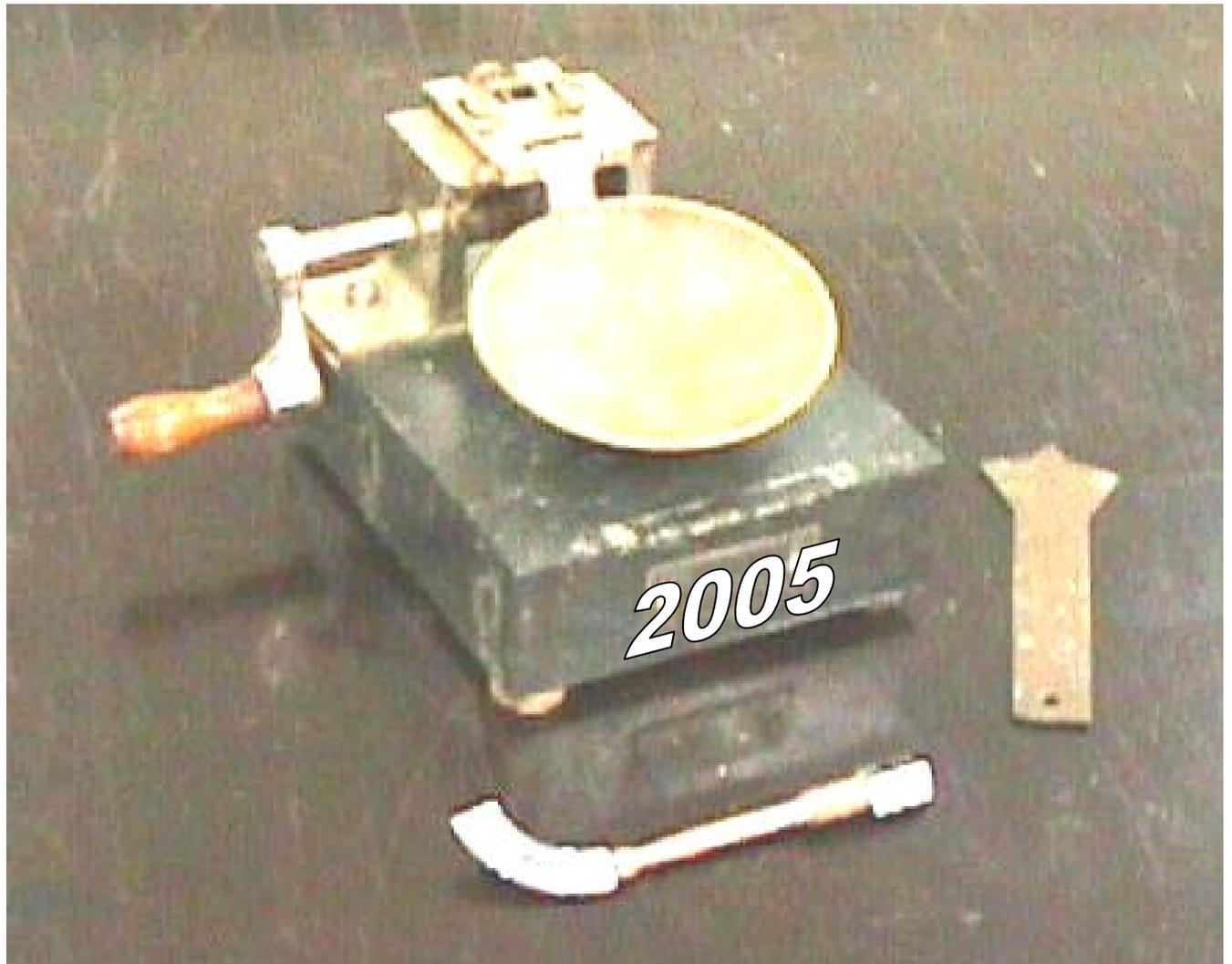




UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

Caracterização Física e Classificação dos Solos



Gil Carvalho Paulo de Almeida

ÍNDICE

3	Prólogo
6	Capítulo 1 – Principais Instrumentos
15	Capítulo 2 – Terminologia (introdução)
20	Anexo – Inspeção Visual – Primeiro Contato
26	Capítulo 3 – Propriedades Índices – Índices Físicos
36	Capítulo 4 – Coleta e Preparação de Amostras
39	Ensaios para determinação dos Índices Físicos
40	Capítulo 5 - Teor de Umidade
41	Processo da Estufa
42	Processo do Banho de Areia
43	Processo do Álcool Etílico
44	Processo do Densímetro Nuclear
45	Processo do “ <i>Speedy</i> ”
49	Capítulo 6 – Peso Específico e Densidade dos Grãos
61	Capítulo 7 – Peso Específico Aparente
64	Anexo 1 – Método do Cilindro de Cravação
66	Anexo 2 – Método do Frasco de Areia
69	Anexo 3 – Método do Óleo Grosso
70	Anexo 4 – Método do Balão de Borracha
72	Capítulo 8 – Textura – Granulometria
92	Capítulo 9 – Estados e Limites de Consistência
96	Limite de Plasticidade
98	Limite de Liquidez
105	Limite e Grau de Contração
110	Capítulo 10 – Sistemas de Classificação dos Solos
111	Classificação granulométrica
113	Sistema AASHO
114	Sistema de classificação do TRB
116	Sistema unificado de classificação de solos (SUCS)
121	Classificação para solos tropicais (MCT)
122	Classificação pela pedologia
125	Classificação pela movimentação de sedimentos
126	Capítulo 11 - Compacidade de Solos Granulares
128	Visão geral (simplificada)
129	Índice de vazios máximo
132	Índice de vazios mínimo

APRESENTAÇÃO

Este trabalho tem a intenção de facilitar ao estudante uma consulta sistemática a normas técnicas, durante aulas práticas, permitindo concentrar sua atenção nos procedimentos sem se preocupar em fazer muitas anotações. A versão digital deve ser copiada para o computador, para que possa ser atualizada. Cada assunto deve ser lido ANTES das aulas, para que dúvidas aflorem com maior facilidade.

ADVERTÊNCIA

Não se tem intenção de plagiar inadvertidamente as normas técnicas da ABNT, DNER, DER's, livros de que figuras e trechos foram reproduzidos, ou quaisquer outros trabalhos, como apostilas ou artigos. Pelo contrário, as citações são explícitas, e remetemos os leitores às fontes originais, principalmente no caso de normas técnicas, pois o engenheiro tem obrigação de consultá-las no original.

Nossa obrigação é ensinar, formar e informar. Por isso, onde algumas simplificações são introduzidas, queremos induzir o aluno a pensar e criticar, para que as ciências do solo continuem, por meio dele, a evoluir, e com rapidez.

Qualquer sugestão, crítica, ou correção a omissões e erros cometidos, será recebida com humildade e respeito.

Fevereiro de 2004

AGRADECIMENTOS

Á todos os que colaboraram ou venham a colaborar neste trabalho, com críticas, sugestões, participação na discussão e elaboração dos textos, identificação e correção de erros. Aos amigos, professores e profissionais que tiveram a paciência de ler e opinar quanto ao conteúdo e a forma. Em especial aos Professores Avelino Gonçalves Koch Torres, Jane Azevedo da Silva, Mitsuo Tsutsumi, Mario Barraza Larios, Ronaldo da Silva Ferreira.

PRÓLOGO

Este livro tem por objetivo principal organizar e discutir, de forma didática, atitudes e procedimentos de engenheiros atuando em laboratório de solos, com maior ênfase no aprendizado que no ensino.

Nas palavras de Avelino Gonçalves Kock Torres,

Estudar engenharia — não é saber apenas o “como”. Quem tem que sabê-lo são os técnicos de nível médio e os operacionais. O engenheiro tem que conceituar para indicar as soluções para problemas nunca antes enfrentados. Deve saber usar naturalmente seu potencial, pela consciência objetiva de ser um profissional do conhecimento conceitual. É ele quem define para gestores e executores o que fazer, quando e como fazer. O estudante evita a mediocridade, pela prática dos seguintes tópicos:

APRENDER A DESAPRENDER

Há que ter um compatível medo do novo, mas conviver produtivamente com ele.

APRENDER A CONCEITUAR

Definir o “porque”, frente a possíveis opções, para assim justificar sempre o “como”.

APRENDER A CORRER RISCOS

Ousar e inovar (ou seja, ser criativo, agregando valor. Todos nós somos criativos, mas poucos somos inovadores).

APRENDER A ASSUMIR RESPONSABILIDADES

Aceitar desafios como oportunidade para o crescimento pessoal e para a realização profissional. Assumir sua dimensão de incompetência, quando for o caso, como um procedimento de retomada e exercício de perseverança.

APRENDER A DECIDIR FRENTE A INCERTEZAS

Encarar o erro como uma oportunidade de melhoria, não se inibindo pela necessidade “demonstrativa” de não errar. Exercitar sempre a busca do maior número possível de dados e fatos, para o exercício de cada decisão a ser tomada. Eliminar qualquer interferência para suas decisões.

APRENDER A VENCER DIFICULDADES

Ao assumir, consigo mesmo, o compromisso de fazer prova (de ser avaliado e melhor se avaliar), honestamente e assim, ter o insucesso como desafio a ser vencido (não aceitar o faz de conta, a mentira institucionalizada).

Satisfeitas essas condições, cada um terá melhor embasamento para acionar suas potencialidades.

No primeiro capítulo será feita uma recordação sobre o uso de alguns instrumentos de medida. Destina-se a prevenir e evitar os erros e vícios mais comuns no dia a dia de um laboratório de solos.

No segundo capítulo apresentamos a nomenclatura utilizada em Geotécnica (ou Geotecnia), e uma visão introdutória dos ensaios de caracterização física dos solos – que determinam as Propriedades Índices (compostas pelos Índices Físicos, Granulometria e Índices de Consistência). A seguir é feita uma primeira abordagem à classificação visual de um solo, denominada “primeiro contacto” e que será revista e ampliada ao final do trabalho.

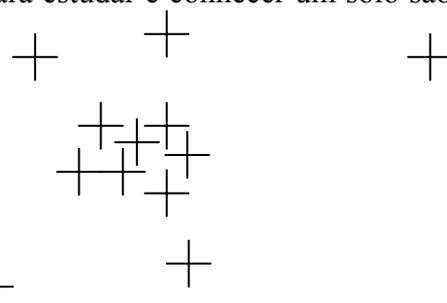
As propriedades índices são apresentadas no terceiro capítulo.

A partir do quinto capítulo, são detalhados e comentados ensaios específicos. Os primeiros são procedimentos simples, que geram resultados que serão utilizados em ensaios posteriores, ou fazem parte desses outros. É muito importante que esses primeiros ensaios sejam bem treinados e perfeitamente compreendidos, principalmente quanto ao contexto que define a precisão necessária (ou não) em seus resultados. Para isto, o “controle de qualidade” especificado para cada ensaio deve ser analisado com atenção.

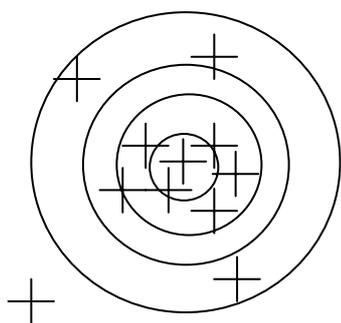
Não se aprende a conhecer solos apenas em textos. É preciso ter contato físico, olhar, apalpar, cheirar, ouvir o som que produz ao ser esfregado ou socado e até – em certas circunstâncias – conhecer seu sabor. É preciso criar experiência ao repetir experimentos e analisar seus resultados, aprender com os erros cometidos, comparar índices e propriedades com comportamentos e sempre ter em mente uma importante diferença entre os solos e os outros materiais utilizados na engenharia: solos são extremamente heterogêneos.

Por causa dessa heterogeneidade, as principais ferramentas de análise para estudar e conhecer um solo são estatísticas.

Imagine que a figura seguinte represente o resultado dos tiros desferidos, em um torneio entre campeões de tiro ao alvo. Onde estaria o centro do alvo?



Supondo serem poucos os tiros errados, já que se trata de um torneio entre campeões, e que os desvios sejam pequenos, é grande a probabilidade de que o centro do alvo esteja próximo do baricentro da figura formada por pontos. Dois pontos foram considerados “tiros perdidos” (errados). (*Supôs-se não existir tendências ou vícios nas armas ou nos atiradores*).



Um exame de laboratório é muito semelhante, já que o resultado não é conhecido “a priori” (não se sabe onde está o alvo). A concentração de resultados próximos ou parecidos indica a precisão (proximidade de cada observação de sua própria média), mas nem sempre a acurácia (proximidade de cada resposta ao valor correto) desta resposta. Ao contrário, uma grande dispersão nos resultados indicaria imprecisão no processo.

Um dos princípios gerais da Estatística é que O RESULTADO ISOLADO DE UMA MEDIÇÃO OU ENSAIO TEM POUCA CONFIABILIDADE. Uma média entre resultados é mais confiável que um resultado simples. Além disso, a qualidade dos ensaios só poderá ser constatada havendo repetições em seus resultados.

Outro conceito estatístico que deve estar sempre na mente do estudante e do profissional é o de que uma amostra tem de ser representativa do objeto de estudo. Uma amostragem pobre sempre produz resultados pobres.

As normas técnicas que regem os métodos e processos de obtenção de índices em Mecânica dos Solos usam grande parte dos seus textos para detalhar os procedimentos para obtenção de amostras

representativas. Para cada ensaio ou grupo de ensaios, existe uma quantidade de material mínima necessária à execução de cada determinação, uma quantidade mínima de repetições do experimento, e uma (ou mais) especificação para analisar e interpretar os resultados, incluindo recusa ou aceitação (validação) do resultado.

Alguns ensaios exigem como uma das condições para obter amostras representativas, que a amostra bruta seja preparada e homogeneizada *. É este, por exemplo, o caso das amostras deformadas, que devem SEMPRE ser colhidas de uma amostra maior, que tenha sido homogeneizada. Não havendo esse cuidado, a precisão dos resultados, verificada pela repetição de ensaios, é muito prejudicada.

Outros ensaios não permitem qualquer tipo de preparação ou alteração nas condições originais da amostra. De modo geral não é possível executar homogeneização em amostras indeformadas

** A homogeneidade de uma amostra é conseguida com uma mistura bem feita, sendo a amostra revolvida com cuidados que seguem certas especificações.*

Uma boa mistura, em laboratório, pode ser obtida passando a amostra inteira por duas vezes em um repartidor de amostras (já foi demonstrado que duas vezes é suficiente para uma boa homogeneização).

Existem outros procedimentos para a homogeneização de amostras.



Repartidor de amostras
(também conhecido como
quarteador)

Para conseguir melhoras na acurácia de resultados, em cada tipo de ensaio são utilizadas diferentes formas para se obter médias** entre os resultados individuais desses ensaios.

*** A MÉDIA SIMPLES é a mais conhecida: somam-se os resultados de “n” ensaios, e divide-se o resultado da soma pelo número “n”. No cálculo de uma MÉDIA APARADA, são excluídos alguns valores (invalidados) e calculada a média simples daqueles que foram considerados válidos (por alguma regra). Alguns processos gráficos ou de regressão têm conceituação semelhante.*

A criação dos métodos e processos utilizados no estudo dos solos começa pela observação do comportamento desses solos sob condições controladas. Depois de serem identificadas as variáveis que influem de forma significativa no comportamento que está sendo estudado, tenta-se criar MODELOS que expliquem o fenômeno. Cada modelo é testado para ser validado ou descartado.

Uma vez que um modelo seja aprovado, isto é, que seja considerado capaz de explicar o fenômeno, são criados MÉTODOS que permitam efetuar medições ou avaliações.

A definição clara dos objetivos a serem alcançados, a lista dos instrumentos a serem utilizados durante a execução de um ensaio, o detalhamento das operações e da seqüência em que são realizadas e a definição de domínios são as partes principais do PROCESSO de execução de um ensaio.

A definição de critérios de interpretação e a análise dos resultados fazem parte do DIAGNÓSTICO.

Capítulo 1 – PRINCIPAIS INSTRUMENTOS

Para fazer ensaios de solos com sucesso é necessário ter o instrumental adequado. É possível montar uma unidade excelente, sem o custo de um grande laboratório de solos. É fundamental estar totalmente equipado - para alcançar os objetivos desejados.

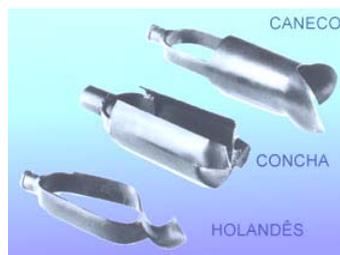
Mais importante que tudo o mais, cada elemento do pessoal – do auxiliar de laboratório ao engenheiro-chefe – deve estar suficientemente treinado para as tarefas de sua competência. Uma corrente que tenha um elo partido está quebrada, uma máquina a que falta uma peça não funciona, uma equipe técnica não sobrevive se faltar competência ou perfeita honestidade a um de seus elementos.

Para PROSPECÇÃO, os instrumentos principais são simples, fortes e de baixo custo:

- Trados (incluindo cabo e extensões) e escavadeiras;



Escavadeira, pá, trados, picareta.



Tipos de trados

- Ferramentas de uso geral, como enxadas, pás e picaretas;
- Balanças de campo (capacidade na ordem de grandeza 30 Kg);
- Baldes e bacias;
- Recipientes para transporte de amostras sem perda de umidade (sacos plásticos, caixas, potes com tampa);
- Fontes de calor portáteis (fogareiro a gás, gasolina, querosene...);
- Parafina (para impermeabilizar amostras indeformadas);
- Conjuntos para obter amostras indeformadas (martelos, talhadeiras e espátulas, arco de serra, conjunto cilindro de cravação, etc.);

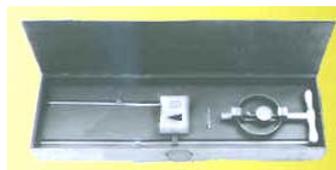


conjunto cilindro de cravação

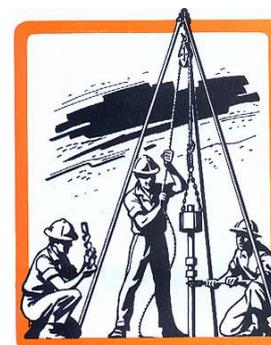


Vane Test

Outros ensaios de campo, como os de penetração, provas de carga, cisalhamento com a palheta (*Vane Test*), empregam equipamentos especiais.



penetrômetro



Sondagem à percussão (SPT)

Dentre os ensaios que medem a resistência do solo à penetração, um dos mais utilizados é o *Standard Penetration Test* (SPT). Esse ensaio determina parâmetros para a avaliação da capacidade do solo em resistir a esforços de cisalhamento e permite obter amostras (deformadas).

Auxiliando as prospecções executadas em grandes áreas, muitas indicações úteis para a engenharia podem ser obtidas por aerofotogrametria ou geoprocessamento.

Para CONTROLE de serviços executados no campo, principalmente em compactação de solos, são utilizados:

- Conjuntos para determinar o peso específico aparente;
- Conjuntos para determinar a umidade de amostras no campo.

Em grandes obras, a necessidade de efetuar grande número de ensaios em curtos períodos de tempo pode indicar o uso de equipamentos nucleares para estes dois controles, embora tenham custo elevado de aquisição e manutenção. Como outros instrumentos especiais, serão mencionados oportunamente.

Em LABORATÓRIO (fixo ou de campo), são necessários:

- Estufa para secar amostras (atualmente são elétricas, e com regulagem para manter temperaturas razoavelmente estáveis. As faixas de temperatura mais usadas são entre 100 e 105 ou entre 60 e 65 graus centígrados). Já foram populares estufas à base de combustíveis.
- Dessecador (recipiente contendo material hidrófilo, utilizado para arrefecer amostras que foram aquecidas, antes de sua pesagem, para que não absorvam umidade do ar enquanto perdem calor);
- Peneiras especiais para laboratório de solos;
- Agitador de peneiras;
- Dispersor;



Estufa elétrica



Agitador de peneiras



Dispersor



Peneiras para solos

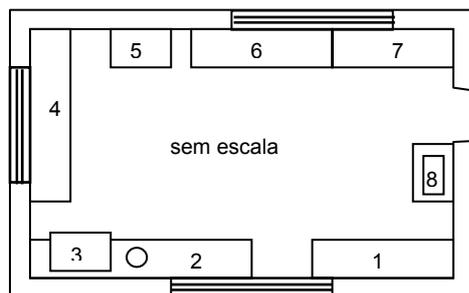
- Bomba de vácuo;
- Balanças aferidas ou calibradas, com capacidades e precisão compatíveis com o objetivo de sua utilização;
- Instrumentos de uso geral, como picnômetros, provetas, pipetas, copos (béquer), picetas (seringas de borracha), conta-gotas, bastões de vidro, moldes, cronômetro, termômetro, alarme de tempo (despertador), cápsulas metálicas, bandejas metálicas;
- Almofariz e mão-de-gral (gral e mão-de-pilão);
- Instrumentos específicos para execução de ensaios especiais, como os de consistência, compactação, CBR (*California Bearing Ratio*), cisalhamento, permeabilidade, compressão simples e triaxial, etc.

Ao listar as ferramentas necessárias em um laboratório, não se deve esquecer de acrescentar as ferramentas de uso geral, como arco de serra (para cortar amostras indeformadas), escovas de aço e trinchas (tipo de pincel), formões, facas e espátulas, alicate, chaves de fenda, régua de aço graduada, colher, limas (para afiar trados e outras ferramentas), chave para tubos, chave inglesa, etc.

Os materiais de consumo mais notáveis são parafina, mercúrio, álcool e éter sulfúricos, água destilada, soluções floculantes e defloculante, óleo (fino e grosso), folhas de serra, fitas para impermeabilizar (isolante, gomada, de vedação), sacos de lona, sacos plásticos, lápis de cera, lápis e caneta, toalhas de papel, toalha, panos de limpeza, etiquetas, cadernos de notas, papéis (fichas para anotar dados de ensaios, nomogramas, folhas impressas especiais), cordas e barbante, ingredientes de limpeza, material para vedar (celofane, folhas plásticas).

A organização de um laboratório é fundamental para sua eficiência.

Da organização fazem parte a localização, a disposição (*lay-out*), e regras de utilização. Bons locais são porões (por causa do ar fresco e úmido) e andar térreo de prédios (compactação de amostras em andares superiores incomoda outros ocupantes do prédio).



DISPOSIÇÃO TÍPICA DE UM PEQUENO LABORATÓRIO DE CAMPO

1. Mesa de balanças
2. Bancada de trabalho
3. Estufa
4. Bancada (CBR, Hilf, compactação)
5. Estante
6. Bancada e estante
7. Bancada para amostras e preparo
8. Lavatório

Recomendações (laboratório)

- a) Um lugar para cada coisa, cada coisa em seu lugar;
- b) Manter ambiente de trabalho limpo;
- c) Manter equipamentos em perfeitas condições de uso;
- d) Manter em nível suficiente o estoque de materiais de consumo;
- e) Respeitar as especificações e os limites dos instrumentos;
- f) Ter em estoque formulários para registro de dados, etiquetas, etc.

Exemplos de formulários:

ETIQUETA DE IDENTIFICAÇÃO DE AMOSTRAS			
Cliente:		Obra:	
Furo ou estaca:	Amostra n°:	Profundidade:	
Camada:	Posição:	BE	EIXO
BD			
Local da coleta:			
Pré-classificação e cor:			
Fornecedor:			
Coletado por:		Data: / /	

TEOR DE UMIDADE E FATOR DE CONVERSÃO DE SOLOS			
Amostra:			
		Cápsula número:	
Tempo em estufa:		(preenchimento opcional)	
Massa do solo úmido + tara		M_1	
Massa do solo seco + tara:		M_2	
Massa do recipiente [com tampa]:		M_3	
Massa de solo seco		$M_s = [M_2 - M_3]$	
Massa d'água		$M_a = [M_1 - M_2]$	
Teor de umidade:		$h = H = 100 X [m_a / m_s]$	
Teor de umidade (média entre determinações válidas*)		%	
Fator de conversão:		$F_c = 100 / [100 + h]$	
Responsável e data:			

PRINCIPAIS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Os primeiros instrumentos usados para conhecer um solo são os cinco sentidos: tato, visão, audição, olfato e paladar. Fornecem informações qualitativas e quantitativas, e acionam o mais perfeito computador que existe: a mente. Infelizmente sua precisão varia conforme o indivíduo, e exige extenso treinamento para que esses dados sejam confiáveis. O treinamento tem base na observação de erros cometidos e no exercício contínuo e repetitivo dos procedimentos para a identificação de características do solo.

Os instrumentos de medida citados a seguir fornecem principalmente dados quantitativos, mas é necessário estar consciente de que **TODO ATO DE MEDIR TEM IMPLÍCITO UM OU MAIS ERROS, CAUSADO PELO INSTRUMENTO, PELO OPERADOR, OU AMBOS. Um erro só pode ser corrigido se for identificado.** Todos os processos e cuidados prescritos em normas técnicas têm por finalidade minimizar tais erros.

Leitura errada, braço de balança tocando lateral do suporte, pesagem próxima à fonte de calor, pesagem de material quente, anotação ilegível de dados, erro de cópia, audição imperfeita causam erros grosseiros, evitados por treinamento.

BALANÇAS são os equipamentos mais utilizados, no dia a dia do laboratorista. Caracterizam-se por sua capacidade (maior massa que podem medir) e por sua precisão ou sensibilidade. As balanças mais comuns, atualmente, são mecânicas ou eletrônicas.



Balança tríplice escala
fabricada na EEUFJF



Balanças eletrônicas

As balanças mecânicas mais precisas têm sua sensibilidade restrita a uma ordem de grandeza de 0,01g. As eletrônicas podem ter precisão de 0,0001g. Em ambos os casos, a capacidade máxima de uma balança não ultrapassa muito o limite de 10000 ou 20000 vezes o valor da sensibilidade. Em todas as balanças, pesagens próximas da capacidade máxima acarretam erros de tendência, além da redução da vida útil do instrumento. Para boa utilização, devem estar niveladas e ter manutenção e calibração periódica.

