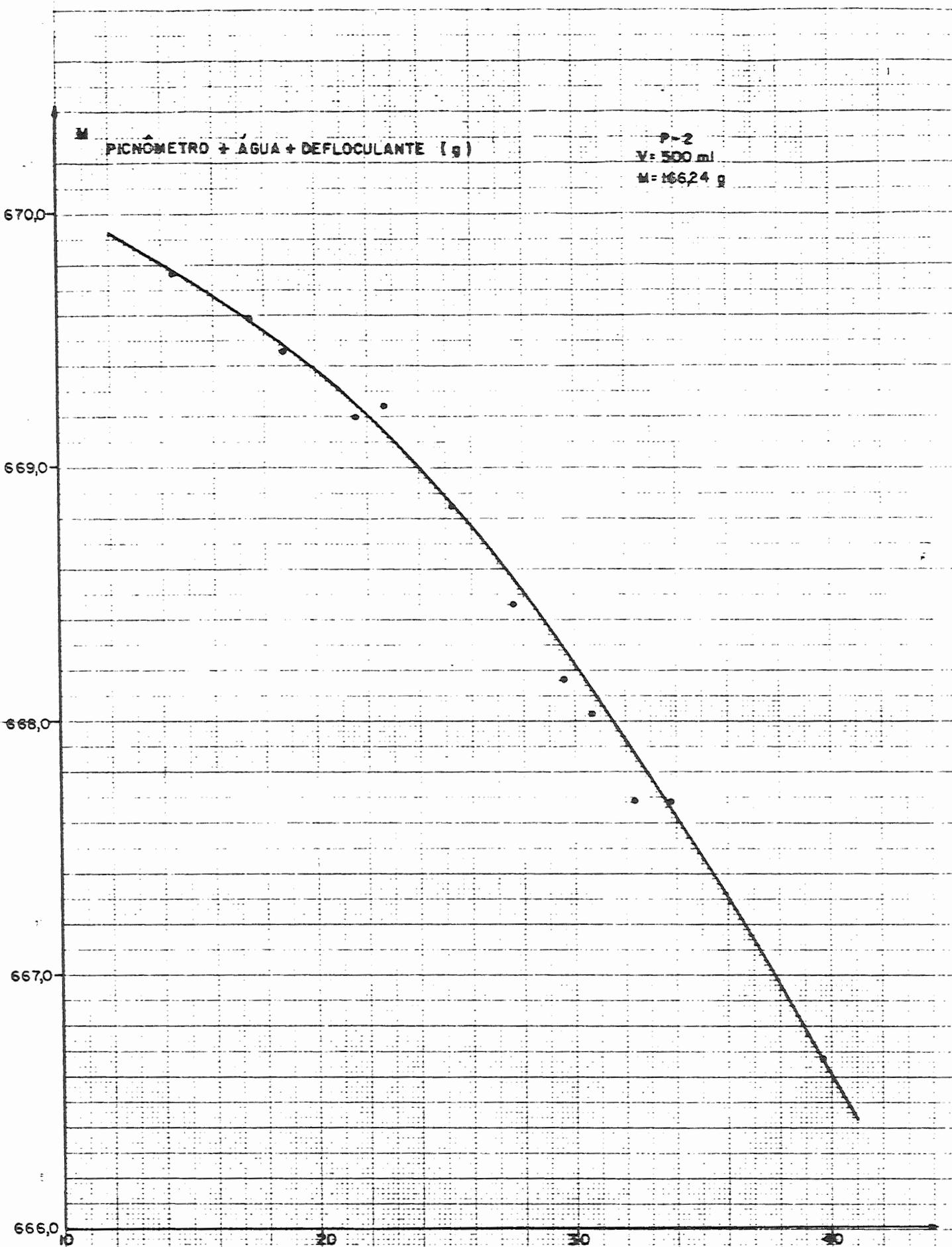


Figure C.2 — CURVA DE CALIBRAÇÃO PICNÔMETRO P-2  
Determinação de massa de Picnômetro mais Água Destilada  
mais Defloculante [Hexametáfosfato de Sódio] em Função  
da Temperatura