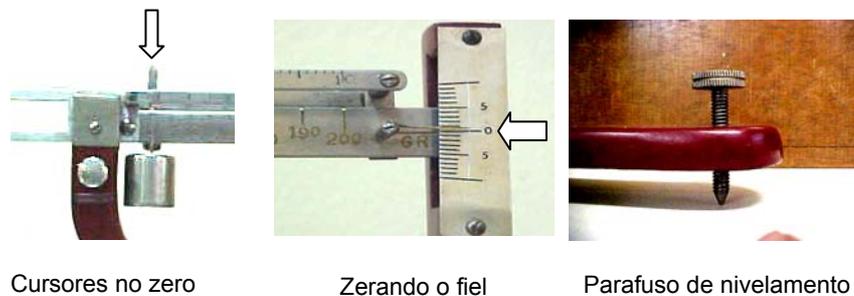
Os DEFEITOS ou VÍCIOS que uma balança pode apresentar são de dois tipos: erros de tendência e defeitos localizados. Balanças mecânicas costumam apresentar erros localizados: por exemplo, uma balança tríplice escala pode apresentar um erro positivo ou negativo sempre que for utilizada a marca de 9 gramas de sua segunda escala.

Provavelmente o vício localizado no exemplo é devido ao desgaste causado na ranhura (9g) pelo peso cursor, que está a apoiar-se em local diferente do correto. A correção do defeito só pode ser feita em oficinas especializadas, retificando-se a ranhura. Mas a balança, mesmo estando defeituosa, pode ser utilizada com precisão, se for feita sua calibração.

CALIBRAÇÃO DE UMA BALANÇA MECÂNICA (EXEMPLO)

Para calibrar uma balança mecânica é necessário ter um conjunto de pesos confiáveis. Tomemos como exemplo a calibração de uma balança tríplice escala, de precisão 0,01 g.

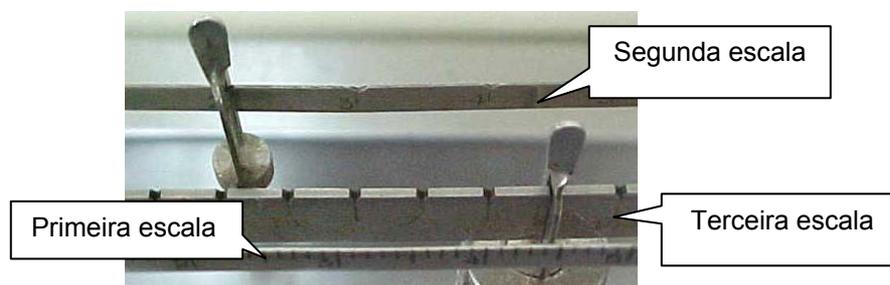
Para nivelar esta balança, todos os pesos cursores são colocados no ponto zero das escalas e ajusta-se o parafuso de nivelamento para zerar o fiel da balança.



Primeiro confere-se a escala mais delicada, cujo cursor pode mover-se continuamente de 0 a 1 grama. Em geral, nesta escala não aparecem defeitos, e a conferência se reduz a verificar se existe erro na pesagem máxima (1 grama). Caso haja imprecisão, será devida a erro na massa do cursor, que deverá ser substituído ou retificado.



Depois de conferida a primeira escala, verificam-se os eventuais erros nas dez posições possíveis para o cursor da segunda escala. Para isso são colocados os pesos do conjunto padrão e os erros da segunda escala são medidos com auxílio da primeira (que já foi calibrada) e anotadas as correções (positivas ou negativas) a serem feitas para cada posição do segundo cursor.



Igual procedimento será tomado com a terceira escala, ainda usando a primeira (já calibrada) para medir os erros.

O resultado da calibração pode ser apresentado, por exemplo, como uma matriz – onde cada célula fornece a soma dos erros observados nas segunda e terceira escalas – que será a correção a ser somada ou subtraída da leitura da balança, obtendo-se assim uma pesagem “quase correta”.

EXEMPLO DE MATRIZ DE CORREÇÃO DE ERROS LOCALIZADOS DE UMA BALANÇA TRÍPLICE ESCALA

ESCALA	BALANÇA TRÍPLICE ESCALA												
	ERRO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		0	0,01							-0,01		0,02	
0		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
10		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
20		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
30		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
40	0,02	-0,02	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,04	-0,02
50		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
60		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
70		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
80		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
90		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
100	0,01	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0	-0,01	-0,03	-0,01
110		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
120		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
130		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
140		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
150	-0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0	0,02
160		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
170		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
180		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
190		0	-0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	-0,02	0
200	-0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0	0,02

Exemplo: o peso real correspondendo a pesagem 151,43 g é 151,44 g.

(Esta planilha para calibração está disponível no site www.geotecnia.ufff.br e no cd-rom)

Por que “quase correta?”.

Tratamos até agora apenas da correção de defeitos localizados. Os erros de tendência são mais evidentes em pesagens próximas da capacidade máxima da balança, sendo tanto maiores quanto maior o peso* que está sendo medido, e ocorrem tanto em balanças mecânicas quanto em eletrônicas. São muito difíceis de serem eliminados, mas podem ser bastante atenuados pela prática de apenas fazer PESAGENS INDIRETAS. Em laboratório, NUNCA SE DEVE FAZER PESAGEM DIRETA (colocar na balança e verificar o valor do peso do objeto).

(*) Balanças medem “pesos” ou “massas”? Lembre-se que massas têm por unidade “quilos ou quilogramas”, toneladas, gramas. Pesos são forças e tem por unidades “quilogramas-força”, newtons, kilonewtons. A não existência de verbo específico para designar a medida de massas na língua portuguesa induz ao equívoco: por exemplo calcular a massa específica de um objeto, expressa-la (corretamente) em g/cm³, mas relatar o resultado como “peso específico”.

Para uma pesagem correta, raciocine sempre como se o objeto fosse líquido. Como se pesa uma quantidade qualquer de um líquido? Você o coloca em um recipiente e pesa o conjunto (recipiente + líquido). Depois pesa o recipiente. A diferença entre os dois valores é a massa do líquido. Se denominarmos E ao erro de tendência:

$$\text{Massa medida (recipiente + objeto)} = \text{Massa real (recipiente + objeto)} + \underline{E}$$

$$\text{Massa medida (recipiente)} = \text{Massa real (recipiente)} + \underline{E}$$

Subtraindo o segundo “peso medido” do primeiro, obtemos o peso do objeto e o erro é eliminado ou muito reduzido (se o recipiente for leve em relação ao objeto a ser pesado não haverá diferença significativa no valor E).

Este procedimento é chamado PESAGEM INDIRETA.

Observação: Imprecisão existe sempre, mas só é considerada erro ao produzir más conseqüências. O que se deseja é a redução da imprecisão a uma ordem de grandeza em que esta deixe de ser relevante.

(Estes exemplos ilustram o tortuoso modo como raciocinam os engenheiros de laboratório... Talvez pareça complicado para um leigo, mas é uma maneira eficiente de reduzir erros.).

Exercício: use os conceitos adquiridos para criar um processo que permita obter com precisão o peso da fumaça de um cigarro, utilizando uma balança (calibrada) de três escalas.

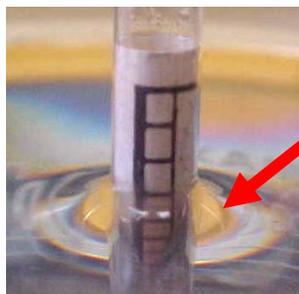
DENSÍMETROS medem a densidade de líquidos. Também são sujeitos a grandes erros e vícios. Em laboratório de solos, por exemplo, podem medir a variação da densidade de uma solução (água + defloculante) com um solo em suspensão, enquanto as partículas sólidas deste estão se sedimentando. O método utilizado para sua utilização é semelhante ao usado na pesagem indireta: chamando L a medição feita com o densímetro e R ao eventual erro do densímetro, a influência da presença do solo na densidade da solução terá por medida:

$$I(\text{solo}) = L(\text{solução} + \text{solo} + R) - L(\text{solução pura} + R)$$

(Como a temperatura também influencia a densidade, ambas as leituras devem ser feitas a uma mesma temperatura).

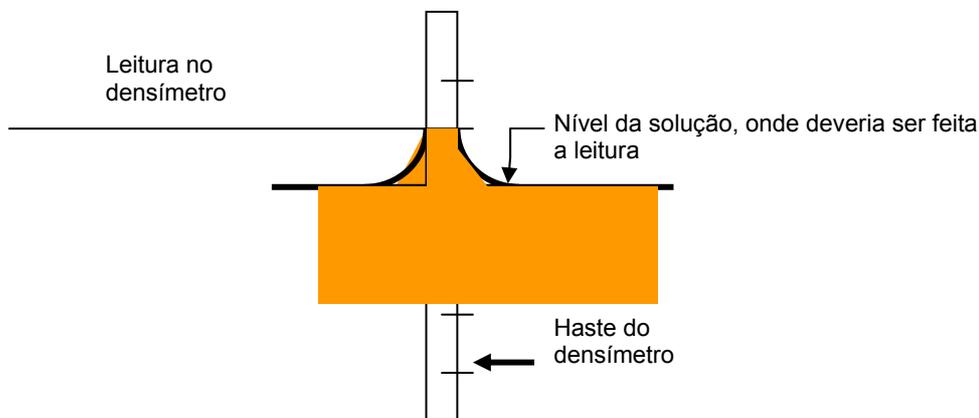


Densímetro de bulbo simétrico



menisco

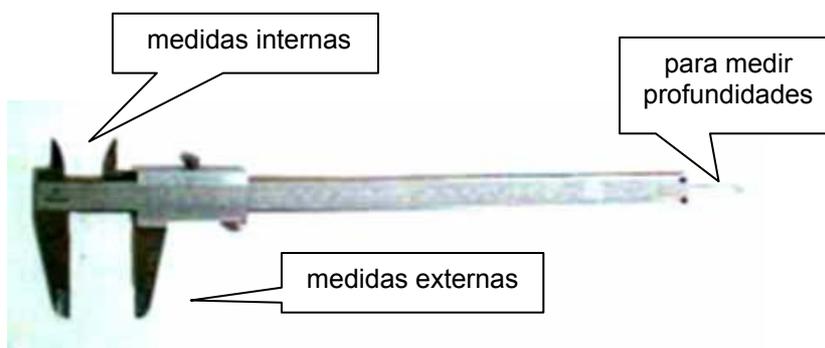
Outro motivo de erro surge ao usar o densímetro: ao serem feitas leituras na solução de solo, a água está geralmente escura, devido à presença do solo. Isto obriga o laboratorista a fazer leituras na parte mais alta do menisco (causado por o líquido molhar a haste do densímetro), quando o correto é ler na base do menisco. Mas quando é feita a leitura na solução pura, que é clara e transparente como a água, não é possível enxergar claramente o ponto mais alto do menisco, e a leitura é feita (corretamente) no nível da solução (base do menisco).



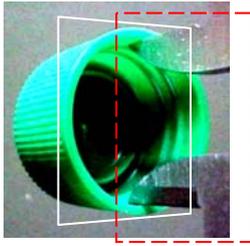
Verifica-se experimentalmente que o erro causado pela diferença entre os dois modos de leitura tem valor médio -0,0012 (pouco mais de uma subdivisão na escala do densímetro). Este erro é facilmente corrigido, somando o valor 0,0012 a todas as diferenças de leitura mencionadas.

O resultado de $L(\text{solução} + \text{solo} + R) - L(\text{solução} + R) + 0,0012$ é denominado “leitura corrigida” e utilizado nos cálculos da fase de sedimentação do ensaio de granulometria completa.

PAQUÍMETROS são instrumentos utilizados para medir grandezas lineares. Os erros devidos ao instrumento são em geral desprezíveis, quando comparados a erro de leitura ou de posicionamento, cometido pelo operador.



Ao fazer uma medida, o plano que contém o paquímetro deverá coincidir ou ser perpendicular ao plano que contem o segmento que está sendo medido.

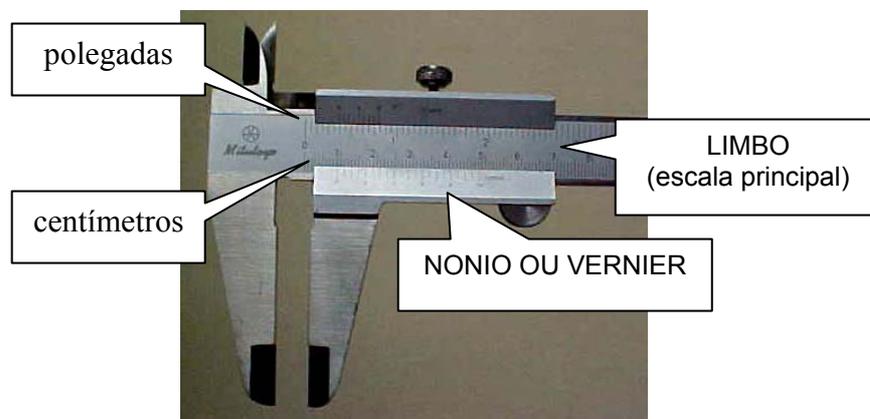


O posicionamento incorreto produz grandes erros nas medidas.



Cuidado: medir diâmetros não é o mesmo que medir cordas...

Leitura de medidas no paquímetro:



Na posição superior encontram-se as leituras em polegadas e na parte inferior, as leituras em centímetros. Como é adotado no Brasil o sistema métrico decimal, detalharemos leituras com a escala inferior.

No paquímetro do exemplo:

A escala principal ou limbo tem a menor subdivisão em milímetros.

O vernier permitirá avaliar 0 a 10 décimos de milímetro (mícron).

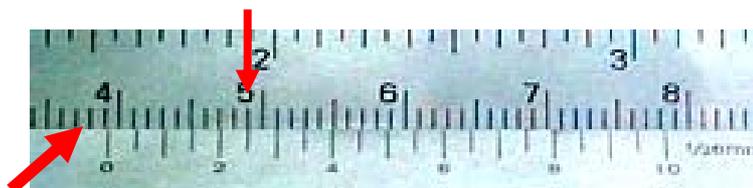
A leitura de uma medida é feita em duas etapas:

Em uma primeira aproximação, ler no limbo a posição ocupada pelo “zero” do vernier.

Em seguida, ler no vernier o valor correspondente à posição em que um dos traços do limbo coincida com (ou aparente ser o prolongamento de) um dos traços do vernier. Os algarismos dessa segunda leitura serão acrescentados em continuação à primeira leitura. (na impossibilidade de decidir entre dois traços consecutivos do vernier, qualquer deles pode ser escolhido, ou sua média).

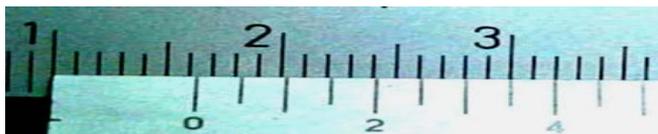
Por exemplo:

Observe a posição do zero da escala secundária (cm):

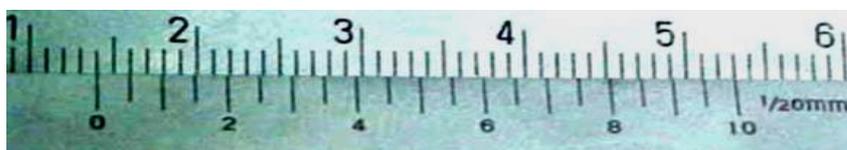


A posição do zero da escala secundária fornece como primeira aproximação para a medida que está sendo executada o valor 3,9 (cm). Em seqüência, é identificado o traço da escala secundária que coincide com um traço da escala principal. Isto é observado no valor 2,5. A leitura é refinada para 3,925 cm.

Como exercício, faça as leituras seguintes:



Resposta: 1,635 cm.



Resposta: 1,400 cm.

Exercícios:

1. Para que se repetem ensaios? Em outras palavras, por que o resultado isolado de um ensaio de laboratório não é considerado confiável?
2. Um experimento foi repetido por nove vezes. Os resultados apresentaram os valores 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 (ordenados depois). Apenas com essas informações, algo pode ser concluído?
3. Uma medida foi repetida por nove vezes. Os resultados apresentaram os valores 1216, 1217, 1217, 1218, 1218, 1218, 1219, 1219, 1247. Apenas com essas informações, o que se pode concluir?
4. No experimento anterior, considera ser possível considerar algum dos resultados isolados como “provavelmente não confiável?” E no caso do segundo exercício?
5. Defina o que é necessário para que um instrumento de medida mereça confiança. Aplique o conceito anterior, definido por você, aos cinco sentidos: tato, olfato, paladar, audição e visão. O que será necessário fazer para que cada um desses instrumentos de medida mereça confiança?
6. Em que consiste “calibrar uma balança”? Qual o objetivo dessa calibração?
7. Leituras efetuadas com o mesmo densímetro, em soluções puras e com solo em suspensão tiveram como valores: 1,0236 e 1,0035. Qual o valor da leitura corrigida? R: 0,0213
8. Usando a balança 14, cuja matriz de calibração foi apresentada algumas páginas atrás, foram obtidos em pesagens diretas os valores apresentados abaixo. Complete a tabela com os verdadeiros pesos dos objetos.
(suponha não existir de erro de tendência nessa balança).

Valor lido (g)	76,14	107,13	43,11	159,20
Peso verdadeiro (g)				

R: 76,14 - 107,15 - 43,09 - 159,20

CAPÍTULO 2- TERMINOLOGIA DE ROCHAS E SOLOS

REFERENCIAS: NBR 6502/95 e 6502/80 (ABNT)

Obs: Os textos em itálico são comentários, não fazendo parte da norma NBR 6502/95. Aqui é feita uma primeira apresentação da terminologia, extraída das NBR 6502/80, e 6502/95 (ABNT). Deve ser usada uma linguagem técnica tão cedo quanto possível, para que se possa utilizar um idioma básico comum. São usados no dia a dia muitos outros termos, de uso popular ou local, ou devidos ao estreito relacionamento do engenheiro com geólogos, profissionais da terraplanagem, de minas, etc., e que serão agregados - aos poucos - ao vocabulário inicial. Recomendamos a leitura da NBR 6502/95.

2.1 TERMINOLOGIA DE ROCHAS (incompleta)

2.1.1. Rocha *Material sólido, consolidado e constituído por um ou mais minerais, com características físicas e mecânicas específicas para cada tipo. São provenientes do magma ou de lava, ou da consolidação de sedimentos, com elevada resistência só modificável por água e ar em condições especiais. São designadas pelo nome corrente em geologia, mencionando (quando possível) seu estado de fraturamento e alteração.*

Quanto a suas dimensões, são denominadas:

Bloco de Rocha: fragmento de rocha com diâmetro (Φ) > 1 m;

Matacão: Φ entre 20 e 100 cm;

Pedra ou Pedra-de-mão: Φ entre 6 cm e 20 cm.

A NBR 6502/05 é bem mais extensa que o extrato aqui apresentado, agrupando os termos relacionados a rochas por: definições, origem, forma de ocorrência, coloração, textura, composição química, estrutura, principais tipos e propriedades. Sendo esta uma apresentação inicial com ênfase em solos, o texto completo e comentado será apresentado em momento e local mais oportunos.

2.2. TERMINOLOGIA DE SOLOS (também incompleta)

Solos são Materiais provenientes da decomposição das rochas ou sedimentação não consolidada de seus grãos, sem ou com matéria orgânica. *São identificados pela textura, granulometria, plasticidade, consistência, compacidade, estrutura, forma dos grãos, cor, cheiro, friabilidade, presença de outros materiais (conchas, matéria vegetal, mica, etc.).*

Pela textura (conjunto de características de forma, dimensão e proporções dos elementos mineralógicos constituintes do solo, avaliado pela granulometria), denominam-se:

Pedregulho: solo formado por minerais ou partículas de rocha, com comportamento dominante devido à fração pedregulho, onde as partículas têm diâmetros (Φ) compreendidos entre 2,0 mm e 60 mm. *Quando arredondadas ou semi-arredondadas, são denominadas seixos rolados. É caracterizado por sua textura.*

Pedregulhos grossos têm grãos com diâmetros entre 20,0 e 60,0 mm;

Pedregulhos médios: Φ entre 6,0 e 20,0 mm;

Pedregulho fino: Φ entre 2,0 e 6,0 mm.

Areia: Solo não coesivo e não plástico *com comportamento predominantemente devido à fração areia, constituída por minerais ou partículas de rochas com diâmetros (Φ) compreendidos entre 0,06 mm e 2 mm. É caracterizado por sua textura, compacidade (estado de maior ou menor concentração de grãos ou partículas de um solo não coesivo em um dado volume) e forma dos grãos.*

Quanto à textura, as areias podem ser:

Areias grossas: Φ entre 0,60 mm e 2,0 mm;

Areias médias: Φ entre 0,20 mm e 0,60 mm;

Areias finas: Φ entre 0,06 mm e 0,20 mm.

Pelo Grau de Compacidade*, as areias são classificadas em:

Fofas, medianamente compactas, ou compactas.

*Compacidade é o estado de maior ou menor concentração de grãos ou partículas de um solo não coesivo em um dado volume. Qualitativamente, a compacidade pode ser avaliada pela dificuldade de penetração de um instrumento de sondagem ou dificuldade de escavação.

Quanto à forma dos grãos, lembremos que os grãos de areia de praia costumam ser arredondados e lisos, enquanto os de areia de rio são angulosos ou sub-angulosos. Os grãos de areia proveniente de jazidas são geralmente mais ásperos (sub-angulosos ou angulosos) que os de origem fluvial.



Siltes: Solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade e que exibe baixa resistência quando seco ao ar . (mostram apenas a coesão* necessária para formar, quando secos, torrões facilmente desagregáveis pelos dedos.). Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração silte, que é formada por partículas com diâmetros entre 0,002 mm e 0,06 mm. Caracterizam-se pela textura e compacidade.

*Coesão é a parcela de resistência ao cisalhamento de um solo, independente da tensão efetiva normal atuante, provocada pela atração físico-química entre partículas ou pela cimentação destas. A coesão é tanto maior quanto menores forem os diâmetros das partículas e maior o seu grau de "achatamento". Em linguagem popular, é o "grudar" ou "colar" entre partículas. Observe que só existe coesão (entre partículas muito pequenas) havendo água, que muita água diminui a coesão e pouca água a aumenta.

Argilas: Solos de granulação fina constituída principalmente por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração argila. Quando suficientemente úmidas, moldam-se facilmente e secas formam torrões de difícil desagregação pelos dedos. Caracterizam-se por sua plasticidade, textura, sensibilidade e consistência em sua umidade natural.

Quanto à Plasticidade (facilidade em ser moldada por pressão externa sem alteração de volume), as argilas podem ser Gordas (muito plásticas) ou Magras (pouco plásticas).

Sua textura é analisada no ensaio de granulometria, na fase de sedimentação.

Quanto à Consistência, podem ser quantitativamente definidas conforme o Índice de Consistência. A consistência difere para cada solo, mas depende muito do teor de umidade.

Qualitativamente, a consistência de uma argila é avaliada como:

Muito mole, se escorre entre os dedos, quando apertada nas mãos;

Mole, se pode ser facilmente moldada pelos dedos;

Média, se pode ser moldada pelos dedos;

Rija, se requer grande esforço para ser moldada pelos dedos;

Dura, se não pode ser moldada, e quando submetida à grande esforço os torrões desagregam-se.

Argilas com grande volume de vazios, cujos poros estejam parcialmente cheios de ar recebem ainda a complementação "porosa".

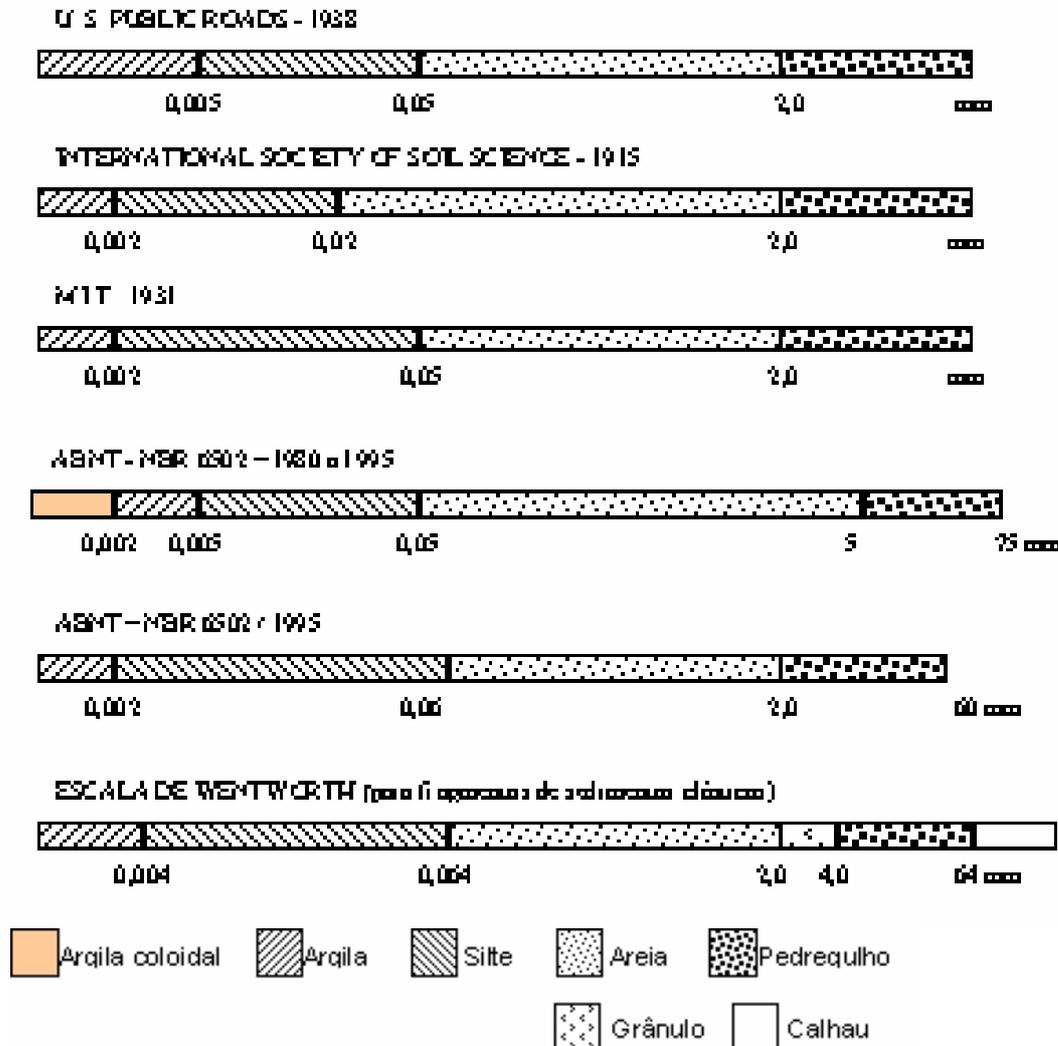
Os solos devem ser designados pelo nome do tipo de sua fração granulométrica seja mais ativa, seguida dos adjetivos referentes às frações que influenciam seu comportamento.

Exemplos:

*Argila arenosa, com consistência média; Argila areno-siltosa, rija.
Silte argiloso; Argila silto-arenosa, porosa; areia argilosa.*

No primeiro exemplo, o comportamento do solo é semelhante à argila, com influência da fração areia. Ainda que haja presença de silte, este não altera o comportamento do solo. No segundo exemplo, a presença de silte influi em suas propriedades, é notada.

Não existe uma concordância universal quanto ao intervalo de variação dos diâmetros de cada uma das frações que compõem os solos. Vejam-se a seguir algumas escalas granulométricas:



Neste trabalho será adotada a ESCALA DA NBR 6502/95

Classificação granulométrica de um solo:

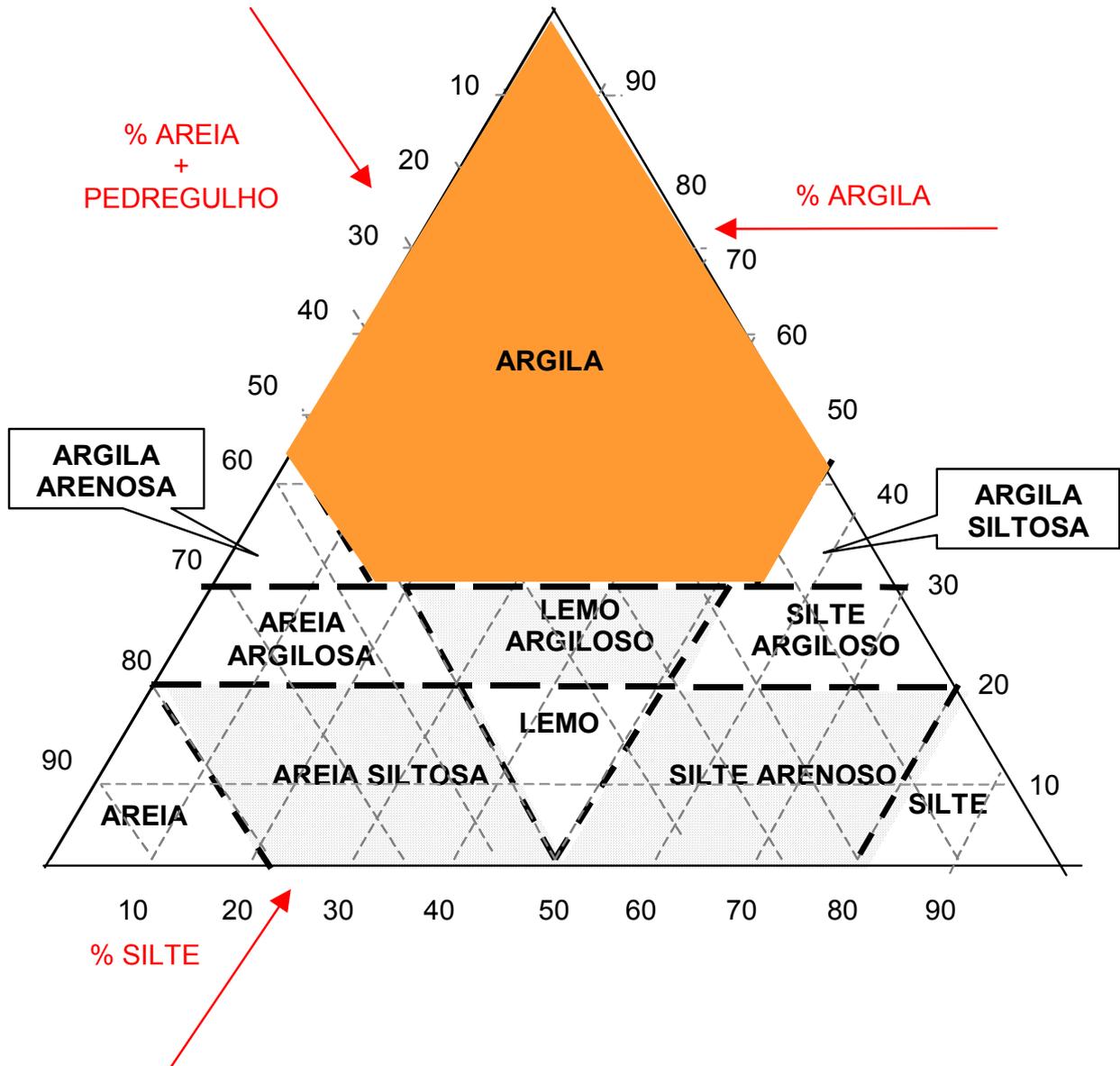
Apenas nos solos grossos a distribuição granulométrica dita o comportamento. Apesar disto, classificações baseadas na granulometria tornaram-se universalmente empregadas, ainda que sua utilidade geotécnica seja pequena. A classificação granulométrica de solos (pela textura) pode ser auxiliada pelo diagrama triangular de Feret, desde que mencionada a versão (ou origem) do diagrama. Existem outras classificações: geológicas, geotécnicas, pedológicas.

Embora hoje seja usada quase exclusivamente na agronomia, comentamos a seguir uma das versões do triângulo de Feret:

Em um solo constituído apenas por areia, silte e argila, a soma das porcentagens destas três frações é 100%. Entrando no gráfico com a porcentagem com que cada uma destas frações compõe o solo, obtém-

se a localização de um ponto em uma das áreas demarcadas, obtendo assim a classificação conforme esta versão do triângulo de Feret.

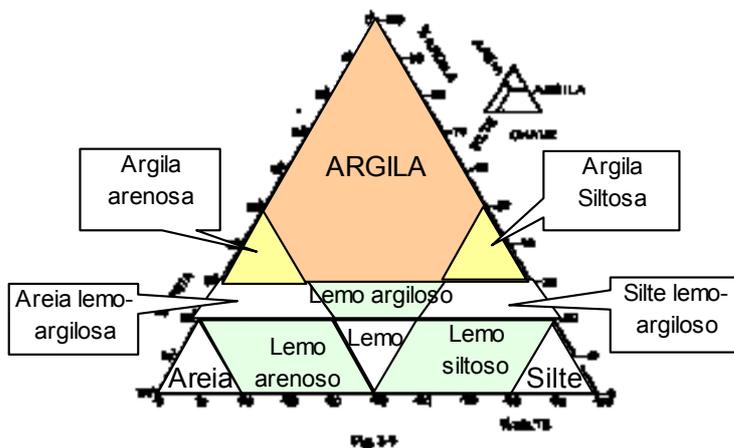
Em solos com pedregulhos, geralmente se soma a porcentagem deste à da areia.



Observar que a linha que representa a porcentagem de argila é paralela à escala do silte, a que representa a porcentagem de areia é paralela à escala da argila e a linha que representa a porcentagem de silte é paralela à escala da areia. Verifique que um solo com 28% de argila, 23% de silte e 49% de areia será classificado “lemo argiloso”. (o comportamento do lemo é menos previsível que o da areia).

O termo “LEMO” é uma adaptação do inglês “LOAM” (cujo significado literal “barro” ou “terra” designa uma mistura em proporção variável de areia, silte e argila, com propriedades mal definidas).

Existem muitas versões do triângulo de Feret. A versão mostrada em seguida ilustra apenas o excesso do uso do termo “lemo” (que pela definição anterior expressa mais ignorância que conhecimento sobre o comportamento do solo).



Triângulo de Feret, em uma versão do meio do século XX.

Se as porcentagens de areia, silte e argila, obtidas no ensaio de granulometria, forem divididas pela porcentagem de material passante na peneira de 2,0 mm, para que sua soma seja 100%, a classificação deverá então mencionar ser referente “à fração fina do solo”. No caso, a peneira de 2,0mm foi usada para excluir a fração pedregulho da amostra.

Solo orgânico: Solo formado pela mistura homogênea de matéria orgânica decomposta e de elementos de origem mineral, apresentando geralmente cor preta ou cinza-escuro. *Quando houver um teor apreciável de matéria orgânica, deve ser indicada sua presença, pelo acréscimo da expressão “com matéria orgânica” à designação dada ao solo. Se forem muito moles, pode ser adicionado, entre parênteses, o termo “lodo”.*

Exemplos:

Areia grossa, fofo, com matéria orgânica.

Argila siltosa, com matéria orgânica (lodo).

Turfa: Solo com grande porcentagem de partículas fibrosas e matéria orgânica no estado coloidal, com coloração marrom escura a preta. É um material mole, altamente compressível, não plástico, combustível, e com cheiro característico.

Alteração de rocha ou solo de alteração: Material proveniente da alteração de rochas “in situ”, que se encontra em estágio avançado de desintegração. Possui a estrutura original da rocha e a ela se assemelha em todos os aspectos visuais perceptíveis, salvo na coloração. Sua constituição é variável, mostrando o conjunto em geral, anisotropia ou heterogeneidade acentuada, decorrente da presença de núcleos de material consistente entremeados a uma massa com características de solo. *É descrita pela textura, plasticidade e consistência ou compacidade, com indicação do grau de alteração e, se possível, rocha de origem. Também é denominada saprolito ou saprólito.*

Solo Superficial: *Zona abaixo da superfície do terreno natural, geralmente mistura de areias, argilas e matéria orgânica, exposta à ação dos fatores climáticos e agentes vegetais e animais.*

Aterro: Depósito artificial de qualquer tipo de solo ou outro material. Descrito pelo tipo de material e, se possível, o processo de execução.

Sugere-se consultar a NBR 6502/85 original, com mais de 300 verbetes sobre a terminologia de rochas e solos.

Outras consultas:

Glossário de termos de geologia, Universidade Federal de Brasília:

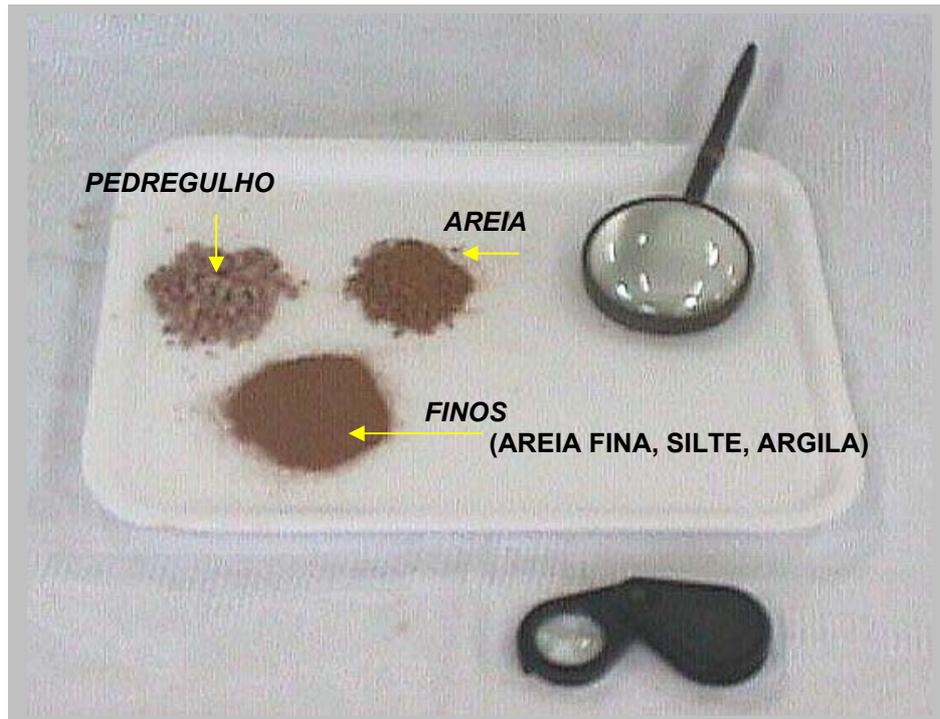
<http://www.unb.br/ig/glossario>

Glossário de termos rodoviários, DNIT (DNER).

<http://www.pr.gov.br/mtm/informacoes/glossario.shtml>

LEMBRETE: Os termos ARGILA, SILTE e AREIA têm duplo significado, pois designam SOLOS e também FRAÇÕES DO SOLO. Raramente são encontrados na natureza solos compostos exclusivamente por uma destas frações.

ANEXO - INSPECÇÃO VISUAL – PRIMEIRO CONTATO



O objetivo deste anexo é promover um primeiro contato com os solos, sem rigor científico. O estudante deverá comparar amostras de solos (argilas gordas, siltes, areias) cujas características são bem nítidas. São oferecidas sugestões sobre como olhar, apalpar, cheirar ou ouvir o óbvio que tais amostras podem informar. Os sentidos deverão ser usados para executar uma identificação grosseira, usando esta primeira tentativa para facilitar a compreensão das aulas teóricas. Mais tarde será estudada a classificação dos solos de forma rigorosa. Recomenda-se ao futuro engenheiro praticar os termos usados em sua profissão e (repetir com frequência os procedimentos), para descobrir e aprender sem necessitar memorizações fatigantes.

O QUE OBSERVAR?

1. TEOR DE UMIDADE (h) ou (w): A relação percentual do peso de água contida em uma amostra de solo e o peso das partículas dessa amostra de solo, cuja determinação precisa será vista mais tarde, pode ser qualitativamente estimada pela cor (mais escura ou mais clara) de um solo, por comparação, se já o tivermos observado completamente seco e saturado. Também pelo tato, apertando-o nas mãos, esfregando-o e observando o aparecimento do brilho característico de umidade. A facilidade de moldagem, no caso de argilas, dá uma boa indicação do teor de umidade de solos que já conhecemos. Até o odor é característico.
2. TEXTURA é o tamanho relativo dos grãos que constituem a fase sólida dos solos. Sua medida é chamada GRANULOMETRIA. A textura de um solo pode ser avaliada de forma grosseira pelo tato.

Pedregulhos têm diâmetros máximos entre 2,0 mm e 60 mm e podem ser identificados visualmente. Sua forma e compacidade são importantes do ponto de vista de sua utilização. Outras partículas “macro”, como as de mica (ou malacacheta), têm forma de lâminas delgadas e flexíveis, com brilho característico.

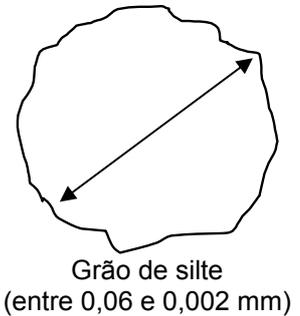
Areias (diâmetro dos grãos varia de 0,06 a 2,00 mm) dão ao tato uma sensação de aspereza. Apenas seus maiores grãos são visíveis a olho nu. A audição pode auxiliar a identificação: as areias, quando esfregadas, produzem um rangido característico.

Partículas de tamanho igual ou menor que as do silte não podem ser identificadas a olho nu, e individualmente são imperceptíveis ao tato. O tamanho dos grãos de silte (0,002 a 0,06 mm) os torna invisíveis ao olho nu, como as argilas. O formato dos grãos de silte também difere do formato dos de argila:

são arredondados como os grãos de areia de praia (e menores), enquanto a maior parte dos de argila tem semelhança com placas de vidro ou lâminas gilete. Seca e destorroada, a sensação tátil de uma porção de silte ou de argila assemelha-se a de talco para bebês.

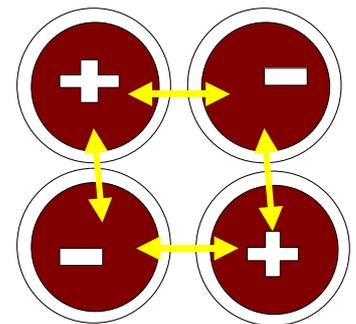
Argilas (diâmetro máximo dos grãos < 0,002 mm) molhadas escorregam como sabão. Ao secar tendem a formar torrões de difícil desagregação.

3. COESÃO é a resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pela qual ele se torna capaz de se manter coeso, em forma de torrões ou blocos, podendo ser cortado ou moldado em formas diversas e manter essa forma. A coesão é definida por Milton Vargas como a maior ou menor resistência que um torrão de argila apresenta ao se tentar deformá-lo. Solos com essa propriedade denominam-se coesivos. Solos não coesivos, como areias e pedregulhos, esboroam-se facilmente ao serem cortados ou escavados. A NBR6502/95 define coesão como: “parcela de resistência ao cisalhamento de um solo, independente da tensão efetiva normal atuante, provocada pela atração físico-química entre partículas ou pela cimentação destas”.

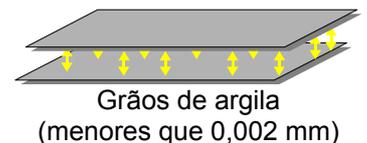


Várias teorias explicam a coesão, sendo uma das mais simples a que se baseia na água adsorvida pelos grãos de argila, descrita na página 30 do livro “Introdução à Mecânica dos Solos”, de Milton Vargas:

A água, em contato com a superfície de uma partícula adere a ela, com tal força que se torna “sólida” e passa a ter a mesma carga eletrostática que ela. Essa força de adesão pode enorme: nas menores partículas de argila pode atingir a ordem de grandeza de vinte toneladas por centímetro quadrado. Em contato com a água adesiva de outra partícula (de sinal contrário), gruda nesta, com força inversamente proporcional ao diâmetro das partículas e à distancia entre seus pontos mais próximos (aqui chamados pontos de contato).



Parece evidente que também seja diretamente proporcional ao número de “pontos de contato” (ou área de contato). Se as partículas são arredondadas, são poucos esses pontos. Quando as partículas são lamelares, a área em contato é grande. Por isso, as partículas lamelares das argilas aumentam sua coesão após serem amassadas quando úmidas (arrumadas), e perderem parte de sua umidade (o que as aproxima, provocando contração dos torrões). Observe que uma alta umidade nas argilas diminui a coesão, por aumentar a distancia entre as partículas, mas quando completamente seca, não há água adesiva colando-se à outra água adesiva, e os torrões se fraturam ou pulverizam com facilidade.



Por exemplo, telhas, tijolos ou cerâmicas atingem sua maior resistência a esforços quando são retirados dos fornos de secagem quando estão “quase secos”. Se ficassem totalmente secos, teriam sua resistência muito diminuída.

4. COMPACIDADE é um índice para os solos grossos que indica se as partículas sólidas estão mais – ou menos – arrumadas e próximas umas das outras, com conseqüente redução no volume de vazios e na porosidade. A compactidade altera a permeabilidade (capacidade do solo de deixar-se atravessar pela água). Nos solos finos têm como correspondente o grau de COMPACTAÇÃO.

5. PLASTICIDADE, uma característica dos solos finos, é a capacidade do solo de poder ser moldado sem alteração de volume. Depende da umidade presente e da forma, do tamanho e da composição química dos grãos que o constituem, bem como de sua granulometria. Numa amostra de solo, podemos obter uma primeira avaliação de sua plasticidade amassando-a nas mãos: uma areia molhada pode ser razoavelmente

esculpida, mas não lhe podemos dar forma suficientemente elaborada para que possa ser considerada plástica. No ensaio para a determinação da plasticidade, veremos não ser possível moldar (por rolamento) uma massa de areia na forma padrão que define a condição de plasticidade. Argilas úmidas podem ser moldadas, mantendo sua forma depois de cessada a pressão que lhes deu forma. Ao perder umidade, as argilas passam do estado plástico para o estado semi-sólido, em que não mais podem ser moldadas, e tem desagregação difícil. Secando mais, para um estado sólido (quando não mais sofrem retração com a perda de umidade), como as telhas e cerâmicas. Se demasiadamente molhadas, podem atingir o estado líquido, passando a fluir como um líquido viscoso.

Não confundir coesão com plasticidade, nem plasticidade com compressibilidade. A compressibilidade de um solo (fino) é função do volume de vazios que ele apresenta, que, por uma pressão ativa exercida sobre ele (compactação) pode ser reduzido, por aproximação dos grãos. Tanto argilas quanto areias, pedregulhos e até massas de blocos de rocha podem ter diminuído o volume de vazios, com a finalidade de aumentar sua estabilidade e resistência ao cisalhamento. Nos solos coesivos, isto é conseguido por compressão e amassamento. Nos granulares, por vibração.

6. Além da umidade, a intensidade da COR de um solo oferece indicação da presença de matéria orgânica (origem vegetal ou animal), indicada por cor escura, com partículas pretas, pardas ou roxas. A presença de manchas variegadas ou cinzentas (observadas ao natural, no campo) pode indicar a presença de impedimentos à drenagem. Matizes avermelhados ou amarelos sugerem presença de óxidos de ferro, que por sua vez são indicadores de boa permeabilidade. Serpentininas e cloritas (tom esverdeado), e o talco, branco ou branco-esverdeado, são silicatos, parentes próximos do quartzo (SiO₂), que se apresenta sob cores diversas, função dos minerais presentes na ocasião de sua cristalização. A partir da cor, pode ser economizado bastante tempo na identificação (química) da origem de um solo ⁽¹⁾. As cores do solo matriz e de manchas são definidas por comparação, empregando a carta de Munsell, semelhante a cartas de fabricantes de tintas. Geralmente, a cor de um solo é definida durante o ensaio para a determinação do Limite de Contração, para o solo seco e para o solo saturado.



“Munsell soil color charts”

Munsell Color Company, Inc.
Baltimore, USA, 1954.

⁽¹⁾ Ref. “Notas de Aula”, Professor Avelino Gonçalves Koch Torres.

7. DUREZA é a capacidade de riscar outro material mais mole ou ser riscado por um material mais duro. A dureza é um dos atributos dos grãos dos minerais, utilizada em sua identificação, por comparação pela escala de Mohs.

Escala de Mohs

NÚMERO	MINERAL	OBSERVAÇÃO
1	Talco	Riscado pela unha
2	Gesso cristalizado	
3	Calcita	Riscados pelo aço
4	Fluorita	
5	Apatita	Riscam o vidro
6	Ordósia	
7	Quartzo	
8	Topázio	
9	Corindo	
10	Diamante	
(Cada mineral risca o anterior e é riscado pelo subsequente)		

8. O ODOR de solos orgânicos é característico. Até o SABOR poderia ser usado na identificação de solos ácidos (azedos) ou básicos (sabor semelhante ao do sabão), se não existissem os indicadores químicos.

9. FRIABILIDADE é a capacidade de fragmentação de uma partícula ou de um torrão. Torrões quase secos de silte apresentam fácil desagregação por pressão dos dedos, enquanto os de argila são muito menos friáveis. A observação da friabilidade é feita no ensaio de resistência a seco.

EXERCÍCIOS e pontos para discussão:

1. *Defina UMIDADE de uma amostra de solo.*
2. *Qual é a diferença entre TEXTURA E GRANULOMETRIA? E a relação?*
3. *Qual a diferença entre PLASTICIDADE e COESÃO? Um solo pode ser plástico e não ser coesivo? Pode ser coesivo e não ser plástico?*
4. *Amassando nas mãos uma porção de argila siltosa úmida e fazendo o mesmo com um pouco de silte argiloso no mesmo teor de umidade, como poderíamos, em uma classificação prévia do solo, diferenciar as duas amostras? Se estas amostras estivessem secas e destorroadas, seria possível diferenciá-las visualmente?*
5. *A coesão nos siltes finos pode ser menor que nas argilas? Defenda sua opinião.*
6. *Uma areia pura úmida não tem plasticidade, embora quando muito molhada possa ser esculpida, por exemplo, em uma escultura de praia. Se a ela for acrescentada, aos poucos, argila pura, terá sua classificação modificada para areia argilosa. Essa mistura terá imediatamente sua plasticidade aumentada, ou será necessário muita argila para que a plasticidade seja notada? E quando for notada, será ainda uma areia argilosa, ou já se terá transformado em uma argila arenosa?*
7. *Um torrão de argila, com diâmetro 6,0 mm, muito seco e duro ao tato, pode ser considerado pedregulho? Por quê?*
8. *O que entende por compactação? É sempre sinônimo de compressão? Que objetivos se procura alcançar compactando um solo?*
9. *Todos os solos podem ser comprimidos? Porções de argila podem ser compactadas? E de areia? E de pedregulhos? E de matações e blocos de rocha?*
10. *Uma amostra de solo é áspera ao tato, e quando comprimida e seca forma torrão muito duro. É escura e apresenta cheiro desagradável. Como você a identificaria?*
11. *Uma amostra de solo tem granulometria tão fina e delicada que seca e peneirada, tem a maciez de um talco de perfumaria, e molhada, produz a sensação tátil de um sabonete molhado, e seus torrões são muito friáveis. Que solo parece ser?*
12. *Um solo pode ser muito plástico, mas pouco compressível? Explique sua resposta.*
13. *Um solo pode ser muito compressível, mas pouco plástico? Explique sua resposta.*

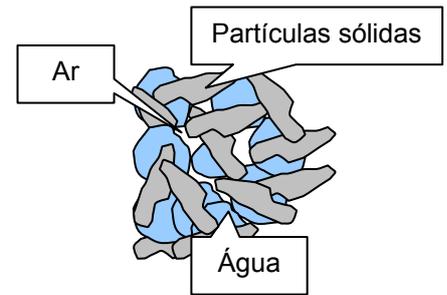
Capítulo 3 - PROPRIEDADES ÍNDICES

O solo é um material constituído por partículas sólidas e pelo espaço (vazios) entre elas, que pode estar preenchido por água ou ar. Constitui assim um sistema de três fases: sólida, líquida e gasosa.

Fase Sólida

A fase sólida é constituída por grãos minerais, com ou sem presença de matéria orgânica. As principais características a observar nos grãos são tamanho, peso específico, forma e composição química.

Um grão visível a olho nu em geral tem origem de natureza mecânica, e as três dimensões na mesma ordem de grandeza (como exceção se pode citar as micas). Quimicamente, os silicatos (feldspato, mica, quartzo, serpentina, clorita, talco) compõem a maioria, seguida pelos óxidos (hematita, magnetita, limonita), pelos carbonatos (calcita, dolomita), e pelos sulfatos (gesso, anidrita).



Forma das partículas granulares

Partículas presentes nas frações argilosas têm menores dimensões, em maioria com gênese de natureza química e formato lamelar (uma dimensão muito menor que as outras duas). Os principais minerais argílicos são as caolinitas, as montmorilonitas e as ilitas.

Partículas de forma fibrilar (uma dimensão dominante) são mais raras, encontradas principalmente em solos turfosos.

As maneiras como as partículas sólidas se arrumam em um solo natural tem influência em algumas de suas propriedades. Seu estudo é feito no assunto “Estrutura dos solos”.