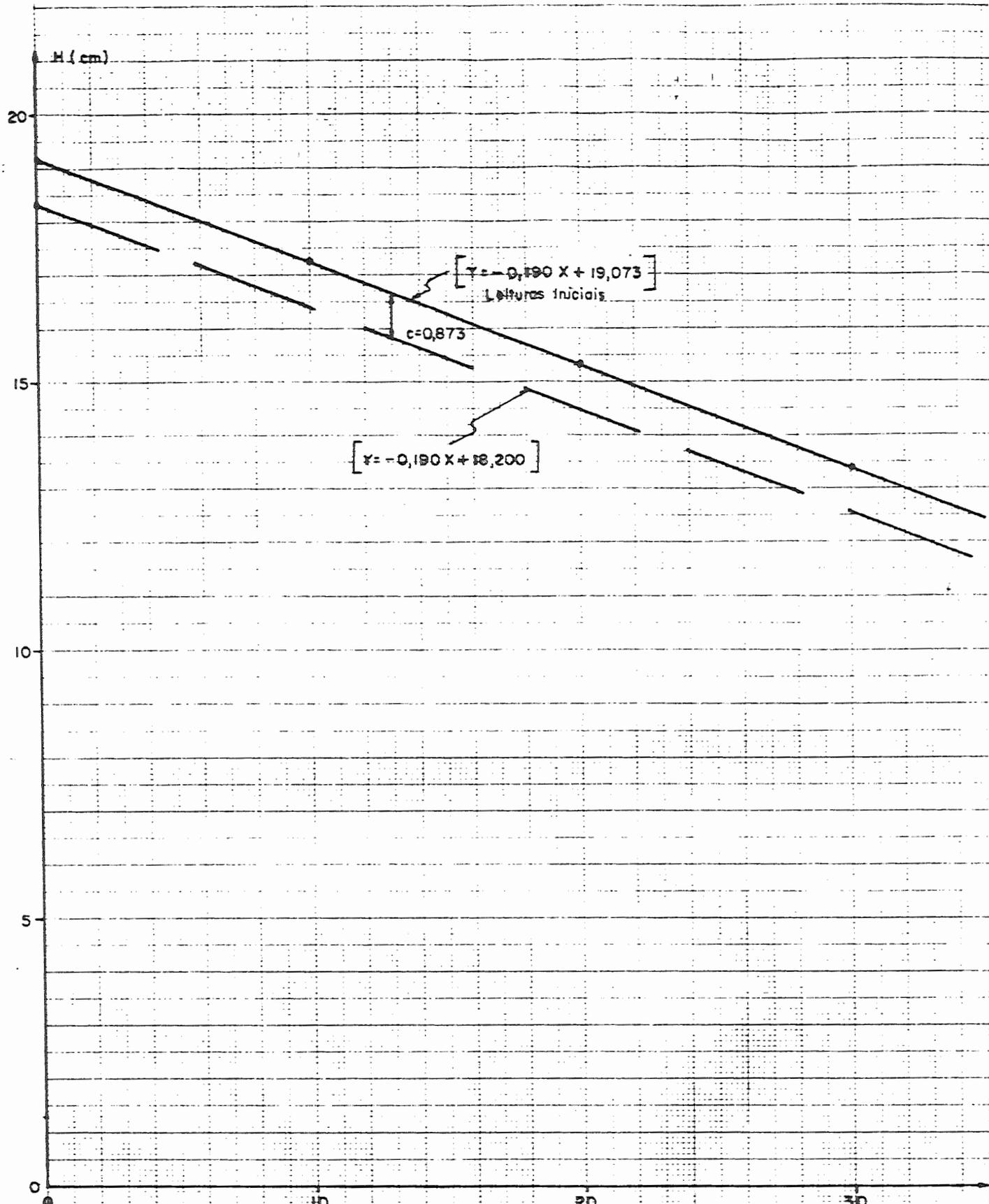


Figura C.3 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO 4B,  
 PARA AS PROJETAS 11, 12, 13, 14, 15 E 11-  
 Determinação da Altura de Queda das Partículas  
 em Função das Leituras no Densímetro

$[ (L - 1000) \times 1000 ]$

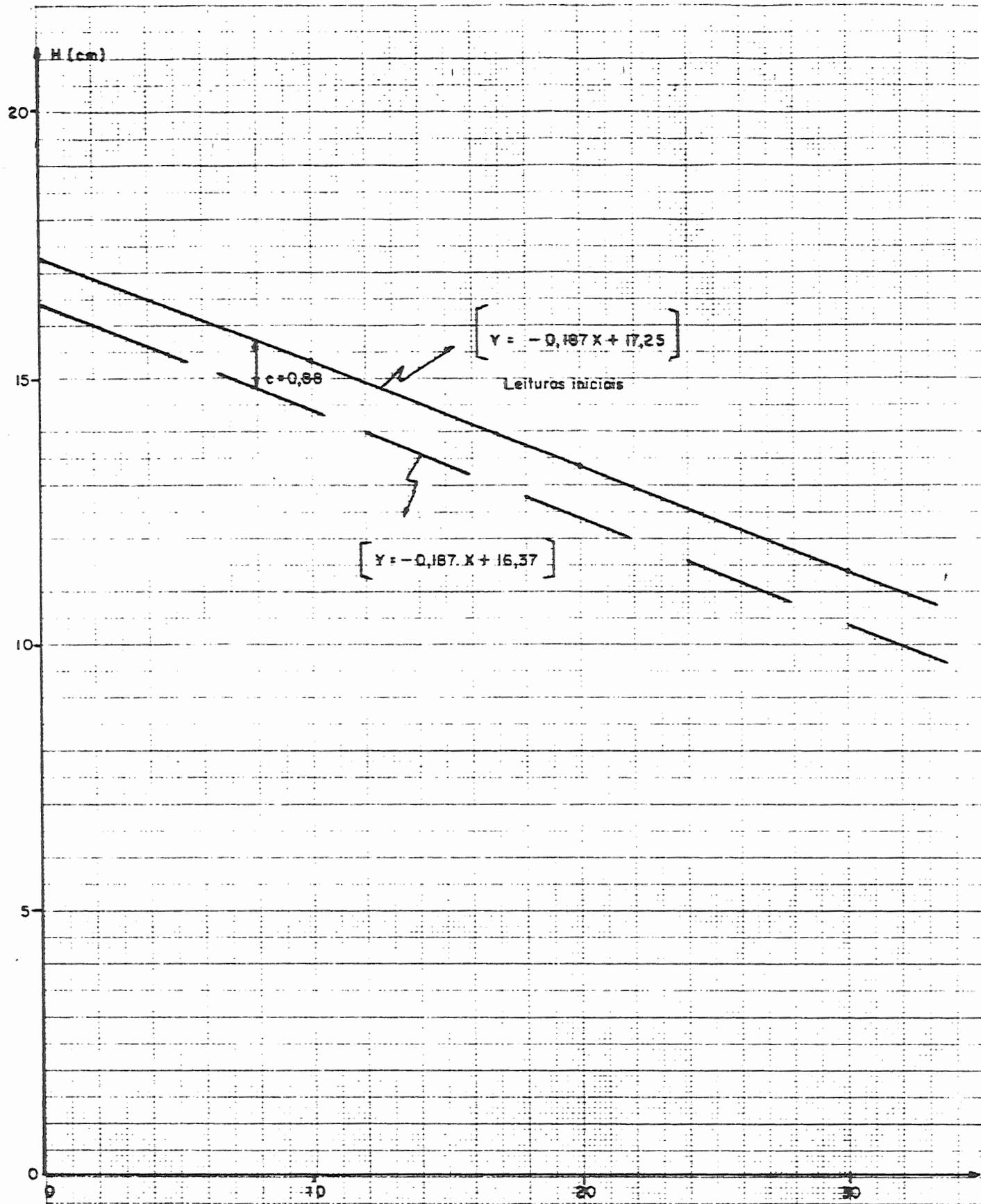


Figure C.4 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO 26, PARA AS PROJETAS 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, E 17 - Determinação da Altura de Queda das Partículas em Função das Leituras do Densímetro