Fase Líquida:

A água, sempre presente nos solos, é responsável por grande parte de suas propriedades e do seu comportamento. Na gênese de um solo, a água atua física e quimicamente, provocando ruptura de rochas ao congelar-se, erodindo e transportando partículas, por dissolução e lixiviação, pela ação de ácidos nela presentes, por exemplo. Pode participar da composição química de minerais argílicos, faz parte da composição das pressões a que um solo fica submetido, altera sua consistência (e sua resistência ao cisalhamento) e peso específico (aparente) de uma massa de solo.

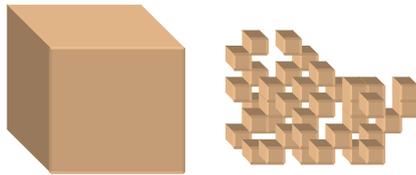
A água pode aparecer nos solos como:

1. Água de constituição - faz parte da estrutura molecular de partículas sólidas, principalmente nos minerais argílicos;
2. Água adesiva - película de água que adere fortemente à superfície de cada partícula (com espessura média $0,005 \mu$, as forças eletrostáticas que unem suas moléculas mais próximas aos sólidos as submetem a pressões na ordem de grandeza de 20.000 Kg/cm^2 , tornando-a semi-sólida. Por isso é chamada também “água dura”. As mais afastadas apenas apresentam alta viscosidade.);
3. Água higroscópica – é a que permanece em uma amostra de solo que foi seca ao ar livre;
4. Água livre – encontrada em algumas zonas de maciços terrosos, enchendo todos os seus vazios.
5. Água capilar – nos solos finos, a água sobe pelos interstícios finos (diâmetro inferior ao de um fio de cabelo) existentes entre as partículas sólidas, acima do nível máximo da água livre em locais onde esta exista. A altura de ascensão é inversamente proporcional ao diâmetro dos vazios que formam esses canais capilares, já tendo sido observados valores superiores a setenta metros.

Observações:

- A água adere à superfície de cada partícula, por forças de natureza eletrostática. A proporção de água adesiva (e capilar também) tende a ser tanto maior quanto maior for a sua superfície específica (relação entre a superfície de um corpo e sua massa).

Por exemplo: Suponha que um corpo tenha forma cúbica, com arestas de 10 cm, e massa 3000 g. Sua superfície terá área $6 \times 10 \times 10 = 600 \text{ cm}^2$ e área específica $600/3000=0,2 \text{ cm}^2/\text{g}$. Fracionando este corpo em pedaços cúbicos com 0,1 cm de aresta, o peso não se altera, mas a área total torna-se $1.000.000 \times 6 \times 0,1 \times 0,1 = 6.000.000 \text{ cm}^2$, e a área específica passa a ser $2.000 \text{ cm}^2/\text{g}$.



Partículas de solo do tamanho do silte têm dimensão máxima entre 0,05 mm e 0,005 mm. Supondo possível dividir o corpo do exemplo em partes com a dimensão média do silte (0,001 cm), sua área específica seria de

$$1.000.000.000.000 \times 6 \times 0,001 \times 0,001 / 3000 = 2.000.000 \text{ cm}^2/\text{g}.$$

Experimente calcular a superfície específica para partículas de dimensões $0,0000001 \times 0,00025 \times 0,0004 \text{ cm}$ (ordem de grandeza das partículas de argila).

- As águas livre e higroscópica evaporam por efeito do calor, lentamente a partir de 60° C , e rapidamente a partir de 100° C . Mas alguns solos (principalmente orgânicos) podem perder água adesiva e de constituição a partir de 75° C (aproximadamente). Quando é perdida água de constituição por excesso de calor, ocorre um fenômeno denominado “cracking” (quebra), que altera a constituição química das partículas sólidas, o que pode falsificar o resultado de ensaios. Ao secar solos em ensaios, é preciso utilizar faixas de temperatura eficientes, mas que não alterem a natureza das partículas.
- Não existirá água capilar onde não existir água livre. Por isso amostras levadas para um laboratório não apresentam água capilar.

Fase Gasosa:

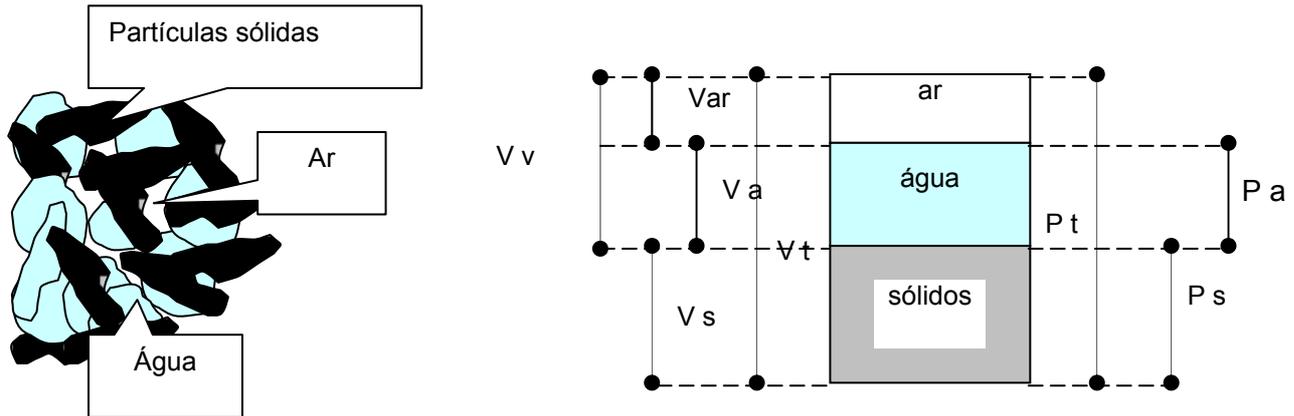
É constituída por ar, vapor d’água e carbono combinados. Tem interesse em casos especiais de consolidação de aterros, no cálculo de “pressões neutras” desenvolvidas em decorrência da redução de volume da fase gasosa. Sua densidade é – aproximadamente – $0,0012 \text{ g} / \text{cm}^3$.

Índices físicos, granulometria e consistência definem as principais propriedades de um solo, denominadas propriedades índices. Neste capítulo serão apresentados os índices físicos dos solos, e serão apenas mencionados os processos que permitirão sua obtenção. A granulometria (que estuda a textura), a consistência (que trata da influência do teor de umidade na fração fina dos solos) e outras propriedades índices serão objeto de capítulos especiais.

As propriedades permitirão indicar o tipo de solo que deverá ser utilizado para um determinado objetivo, classificá-lo, prever seu comportamento em determinadas condições, aprovar ou descartar jazidas (empréstimos), obter parâmetros para cálculos de pressões, permeabilidade, resistência a esforços, etc. São usados no cálculo em todas as áreas da Geotecnia: fundações, dispositivos de drenagem, estabilidade de taludes, barragens de terra, muros de arrimo, bases de rodovias e ferrovias, estudo e prevenção de acidentes, composições (misturas) de materiais e outros.

ÍNDICES FÍSICOS:

Quantificam as proporções das três fases de um solo, entre pesos, volumes, pesos e volumes.



Elementos fundamentais para o cálculo dos índices físicos:

- V_t = Volume total de uma amostra de solo;
- V_s = Volume dos sólidos (soma dos volumes das partículas sólidas);
- V_v = Volume dos vazios (soma dos volumes não ocupados por sólidos);
- V_a = Parte do volume de vazios que é ocupada por água;
- V_{ar} = Parte do volume de vazios que está ocupada pelo ar;
- P_t = Peso total de uma amostra;
- P_s = Peso das partículas sólidas (peso da amostra completamente seca);
- P_a = Peso da água presente nos vazios da amostra.

No esquema, pode ser visualizado que:

$$\begin{aligned}V_v &= V_a + V_{ar} \\V_t &= V_s + V_v = V_s + V_a + V_{ar} \\P_t &= P_s + P_a\end{aligned}$$

O ar existente nos vazios de uma amostra de solo tem peso muito pequeno em relação ao dos sólidos e da água. Como está sujeito ao empuxo da atmosfera, seu peso não pode ser medido diretamente (mas pode ser calculado), e habitualmente é desprezado.

1) Teor de umidade (símbolo: h ou w)

Definimos teor de umidade (h) de uma amostra de solo como a razão entre a massa da água (M_a) contida em um certo volume de solo e a massa da parte sólida (M_s) existente nesse mesmo volume, expressa em porcentagem. Também pode ser calculada pela razão entre pesos.

$$h = w = 100.M_a / M_s = 100.P_a / P_s \quad (\%)$$

Conhecido o teor de umidade de um solo, pode ser imediatamente calculado o fator de correção de umidade (fc), que ao ser multiplicado pelo peso de uma amostra com esse teor de umidade informa o peso que tal amostra teria se estivesse seca.

$$F_c = 100 / (100 + h)$$

Teores de umidade devem expressos em porcentagem com precisão de centésimos, e o fator de correção com quatro casas decimais, quando fazem parte de cálculos em ensaios que exigem precisão.

No campo, os processos mais rápidos são os calcados em métodos nucleares e o que utiliza o aparelho “Speedy”.

O teor de umidade de um solo, embora expresso como tal, não é uma porcentagem. Imagine uma amostra de solo seco, à qual se adicionará água. O peso da água aumenta, mas o peso das partículas sólidas

é constante. Portanto h tem limite inferior 0 %, mas não há limite superior para a umidade. A umidade natural de algumas argilas vulcânicas do México, por exemplo, pode superar a marca de 400 %.

A determinação do teor de umidade de uma amostra de solo pode ser feita por vários métodos, sendo o mais utilizado:

- a) Determinar o peso total (Pt) da amostra;
- b) Secar completamente a amostra;
- c) Determinar o peso da amostra seca (Ps).
- d) Por diferença, obter o peso original da água na amostra ($P_a = P_t - P_s$)
- e) Calcular o teor de umidade $h = 100.P_a / P_s$. Expressá-lo em porcentagem.

A umidade não se distribui uniformemente nos solos, nem em amostras. A superfície específica de partículas pequenas é maior que a das maiores. Em uma amostra preparada e homogeneizada, se separarmos por peneiramento as frações de partículas grandes das menores (por exemplo, usando uma peneira de 2,0 mm de malha), o teor de umidade será muito maior na fração de partículas menores.

Discuta outras causas de variação na distribuição da umidade em amostras ou no campo.

2) Peso específico (γ_g), massa específica (ρ_g) e densidade (δ) das partículas sólidas

O peso específico (γ_g) de uma partícula sólida é, por definição, o peso da substância que a forma, por unidade do volume que ocupa no espaço. O peso específico da partícula é determinado pela razão entre seu peso (seco) e seu volume.

$$\gamma_g = P_s / V_s$$

Massa específica (ρ_g) de uma partícula sólida é obtida pela razão entre sua massa e o volume que a partícula ocupa no espaço. É expressa em g/cm^3 , kg/l , t/m^3 .

$$\rho_g = M_s / V_s$$

É muito comum utilizar-se a expressão “peso específico” e utilizar como unidade g/cm^3 . Trata-se de um erro compreensível: também é comum (e errado) responder à pergunta “Quanto você pesa?” com a resposta “X quilos”, já que quilograma é uma unidade de massa. Engenheiros não os devem cometer.

Densidade (δ) ou densidade relativa de uma partícula é a razão entre seu peso específico e o peso específico da água (γ_a) destilada e isenta de ar à 4° C. Como este último vale $1,000 \text{ g/cm}^3$, a densidade e o peso específico são expressos pelo mesmo valor numérico.

$$\delta = \gamma_g / \gamma_a = \rho_g / \rho_a$$

(Com base nestas definições clássicas, pode ser concluído que os índices peso específico e densidade dos grãos são valores aproximados: o peso varia conforme o local onde são determinados, principalmente quanto à altitude, e o volume conforme a temperatura e a pressão a que estiverem submetidos. Para aplicações normais da Mecânica dos Solos, tais variações são muito pequenas, podendo ser desprezadas).

A determinação do peso específico e da densidade de partículas isoladas de grandes tamanhos (como pedras ou os maiores pedregulhos) é estudada na Física, e será objeto de uma seção especial.

Como em um solo podem ocorrer partículas de natureza variada, em geral há mais interesse em determinar o peso específico médio das partículas sólidas que o compõem. Além disso, a fração mais fina dos solos costuma ter natureza diversa da de maior tamanho, já que é gerada mais por desintegração química (oxidação, hidratação, carbonatação) que mecânica (ruptura e desgaste, causados por temperatura, atrito, etc.). Por isso, as normas sempre se referem à determinação do peso específico médio ou da densidade média das partículas menores que um tamanho especificado. Todas as normas exigem que o valor da densidade seja expresso com precisão de milésimos (três casas decimais).

A ABNT adota o processo do picnômetro para a determinação da massa específica das partículas menores que 4,8 mm, enquanto o DNIT (antigo DNER) o faz para a determinação da densidade das partículas menores que 2,0 mm.

A densidade dos grãos depende principalmente dos seus constituintes mineralógicos. Para os solos mais comuns, a densidade dos grãos varia de 2,650 a 2,900; valores menores em solos com elevados teores de matéria orgânica e maiores nos que tem óxidos de ferro. A presença de minérios ou metais com densidade muito elevada, como o ósmio (22,480) ou o ferro (7,880) pode aumentar muito o valor de δ . Como exemplo de exceção, a vermiculita (solo rico em silicatos e óxido de ferro) tem densidade na ordem de grandeza de 0,750.

3) Peso Específico Aparente (γ) e Massa Específica Aparente (ρ)

O peso específico aparente de uma amostra de solo é determinado pela razão entre o peso total da amostra e seu volume.

$$\gamma = P_t / V_t$$

A massa específica aparente de uma amostra é obtida pela razão entre sua massa total e seu volume.

$$\rho = M_t / V_t$$

Existem vários processos para sua determinação.

São chamados processos diretos àqueles em que uma amostra é colhida sem deformação, sendo então determinados sua massa e seu volume. Os principais são o do cubo esculpido e o do cilindro de cravação.

Nos processos indiretos, a amostra é retirada do solo e pesada. Seu volume é determinado pelo volume da escavação (volume do buraco). A maneira escolhida para medir esse volume determina o equipamento e o nome do processo (processo do frasco de areia, do óleo grosso, do balão de borracha).

Em todos os casos, é determinado o teor de umidade das amostras, para que possa ser calculado o peso específico aparente seco.

Além dos mencionados, a partir do meio do século vinte começaram a ser empregados métodos nucleares, que se baseiam:

- a) Na emissão de raios gama, para obter o peso específico aparente;
- b) No uso de fonte de nêutrons, para determinar a umidade.

4) Peso Específico Aparente Seco (γ_s) e Massa Específica Aparente Seca (ρ_d)

$$\gamma_s = P_s / V_t$$

$$\rho_s = M_s / V_t$$

Dividindo por P_t ambos os termos da equação e substituindo P_t por $P_s + P_a$,

$$\frac{P_s / (P_s + P_a)}{[V_t / P_t]} = 1 / [(P_s + P_a) / P_s] [1 / \gamma] = [1 / (1 + h)] [\gamma]$$

$$\gamma_s = \gamma / (1 + h) \quad \text{ou} \quad \gamma_s = \gamma \cdot f_c$$

Analogamente,

$$\rho_s = \rho \cdot f_c$$

Na dedução desta fórmula, o teor de umidade foi expresso em decimais. Embora o resultado seja correto, a ABNT exige que o teor de umidade seja sempre expresso em porcentagem.

Exemplo de utilização direta: A qualidade da compactação de aterros é controlada pela necessidade de obter um valor para o γ_s , no campo, que atinja –pelo menos– uma porcentagem (definida para cada obra) do γ_s máximo, obtido em laboratório no ensaio de compactação, feito com o mesmo solo.

5) Índice de vazios (e) ou (ϵ)

É a razão entre o volume de vazios V_v e o volume ocupado pela parte sólida (V_s) do solo

$$e = \epsilon = V_v / V_s$$

Geralmente é calculado em função do peso específico das partículas e do peso específico aparente seco, pois

$$\varepsilon = (V_t - V_s) / V_s = V_t / V_s - V_s / V_s = (V_t / P_s) / (V_s / P_s) - 1 = (1 / \gamma_s) / (1 / \gamma_g) - 1$$

$$e = \gamma_g / \gamma_s - 1$$

Nos solos mais comuns, o índice de vazios varia de 0 a 20.

O índice de vazios tem aplicação direta, além do cálculo de outros índices físicos, no estudo da densificação de solos. Quando um maciço terroso diminui de volume, isto se dá pela redução do volume de vazios, pois o volume dos sólidos varia muito pouco durante o fenômeno.

“Densificar” significa tornar mais denso, isto é, diminuir o volume de vazios. Uma densificação pode ser causada por vibração, em solos não coesivos, compactação (pressão e amassamento) em solos coesivos. Grande parte dos autores denomina adensamento apenas ao fenômeno de redução lenta do volume de vazios de um solo, quando pressões causam o escoamento da água que os preenche.

6) Porosidade

É a razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V_t) de uma amostra de solo, sempre expressa em porcentagem.

$$n = 100 V_v / V_t \quad (\%)$$

A porosidade pode ser determinada em função do índice de vazios, pois $V_t = V_s + V_v$ e dividindo ambos os termos da equação anterior por V_s , temos $V_v / V_t = (V_v / V_s) / [(V_s + V_t) / V_s] = \varepsilon / (1 + \varepsilon)$

$$n = 100 \cdot \varepsilon / (1 + \varepsilon) \quad (\%)$$

A porosidade também pode ser calculada por:

$$n = 100 (1 - \gamma_s / \gamma_g)$$

7) Grau de Saturação e Grau de Aeração

Grau de Saturação (ou Saturação) de um solo é a porcentagem volumétrica de água existente nos vazios desse solo.

$$S = S_r = 100 \cdot V_a / V_v \quad (\%)$$

$$\text{Como } h = P_a / P_s = V_a \cdot \gamma_a / (V_s \cdot \gamma_s) = \gamma_a \cdot S \cdot V_v / (\delta \cdot \gamma_a \cdot V_s) = S \cdot \varepsilon / \delta$$

$$S = h \cdot \delta / \varepsilon = h \cdot \delta (1 - n) / n$$

Observe que quando o solo está saturado, $\varepsilon = 100 \cdot \delta \cdot h$

Grau de Aeração (ou Aeração) é, por definição, a porcentagem do volume de ar em relação ao volume de vazios do solo.

$$A = 100 \cdot V_{ar} / V_v \quad (\%)$$

Daí,

$$A = (V_v - V_a) / V_v = 1 - S$$

É interessante observar que, com o mesmo teor de umidade, um solo pode apresentar diferentes valores para a saturação. Antes de uma compactação, por exemplo, o solo é revolvido, tendo muito ar ocupando vazios. Depois de compactado, o volume de água pouco se altera, ao contrário do volume ocupado pelo ar, que diminui drasticamente.

8) Peso Específico Saturado

O peso específico aparente de um solo já foi descrito como $\gamma = P_t/V_t$, que podemos reescrever:

$$\gamma = P_t/V_t = (P_s + P_a)/(V_s + V_a) = P_s(1+h)/V_s(1+\epsilon) = \gamma_g(1+h)/(1+\epsilon)$$

$$\gamma / (1+h) = \gamma_g / (1+\epsilon) = \gamma_s$$

Como $\gamma_g = \sigma \cdot \gamma_a$ e $h \cdot \delta = S \cdot \epsilon$,

$$\gamma = \gamma_a(\delta + S \cdot \epsilon)/(1 + \epsilon)$$

Quando o solo está seco, $S_r=0$, e a fórmula se torna:

$$\gamma_s = \gamma_a \cdot \delta / (1 + \epsilon) \quad (\text{seco})$$

Um solo é saturado quando todos os vazios estão preenchidos por água, sendo obtido o valor máximo de γ . Para $S_r = 100\%$,

$$\gamma_{\text{sat}} = \gamma_a(\delta + \epsilon)/(1 + \epsilon)$$

O peso específico de um solo saturado também pode ser obtido pelas relações

$$\gamma_{\text{sat}} = \gamma_s + n \cdot \gamma_a$$

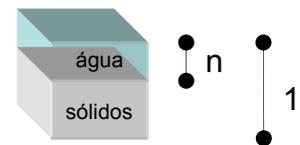
$$\gamma_{\text{sat}} = \gamma_a [n + (\delta(1-n))]$$

9) Peso Específico Submerso

Quando um solo está imerso em um líquido (água), suas partículas sólidas sofrem a ação do empuxo. O valor do empuxo é obtido multiplicando o volume das partículas pelo peso específico do líquido que as submerge. No caso da água, $\gamma_{\text{sub}} = \delta(1-n)\gamma_a - (1-n)\gamma_a$

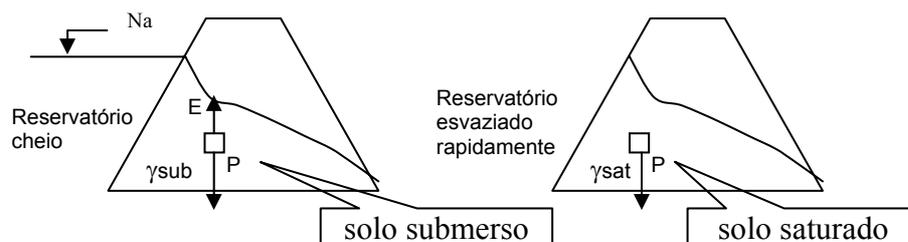
$$\gamma_{\text{sub}} = (\delta - 1)(1 - n)\gamma_a$$

$$\gamma_{\text{sub}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_a$$



Um bom exemplo para tornar clara a diferença entre solo saturado e submerso é mostrado no livro “Mecânica dos Solos e suas aplicações”, de Homero Pinto Caputo:

Imagine um reservatório (por exemplo, uma barragem de terra) cheio, com o nível d’água marcado por N_a :



Quando o reservatório é esvaziado rapidamente, os vazios continuam preenchidos por água, mas o empuxo (E) deixa de existir. Na segunda situação, o solo continua saturado, sem estar submerso (o peso específico de uma partícula só pode ser considerado submerso se o nível do lençol freático tiver cota superior à dela).

Observe que neste caso ocorre a situação mais desfavorável para a estabilidade da barragem de terra, uma vez que sobre cada camada inferior a outras, e sobre o terreno, atua o peso máximo. Neste momento a probabilidade de desabamento do talude de montante é a maior possível.

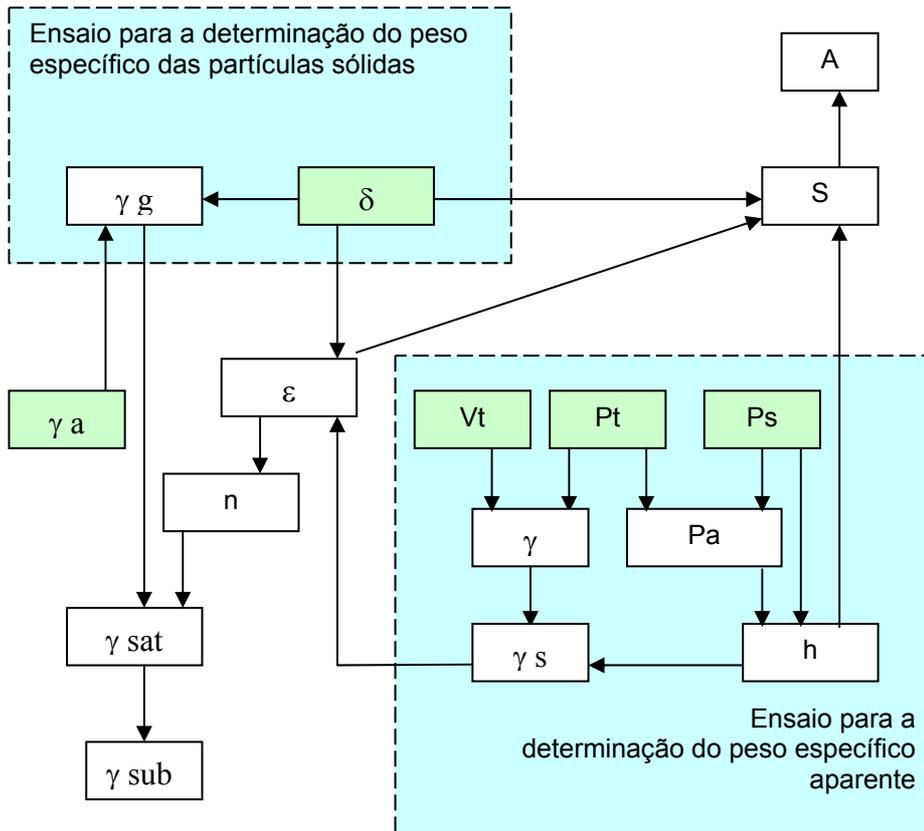
Fazendo analogias, imagine causas prováveis para avalanches e desabamento de encostas.

PRINCIPAIS RELAÇÕES BÁSICAS (resumo)

ÍNDICES FÍSICOS		RELAÇÕES PARA CÁLCULO	
Teor de umidade h ou h%	$0 < h\% < 500\%$ (solos comuns)	$h\% = 100.Pa / Ps$	$Pt = Ps + Pa$
Índice de vazios ϵ	$0 < \epsilon < 20$ (solos comuns)	$\epsilon = Vv / Vs$ $\epsilon = (\gamma g / \gamma s) - 1$ $\epsilon = n / (1 - n)$	$Vv = Va + Var$ $Vv = Vt - Vs$
Porosidade n	$0 < n < 100\%$	$n = 100 Vv / Vt$	$n = 100 \epsilon / (1 + \epsilon)$ $n = 100.(1 - \gamma s / \gamma g)$
Grau de saturação S	$0 < S < 100\%$	$S = 100 Va / Vv$	$S = h \delta / \epsilon$
Grau de aeração A	$0 < A < 100\%$	$A = 100\% - S$	
Massa específica ρ (ou ρ nat)	$1 < \rho < 2,5 \text{ g/cm}^3$ (solos comuns)	$\gamma = Pt / Vt$ $\gamma = \gamma g (1 + h) / (1 + \epsilon)$	$\gamma = \gamma a (\delta + S.\epsilon) / (1 + \epsilon)$
Peso específico seco γs e Massa específica seca ρs	$1 < \rho < 2,3 \text{ g / cm}^3$ (solos comuns)	$\gamma s = Ps / Vt$ $\rho s = Ms / Vt$ $\gamma s = \gamma / (1+h)$ $\rho s = \rho / (1+h)$	$\gamma s = \gamma g / (1 + \epsilon)$ $\gamma s = (1 - n) \gamma g$
Densidade dos grãos δ	$1 < \delta < 2,9$ (solos comuns)	$\delta = \gamma g / \gamma a$ $\delta = \rho g / \rho a$	
Massa específica dos grãos ρg e Peso específico dos grãos γg	$(1 < \rho g < 2,9 \text{ g/cm}^3)$ (solos comuns)	$\gamma g = Ps / Vs$ $\gamma g = \gamma s(1 + \epsilon)$ $\gamma g = \delta . \gamma A$	$\rho g = Ms / Vs$ $\rho g = \rho s(1 + \epsilon)$ $\rho g = \delta . \rho A$
Peso específico saturado γ sat	Até 3,8 (comuns)	γ sat = $\gamma a (\delta + \epsilon) / (1 + \epsilon)$	γ sat = γ sub + γa γ sat = $\gamma s + n.\gamma a$ γ sat = $\gamma a.[\delta(1 - n) + n]$
Peso Específico Submerso γ sub	Até 2,8 (comuns)	γ sub = $(\delta - 1) \gamma a / (1 + \epsilon)$	γ sub = $(\delta - 1).(1 - n) \gamma a$
<p>Neste resumo, o teor de umidade foi expresso em decimais, para simplificação das fórmulas. Nas primeiras linhas do quadro, frisamos o emprego do conceito de porcentagem, exigido pelas normas da ABNT, pela expressão h%.</p>			

ρg do quartzo $\cong 2,670 \text{ g/cm}^3$ (areias)

A determinação dos principais índices físicos pode ser feita a partir de apenas dois ensaios:



Depois de executar esses dois ensaios, experimente utilizar a planilha de cálculo “Índices Físicos” para conferir todos os índices físicos calculados a partir de P_t , V_t , P_s e δ .

Outras propriedades dos solos são provenientes de sua textura, estrutura, forma dos grãos e sua composição química. Serão descritas e estudadas em momento mais conveniente. Comentaremos agora, superficialmente, outras propriedades índices mais importantes.

a) A **TEXTURA** de um solo trata dos tamanhos das partículas e das proporções em que tais tamanhos ocorrem no solo. (Nas palavras de Costa Nunes, textura ou composição granulométrica é a distribuição da frequência das massas dos grãos de um solo em função dos diâmetros dos mesmos.). Representa-se a composição granulométrica por meio de curvas. É avaliada no Ensaio de Granulometria, a partir de amostras, e fundamental na execução das classificações geotécnicas.

b) O estado natural de solos não coesivos (areias e pedregulhos) tem a **COMPACIDADE** como característica mais notável. Apenas para este tipo de solos há objetivo em descrevê-los como estando “mais compactos” (mais densos, com menor índice de vazios) ou “mais fofos” (maior índice de vazios). Por ser uma característica determinada apenas dos granulares, não é considerada como “índice físico”. Tanto o índice de vazios como o peso específico aparente seco de um solo granular pode ser usado para definir seu Grau de Compacidade (GC).

$$GC = (\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{nat}}) / (\epsilon_{\text{máx}} - \epsilon_{\text{mín}})$$

ou

$$GC = \gamma_s \text{ max } (\gamma_s \text{ nat} - \gamma_s \text{ mín}) / \gamma_s \text{ nat } (\gamma_s \text{ max} - \gamma_s \text{ mín})$$

Cada um dos parâmetros acima, usados para calcular o grau de compacidade, é obtido em ensaios executados com cada solo granular em estudo. A determinação do índice de vazios máximo é feita em ensaio descrito na norma MB-3324, e a do índice de vazios mínimo na MB-3388 (ABNT). Não tem sentido

a comparação – por exemplo – entre areias diferentes, com granulometria ou grãos com formato (e aspereza) diversos. Uma areia é considerada (segundo Terzaghi).

Fofa (solta)	$GC < 0,3$
Medianamente compacta	$0,3 < GC < 0,7$
Compacta	$GC > 0,7$

c) Os solos coesivos são aqueles que contém uma fração significativa de argila, capaz de lhes conferir comportamento coesivo. Nos solos coesivos, o que mais determina o comportamento do solo é a sua CONSISTÊNCIA. A rigidez de um solo argiloso é inversamente proporcional ao seu teor de umidade. Se o teor de umidade de um torrão de argila aumenta, este fica mais mole (menos consistente). Quando diminui, a argila torna-se mais rígida.

Conforme seu teor de umidade, um solo coesivo pode apresentar características de um dentre quatro estados: líquido (caracterizado “grosso modo” pela possibilidade de fluir), plástico (pela possibilidade de ser moldado), semi-sólido ou sólido (nestes estados a tentativa de moldagem fragmenta a amostra, mas no estado sólido o volume de uma amostra não se altera quando o teor de umidade varia). Os teores de umidade que definem fronteiras entre esses estados são chamados limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC), cada um determinado por um ensaio específico. Uma vez identificados os limites de consistência, o Índice de plasticidade $IP = LL - LP$ permite a classificação do solo (Jenkins) em:

Fracamente plástico	$1 < IP < 7$
Medianamente plástico	$7 < IP < 15$
Altamente plástico	$IP > 15$

Um solo coesivo que tenha em certo momento o teor de umidade h terá seu ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (IC) definido por:

$$IC = (LL - h) / IP$$

O índice de consistência IC permite a classificação dos solos coesivos em

Muito mole	$IC < 0$
Mole	$0 < IC < 0,5$
Médio	$0,5 < IC < 0,75$
Rijo	$0,75 < IC < 1$
Duro	$IC > 1$

A consistência pode ser avaliada pelo ensaio de compressão simples, em que um corpo de prova cilíndrico é comprimido até se romper. A resistência à compressão (R_s) é definida pela razão entre a carga (kgf) que o rompe e a área da seção reta do cilindro (cm^2). Neste último caso, a consistência do solo pode ser classificada como:

Mole	$R_s < 0,5 \text{ kgf} / cm^2$
Média	$0,5 < R_s < 1,5$
Rija	$1,5 < R_s < 4$
Dura	$R_s > 4$

A consistência também pode ser definida pela resistência a penetração de um cone padronizado (medida pela pressão necessária para que o cone penetre – por exemplo, 1 cm em uma amostra).

Os ensaios mencionados serão estudados em momento oportuno.

Exercícios sobre Índices Físicos de um solo

1) De uma quantidade $P_t = 22,00 \text{ kg}$ e volume respectivo $V_t = 12,2 \text{ l}$, extrai-se uma pequena amostra, para a qual se determina: peso úmido = 70 g, peso seco = 58 g e peso específico das partículas $\gamma_s = 2,67 \text{ g} / cm^3$. Pede-se calcular: teor de umidade (h), peso da parte sólida (P_s), peso da água (P_a),

volume da parte sólida (V_s), volume de vazios (V_v), índice de vazios (e), porosidade (n), grau de saturação (S), grau de aeração (A), peso específico aparente (γ), o teor de umidade considerando o solo saturado e o peso específico saturado (γ_{sat}).

- 2) Trace a curva da função $\varepsilon = f(n)$, onde ε é o índice de vazios, e n a porosidade.
- 3) O peso específico de um solo é $1,75 \text{ g/cm}^3$ e seu teor de umidade 6%. Calcule a quantidade de água a adicionar, por m^3 de solo, para que o teor de umidade passe a 13%. Considere constante o índice de vazios.
- 4) Uma amostra de 200 g de solo tem teor de umidade 32,5 %. Calcule a quantidade de água a adicionar para que o teor de umidade se torne 41 % .
- 5) O peso específico de uma argila é $1,7 \text{ g/cm}^3$, seu teor de umidade 34 % e a densidade das partículas 2,65. Qual o índice de vazios do material?
- 6) O peso específico de um solo é $1,6 \text{ g/cm}^3$, seu teor de umidade 33% e a densidade das partículas 2,65. Calcule: a) índice de vazios e , b) porosidade n , c) grau de saturação S .
d) Que quantidade de água deve-se acrescentar, por m^3 de solo, para saturá-lo?
- 7) Uma amostra de areia no estado natural pesa 875 g e seu volume é 512 cm^3 . Tem peso seco 803 g e densidade relativa dos grãos 2,66. Determine índice de vazios, porosidade, teor de umidade e grau de saturação.
- 8) O peso específico dos sólidos de uma areia é $2,650 \text{ g/cm}^3$ e seu índice de vazios 0,57. Calcule os pesos específicos: da areia seca; da areia quando estiver saturada; da areia quando se encontrar submersa.
- 9) Uma argila saturada tem peso específico saturado $\gamma_{sat} = 1,84 \text{ g/cm}^3$ e umidade $h = 39,3 \%$. Calcule a densidade das partículas e o índice de vazios.
- 10) O peso específico de um solo é $1,6 \text{ g/cm}^3$, o peso específico das partículas é $2,6 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade 12 %. Calcule:
a) peso específico do solo seco; b) porosidade; c) índice de vazios;
d) grau de saturação; e) grau de aeração.
- 11) São conhecidos, para um solo:

$\gamma = 1,8 \text{ g/cm}^3$	$h = 12 \%$	$\gamma_g = 2,7 \text{ g/cm}^3$
-------------------------------	-------------	---------------------------------

 Calcule: γ_s , S , A , e n .
- 12) Um cm^3 de solo úmido pesa 1,8 g. Seu peso seco é 1,5 g. O peso específico das partículas sólidas é 2,72 g. Calcule o teor de umidade e o índice de vazios.
- 13) De uma amostra indeformada de solo são obtidos os seguintes dados:
Volume total 1.150 cm^3 ; peso total úmido 2,6 kg; peso seco 2,4 kg; $\delta = 2,73$. Pede-se o grau de saturação.
- 12) De um solo saturado são conhecidos $\gamma_{sat} = 1,85 \text{ g/cm}^3$ e $h = 38,7 \%$. Calcule o peso específico das partículas.
- 13) Uma amostra de solo pesa 2,75 kg e tem volume $1,5 \text{ dm}^3$. A densidade das partículas é 2,7. Os pesos de uma pequena amostra, antes e depois de seca em estufa, são respectivamente 5 g e 4,35 g. Calcule: umidade, índice de vazios, porosidade, grau de saturação e grau de aeração.
- 14) Dados: $P_t = 1010 \text{ g}$, $V_t = 558 \text{ cm}^3$, $\gamma_g = 2,68 \text{ g/cm}^3$, e $P_s = 918 \text{ g}$, Calcule: γ , h , S , A , ε e n .
- 15) A porosidade de uma areia é 34%. Densidade das partículas, 2,7. Calcule seu peso específico quando estiver seca, saturada e submersa.

- 16) A porosidade de uma areia é 37% e o peso específico dos grãos $2,66 \text{ g/cm}^3$. Determine:
- Índice de vazios;
 - Peso específico aparente seco;
 - Peso específico quando $S = 30 \%$;
 - Peso específico saturado.
- 17) Uma amostra de argila saturada tem volume 162 cm^3 e pesa 290 g . Sendo $\delta = 2,790$, determine o índice de vazios, porosidade, teor de umidade e peso específico do material (grãos).
- 18) Um centímetro cúbico de areia seca pesa $1,8 \text{ g}$. Supondo $\delta = 2,65$, calcule o peso específico, supondo $S = 50 \%$ e $S = 100 \%$.
- 19) Sendo dados o peso específico úmido $1,8 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade 10% , determine γ_s e S . Considere $\delta = 2,67$.
- 20) Um solo saturado tem teor de umidade 42% e a densidade das partículas é $2,68$. Calcule o índice de vazios, a porosidade e o peso específico do solo.
- 21) Uma amostra de solo tem peso $132,2 \text{ g}$ e volume $62,3 \text{ cm}^3$ no estado natural. Seu peso seco é $118,2 \text{ g}$. O peso específico das partículas é $2,67 \text{ g/cm}^3$. Calcule a umidade, índice de vazios, porosidade e grau de saturação.
- 22) Conhecidos $P_t = 5,1 \text{ kg}$, $V_t = 2\,605 \text{ cm}^3$, $h = 13,6 \%$ e $\gamma_g = 2,65 \text{ g/cm}^3$, determine γ_s , S e ε .
- 23) Dados: Peso total de uma amostra de solo = $72,49 \text{ g}$; peso após secagem em estufa = $61,28 \text{ g}$; peso da cápsula = $32,54 \text{ g}$; densidade das partículas = $2,69$.
Pede-se: teor de umidade, porosidade, índice de vazios, peso específico aparente (com $h = 0$ e na umidade original) e peso específico do solo submerso.
- 24) Dados: $A = 51,7 \%$, $h = 12,4 \%$ e $\delta = 2,7$, calcule n .
- 25) Uma amostra de areia seca enche um cilindro. Determine o índice de vazios do solo em função do volume do cilindro V , da densidade dos grãos δ , do peso específico da água γ_a e do peso P_s da areia contida no cilindro.

$$\text{Resposta: } \varepsilon = [(V \delta \gamma_a) / P_s] - 1$$

- 26) De um corte são removidos $180\,000 \text{ m}^3$ de solo, com índice de vazios $1,22$. Quantos m^3 de aterro com índice de vazios $0,76$ poderão ser construídos?
- 27) Para a construção de uma pequena barragem de terra será necessário fazer um aterro de $300\,000 \text{ m}^3$ com índice de vazios $0,8$. Existem três jazidas disponíveis. O índice de vazios do solo em cada uma delas, bem como a estimativa de custo do movimento de terra até o local da barragem, são indicados no quadro abaixo. Que jazida produzirá maior lucro ao empreiteiro?

Jazida	Índice de vazios	Custo do movimento de terra R\$/ m^3
A	0,9	10,20
B	2,0	9,00
C	1,6	9,40

- 28) Como você determinaria a densidade aparente de um pedregulho que tenha maior dimensão em torno de duas polegadas? Detalhe diferenças de procedimento na determinação de seu volume, se o pedregulho:
- tiver densidade maior que a da água.
 - tiver densidade menor que a da água.

Capítulo 4 - COLETA E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Para estudar um solo, precisamos primeiro definir o objetivo do estudo.

O solo pode ser usado como material de construção, onde é importante o conhecimento das suas propriedades - que poderão ou não ser aproveitadas integralmente ou modificadas. Esse conhecimento pode até conduzir à decisão de não utilizá-lo.

Quando em um determinado terreno vai ser construída uma obra de engenharia, o tipo de obra e sua interação com o solo definem quais os estudos a serem feitos. Conforme a obra de engenharia que será executada, podem nos interessar as camadas mais profundas e/ou mais próximas da superfície.

Estruturas naturais como taludes de corte ou encostas naturais facilitam o estudo do comportamento do solo sob condições diversas, como variações das condições de umidade, intemperismo, etc.

A topografia da região, a vegetação e o aspecto superficial nos dão algumas indicações sobre as camadas (horizontes) mais superficiais, mas isto é insuficiente para a tomada de decisões.

Do estudo da exploração do subsolo, principalmente no que se refere às camadas profundas, faz parte coletar amostras, operação comum tanto à prospecção superficial quanto à profunda. Essas amostras têm que ser REPRESENTATIVAS do solo, e a decisão sobre seu tamanho, número de amostras, locais de onde são retiradas, é responsabilidade do Engenheiro. Uma amostragem mal executada leva fatalmente à resultados tendenciosos, e a quantidade e qualidade dos ensaios de laboratório não podem corrigir seus resultados pobres.

A coleta de amostras é feita durante a prospecção, durante o projeto e durante a execução de obras (controle). Pode ser superficial ou profunda.

De um modo geral, podemos classificar as amostras em dois tipos: amostras deformadas e amostras indeformadas.

AMOSTRAS DEFORMADAS

Conservam todos os constituintes minerais do solo, inclusive, se possível, sua umidade natural, mas não conservam sua estrutura original que é alterada pelo processo de extração.

Em uma amostragem superficial as coletas são feitas com auxílio de trados, pás, escavadeiras manuais, talhadeiras e martelos e as amostras são transportadas para o laboratório preferencialmente em recipientes que evitem perda significativa de umidade. Na amostragem profunda, é necessário equipamento especial, sendo a perfuração rotativa ou por percussão (ou a escavação de poços ou trincheiras).

Para fins de engenharia, pouco interessa a camada superficial, (horizonte A) da qual participam componentes orgânicos e elementos transportados. Geralmente esta é retirada por terraplanagem para a execução de uma obra, e por isso antes de ser colhida uma amostra, a superfície do solo normalmente é raspada. Mas o horizonte A não deve ser desprezado, pois é a base de sustentação da vida no planeta. Suas características podem fornecer importantes indicações sobre o subsolo. Esse horizonte é estudado na Pedologia.

AMOSTRAS INDEFORMADAS:

Diferem das amostras deformadas por manterem sua estrutura original, embora percam as tensões a que estavam submetidas em seu local de origem. São colhidas tanto em sondagens superficiais quanto profundas.

Sua coleta é feita pela cravação (e posterior retirada) de um cilindro metálico no solo, ou pela escultura de uma forma prismática (como o cubo), executada no local de amostragem.

Cuidados especiais com seu acondicionamento para transporte até o laboratório onde serão analisadas são tomados para evitar perda de umidade e deformação (incluindo ruptura) da amostra. Esses detalhes incluem o uso de sacos plásticos, banho de parafina, forma de recipientes para transporte, material de acondicionamento, etc.

Veja mais em "peso específico aparente".

PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS USUAIS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

1. REFERÊNCIAS:

NBR 6457 [ABNT], M2-61 [DER / SP], ME 041 [DNER],
EM 035 [DNER], NBR 9604 [ABNT].

2. APARELHAGEM (para preparação com secagem prévia)

- almofariz com mão de gral recoberta de borracha;
- repartidor de amostras;
- balança com capacidade até 20 kg, sensível a 1 g.
- peneira de malha quadrada de 75 mm;
- peneira de malha quadrada de 4,75 mm (peneira nº 4);
- peneira de malha quadrada de 2 mm (peneira nº 10);
- tampa e fundo para o conjunto de peneiras;
- bandejas galvanizadas, com 50x30x6 cm.

Nas peneiras mais finas, existe uma dupla nomenclatura. Quando uma peneira é designada pelo número, esse número se refere a quantidade de malhas por polegada. (ASTM, AASHO)



Almofariz e mão de gral



Repartidor de amostras



Peneira



bandeja

PREPARAÇÃO COM SECAGEM PRÉVIA

3) OPERAÇÕES PRELIMINARES, comuns a todos os ensaios:

Com a amostra (mínimo de 10 kg), procede-se do seguinte modo:

- 3.1. espalhar toda a amostra de solo em uma ou mais bandejas ou tabuleiros, colocando-as em local bem ventilado a fim de permitir a evaporação das águas livres nela existentes.

O ambiente de laboratório é preferível, com ventiladores para circular ar sobre a amostra. Também se recomenda o uso de lâmpadas infravermelhas colocadas a cerca de 50 cm da amostra. No caso de solos predominantemente argilosos, recomenda-se um destorroamento contínuo, à medida que a amostra perca água, a fim de evitar a formação de aglomerados de argila seca, de desagregação difícil. Embora algumas normas mencionem secagem ao sol, solos orgânicos podem ser alterados por calcinação, se forem assim desidratados.

- 3.2. fazer uma homogeneização cuidadosa após essa secagem prévia, destorroando com a mão de gral.

- 3.3. separar a amostra em quatro frações, por peneiramento:

- a - fração retida na peneira de 75 mm;
- b - fração que passa na peneira de 75 mm e fica retida na peneira nº 4 (4,75 mm);
- c - fração que passa na peneira N°4 e fica retida na peneira nº10 (2,0 mm);
- d - fração que passa na peneira nº 10

- 3.4 usando o almofariz e a mão de gral, desmanchar os torrões existentes em cada fração, isoladamente, com o cuidado de não triturar partículas individuais.

O solo foi separado em frações para facilitar esta operação de desagregação, e garantir uma rigorosa eliminação de torrões (também chamados grumos).

3.5. reunir as frações já desagregadas, homogeneizando-as (primeiro com as mãos e a seguir pela dupla passagem no repartidor de amostras). Nenhuma fração poderá ser descartada.

Terminadas estas operações, a amostra está pronta para dela serem tomadas partes * para a execução dos diversos ensaios.

* Cada “parte” retirada da amostra total também é chamada amostra (ou amostra parcial), e a quantidade de material difere para cada tipo de ensaio. Toda amostra, para qualquer ensaio, deve ser representativa. Para evitar tendências, a quantidade requerida para estas amostras (parciais) deve ser sempre obtida por quarteamento ou pelo uso repetido do repartidor de amostras.

Por exemplo: temos uma amostra de dez (10) kg. e necessitamos pelo menos 250 g para executar um determinado ensaio. Ao passar toda a amostra (já homogeneizada) pelo repartidor, teremos duas porções de 5 kg, aproximadamente. Passando uma destas pelo repartidor, obtemos duas de 2,5 kg. Repetindo tal procedimento, obtemos amostras em torno de 1,25 Kg, 600 g, e finalmente 300 g, que é quantidade suficiente para executar o ensaio.

Deve ser dedicada atenção especial à homogeneização da amostra total, que é feita antes da retirada de amostras para ensaios específicos. A vibração produzida por transporte ou movimentação dos recipientes pode provocar segregação de partículas de tamanhos diferentes, demoras podem criar diferenças na umidade de setores da amostra, etc. Retirar uma pequena amostra sem ter garantido a homogeneidade da amostra total pode produzir (e freqüentemente o faz) amostras tendenciosas. Frações da amostra total em que tenha havido separação por peneiramento (fracionamento) e que não sejam utilizadas, devem ser jogadas fora e nunca juntadas de novo à amostra original.

Alguns ensaios exigem fracionamento (separação dos grãos em faixas de tamanhos). Por exemplo, no ensaio de granulometria, uma amostra é dividida (por passagem na peneira de 2,0 mm em duas partes. A parte retida é chamada material “grosso” e é submetida à um determinado procedimento. Com o material que passa, chamado “fino”, são colhidas pequenas amostras para a execução de operações diferentes, e para a determinação da umidade. Como o teor de umidade do material fino tem valor maior que o da amostra total, só pode ser utilizado para corrigir o peso (obter o valor do peso da amostra se estivesse seca) destas amostras menores e não o peso seco da fração grávida, cuja umidade pode ser desprezada. Também devem ser eliminadas amostras parciais que tenham sofrido qualquer outro tipo de alteração (por exemplo, no teor de umidade) ou possibilidade de contaminação. Devolvê-las à amostra total poderia provocar tendenciosidade nesta.

Atenção: as duas principais condições para que uma amostra seja representativa são:

- ✓ Ter sido colhida corretamente* de outra amostra representativa;
- ✓ Ter tamanho suficiente para o fim a que se destina.

* No caso de amostra previamente preparada, a homogeneização antes da coleta é obrigatória.

Amostras indeformadas não podem ter preparação, que as deformaria. Também não se faz preparação de amostras que deverão descrever a estrutura do solo, construída em um trabalho de campo.

É o caso de amostragem para determinação do peso específico aparente de um solo, por exemplo. Seu objetivo mais freqüente é a verificação da qualidade de trabalhos de compactação, por comparação com um padrão criado ou obtido em laboratório ou pista experimental.

O peso específico aparente de um solo compactado é avaliado a partir da determinação do peso e do volume total de amostras colhidas após a execução da compactação. O peso é medido em uma balança, e o volume pode ser determinado a partir de processos diretos ou indiretos. Em um método direto, o volume da amostra indeformada pode ser obtido a partir do conhecimento do volume interno de um cilindro de cravação utilizado na extração, ou pode ser calculado medindo-se o volume deslocado quando uma amostra esculpida é imersa em um líquido, ou pode ser calculado a partir do empuxo causado por sua imersão em água. São chamados indiretos os métodos ou processos onde é pesado o material escavado e medido o volume da escavação local (volume do buraco).

EXERCÍCIOS (para pensar e discutir, discordar e ousar)

1. *Que tipo de água se deseja eliminar na secagem prévia? Que tipo de umidade permanece?*
2. *Nos solos argilosos, para que se recomenda destorroamento contínuo durante a secagem ?*
3. *Na preparação com secagem prévia, para que se faz o peneiramento antes de levar o solo ao almotofariz ? Se não houver no laboratório disponibilidade da(s) peneira(s) indicada(s) pela NBR 6457, poderiam ser utilizadas outras?*
4. *Cite dois objetivos diferentes no uso do repartidor de amostras.*
5. *No item 7.1, recomenda-se “inutilizar o material retido ...”, isto é, jogá-lo fora. Por que não pode voltar para a amostra bruta? Discutir e exemplificar.*
6. *O que entende por “amostra representativa”? Uma parte de 27 g de uma amostra de 10 kg pode ser representativa daquela? E três porções de 9 g? Seria mais representativa, ou menos?*
7. *Descreva as operações preliminares da preparação de amostras para ensaios usuais de solos.*
- 8- *Discuta a frase: “Só existe uma sondagem cara: aquela que não é feita.”*

ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PRINCIPAIS ÍNDICES FÍSICOS

A partir do capítulo cinco, começamos a detalhar ensaios para a determinação dos principais índices físicos. Em cada capítulo é feita inicialmente uma recordação dos principais conceitos, e em seguida são apresentados os métodos e processos utilizados para o objetivo proposto.

Para melhor aprender, é necessário que o estudante esteja disposto a:

- *CONCEITUAR (Definir o “porque”, frente a possíveis opções, para assim justificar sempre o “como”.*
- *CORRER RISCOS (Ousar e inovar. Ser criativo, agregando valor. Todos nós somos criativos, mas poucos somos inovadores).*
- *ASSUMIR RESPONSABILIDADES (Aceitar desafios como oportunidade para o crescimento pessoal e para a realização profissional. Assumir sua dimensão de incompetência, quando for o caso, como um procedimento de retomada e exercício de perseverança.);*
- *APRENDER A DECIDIR FRENTE A INCERTEZAS (Encarar o erro como uma oportunidade de melhoria, não se inibindo pela necessidade “demonstrativa” de não errar. Exercitar sempre a busca do maior número possível de dados e fatos, para o exercício de cada decisão a ser tomada. Eliminar qualquer interferência para suas decisões);*
- *VENCER DIFICULDADES (Assumir, consigo mesmo, o compromisso de ser avaliado e se avaliar honestamente e assim, ter o insucesso como desafio a ser vencido).*

O estudante deverá concentrar sua atenção principalmente nos seguintes pontos:

- *Objetivo de cada ensaio (inclui o contexto em que o ensaio é executado);*
- *Coleta da amostra (cuidados para que a amostra seja representativa);*
- *Seqüência (ordem em que são executados os passos de cada ensaio e detalhes de execução que possam invalidar o resultado do ensaio);*
- *Número de repetições necessárias para que se tenha confiança no resultado do ensaio;*
- *Conclusões (que diagnóstico, qual a “resposta” do ensaio. O que se aprendeu durante sua execução. Fazer inferências e hipóteses, que deverão ser discutidas para uma possível validação. Identificar alternativas).*

Capítulo 5. TEOR DE UMIDADE

Definimos teor de umidade (h) de uma amostra de solo como a razão entre o peso da água (P_a) contida em certo volume de solo e o peso da parte sólida (P_s) existente nesse mesmo volume, expressa em porcentagem. A nomenclatura internacional utiliza o símbolo w .

$$h = w = 100 P_a / P_s = 100 M_a / M_s \quad (\%)$$

Teores de umidade devem ser expressos com aproximação de pelo menos 0,1%, exceto quando definem limites de consistência.