$[(L-1,000) \times 1,000]$

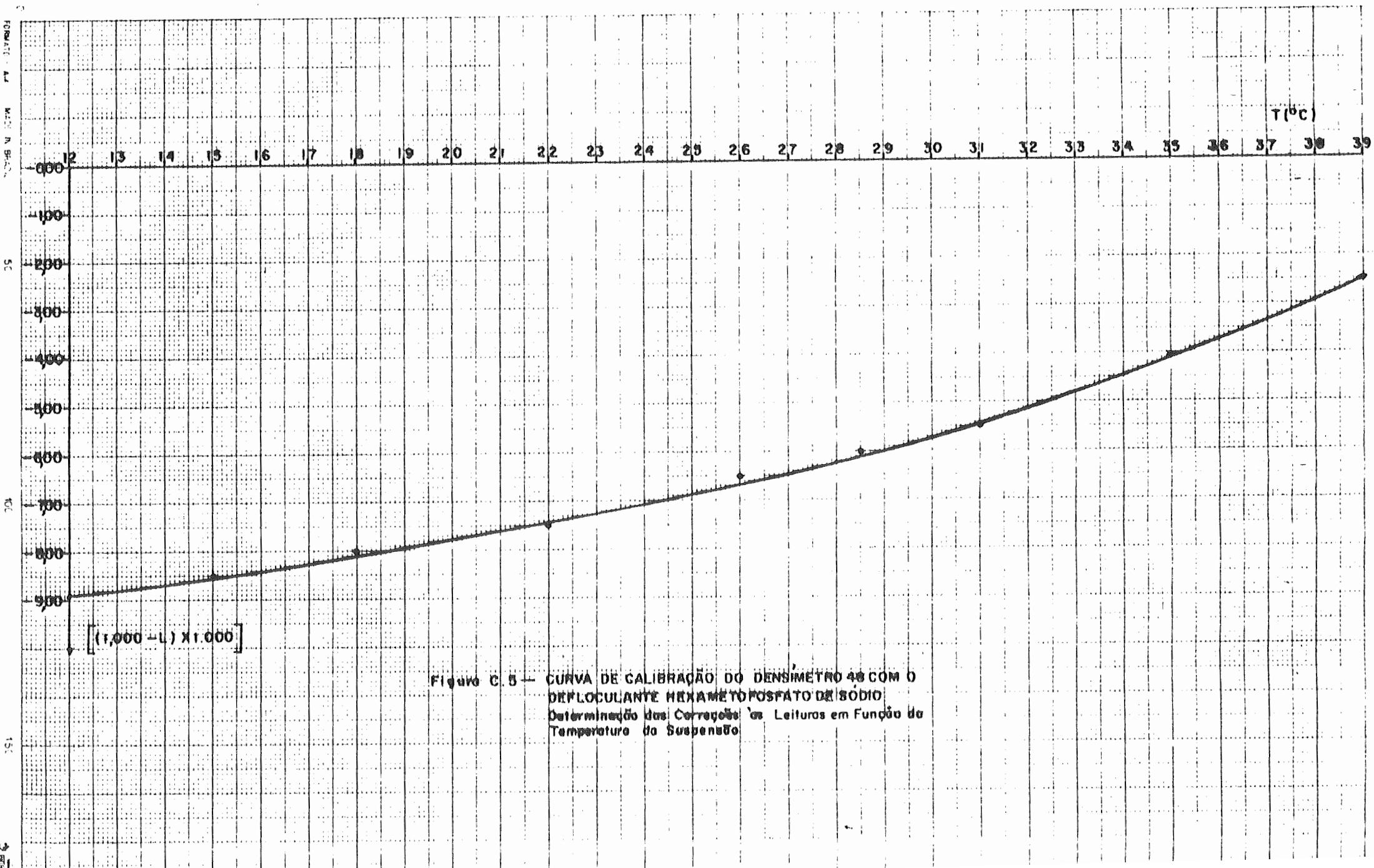


Figura C.5 — CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO 48 COM O DEFLOCULANTE HEXAMETÁFOSFATO DE SÓDIO  
 Determinação das Correções às Leituras em Função da Temperatura da Suspensão