O teor de umidade de um solo, embora expresso como tal, não é uma porcentagem. Imagine uma amostra seca, à qual vão adicionadas porções de água. O peso da água aumenta, mas o peso das partículas sólidas é constante. Portanto o limite inferior para a umidade de um solo é zero (0 %), mas não há limite superior para este índice.

Teor de umidade higroscópica de um solo é o teor de umidade do solo, após destorroamento e secagem prévia ao ar livre, de modo a não apresentar água livre ou capilar (M1-61 DER/SP). As águas de constituição e adesiva não compõem o teor de umidade higroscópica de um solo.

Conhecido o teor de umidade de um solo, pode ser calculado o fator de correção de umidade (f_c), também chamado fator de conversão, que ao ser multiplicado pelo peso de uma amostra com esse teor de umidade fornece o peso que tal amostra teria se estivesse seca.

(Talvez seja a aplicação mais freqüentemente usada em toda a geotecnia.).

$$f_c = 100 / (100 + h)$$

Nesta seção serão apresentados métodos e processos para a determinação do teor de umidade de um solo.

O método mais utilizado para determinar a umidade consiste em:

- Determinar o peso total (P_t) da amostra;
- Secar completamente a amostra;
- Determinar o peso da amostra seca (P_s);
- Por diferença, obter o peso original da água ($P_a = P_t - P_s$) na amostra;
- Calcular o teor de umidade $h = 100 P_a / P_s$.

A maneira de efetuar a secagem completa distingue os processos práticos que seguem este método: estufa, banho de areia, álcool etílico.

Após tomar conhecimento dos processos para a determinação do teor de umidade, o aluno deverá estar apto a decidir:

Como colher a amostra? Que tamanho deverá ter?

Em que circunstância deve ser utilizada uma média simples ou uma média aparada para o cálculo do teor de umidade final de uma amostra?

Que processo deve ser escolhido para a determinação da umidade, em função de quais circunstâncias?

Conforme o processo utilizado para a determinação do teor de umidade, que critérios utilizar para decidir se o ensaio foi bem executado ou se deverá ser repetido?

Com que nível de precisão o resultado do ensaio deve ser apresentado? Depende do processo?

Sei executar e calcular este ensaio? Estou capacitado a tomar decisões?

Que objetivos tem a determinação do teor de umidade, no laboratório e no campo?

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE PELO PROCESSO DA ESTUFA

REFERENCIAS: NBR 6457 anexo 1(ABNT), M1 – 61 (DER/SP)

APARELHAGEM E MATERIAL

1. Balanças que permitam pesar 200 g, 1,5 kg e 5 kg, com resoluções de 0,01g, 0,1g e 0,5g respectivamente, e sensibilidades compatíveis;
2. Estufa capaz de manter temperatura entre 60-65°C e entre 105-110°C;
3. Dessecador com agente de absorção de umidade (tipo sílica gel) ;
4. Recipientes adequados, confeccionados com material não corrosível, como: cápsulas metálicas com tampa ou pares de vidro de relógio com grampo, de dimensões adequadas;
5. Pinças metálicas com aproximadamente 30 cm. de comprimento e 15 cm de abertura.



estufa



dessecador



cápsulas, vidro relógio c/ grampo

EXECUÇÃO DO ENSAIO:

1) Tomar uma quantidade do material, função da dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, como indicado na TABELA 5.1, em cápsulas metálicas adequadas e fechar com a tampa. Pesar o conjunto com a resolução correspondente, e anotar o peso como P1.

2) Remover a tampa e colocar a cápsula em estufa à temperatura de 105-110° C*, onde deve permanecer até apresentar constância de massa.

* Trabalhos recentes tem recomendado usar temperaturas entre 100 e 105°C

Solos orgânicos, turfosos ou contendo gipsita devem ser secados em estufa à temperatura de 60-65° C, requerendo tempo maior de secagem. (Normalmente, um intervalo de 16 a 24 horas é suficiente para a secagem do material, podendo ser necessário intervalo maior, dependendo do tipo de solo ou se este estiver muito úmido.).

Não recolocar a tampa enquanto o material permanecer na estufa.

Constância de massa: considera-se que uma amostra atingiu constância de massa, quando em duas pesagens consecutivas, permanecendo a amostra na estufa por um intervalo de tempo razoável entre elas, apresentar mesma leitura na pesagem.

Tabela 5.1 – Quantidade de material em função da dimensão dos grãos maiores

Dimensão dos grãos maiores contidos na mostra, determinada visualmente. (mm)	Quantidade de material em massa seca aproximadamente (g)	Balança a ser utilizada	
		Capacidade nominal (g)	Resolução (g)
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1500	0,1
20 a 76	300 a 3000	5000	0,5

3. Tampar e transferir a cápsula da estufa para o dessecador, onde deve permanecer até atingir a temperatura ambiente. Pesar o conjunto, com a resolução correspondente, e anotar como P2.

4. Efetuar, no mínimo, três determinações do teor de umidade por amostra.

Quando existe a necessidade de grande acurácia no resultado do ensaio de determinação da umidade pelo processo da estufa (p. exemplo, ao executá-lo como parte do ensaio de granulometria ou na determinação da densidade dos grãos), exige-se que pelo menos duas das determinações não difiram mais que 0,2 %. A média dos resultados válidos será adotada como teor de umidade da amostra.

(A probabilidade de que dois resultados falsos apresentem mesmo valor é considerada pequena. Esta regra funciona como um controle para a qualidade do ensaio).

Há casos em que tal precisão não pode ser exigida (por exemplo, quando a amostra não pode ser homogeneizada). É preciso distinguir entre casos em que se determina a média entre as determinações válidas de uma amostra (homogeneizada) e casos em que se determina a média entre teores de umidade de amostras diferentes de um mesmo solo (tomar como exemplo uma amostra indeformada, coletada com o objetivo de determinação da massa específica aparente seca, da qual se colhem três amostras distintas para a determinação do teor de umidade médio).

Dois ensaios (cada um com um mínimo de três determinações da umidade), efetuados pelo mesmo operador para uma amostra de solo, não deverão diferir mais de 0,2 %. Tendo sido utilizado este critério, o teor de umidade adotado deverá ser a média dos resultados.

Sempre que a temperatura de secagem do material for diferente de 100-105°C, o fato deve ser indicado na ficha do ensaio.

Exemplo de ficha de ensaio, válida para os processos da ESTUFA, ÁLCOOL ETÍLICO E BANHO DE AREIA.

TEOR DE UMIDADE E FATOR DE CONVERSÃO DE SOLOS			
Amostra:			
Cápsula número:			
Tempo em estufa: (preenchimento opcional)			
Massa do solo úmido + tara	P ₁		
Massa do solo seco + tara:	P ₂		
Massa do recipiente [com tampa]:	P ₃		
Massa de solo seco	$P_s = [P_2 - P_3]$		
Massa d'água	$P_a = [P_1 - P_2]$		
Teor de umidade:	$h = 100 \times [P_a / P_s]$		
Teor de umidade (média entre determinações válidas*)			
Fator de conversão:	$F_c = 100 / [100 + h]$		
*A diferença entre duas determinações de umidade para uma mesma amostra homogênea, pelo método da estufa, não deverá diferir de mais de 0,2%.			

É preciso cuidado para evitar erros grosseiros, como a troca de tampas das cápsulas. Para evitá-lo, recomenda-se que durante a secagem, a tampa da cápsula permaneça sob ela, como se fosse uma bandeja.

Em laboratório, o processo da estufa deverá ter preferência sobre qualquer outro. A possibilidade de controle da temperatura permite seu uso com amostras de solos orgânicos outros materiais sensíveis a altas temperaturas. Por exemplo, em algumas argilas, temperaturas na ordem de grandeza de 90°C podem iniciar um processo de quebra de sua estrutura cristalina (cracking), com perda de água de constituição. Solos orgânicos podem começar a calcinar-se a partir de 70° C. Nestes casos, recomenda-se que a estufa seja regulada para que a temperatura oscile entre 60 e 65°C, ainda que isto obrigue um tempo maior de secagem, a qual só terminará quando se observar constância de peso (ver observação anterior).

A utilização mais freqüente em laboratório para o teor de umidade é o cálculo do fator de conversão, utilizado para se obter o peso seco de uma amostra. O peso seco é utilizado nos cálculos de quase todos os demais ensaios de Mecânica dos Solos. Os processos de campo são utilizados para decisões imediatas, como verificar se um solo está pronto para ser trabalhado, se deve ser aumentado ou diminuído seu teor de umidade antes de uma compactação, etc. Para tais finalidades, geralmente não é necessária uma precisão tão grande quanto no processo da estufa, que é mais demorado.

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE PELO PROCESSO EXPEDITO DO BANHO DE AREIA (também chamado da frigideira ou do fogareiro)

Conceitualmente semelhante ao processo da estufa, utiliza a mesma ficha de ensaio. É um processo usado no campo. A falta de controle da temperatura desaconselha seu uso com solos orgânicos.

APARELHAGEM:

- Frigideira (ou outro recipiente) com camada de areia de espessura de pelo menos 3 cm;
- Fonte de calor para aquecer o recipiente mencionado em (a).
A fonte de calor pode ser um bico de gás ou um fogareiro. Daí o nome do ensaio.
- Cápsulas metálicas com tampa;
- Pinças para manipular as cápsulas à quente.
- Balança com capacidade 200g e resolução 0,01 g.



PROCEDIMENTO:

- Pesar as cápsulas com tampa e anotar números e pesos (P3);
- Colocar cada amostra (~1/3 da cápsula) na cápsula, sem tampa. Pesar e anotar (P1);
- Apoiar a cápsula sobre a camada de areia quente até que pareça estar completamente seca. Tampar a cápsula e esperar atingir a temperatura ambiente. Pesar e anotar;
- Repetir (3) até que se observe constância de peso; anotar (P2).

A secagem do solo dura entre vinte minutos e uma hora. Quando se trabalha com um mesmo tipo de solo (obras longas usando uma mesma jazida), sem matéria orgânica, a longa prática com aquele solo permite que, às vezes, a constância de peso seja substituída por um período fixo de aquecimento.

CÁLCULOS:

- Peso da água na amostra: $P_a = P_1 - P_2$
- Peso do solo seco: $P_s = P_2 - P_3$
- Teor de umidade: $h = 100 \cdot P_a / P_s$

Não são definidos critérios de aprovação para o ensaio. É um processo expedito, usado para tomar decisões imediatas. A precisão cede lugar à urgência, e não é incomum a perda de um trabalho por não ser executada repetição de ensaios para controle.

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE PELO MÉTODO EXPEDITO DO ÁLCOOL ETÍLICO

REFERENCIA: ME 088/94 (DNIT-DNER)

Este procedimento pode ser usado no campo, quando autorizado pela fiscalização. Restrições são devidas à falta de controle da temperatura, que causa queima de matéria orgânica e pode provocar “cracking” em partículas de argila por perda de água de constituição. Como a queima de álcool comum deixa água como resíduo, só deve ser usado álcool etílico não hidratado.

APARELHAGEM (mínima)

- Balança com capacidade 200 g e sensibilidade 0,01g;
- cápsulas metálicas com tampa, com numeração marcada de forma permanente;
- espátula de aço de ponta arredondada (~ 8 cm de comprimento);
- pinça com tamanho suficiente para manipular a cápsula utilizada.

PROCEDIMENTO

- Pesar cada cápsula (seca e limpa) com tampa (P3);
- Colocar cada amostra (~1/3 da cápsula) na cápsula, sem tampa.

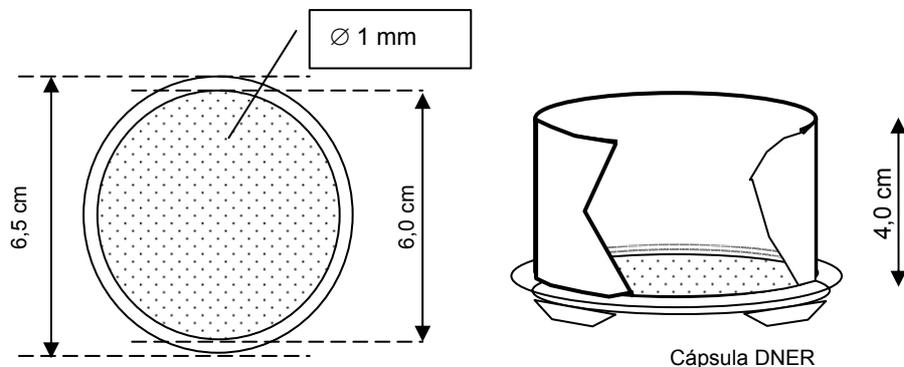


- Pesar e anotar (P1);
- 3) Adicionar álcool etílico à amostra, revolvendo-a com a espátula;
 - 4) Atear fogo à amostra, estando a cápsula presa com as pinças e revolvendo continuamente a amostra para evitar grumos de solo, até que toda a água se evapore.
 - 5) Repetir os procedimentos (3) e (4) até observar constância de massa. *(Geralmente isto ocorre a partir da terceira pesagem. Depois de cada queima, a cápsula é imediatamente tampada, e a pesagem é feita com a cápsula à temperatura ambiente.)*.
 - 6) Pesar a cápsula com o solo seco e anotar (P2).

CÁLCULOS

1. Peso da água $P_a = P1 - P2$
2. Peso do solo seco $P_s = P2 - P3$
3. Teor de umidade $h = 100 \cdot P_a / P_s$

O DNER (atual DNIT) utiliza cápsula metálica perfurada no fundo e com suporte padronizado, tendo padronizado este ensaio pela ME 088/94 para amostras com cerca de 50 g passante na peneira de 2,0 mm.



MÉTODO DO DENSÍMETRO NUCLEAR [campo]

Baseia-se na propriedade da água de moderar a velocidade das emissões de nêutrons. Colocando um emissor de nêutrons rápidos em uma sonda e usando um contador de nêutrons lentos, este registrará valores proporcionais à umidade no espaço entre eles.

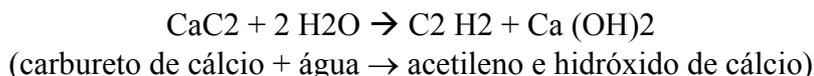


O instrumento é aferido para a água pura e para a areia seca. A variação da umidade é expressa em gráfico correspondente à leitura do contador Geiger. A principal função do aparelho é avaliar a densidade aparente do solo.

Este método é mais usado em agronomia, e não está muito difundido no Brasil devido ao elevado custo do equipamento.

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE PELO MÉTODO “*SPEEDY*” (Speedy Moisture Test)

A determinação do teor de umidade de solos e agregados miúdos com utilização do aparelho “*Speedy*” tem base na reação química da água existente em uma amostra com o carbureto de cálcio, realizada em ambiente confinado.



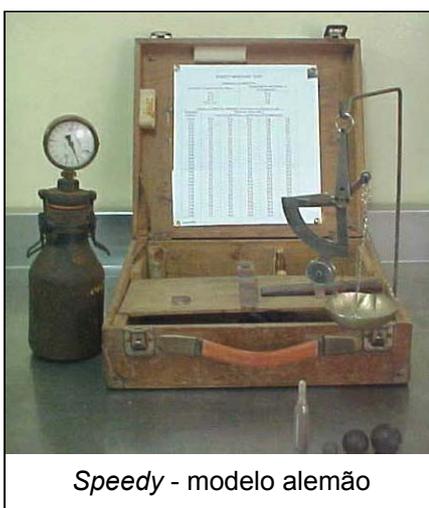
O gás acetileno ao expandir-se gera pressão proporcional à quantidade de água existente na amostra. A leitura dessa pressão em um manômetro permite a avaliação da quantidade de água em uma amostra, e em consequência, do seu teor de umidade.

REFERÊNCIAS: DNER ME 052/94

APARELHAGEM:



Speedy - modelo americano



Speedy - modelo alemão

- a) Conjunto “*Speedy*” completo (ver fotos acima);
- b) Ampolas com cerca de 6,5g de carbureto de cálcio (CaC₂).

AMOSTRA: (usando o modelo alemão)

O peso da amostra a ser utilizada é escolhido pela umidade que se admite a amostra possuir, de acordo com a tabela seguinte:

Peso da amostra em função da umidade estimada	
Umidade estimada, em %	Peso da amostra, em g
5	20
10	10
20	5
30 ou mais	3

ENSAIO: (Aqui é o ensaio é descrito para o modelo denominado “alemão”)

- 1) Pesar a amostra e colocar na câmara do aparelho;
- 2) Introduzir na câmara duas esferas de aço, seguidas da ampola de carbureto de cálcio, deixando-a deslizar com cuidado pelas paredes da câmara, para que não se quebre;
- 3) Fechar o aparelho e agitá-lo repetidas vezes para quebrar a ampola, o que se verifica pelo surgimento de pressão assinalada no manômetro;
- 4) Ler a pressão manométrica após esta se apresentar constante, o que indica que a reação se completou.

(Se a leitura manométrica for menor que 20 kpa [0,2 kg/cm²], o ensaio deve ser repetido com peso de amostra imediatamente superior ao empregado, conforme a tabela. Se a leitura for maior que 150 kpa [1,5 kg/cm²], interromper o ensaio, afrouxando a tampa do aparelho devagar, e repetir o

ensaio com um peso imediatamente inferior. Apenas na faixa de 0,2 a 1,5 kg/cm² o aparelho fornece leituras confiáveis.)

- 5) Entra-se na tabela de aferição própria do aparelho com a leitura manométrica e o peso da amostra utilizada no ensaio, obtendo a percentagem de umidade em relação à amostra total úmida (h1).

Como a umidade é definida por $h = 100 \text{ Pa/Ps}$ é necessário fazer a conversão deste FALSO VALOR ($h1=100 \cdot \text{Pa/Pt}$) para o real valor do teor de umidade ($h=100 \text{ Pa/Ps}$).

$$h1 = 100 \cdot \text{Pa/Pt}, h = 100 \text{ Pa/Ps} \text{ e } Pt = Pa + Ps$$

$$h1 = 100 \cdot \text{Pa} / (Ps + Pa) \text{ ou } h1(Ps + Pa) = 100 \cdot \text{Pa}$$

Desenvolvendo e dividindo por Ps,

$$h1(1 + h/100) = h \rightarrow 100h = h1 \cdot h + 100h1$$

$$h(100 - h1) = 100 \cdot h1 \rightarrow h = 100h1 / (100 - h1)$$

RESULTADO DO ENSAIO (se realizado em temperatura próxima de 20°C):

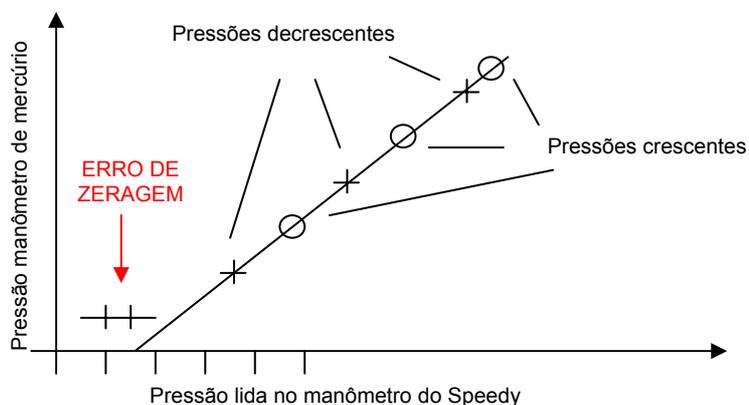
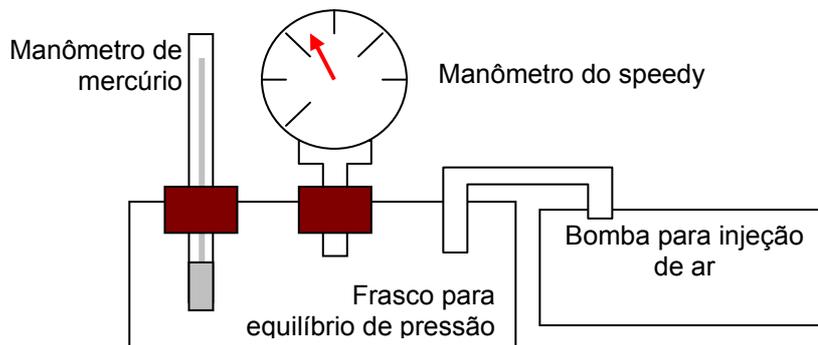
$$h = 100 \cdot h1 / (100 - h1)$$



CONFERENCIA DO APARELHO e CORREÇÕES:

1) Erro de zeragem:

Se o ponteiro do manômetro não coincidir com o zero (manômetro aberto), deduzir de todas as medidas o valor marcado. Se estiver apoiado no descanso, o ponto zero de pressão pode ser falso. A conferência é feita acoplando ao Speedy um manômetro de mercúrio e uma bomba pneumática. Por injeção de ar, variar a pressão, anotando pressões lidas no manômetro de mercúrio e no Speedy. Construir gráfico de correção, como na figura abaixo, identificando o erro (negativo) de zeragem. Esse valor deverá ser somado à leitura.



2) Correção do erro devido à temperatura:

Como o Speedy é calibrado para trabalhar a 20°C, outra correção é necessária, quando se opera em temperatura diferente desta:

$$h'_{20} = h'T.293,2/(273,2 + T)$$

Onde:

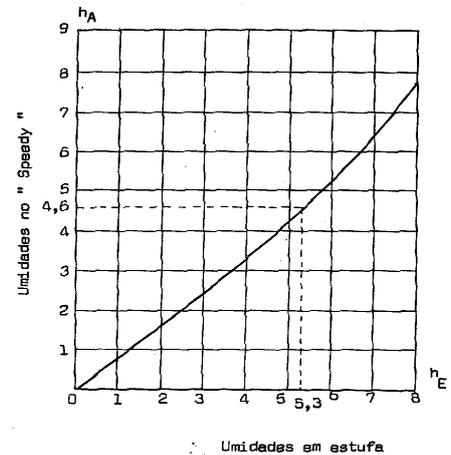
H'20°C = leitura corrigida para a de 20°C;
H'T = leitura na temperatura T;
T = temperatura no local do ensaio (em °C)

Calibração por comparação com o método da estufa:

Toma-se uma porção de amostra de cerca de 1 kg., secando-a na estufa até constância de peso. Depois de dividi-la em porções de 50 g, submeter cada porção a umidades diferentes, acrescentando 5cc, 10cc, 15cc, 20cc, etc., de água, e ensaiando cada uma dessas amostras pelo Speedy e pela estufa, construindo depois um gráfico de correção com o aspecto seguinte:

Este tipo de gráfico de correção é utilizado principalmente quando se executa um trabalho extenso com um solo que seja muito coesivo.

Após cada determinação, o aparelho deverá ser rigorosamente limpo.



Contrapeso
(3 gramas)



A graduação do manômetro é feita em teores de umidade



Medida de volume

COMENTÁRIOS SOBRE O MODELO “AMERICANO”

- ✓ No modelo “americano”, a quantidade de carbureto de cálcio utilizada é a mesma, porém medida por volume.
- ✓ manômetro fornece diretamente o teor de umidade “falso”, isto é, Pa/Pt – ao invés de indicar a pressão.
- ✓ A balança do aparelho permite apenas pesagem de amostras de 6 g (é claro que para solo muito seco é possível usar amostras de 12, 18 ou 24 g, dividindo o resultado da leitura por 2, 3 ou 4).
- ✓ Um contrapeso de três gramas permite usar amostra com a metade do peso normal (utilizada quando o solo está muito úmido). Neste caso o teor de umidade será o dobro da leitura verificada.
- ✓ A amostra é colocada na tampa do aparelho, e o carbureto na garrafa. Esta deve ser fechada sem que o carbureto se misture ao solo (com o eixo da garrafa em posição horizontal), e só depois agitado.
- ✓ Como a escala do manômetro do modelo “americano” é graduada em teores de umidade, operadores novatos podem ser induzidos a errar, por considerar que o aparelho forneça o teor de umidade final, o que não é verdade em qualquer aparelho Speedy: todos fornecem a umidade “falsa” $h' = Pa/Pt$ e necessitam ambas as correções mencionadas.

Comparação entre fichas de cálculo do teor de umidade pelo processo Speedy:		
SPEEDY - ALEMÃO		SPEEDY - AMERICANO
Peso úmido =		= Peso úmido
Leitura em kg/cm(Speedy) L=		H0 = Leitura do Speedy
Erro de zeragem em kg/cm ³ E=		E = Erro de leitura (em %)
Leitura corrigida L=L-E		
Falsa umidade Pa/Pt=h1(tabela)		h1=H0-E (falsa umidade Pa/Pt)
$h = 100 \cdot h1 / (100 - h1) =$		$h = 100 \cdot h1 / (100 - h1)$
Temperatura em ° C T=		T = Temperatura em ° C
$h20 = h \cdot 293,2 / (273,2 + T)$		$h20 = h \cdot 293,2 / (273,2 + T)$

Exercícios

- 1) *Você precisa determinar o teor de umidade de um solo no deserto e dispõe de um conjunto Speedy (modelo americano) que fornece diretamente a falsa leitura da umidade (Pa/Pt), e cuja balança apenas permite a pesagem de 6 gramas. O aparelho não apresenta erro de zeragem ou vazamento, mas o solo está tão seco que o ponteiro pouco se move. Isto significa que a umidade está fora da faixa em que o Speedy apresenta resultados confiáveis. Como você procederia para aumentar a acurácia da avaliação do teor de umidade?*
- 2) *Mesmo problema anterior, mas o solo está mais úmido que o limite máximo do aparelho. Ainda é possível realizar o ensaio?*
- 3) *Quais as principais diferenças entre o modelo “americano” e o modelo “alemão” do conjunto Speedy?*
- 4) *Como controlar a qualidade do resultado do ensaio pelo processo da estufa? Em outras palavras, quando se pode confiar que o ensaio foi bem executado?*
- 5) *Como poderíamos descobrir, usando o processo da estufa, se um solo possui material orgânico em sua constituição?*
- 6) *Um ensaio para a determinação da umidade, executado pelo processo da estufa com quatro amostras retiradas de uma mesma amostra homogênea, produziu os seguintes resultados: 7,18% , 7,42 % , 7,5% e 7,51%. Que valor deverá ser adotado como o teor de umidade da amostra? Justifique.*
- 7) *Idem, com os valores 14,21% , 15,20% , 18,21% e 19,12% .*
- 8) *Sugestão para pesquisa em laboratório: De uma amostra homogênea, retire alguns grupos de três amostras de mesmo tamanho e determine sua umidade pelos diversos processos estudados. Comparando o resultado de cada amostra de um processo com o resultado (por exemplo, a média) do processo, avalie a precisão do processo. Avalie a acurácia dos processos por comparação entre seus resultados (por exemplo, a média) com o resultado obtido pelo processo da estufa (tomado como padrão).*
- 9) *Uma amostra de 100g tem teor de umidade 15%. Que massa de água deve ser acrescentada para que o teor de umidade se torne 40%?*

Capítulo 6 – PESO ESPECÍFICO, MASSA ESPECÍFICA E DENSIDADE DOS GRÃOS

O peso específico (γ_g) de uma partícula sólida é, por definição, o peso da substância que a forma, por unidade do volume que ocupa no espaço. O peso específico da partícula é determinado pela razão entre seu peso (seco) e seu volume.

$$\gamma_g = P_s / V_s$$

A massa específica (ρ_g) de uma partícula sólida é obtida pela razão entre sua massa e seu volume.

$$\rho_g = M_s / V_s$$

Densidade (δ) ou densidade relativa de uma partícula é a razão entre seu peso específico (γ_g) e o peso específico da água (γ_a) destilada e isenta de ar à 4° C (ou entre a massa específica da partícula e a massa específica da água a 4°C). Como $\rho_a = 1,000 \text{ g/cm}^3$, a densidade e a massa específica têm mesmo valor numérico.

$$\delta = \rho_g / \rho_a = \gamma_g / \gamma_a$$

A densidade deve ser expressa com precisão de 0,001 %.