FORMA 1  
MATERIA BRANCA

52

100

150

200

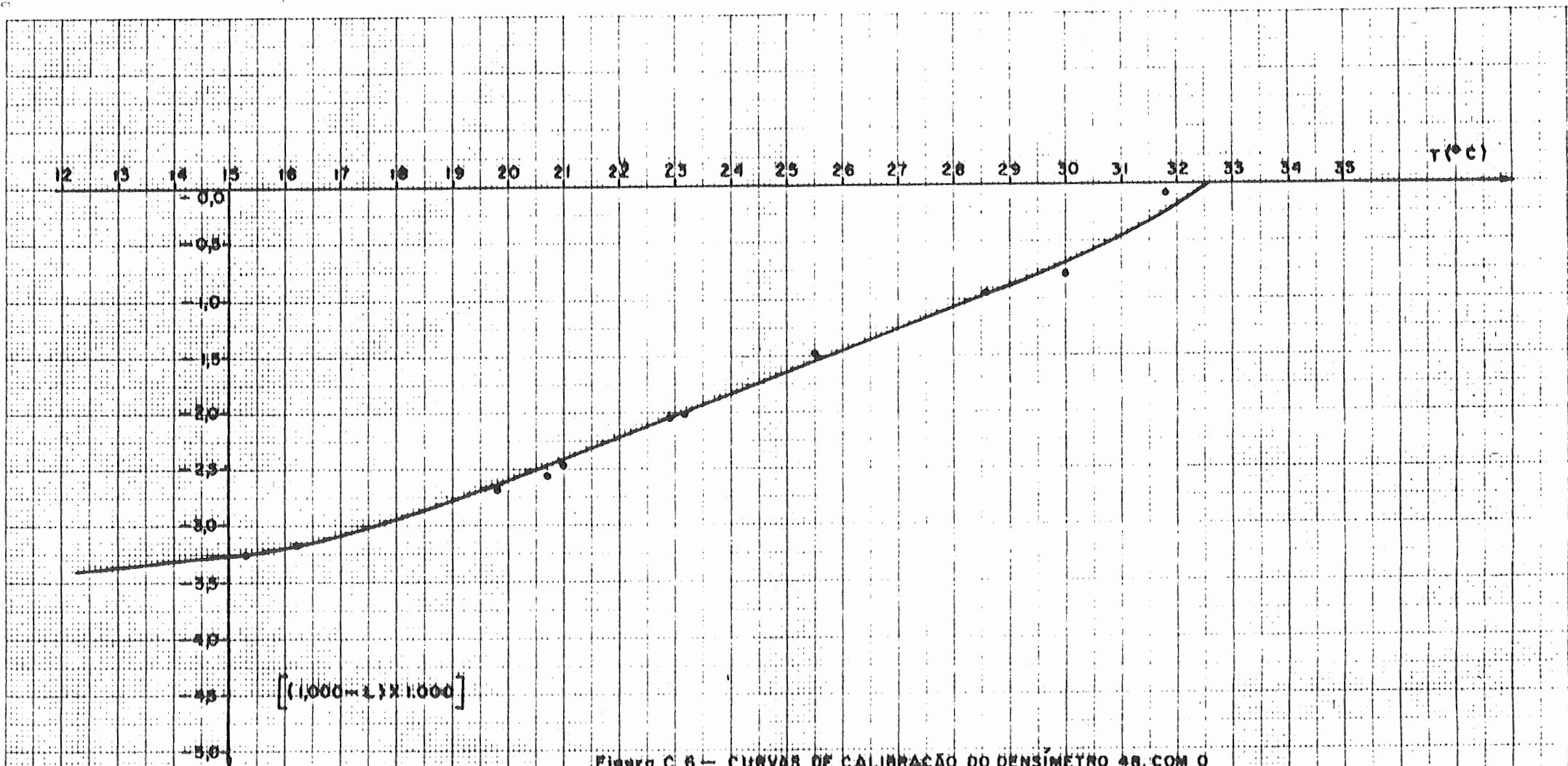


Figura C. 6 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO 48, COM O DEFLOCULANTE SILICATO DE SÓDIO  
Determinação das Correções às Leituras em Função da Temperatura da Suspensão

10000  
14  
MAD: N BR 47  
50  
40  
15  
10000

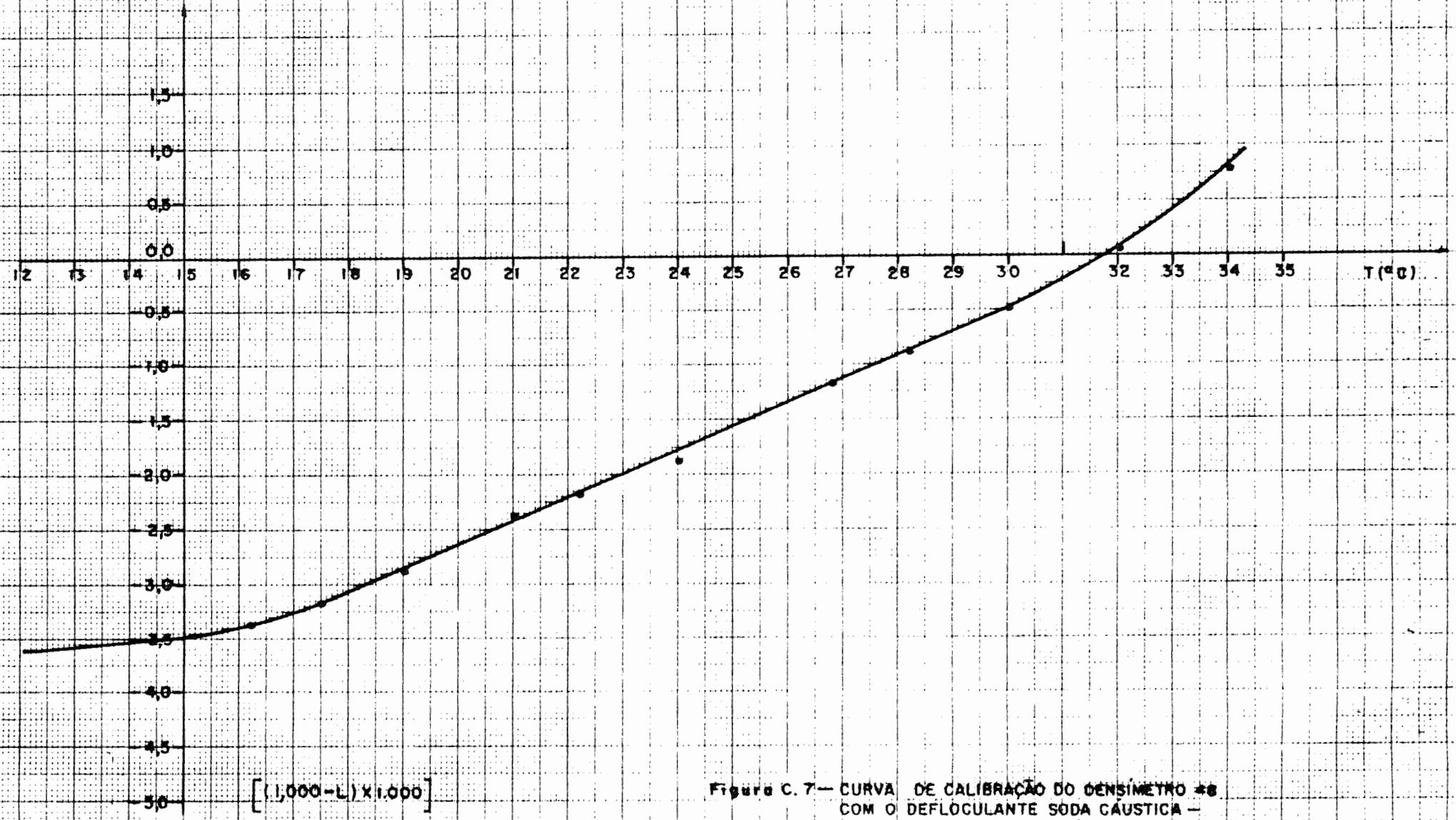


Figura C. 7— CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO #8  
COM O DEFLOCULANTE SODA CÁUSTICA —  
Determinação dos Correções às Leituras em  
Função da Temperatura da Suspensão

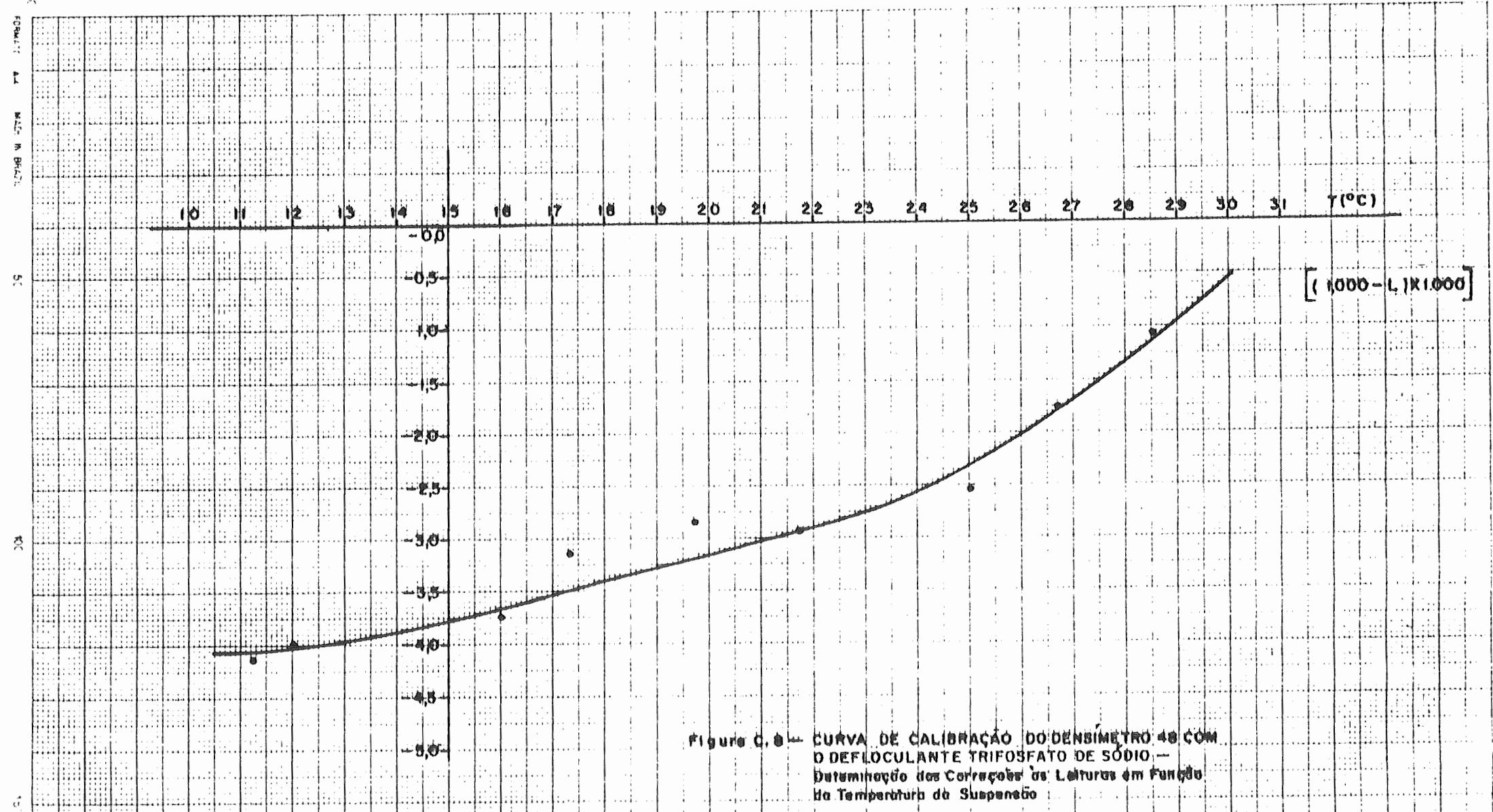


Figura C. 6 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO 48 COM O DEFLOCULANTE TRIFOSFATO DE SÓDIO. —  
 Determinação das Correções às Leituras em Função da Temperatura da Suspensão