Como em um solo podem ocorrer partículas de natureza variada, em geral há mais interesse em determinar o peso específico médio das partículas sólidas que o compõem. Observe que a fração mais fina dos solos costuma ter natureza diversa da de maior tamanho, já que é gerada mais por desintegração química (oxidação, hidratação, carbonatação) que mecânica (ruptura e desgaste, causados por temperatura, atrito, etc.). Por isso, as normas descrevem a determinação do peso específico médio ou da densidade média das partículas menores que um tamanho especificado, ou maiores que um tamanho fixado.

Não se pode confundir peso específico seco dos grãos ou massa específica seca dos grãos com peso específico seco aparente ou massa específica seca aparente de uma amostra. Estas últimas são obtidas pela razão entre o peso seco da amostra e o volume total da amostra. Observe que desse volume faz parte o volume de vazios, que tem de ser eliminado no cálculo do peso específico (ou massa específica) dos grãos.

A ABNT adota o processo do PICNÔMETRO para a determinação da massa específica das partículas menores que 4,8 mm, enquanto o DNIT (antigo DNER) o faz para a determinação da densidade das partículas menores que 2,0 mm. Parece-nos melhor empregar a norma NBR6508 (ABNT) quando o objetivo é o estudo dos agregados miúdos, já que estes têm tamanho menor que 4,8 mm. Por outro lado, será mais preciso o método de ensaio ME 093/94 (DNIT-DNER) quando o objetivo é utilizar o valor da densidade nos cálculos da fase de sedimentação do ensaio de granulometria, pois a amostra utilizada neste ensaio é obtida do material que passa na peneira de 2,0 mm (fração fina do solo).

O grande inimigo da precisão dos resultados de ensaios para a determinação é a presença de bolhas de ar em torrões, ou aderente aos grãos, ou na água. Do valor da densidade dos grãos depende o cálculo de vários outros índices físicos. Daí a necessidade de máxima acurácia no resultado de ensaios.

DENSIDADE DE GRÃOS DE MAIORES TAMANHOS

Na determinação da densidade de grãos de tamanhos maiores que um tamanho especificado, o método mais popular utiliza a pesagem hidrostática, que consiste em:

- Obter a massa da amostra seca (M_s);
- Obter a massa da amostra imersa em água destilada, na temperatura 4°C (P imerso);

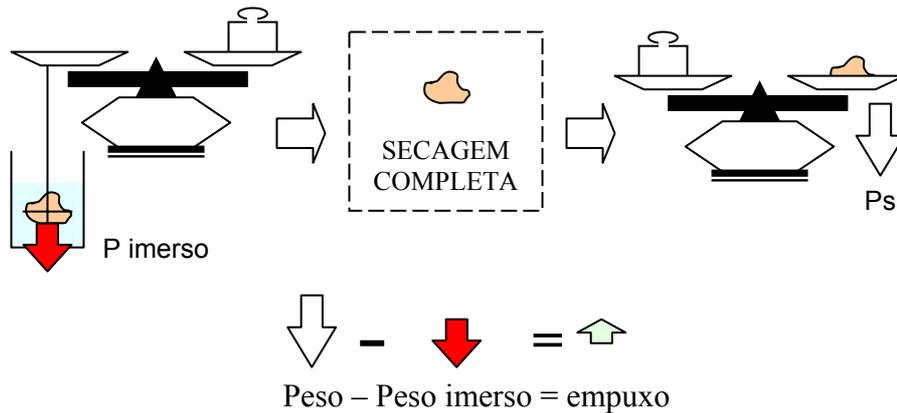
A diferença $M_s - M_i$ será numericamente igual ao empuxo, e numericamente igual ao volume dos grãos imersos, o que permitirá o cálculo imediato da massa específica média dos grãos.

Observação:

Quando se faz a determinação da densidade (ou do peso específico) de agregados graúdos ou de pedregulhos, aproveita-se o trabalho para determinar também sua Absorção (S ou Dat), fazendo uma secagem superficial com um tecido absorvente e obtendo sua massa úmida (M úmido).

$$\text{Absorção} = 100 \cdot (P \text{ úmido} - P_s) / P_s$$

Até aqui foi feita uma apresentação superficial do assunto, para se entender o conceito geral. Começemos agora a detalhar mais os métodos e processos.



DENSIDADE DE GRÃOS DE PEQUENO TAMANHO

Resumo (grosseiro) do método do picnômetro (visão rápida):

Pesar uma amostra para o ensaio. Anotar sua massa seca (M1).

Colocá-la em um picnômetro e completar o volume com água (destilada). Pesar (M2).

Esvaziar e lavar o picnômetro, completar seu volume com água (destilada) e pesar (M3).

A densidade dos grãos da amostra é obtida por $M1 / (M1+M3-M2)$.

Por que foi chamado “grosseiro” este resumo? O resultado do ensaio não terá qualquer acurácia, se não for observado que:

- 1) Em laboratório o termo água sempre significa água destilada. Além disso, neste ensaio, ainda deverá ser isenta de ar. (Trinta minutos em banho-maria são suficientes para retirar as bolhas de ar da água destilada).
- 2) No caso específico de ensaio para a determinação da densidade dos grãos, o grande inimigo da precisão do resultado é a presença de bolhas de ar, na água ou no interior de torrões. Para que a determinação da densidade seja acurada, é preciso que todo o ar seja retirado, pois este tem densidade desprezível ($\sim 0,0012$) em relação à água ($\sim 1,000$).

(Nas pesagens descritas no resumo, o volume ocupado por bolhas de ar não estará ocupado por água, o que falsifica as pesagens. Os detalhes e cuidados descritos nas normas visam principalmente retirar o ar capaz de prejudicar o ensaio).

- 3) O volume da água varia com a temperatura.

(As pesagens deverão ser feitas na mesma temperatura, e o valor da densidade da água nesta temperatura corrigirá o cálculo do peso específico da fase sólida).

Explicação da fórmula apresentada no resumo:

Imagine um frasco cheio d’água, com peso P3. Ao acrescentar a amostra de peso P1, e volume V1, esse volume (em água) transbordaria ($V1 = Va$).

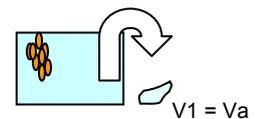
O peso do frasco com solo e água passa a ser P2, e o peso da água que saiu será $Pa = (P1 + P3 - P2)$.

Como $\gamma_a = Pa / Va$, ao substituir o valor de γ_a na fórmula $\delta = \gamma_g / \gamma_a$ fica:

$$d = (P1 / Va) / ((P1 + P3 - P2) / Va)$$

Simplificando Va:

$$\delta = P1 / (P1+P3-P2) = M1 / (M1+M3-M2)$$



PROCESSO DO PICNÔMETRO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DOS GRÃOS

Referências: NBR 6508/84, NBR 5734, NBR 6457 /86 [ABNT], M3-61 [AETCLE] , AASHO T 87/86

OBJETIVO

A norma NBR 6508 (ABNT) descreve como determinar a massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm, utilizando um picnômetro de 500 ml. As demais especificam a determinação da densidade dos grãos que passam na peneira de 2,0 mm. Todas destacam a necessidade de executar pelo menos dois ensaios.

(A diferença na escolha da amostra pode ser explicada pelo objetivo de uso da informação. O valor da densidade dos grãos menores que 2,0 mm deverá ser preferido nos cálculos da fase de sedimentação do ensaio completo de granulometria. No estudo de misturas de agregados é preciso lembrar os agregados finos são menores que 4,8 mm.).

CONVENÇÕES:

γ_g = Peso específico (em g/cm^3) dos grãos de solo.

δ = Densidade real da fração fina de solos é a razão da massa, ao ar e a uma temperatura entre 15°C e 30°C, de um dado volume dessa fração, para a massa ao ar e a 25°C de temperatura, de um igual volume de água destilada isenta de ar. É adimensional e tem o mesmo valor numérico que a massa específica dos grãos do solo (ρ_g).

APARELHAGEM E MATERIAL

1. Estufa capaz de manter a faixa térmica de 105°C-110°C e entre 60°C e 65°C;
2. Dispensor com hélices substituíveis e copo com chicanas metálicas (pelo menos 1200 rpm);
3. Picnômetro de vidro resistente ao calor, com capacidade nominal de 500 ou 1000 ml com a respectiva curva de calibração (variação da massa do picnômetro cheio de água destilada até a marca de referência, em função da temperatura);
4. bomba de vácuo, com capacidade de aplicar um vácuo de 88 kPa (66 cm de Hg a 0°C), para remoção do ar existente na água e do que adere às partículas de solo.
5. Termômetro com haste de cerca de 30 cm, que permita a leitura de temperaturas entre 0°C e 50°C com precisão de 0,1°C;
6. Balança, com capacidade 1,5 kg com resolução de 0,01 g e sensibilidade compatível;
7. Funil de vidro (cerca de 14 cm de diâmetro de boca);
8. Conta-gotas ou pipeta com cerca de 25 ml de capacidade;
9. Banho-maria (nível constante, com espaço útil de no mínimo 15 x 15 cm);
10. Cápsula de porcelana com cerca de 20 cm de diâmetro;
11. Dessecador com cerca de 24 cm de diâmetro, placa perfurada e absorvente de umidade (cloreto de cálcio, sílica-gel, anidros, etc.);
12. Espátula de aço flexível com lâmina de cerca de 20 cm de comprimento;
13. Pinça metálica com cerca de 2,5 cm de comprimento;
14. Bisnaga de borracha (piceta).



copo+chicanas



hélice substituível



Picnômetro



bomba de vácuo



piceta



pinça



dispensor

EXECUÇÃO DO ENSAIO

A amostra deve estar preparada segundo a NBR 6457. Passar na peneira 4,8 mm (NBR 6598) ou 2,0 mm (DNER), homogeneizar e dela tomar, por quartearamento, cerca de 250 gramas para a execução dos ensaios.

1. Tomar, com resolução de 0,01 g, cerca de 60 g quando se tratar de solo arenoso ou 50 g se o solo for siltoso ou argiloso, se for utilizado o picnômetro de 500 ml. *Se for utilizado um picnômetro de 1000 cm³, use o dobro.* Pesar e anotar como M0, ou massa úmida.
2. Do restante do material, imediatamente tomar três amostras para determinar a umidade, pelo processo da estufa (ver NBR 6457 - anexo 1). *(Após obter o teor de umidade h, calcular o fator de correção fc e a massa da amostra seca Ms, a partir de M0 e fc);*
3. Colocar a amostra a ser ensaiada em cápsula (porcelana) e acrescentar água destilada em quantidade suficiente para completa imersão do material durante 12 horas, no mínimo.
4. Transferir a amostra *(depois do período de imersão)* para o copo de dispersão, lavando a cápsula com água destilada para completa remoção do material, evitando perda de material. Se necessário, acrescentar água destilada suficiente para imergir a hélice;
5. Dispersar durante 15 minutos *(se constatada a existência de partículas muito frágeis, reduzir esse tempo a não menos que 10 minutos);*
6. Transferir a amostra para o picnômetro, com auxílio do funil, lavando-se o copo e o funil com água destilada (evitar perda de material);
7. Acrescentar água destilada até cerca de metade do volume do picnômetro. A seguir, aplicar vácuo de, no mínimo 88 Kpa, durante pelo menos 15 minutos, agitando o picnômetro em intervalos regulares de tempo;
8. Adicionar água destilada até cerca de 1 cm abaixo da base do gargalo e aplicar a pressão de vácuo já referida, durante 15 minutos. No caso de não ocorrer remoção total do ar aderente às partículas deve-se colocar o picnômetro em banho-maria durante 30 minutos, no mínimo, adicionando água destilada para compensar a evaporação. *Trinta minutos em banho-maria podem substituir o emprego de vácuo.*
9. Adicionar água destilada até cerca de 1 cm abaixo da marca de calibração do picnômetro;
10. Deixar, em seguida, o picnômetro em repouso até que a temperatura do mesmo se equilibre com a temperatura do ambiente;
11. Com auxílio do conta-gotas, adicionar água destilada até que a base do menisco coincida com a marca de referência. *(Se espuma prejudicar a visão do menisco, vaporizar éter sulfúrico);*
12. Enxugar a parte externa do picnômetro e a parte interna do gargalo acima do menisco;
13. 13. Pesar o conjunto picnômetro + solo + água, com resolução de 0,01 g, à temperatura T. Anotar como M2.
14. Determinar, com resolução de 0,1° C, a temperatura no meio do picnômetro e anotar T. Com esse valor, obter na curva de calibração correspondente, com resolução de 0,01g, a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, e anotar como M3. *(no caso de não haver curva de calibração disponível, pesar o picnômetro apenas com água destilada isenta de ar, na mesma temperatura em que foi obtido M2);*
15. Calcular a densidade dos grãos de solo por

$$\delta = \delta T \cdot M_s / (M_s + M_3 - M_2)$$

Onde:

δ = densidade dos grãos do solo;

M_s = massa da amostra seca, obtida por $M_s = 100 M_0 / (100 + h)$;

P_2 = massa do picnômetro com solo e água até a marca, na temperatura T de ensaio;

P_3 = massa do picnômetro com água até a marca, na temperatura T de ensaio;

h = umidade inicial da amostra;

δT = densidade da água, na temperatura T de ensaio, obtida em tabela (anexo).

Observe que o volume da amostra seria avaliado pelo seu peso em água destilada à temperatura de 4°C. Normalmente o ensaio é executado sob temperatura maior, o que exige a correção dessa massa, o que é conseguido multiplicando o resultado de $M_s / (M_s + M_3 - M_2)$ pela densidade da água destilada na temperatura de ensaio (δT).



RESULTADOS

1. Considerar os ensaios satisfatórios quando seus resultados diferirem $0,02 \text{ g/cm}^3$ ou menos;
2. O resultado final, média obtida de pelo menos dois ensaios considerados satisfatórios conforme (1), deve ser expresso com três algarismos significativos, em g/cm^3 ;
3. Deve ser indicado o processo de preparação da amostra (com secagem prévia ao ar ou sem secagem prévia).

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO DE 500 ml (ou 1000 ml)

1) CALIBRAÇÃO PELO PROCESSO EXPERIMENTAL (mais comum)

- a) Encher o picnômetro com água destilada isenta de ar, completando o volume com a base do menisco no traço de referência;
- b) pesar com aproximação de 0,1 g e determinar a temperatura da água (sempre no meio da massa);
- c) repetir [a] e [b] variando a temperatura e pesando, sempre com o volume completado, a fim de ter uma gama de valores que abranja todas as temperaturas possíveis no local;
- d) construir gráfico com os valores de temperatura nas abscissas e as massas nas ordenadas. A escala utilizada deve permitir obter as massas com aproximação de 0,1g.
(as melhores calibrações são obtidas em ambiente é climatizado)

2) CALIBRAÇÃO PELO PROCESSO TEÓRICO

Baseia-se na fórmula

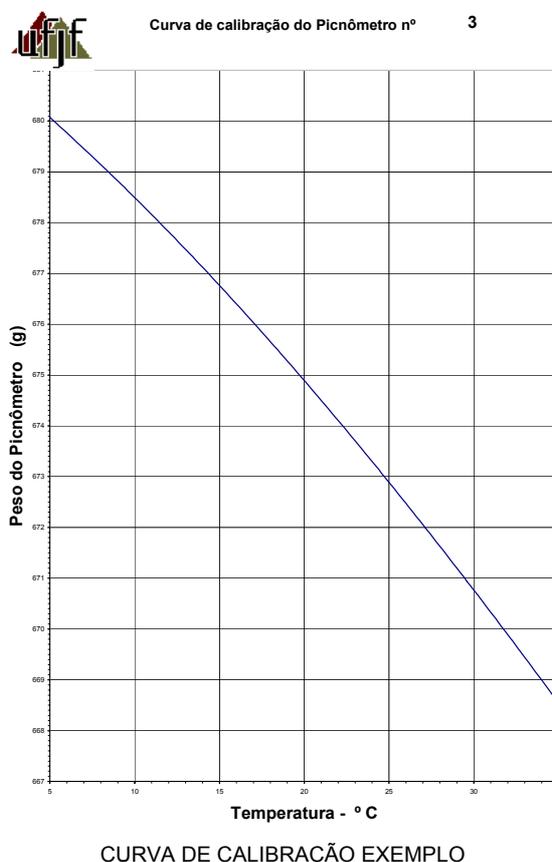
$$M2 = M_p + V_p (1 + E \cdot \Delta T) (\rho_T - \rho_{ar}):$$

- Onde
- $M2$ = massa do picnômetro cheio de água na temperatura de ensaio
 - M_p = massa do picnômetro limpo e seco
 - V_p = volume do picnômetro na temperatura de calibração (500 ou 1000 cm^3)
 - E = coeficiente de expansão do vidro
 - ρ_T = massa específica da água na temperatura T de ensaio (tabelado)
 - ρ_{ar} = massa específica do ar ($0,0012 \text{ g/cm}^3$)
 - ΔT = diferença de temperatura em relação à 20°C .

Arbitrar diversos valores de temperatura abrangendo a variação anual da região e substituir na fórmula. Desenhar a curva como no processo experimental. O valor de E pode ser obtido pesando o picnômetro completado com água destilada isenta de ar, pesando-o e determinando a temperatura (diferente de 20°C) no meio da massa líquida. Substituindo na fórmula, obtemos o valor de E .

Na calibração do picnômetro, observar que:

1. Seja utilizada água destilada e se aplique vácuo de, no mínimo 88 Kpa ao conjunto picnômetro + água destilada, durante dois intervalos de tempo de 15 minutos cada, sendo que no primeiro a água deve ocupar cerca de metade do picnômetro e no segundo o nível deve estar cerca de 1 cm abaixo da base do gargalo, antes do início da calibração;
2. As massas sejam determinadas com resolução de 0,1 g e as temperaturas com resolução de $0,01^\circ\text{C}$;
3. As curvas de calibração sejam feitas em escala tal que permitam a leitura de valores com resolução de 0,01 g.*



Podem ser utilizados picnômetros com tampa perfurada, onde o volume do picnômetro é completado quando a tampa é colocada e o excesso de água vaza pela tampa. Neste caso, são enxugados apenas externamente, e utilizado banho-maria para extração do ar.



Picnômetro com tampa perfurada

O único inconveniente de seu emprego é o tempo de esfriamento para a pesagem, que deve ser feita à temperatura ambiente. Sua calibração é feita do mesmo modo descrito anteriormente. Uma variação deste ensaio, muito popular no ambiente rodoviário, utiliza picnômetros de 50 cm³ com tampa perfurada. Será detalhada adiante.

Comentários:

- a) Em picnômetros de tampa perfurada o banho-maria dispensa o uso do da bomba de vácuo e do dispersor.
- b) Quando se usam picnômetros de 50 ml, o método de ensaio do DNER (DNIT) ME 093/94 permite que a amostra seja previamente seca.
- c) É sugerido o seguinte cuidado, para evitar erros causados por perda de material durante a introdução da amostra nesses picnômetros:
 1. Pesas o picnômetro seco e limpo (Mp);
 2. Com auxílio de funil, introduzir no picnômetro a quantidade necessária para o ensaio (obtida em pesagem prévia);
 3. Pesas novamente o picnômetro, com a amostra (M0);
 4. O peso da amostra (úmida) a ser considerada nos cálculos será obtido pela diferença M0-Mp.

TABELA – MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA, EM g/cm³, entre 0°C e 40°C

° C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
1	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
3	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
4	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
5	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
6	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
7	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
8	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998
9	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9997	0,9997
10	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9996
11	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9995	0,9995
12	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9994	0,9994	0,9994
13	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
14	0,9993	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9991
15	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9990	0,9990	0,9990	0,9990	0,9990
16	0,9990	0,9990	0,9989	0,9989	0,9989	0,9989	0,9989	0,9989	0,9988	0,9988
17	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987	0,9986
18	0,9986	0,9986	0,9986	0,9986	0,9985	0,9985	0,9985	0,9985	0,9985	0,9985
19	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983
20	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981	0,9980
21	0,9980	0,9980	0,9980	0,9980	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9978	0,9978
22	0,9978	0,9978	0,9978	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9976	0,9976
23	0,9976	0,9975	0,9975	0,9975	0,9975	0,9974	0,9974	0,9974	0,9974	0,9974
24	0,9973	0,9973	0,9973	0,9973	0,9972	0,9972	0,9972	0,9972	0,9971	0,9971
25	0,9971	0,9970	0,9970	0,9970	0,9970	0,9969	0,9969	0,9969	0,9969	0,9968
26	0,9968	0,9968	0,9968	0,9967	0,9967	0,9967	0,9967	0,9966	0,9966	0,9966
27	0,9965	0,9965	0,9965	0,9965	0,9964	0,9964	0,9964	0,9963	0,9963	0,9963
28	0,9963	0,9962	0,9962	0,9962	0,9962	0,9961	0,9961	0,9961	0,9960	0,9960
29	0,9960	0,9959	0,9959	0,9959	0,9959	0,9958	0,9958	0,9958	0,9957	0,9957
30	0,9957	0,9956	0,9956	0,9956	0,9956	0,9955	0,9955	0,9955	0,9954	0,9954
31	0,9954	0,9953	0,9953	0,9953	0,9952	0,9952	0,9952	0,9951	0,9951	0,9951
32	0,9951	0,9950	0,9950	0,9950	0,9949	0,9949	0,9949	0,9948	0,9948	0,9948
33	0,9947	0,9947	0,9947	0,9946	0,9946	0,9946	0,9945	0,9945	0,9945	0,9944
34	0,9944	0,9944	0,9943	0,9943	0,9943	0,9942	0,9942	0,9942	0,9941	0,9941
35	0,9941	0,9940	0,9940	0,9940	0,9940	0,9939	0,9939	0,9939	0,9938	0,9937
36	0,9937	0,9937	0,9936	0,9936	0,9936	0,9935	0,9935	0,9935	0,9934	0,9934
37	0,9934	0,9933	0,9933	0,9932	0,9932	0,9932	0,9931	0,9931	0,9931	0,9930
38	0,9930	0,9930	0,9929	0,9929	0,9928	0,9928	0,9928	0,9927	0,9927	0,9927
39	0,9926	0,9926	0,9925	0,9925	0,9925	0,9924	0,9924	0,9924	0,9923	0,9923
40	0,9922	Fonte: ABNT								

A densidade da água pode ser aproximada por uma equação polinomial do quarto grau, o que é muito útil em aplicações programadas, como planilhas de cálculo ou programas de computador.

$$(\delta = 2,932E-10 t^4 + 7,837E-09 t^3 - 6,548E-06 t^2 + 4,076E-05 t + 0,9999364)$$

MODELO DE FICHA DE ENSAIO

Determinação da densidade relativa das partículas sólidas - δ utilizando o picnômetro de 500 ml

Operador _____ Data: _____

Determinação do teor de umidade h do solo (pelo menos 3)

Capsula n°			
Massa úmida + tara [g]			
Massa seca + tara			
Massa de água [g]			
Tara [g]			
Massa seca [g]			
Teor de umidade h [%]			
h médio =			
Fator de conversão $fc = 100 / (100 + h)$			

A média deve ser obtida entre pelo menos duas determinações válidas (diferença menor ou igual a 0,2 %)

Determinação da densidade e peso específico (pelo menos duas)

Ensaio no.			
Picnômetro n°			
Volume nominal [ml]			
Temperatura T de ensaio [° C]			
Densidade da água na temperatura T: δ água			
Massa da amostra úmida: M_0 [g]			
Massa da amostra seca: M_s [g]			
Massa do Picnômetro com água: M_a [g]			
Massa do Picnômetro c/ água e solo M_{a_s} [g]			
$M_a + M_s - M_{a_s}$ [g]			
$\delta^* = M_s / (M_a + M_s - M_{a_s})$			
Média entre determinações δ^* válidas			
DENSIDADE $\delta = \delta^* \times \delta$ água			
Massa específica $\rho = \rho$ água $\times \delta$			
Peso específico $\gamma = \gamma$ água $\times \delta$			

* A diferença entre duas determinações válidas não pode ser maior que 0,02

Exercícios:

1. Para que deve a amostra deve ficar imersa em água destilada antes do ensaio? Por quanto tempo?
2. Quando se pode confiar no resultado do ensaio? Em outras palavras, quando ficar satisfeito, e decidir que não há a necessidade de “fazer mais um, para conferir...”.
3. Para que determinamos a umidade da amostra? Poderíamos utilizar uma amostra seca antes em estufa? Isto acarretaria aumento ou decréscimo de precisão?
4. Se fizermos o ensaio em uma altitude de 2 000 m obteremos o mesmo resultado que ao nível do mar, para a massa específica de uma amostra? Se fizermos o ensaio a uma temperatura de 10 ° C, o resultado terá validade?