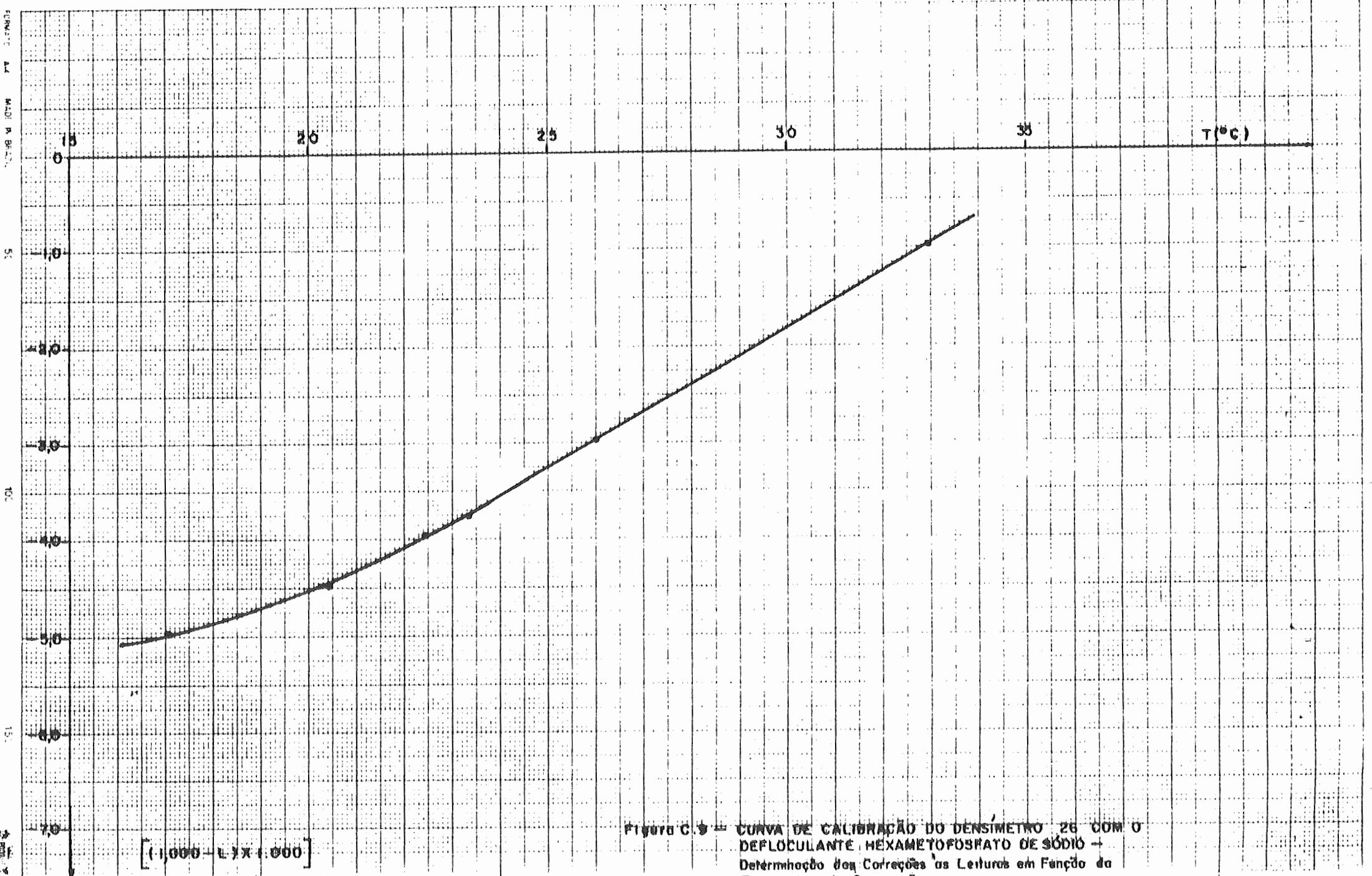


Figura C.9 = CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO 26 COM O DEFLOCULANTE HEXAMETOFOSFATO DE SÓDIO - Determinação das Correções às Leituras em Função da Temperatura da Suspensão

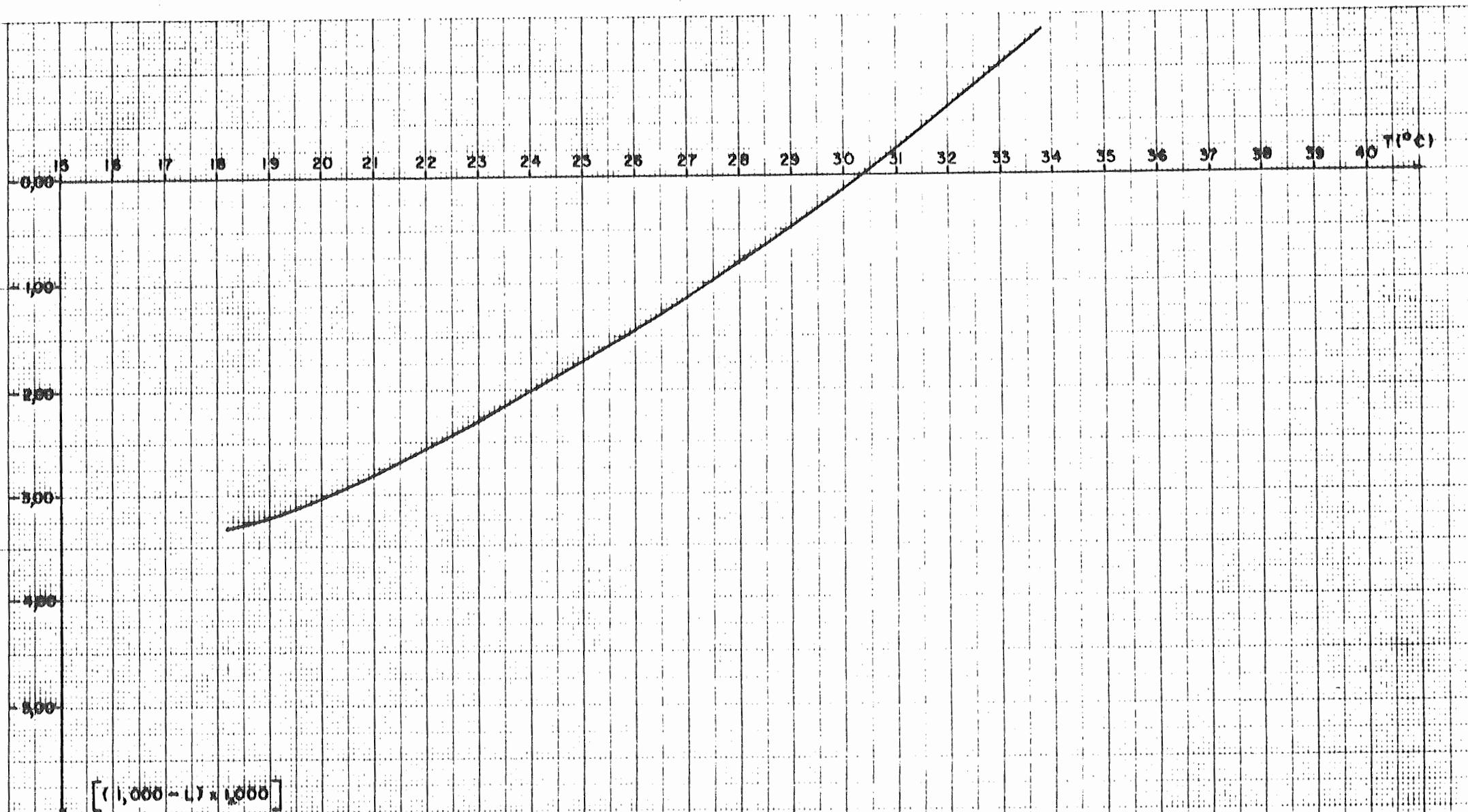


Figura C.10 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO 26 COM O DEFLOCULANTE SÓDIA CAUSTICA  
 Determinação das Correções às Leituras em Função da Temperatura da Suspensão

ANEXO C

TABELAS UTILIZADAS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS EXPERIMENTOS

Tabela C.1 - Limites Unilaterais de F (de Snedecor) ao nível de 5%.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,9	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,15	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,04	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,81	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,29
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,45	1,39	1,32	1,22	1,00

Obtida de COSTA NETO (1977), adaptada a partir de resultados de E.S. Pearson e H. O. Hartley (Biometrika Tables for Statisticians, Cambridge Univ. Press, 1956).

Tabela C.2 - Limites Unilaterais de F (de Snedecor) ao nível de 1%.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	4032	4999,5	5403	5625	5764	5859	5928	5982	6022	6056	6106	6157	6209	6235	6261	6287	6313	6339	6366
2	98,50	99,00	99,17	99,25	99,30	99,33	99,36	99,37	99,39	99,40	99,42	99,43	99,45	99,46	99,47	99,47	99,48	99,49	99,50
3	14,12	14,82	15,16	15,38	15,52	15,63	15,71	15,77	15,81	15,83	15,85	15,87	15,88	15,89	15,90	15,91	15,92	15,93	15,94
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,98	14,80	14,66	14,55	14,37	14,20	14,02	13,93	13,84	13,75	13,65	13,56	13,46
5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,46	10,29	10,16	10,05	9,89	9,72	9,55	9,47	9,38	9,29	9,20	9,11	9,02
6	13,75	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,72	7,56	7,40	7,31	7,23	7,14	7,06	6,97	6,88
7	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,99	6,84	6,72	6,62	6,47	6,31	6,16	6,07	5,99	5,91	5,82	5,74	5,65
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,91	5,81	5,67	5,52	5,36	5,28	5,20	5,12	5,03	4,95	4,86
9	10,56	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,61	5,47	5,35	5,26	5,11	4,96	4,81	4,73	4,65	4,57	4,48	4,40	4,31
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06	4,94	4,85	4,71	4,56	4,41	4,33	4,25	4,17	4,08	4,00	3,91
11	9,65	7,21	6,22	5,67	5,32	5,07	4,89	4,74	4,63	4,54	4,40	4,25	4,10	4,02	3,94	3,86	3,78	3,69	3,60
12	9,13	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,64	4,50	4,39	4,30	4,16	4,01	3,86	3,78	3,70	3,62	3,54	3,45	3,36
13	9,07	6,70	5,74	5,21	4,86	4,62	4,44	4,30	4,19	4,10	3,96	3,82	3,66	3,59	3,51	3,43	3,34	3,25	3,17
14	8,95	6,51	5,56	5,04	4,69	4,46	4,28	4,14	4,03	3,94	3,80	3,66	3,51	3,43	3,35	3,27	3,18	3,09	3,00
15	8,68	6,36	5,41	4,89	4,56	4,32	4,14	4,00	3,89	3,80	3,67	3,52	3,37	3,29	3,21	3,13	3,05	2,96	2,87
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,55	3,41	3,26	3,18	3,10	3,02	2,93	2,84	2,75
17	8,40	6,11	5,18	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,46	3,31	3,16	3,08	3,00	2,92	2,83	2,75	2,65
18	8,24	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,84	3,71	3,60	3,51	3,37	3,23	3,08	3,00	2,92	2,84	2,75	2,66	2,57
19	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,43	3,30	3,15	3,00	2,92	2,84	2,76	2,67	2,58	2,49
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	3,46	3,37	3,23	3,09	2,94	2,86	2,78	2,69	2,61	2,52	2,42
21	8,02	5,78	4,87	4,37	4,04	3,81	3,64	3,51	3,40	3,31	3,17	3,03	2,88	2,80	2,72	2,64	2,55	2,46	2,36
22	7,95	5,72	4,82	4,31	3,99	3,76	3,59	3,45	3,35	3,26	3,12	2,98	2,83	2,75	2,67	2,58	2,50	2,40	2,31
23	7,88	5,66	4,76	4,26	3,94	3,71	3,54	3,41	3,30	3,21	3,07	2,93	2,78	2,70	2,62	2,54	2,45	2,35	2,26
24	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,50	3,36	3,26	3,17	3,03	2,89	2,74	2,66	2,58	2,49	2,40	2,31	2,21
25	7,77	5,57	4,68	4,18	3,85	3,63	3,46	3,32	3,22	3,13	2,99	2,85	2,70	2,62	2,54	2,45	2,36	2,27	2,17
26	7,72	5,53	4,64	4,14	3,82	3,59	3,42	3,29	3,18	3,09	2,96	2,81	2,66	2,58	2,50	2,42	2,33	2,23	2,13
27	7,68	5,49	4,60	4,11	3,78	3,56	3,39	3,26	3,15	3,06	2,93	2,78	2,63	2,55	2,47	2,38	2,29	2,20	2,10
28	7,64	5,45	4,57	4,07	3,75	3,53	3,36	3,23	3,12	3,03	2,90	2,75	2,60	2,52	2,44	2,35	2,26	2,17	2,06
29	7,60	5,42	4,54	4,04	3,73	3,50	3,33	3,20	3,09	3,00	2,87	2,73	2,57	2,49	2,41	2,33	2,23	2,14	2,03
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,07	2,98	2,84	2,70	2,55	2,47	2,39	2,30	2,21	2,11	2,01
40	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	3,12	2,99	2,89	2,80	2,66	2,52	2,37	2,29	2,20	2,11	2,02	1,92	1,80
60	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82	2,72	2,63	2,50	2,35	2,20	2,12	2,03	1,94	1,84	1,73	1,60
120	6,85	4,79	3,95	3,48	3,17	2,96	2,79	2,66	2,56	2,47	2,34	2,19	2,03	1,95	1,86	1,76	1,66	1,53	1,38
$\infty$	6,63	4,61	3,78	3,32	3,02	2,80	2,64	2,51	2,41	2,32	2,18	2,04	1,88	1,79	1,70	1,59	1,47	1,32	1,00

Obtida de COSTA NETO (1977), adaptada a partir de resultados de E.S. Pearson e H. O. Hartley (Biometrika Tables for Statisticians, Cambridge Univ. Press, 1956).

Tabela C.3 - Amplitude total Studentizada (q)  
ao nível de 5% de probabilidade.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
1	18,0	27,0	32,8	37,1	40,4	43,1	45,4	47,4	49,1	52,0	55,4	59,6
2	6,09	8,3	9,8	10,9	11,7	12,4	13,0	13,5	14,0	14,7	15,7	16,8
3	4,50	5,91	6,82	7,50	8,04	8,48	8,85	9,18	9,46	9,95	10,5	11,2
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71	7,05	7,35	7,60	7,83	8,21	8,66	9,23
5	3,64	4,60	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,80	6,99	7,32	7,72	8,21
6	3,46	4,34	4,90	5,31	5,63	5,89	6,12	6,32	6,49	6,79	7,14	7,59
7	3,34	4,16	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6,00	6,16	6,43	6,76	7,17
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,40	5,60	5,77	5,92	6,18	6,48	6,87
9	3,20	3,95	4,42	4,76	5,02	5,24	5,43	5,60	5,74	5,98	6,28	6,64
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,30	5,46	5,60	5,83	6,11	6,47
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,20	5,35	5,49	5,71	5,99	6,33
12	3,08	3,77	4,20	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,40	5,62	5,88	6,21
13	3,06	3,73	4,15	4,45	4,69	4,88	5,05	5,19	5,32	5,53	5,79	6,11
14	3,03	3,70	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25	5,46	5,72	6,03
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,60	4,78	4,94	5,08	5,20	5,40	5,65	5,96
16	3,00	3,65	4,05	4,35	4,56	4,74	4,90	5,03	5,15	5,35	5,59	5,90
17	2,98	3,63	4,02	4,30	4,52	4,71	4,86	4,99	5,11	5,31	5,55	5,84
18	2,97	3,61	4,00	4,28	4,49	4,67	4,82	4,96	5,07	5,27	5,50	5,79
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04	5,23	5,46	5,75
20	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,90	5,01	5,20	5,43	5,71
24	2,92	3,53	3,90	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92	5,10	5,32	5,59
30	2,89	3,49	3,84	4,10	4,30	4,46	4,60	4,72	4,83	5,00	5,21	5,48
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,63	4,74	4,91	5,11	5,36
60	2,83	3,40	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65	4,81	5,00	5,24
120	2,80	3,36	3,69	3,92	4,10	4,24	4,36	4,48	4,56	4,72	4,90	5,13
∞	2,77	3,31	3,63	3,86	4,03	4,17	4,29	4,39	4,47	4,62	4,80	5,01

Tabela C.4 - Amplitude total Studentizada (q)  
ao nível de 1% de probabilidade.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
1	90,0	135	164	186	202	216	227	237	246	260	277	293
2	14,0	19,0	22,3	24,7	26,6	28,2	29,5	30,7	31,7	33,4	35,4	37,9
3	8,26	10,6	12,2	13,3	14,2	15,0	15,6	16,2	16,7	17,5	18,5	19,8
4	6,51	8,12	9,17	9,96	10,6	11,1	11,5	11,9	12,3	12,8	13,5	14,4
5	5,70	6,97	7,80	8,42	8,91	9,32	9,67	9,97	10,2	10,7	11,2	11,9
6	5,24	6,33	7,03	7,56	7,97	8,32	8,61	8,87	9,10	9,49	9,95	10,5
7	4,95	5,92	6,54	7,01	7,37	7,68	7,94	8,17	8,37	8,71	9,12	9,65
8	4,74	5,63	6,20	6,63	6,96	7,24	7,47	7,63	7,87	8,18	8,55	9,03
9	4,60	5,43	5,96	6,35	6,66	6,91	7,13	7,32	7,49	7,78	8,13	8,57
10	4,48	5,27	5,77	6,14	6,43	6,67	6,87	7,05	7,21	7,48	7,81	8,22
11	4,39	5,14	5,62	5,97	6,25	6,48	6,67	6,84	6,99	7,25	7,56	7,95
12	4,32	5,04	5,50	5,84	6,10	6,32	6,51	6,67	6,81	7,06	7,36	7,73
13	4,26	4,96	5,40	5,73	5,98	6,19	6,37	6,53	6,67	6,90	7,19	7,55
14	4,21	4,89	5,32	5,63	5,88	6,08	6,26	6,41	6,54	6,77	7,05	7,39
15	4,17	4,83	5,25	5,56	5,80	5,99	6,16	6,31	6,44	6,66	6,93	7,26
16	4,13	4,78	5,19	5,49	5,72	5,92	6,08	6,22	6,35	6,56	6,82	7,15
17	4,10	4,74	5,14	5,43	5,66	5,85	6,01	6,15	6,27	6,48	6,73	7,05
18	4,07	4,70	5,09	5,38	5,60	5,79	5,94	6,08	6,20	6,41	6,65	6,96
19	4,05	4,67	5,05	5,33	5,55	5,73	5,89	6,02	6,14	6,34	6,58	6,89
20	4,02	4,64	5,02	5,29	5,51	5,69	5,84	5,97	6,09	6,29	6,52	6,82
24	3,96	4,54	4,91	5,17	5,37	5,54	5,69	5,81	5,92	6,11	6,33	6,61
30	3,89	4,45	4,80	5,05	5,24	5,40	5,54	5,65	5,76	5,93	6,14	6,41
40	3,82	4,37	4,70	4,93	5,11	5,27	5,39	5,50	5,60	5,77	5,96	6,21
60	3,76	4,28	4,60	4,82	4,99	5,13	5,25	5,36	5,45	5,60	5,79	6,02
120	3,70	4,20	4,50	4,71	4,87	5,01	5,12	5,21	5,30	5,44	5,61	5,83
∞	3,64	4,12	4,40	4,60	4,76	4,88	4,99	5,08	5,16	5,29	5,45	5,65