5. Se, na primeira aplicação de vácuo, você observar que ainda há movimentação de bolhas de ar na franja mais superficial da mistura de água e solo, o que fará?
6. Se, na segunda aplicação de vácuo, a mistura de água e solo ainda borbulhar após 20 minutos, o que fazer?
7. Durante quanto tempo o picnômetro deve ficar em repouso depois da remoção de ar, e antes de se completar seu volume? Por que e para que? Ficou cansado?
8. Ao completar o volume do picnômetro você olha para a marca de calibração e a borda do menisco ou para a marca de calibração e a base do menisco? Como você procederá se o solo for um lodo orgânico muito escuro e fino, que escureça a água a ponto de fazê-la parecer uma tinta escura?
9. Antes de pesar o picnômetro (sem tampa) com solo e água, o que se enxuga? E antes de pesar o picnômetro apenas com água?
10. Um picnômetro mais pesado que os outros existentes em um laboratório pode estar falseando resultados? E um que, por defeito de fabricação tivesse 510 em vez de 500 ml?
11. Este ensaio pode ser executado sem secagem prévia da amostra ao ar? Por que?
12. A temperatura ambiente altera o resultado final do ensaio?
13. A bomba de vácuo parou de funcionar. O que você faz?
14. V. não determinou a umidade da amostra, e está no fim do ensaio, já nos cálculos finais. Ainda pode fazê-lo, ou o trabalho está perdido e você terá de repetir todo o ensaio? Pode usar o teor de umidade dessa amostra, determinado na semana anterior?
15. Ao completar o volume do picnômetro, você ultrapassou a marca de calibração. Explique como deve proceder, e por que (estando determinando $P(a+s)$ e estando determinando $P(a)$).
16. Calcule a densidade relativa dos constituintes sólidos tendo os seguintes dados: $P_{as} = 87,28$ g; $P_c = 74,89$ g; $P_s = 20,00$ g. Qual o volume desta amostra de solo, em cm^3 ?

DENSIDADE DOS GRÃOS UTILIZANDO PICNÔMETRO DE 50 ml

REFERÊNCIAS:

ME 093 / 94 , ME 093 / 64 , PRO 101 / 93 , ME 041 / 94 [DNER] ;
ASTM D 854 (specific gravity of soils) ;
AASHTO T 100-86 (specific gravity of soils) .

APARELHAGEM:

1. Repartidor de amostras de 13 mm de abertura ;
2. Peneira de 2,0 mm (nº10);
3. picnômetro (capacidade 50 ml);
4. termômetro de 0°C a 60°C, graduado em 0,5° C;
5. bico de gás ou outra fonte de calor;
6. cápsula de porcelana com 50 mm de diâmetro;
7. dessecador;
8. funil de 50 mm de diâmetro;
9. pegador de madeira.



pegador de madeira

AMOSTRA:

Da fração da amostra (representativa) que passa na peneira de 2,0 mm, homogeneizada, tomar cerca de 20 g e secar completamente em estufa, deixando esfriar no dessecador;

Tomar 10 g de solo seco para cada ensaio, no mínimo.

ENSAIO:

1. Pesar o picnômetro vazio, seco e limpo. Anotar (M1);
2. colocar a amostra no picnômetro e pesar (M2) ;
3. colocar água destilada no picnômetro até cobrir, com excesso, a amostra ;
4. aquecer o picnômetro, deixando ferver pelo menos 15 minutos, para expulsar todo o ar existente entre as partículas do solo, e agitando-o para evitar superaquecimento.
(*usar tela entre a chama e o picnômetro, ou banho-maria*).
5. deixar o picnômetro esfriar ao ar ambiente ;
6. completar o volume do picnômetro com água destilada, colocar em banho de água à temperatura ambiente por quinze minutos, colocar a rolha perfurada de modo que aflore à sua parte superior. Anotar a temperatura do banho (T).
7. retirar o picnômetro do banho, enxugar e secar com pano limpo e seco. Pesar o picnômetro e conteúdo (M3);
8. retirar todo o material de dentro do picnômetro, lavar e encher completamente com água destilada. Colocá-lo no banho de água à temperatura ambiente por quinze minutos, colocar a rolha perfurada, deixando a água aflorar à sua parte superior. Verificar a temperatura do banho (T), retirar o picnômetro do banho, enxugar com pano limpo e seco e pesar, obtendo (M4).

CÁLCULOS E RESULTADOS:

1. A densidade (densidade dos grãos que passam na peneira de 2,0 mm) à temperatura T é dada por

$$\delta_T = (M_2 - M_1) / ((M_4 - M_1) - (M_3 - M_2))$$

onde:

δ_T = densidade real do solo à temperatura T;
 M_1 = massa do picnômetro vazio e seco, em g;
 M_2 = massa do picnômetro mais amostra, em g;
 M_3 = massa do picnômetro mais amostra, mais água, em g;
 M_4 = massa do picnômetro mais água, em g.

2. O resultado final é expresso em número adimensional e com aproximação de centésimos;
3. O resultado do ensaio será considerado aceitável quando obtido pela média de duas determinações, no mínimo, e quando não diferirem de mais que 0,009;

A prática corrente é executar pelo menos cinco determinações, por este processo.

4 O valor da densidade real deverá ser referido à água, à temperatura de 20°C, calculado por:

$$D_{20} = k_{20} \times D_T$$

Onde:

D₂₀ = densidade real do solo à 20°C;

D_T = densidade real do solo à temperatura T.

K₂₀ = razão entre a densidade relativa da água à temperatura T e a densidade relativa da água à 20°C;

Crítica ao processo (para ser discutida):

A densidade de um corpo é definida como a razão entre o peso específico do corpo e o peso específico da água (à temperatura de 4°C). Chamar “densidade real” à densidade da água na temperatura de 20° produz complicação desnecessária.

Comentário: Comparando com o processo que utiliza o picnômetro de 500 ml, o tamanho da amostra poderia permitir que fosse considerada menos representativa. Isto é compensado pela execução de mais ensaios, que utilizam mais amostras. A prática tem sugerido que os resultados obtidos com o picnômetro de 50 ml são mais precisos quando as amostras são mais arenosas ou siltosas, e menos quando são muito argilosas.

Razão entre a densidade relativa da água à temperatura T e a densidade relativa da água à 20°C

Temperatura t em °C	Densidade relativa da água	Fator de correção k ₂₀	Temperatura t em °C	Densidade relativa da água	Fator de correção k ₂₀
4	1,0000	1,0018	19	0,9984	1,0002
5	1,0000	1,0018	20	0,9982	1,0000
6	0,9999	1,0017	21	0,9980	0,9998
7	0,9999	1,0017	22	0,9978	0,9996
8	0,9999	1,0017	23	0,9976	0,9993
9	0,9998	1,0016	24	0,9973	0,9991
10	0,9997	1,0015	25	0,9971	0,9989
11	0,9996	1,0014	26	0,9968	0,9986
12	0,9995	1,0013	27	0,9965	0,9983
13	0,9994	1,0012	28	0,9963	0,9980
14	0,9993	1,0011	29	0,9960	0,9977
15	0,9991	1,0009	30	0,9957	0,9974
16	0,9990	1,0008	31	0,9954	0,9972
17	0,9988	1,0006	32	0,9951	0,9969
18	0,9986	1,0004	33	0,9947	0,9965

Fonte: DNER 093/94

Nota: para referir o valor da densidade do solo à água com temperatura diferente de 20°C, deverá ser calculado o valor de kX, para a temperatura desejada.

Exercícios:

- 1) *Quais as causas possíveis de erro na execução do ensaio?*
- 2) *Que “controle de qualidade” deve ser adotado para se verificar se o ensaio foi bem executado?*
- 3) *O ensaio de determinação da densidade de uma amostra que passa na peneira de 2,0 mm, pelo processo do picnômetro de 50 ml forneceu os seguintes resultados:
2,621 - 2,632 - 2,635 - 2,643 - 2,654 (resultados finais)
Explique como proceder, e determine o valor a ser adotado para a densidade dos grãos, se considerar que o ensaio teve sucesso.*

MÉTODO DA BALANÇA HIDROSTÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DOS GRÃOS DE PEDREGULHO* ou de AGREGADO GRAÚDO**

* (material retido na peneira de 2,0 mm)

** (material retido na peneira de 4,8 mm)

REFERÊNCIAS:

DNER-ME 081/94 - Agregado graúdo - determinação da densidade.

ABNT-NBR 6458/84-Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.

ASTM C 127-77 – Specific gravity and absorption of coarse aggregate.

DEFINIÇÕES (adotadas neste método)

- Densidade real do grão: razão entre o peso (ao ar) do volume da porção inacessível à água, após 24 horas de imersão, de um material e o peso de igual volume de água destilada à temperatura ambiente T.
- Densidade aparente do grão: razão entre o peso (ao ar) de um dado volume de material, incluindo todos os vazios dos grãos, e o peso ao ar, de igual volume de água destilada à temperatura ambiente T.

(não confundir densidade aparente do grão com densidade aparente de uma amostra: na segunda o volume total inclui os vazios existentes entre os grãos, o que não ocorre na primeira.).

APARELHAGEM

- repartidor de amostras;
- peneira de 4,8 mm (se analisado o pedregulho) ou peneira de malha 2,0 mm (se analisado o agregado graúdo);
- cesto de tela com abertura menor que 4,8 mm (p/ pedregulho) ou 2,0 mm (para agregado graúdo);
- balanças que permitam pesar 10 kg, 5 kg ou 1,5 kg, com resolução 1g, 0,5g e 0,1g, com dispositivo que permita fazer pesagem hidrostática;
- peneira de 2,0 mm ou 4,8 mm atendendo ABNT EB-22, conforme seja o ensaio para agregado graúdo ou pedregulho;
- estufa capaz de manter a temperatura entre 100°C e 105°C;
- recipiente com dimensões adequadas para completa imersão do cesto de tela;
- termômetro graduado em 0,1°C, de 0°C a 50°C;
- tecido absorvente.

ENSAIO:

Serão feitas pelo menos duas determinações, com amostras representativas que passam na peneira de 7,6 mm e retidas na peneira de 4,8 mm, para o estudo de pedregulhos (ou retidas na peneira de 2,0 mm para o estudo de agregado graúdo), com tamanho escolhido em função da dimensão observada dos grãos maiores contidos na amostra, conforme tabela abaixo.

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra (mm)	Quantidade mínima a tomar (Kg)
< 25	2
25 a 50	8
50 a 76	16

Fonte: NBR 6457/86

- Tomar metade da amostra para cada determinação;
- Lavar a amostra na peneira de 4,8 mm (pedregulhos) ou na peneira de 2,0 mm (agregado graúdo), para retirada de material fino aderente. Imergir em água destilada, à temperatura ambiente, por 24 h. Após esse prazo, retirar a amostra da água e enxugá-la com o tecido absorvente ligeiramente umedecido de forma a remover apenas a água superficial, ficando os grãos com o aspecto

característico de material saturado. Grãos de maiores dimensões devem ser enxutos em separado. Evitar que se evapore a água absorvida.

- 3) Pesar, com a resolução definida na tabela seguinte, a massa da amostra saturada (e superficialmente seca), anotando como Mh.
- 4) Pesar, imersa, a cesta de tela (M cesta)

Tabela: Balança a usar na determinação das massas

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra (mm)	Balança a ser utilizada	
	Capacidade (kg)	Resolução (g)
< 25	1,5	0,1
25 a 50	5	0,5
50 a 76	10	1

- 5) Colocar a amostra saturada no cesto de tela e determinar, com a resolução indicada em (3), sua massa quando totalmente imersa em água destilada, anotando como M imersa a diferença entre esta massa e a massa da cesta. *Deve-se agitar algumas vezes, para expulsar as bolhas de ar do material.*
- 6) Determinar, com resolução de 0,1 °C, a temperatura T da água de imersão.
- 7) Secar em estufa à temperatura de 105-110°C até constância de massa e determinar, com a resolução indicada em (3) a sua massa seca (Ms).

CÁLCULOS:

Massa específica dos grãos:

$$D_i = \delta T \cdot M_s / (M_s - M_{\text{imersa}})$$

Massa específica aparente dos grãos:

$$D = \delta T \cdot M_s / (M_h - M_{\text{imersa}})$$

Absorção de água, em porcentagem da massa de material seco:

$$S = D_{at} = 100 (M_h - M_s) / M_s$$

onde:

δT = massa específica da água (destilada) à temperatura T do ensaio;

M_s = Massa da amostra seca;

M_{imersa} = massa da amostra totalmente imersa em água destilada;

M_h = Massa da amostra saturada, superficialmente secada;

A massa específica dos grãos de solos que contém frações passada e retida na peneira de 4,9 mm pode ser calculada por

$$G = 100 \cdot \delta \cdot D_i / (\delta \cdot M_2 + D_i \cdot M_1)$$

onde

δ = massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm;

M_1 = porcentagem em massa, da fração retida na peneira de 4,8 mm;

M_2 = porcentagem em massa, da fração que passa na peneira de 4,8 mm;

D_i = massa específica dos grãos retidos na peneira de 4,8 mm.

RESULTADOS:

Considerar satisfatórios os ensaios quando os resultados não diferirem mais que 0,02 g/cm³, tanto para a determinação de D_i quanto de D.

O resultado final, média entre dois ensaios satisfatórios, deve ser expresso com três algarismos significativos para D_i e D, em g/cm³. Também o valor de G deve ser expresso com três algarismos significativos.

Exercícios

- 1) *Existem solos com densidade menor que a da água. O minério vermiculita é um exemplo. Como você determinaria a densidade dos grãos, no caso de sua amostra ser constituída de grandes pedregulhos? E como o faria, quando a amostra também tivesse grãos menores que 2,0 mm?*
- 2) *Foi alertado, ao início deste capítulo, que o grande inimigo da precisão nos ensaios de determinação da densidade dos grãos é a presença de ar – no interior de torrões, aderente à partículas, ou na água. Por que as especificações para a retirada de ar, na determinação da densidade dos pedregulhos, reduzem-se a “agitar o material”? Como você tornaria esse ensaio mais preciso?*

Capítulo 7 - Peso específico aparente (*massa específica aparente, densidade aparente*)

Denomina-se peso específico aparente de uma amostra (γ) ao resultado da divisão do peso da amostra pelo volume total desta amostra.

$$\gamma = P_t / V_t$$

A massa específica aparente (ρ) de uma amostra é obtida por

$$\rho = M_t / V_t$$

O peso da amostra inclui o peso das partículas sólidas e o peso da água que ocupa seus vazios. O peso do ar é geralmente considerado desprezível.

$$P_t = P_s + P_a$$

Menos freqüentemente se encontra na literatura a expressão “densidade aparente”. Deve ser interpretada como o resultado da divisão do peso específico (γ) da amostra pelo peso específico da água, ou da divisão da massa específica da amostra (ρ) pela massa específica da água (sempre à 4°C).

$$\delta = \gamma / \gamma_{\text{água}} = \rho / \rho_{\text{água}}$$

O volume (V_t) considerado no cálculo do peso específico aparente é constituído pelo das partículas (V_s) e pelo dos vazios (V_v), que podem estar ocupados pela água (V_a) e/ou pelo ar (V_{ar}).

$$V_t = V_s + V_v, \text{ onde } V_v = V_a + V_{ar}$$

Um exemplo de aplicação direta na terraplanagem:

Para se comprovar no campo se uma camada de aterro está submetida à uma compactação correta, determina-se o peso específico aparente e o teor de umidade de uma amostra do material que foi submetido à compactação. Com esses parâmetros, calcula-se seu peso específico aparente seco:

$$\gamma_s = \gamma \cdot 100 / (100 + h)$$

Em laboratório já havia sido determinado previamente (no ensaio de compactação) qual o maior peso específico aparente seco (γ_s MÁXIMO) possível ser obtido com aquele material e com que energia e teor de umidade (h ótimo) isto seria possível.

Define-se Grau de Compactação (G) como a relação percentual entre o peso específico aparente seco obtido pela compactação no campo (γ_s campo) e o maior γ_s possível de obter no laboratório, com amostra na umidade ótima (γ_s MÁXIMO).

$$G = 100 \cdot \gamma_s(\text{campo}) / \gamma_s(\text{MÁXIMO}) \quad (\%)$$

“Grosso modo”, se G atinge ou ultrapassa a especificação mínima para o trabalho (por exemplo, $G \geq 95\%$), o serviço é aceito. Se não, é recusado (quando não atinge a compactação desejada, todo o material é removido e a camada refeita.).

Não será gerado erro ao empregar MASSAS em lugar de PESOS, se houver consciência de que a divisão pelo volume informará sobre MASSA ESPECÍFICA. É comum se falar em “peso específico” e utilizar g/cm^3 como unidade. Embora errado, deverá ser entendido que a intenção é informar sobre massa específica. (para obter γ basta multiplicar pela aceleração da gravidade, mas é comum expressar γ em g/cm^3 , que é uma confusão com ρ).

Existem vários processos para a determinação do peso específico aparente, sendo feita a escolha de um deles em função do tipo de solo a ser estudado. Aqui os grupamos em métodos diretos, métodos indiretos e métodos especiais.

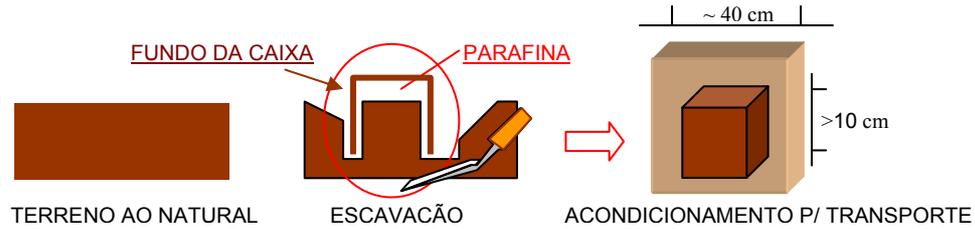
Os principais processos de identificação da massa específica aparente por métodos diretos consistem na coleta de uma amostra indeformada. Com a massa e o volume dessa amostra calcula-se a massa específica aparente, e com o teor de umidade dela obtido, a massa específica aparente seca. Os mais comuns são o do cilindro de cravação e o do “cubo” esculpido.

Nos métodos indiretos, escava-se a amostra, que é totalmente recolhida e pesada. O volume da amostra é obtido medindo o volume da escavação. O teor de umidade da amostra deve ser determinado logo após sua pesagem. Os principais utilizam o frasco de areia, o óleo grosso ou o balão de borracha.

Métodos especiais utilizam sonares, resistividade elétrica ou radiação. Destes, o mais difundido no Brasil utiliza o densímetro nuclear.

Determinação da massa específica aparente, por métodos diretos:

1) Resumo do processo do cubo esculpido, utilizado quando o solo é coesivo, podendo ter pedregulhos:



A extração da amostra é feita cortando-se cuidadosamente ao redor do terreno compactado, obtendo-se um bloco de forma aproximadamente cúbica, com pelo menos 10 cm de lado. Logo que se obtenha a amostra colhe-se uma pequena quantidade do solo, no mesmo local, para determinação do teor de umidade (h). O teor de umidade também pode ser determinado a partir de três amostras (distintas) colhidas ao partir o cubo, após ser determinado seu volume.

A amostra extraída é acertada na superfície e pesada (anotar a massa úmida M1) e imediatamente envolvida em parafina (cuja massa específica é $\rho_p = 881 \text{ g/cm}^3$). Esse envolvimento pode ser feito por pintura em toda a sua superfície ou por imersão rápida em parafina quente, deixando-se escorrer o excesso, e esfriar. Depois de fria a parafina, torna-se a pesar, obtendo-se a massa do solo mais a parafina que o envolve (anotar M2). Por diferença, obtém-se a massa da película de parafina usada: $M_p = M_2 - M_1$. Obtém-se então o volume da amostra (V_a) envolvida em parafina mergulhando-a em água em um recipiente graduado, medindo a quantidade do líquido deslocado. O volume (V) da amostra será obtido pela diferença entre o volume de água deslocado e o volume de parafina ($V_p = M_p / \rho_p$):

$$V = V_a - V_p$$

Para transporte, a amostra (parafinada) é protegida com areia e acondicionada em caixas de madeira.

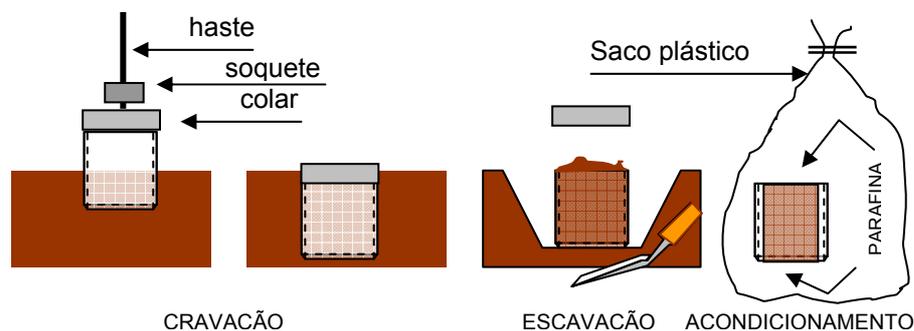
CÁLCULOS:

Massa da amostra seca: $M_s = 100 M_1 / (100 + h)$

Massa específica aparente seca: $\rho_s = M_s / V$

Densidade aparente seca: $\delta = \gamma_s / \gamma_{\text{água}} = \rho_s / \rho_{\text{água}}$

2) Quando o solo é coesivo e não tem pedregulhos, um dos processos mais convenientes para a determinação de γ utiliza o CILINDRO DE CRAVAÇÃO.



Utiliza um cilindro padronizado, com bordas cortantes, sendo o volume interno e o peso já determinados.

Resumo do processo do cilindro de cravação:

Cravar cuidadosamente o cilindro com auxílio do soquete e da haste de cravação (veja especificações para cilindro, haste e soquete na NBR 9813-ABNT). Cortar o solo ao redor do cilindro, evitando choques com o mesmo, e retirar o cilindro com a amostra, rasando a base superior e a inferior, evitando perda de material. Imediatamente, colher uma pequena quantidade do solo para determinação do teor de umidade (h). É mais comum determinar o teor de umidade média da amostra calculado a partir de

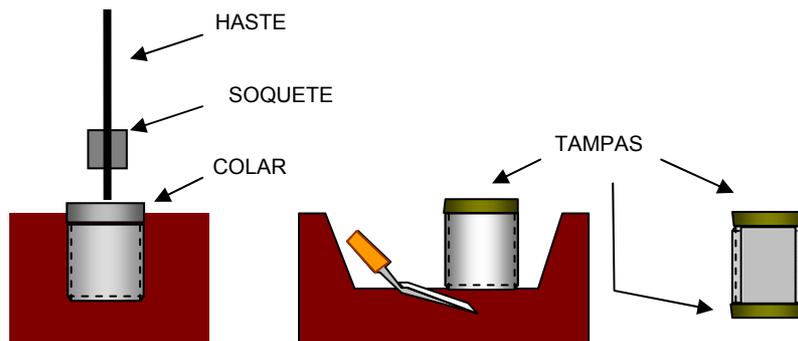
três amostras retiradas do interior do corpo de prova, após sua extração do cilindro. Quando o laboratório encontra-se distante, deve-se proteger a amostra contra alteração da umidade durante o transporte.

Como o volume interno do cilindro é conhecido, conhecemos o volume da amostra. Pesar a amostra com o cilindro (M_1), e obter a massa da amostra subtraindo a massa do cilindro (M_c). A massa da amostra seca será

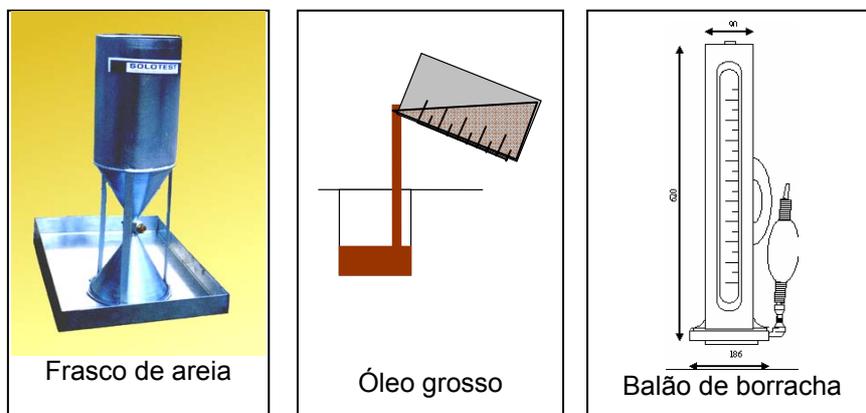
$$M_s = 100 \cdot (M_1 - M_c) / (100 + h)$$

A massa específica aparente seca será: $\rho_s = M_s / V$

- 3) Em solos arenosos, o processo de retirada da amostra pode ser semelhante ao mostrado para solos coesivos sem pedregulho, utilizando um cilindro de cravação com tampas para auxiliar a retirada da amostra sem perda de material.



Nos métodos indiretos, da amostra (deformada) retirada de uma escavação obtém-se a massa. Medindo o volume da escavação é obtido o volume da amostra. Os métodos indiretos mais comuns são o do frasco de areia, o do óleo grosso e o do balão de borracha. O processo que utiliza o frasco de areia é o mais utilizado.



Os processos do frasco de areia e do balão de borracha podem ser empregados praticamente com qualquer tipo de solos. O do óleo grosso deve ser evitado em solos em que exista a possibilidade de absorção, como solos grossos com poucos finos.

A seguir, em anexos:

Normas técnicas comentadas e detalhamento dos ensaios que determinam o peso específico aparente e o peso específico aparente seco.

ANEXO 1: DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE “*IN SITU*” COM EMPREGO DE CILINDRO DE CRAVAÇÃO

1. OBJETIVO

Obter a massa específica aparente de um solo, sendo aplicável somente a solos de granulação fina, isentos de pedregulhos, coesivos e não muito duros.

2. REFERÊNCIAS: NBR 9813, NBR 6457.

3. APARELHAGEM

3.1. Equipamento de cravação;

- a) cilindro de cravação calibrado; (ver o item 4) ;
- b) haste guia e soquete de cravação;
- c) colarinho destacável;

3.2. Balanças que permitam pesar nominalmente 1,5 kg e 10 kg, com resolução de 0,1g e 1g respectivamente, tendo sensibilidades compatíveis;

3.3. Recipiente que permita acondicionar o cilindro de cravação com a amostra, sem perda de umidade;

3.4. Estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C, e entre 60°C e 65°C;

** Estudos recentes recomendam para a maior temperatura de utilização da estufa a faixa de 100-105°, mantendo-se 60-65°C para solos orgânicos e solos sensíveis ao calor.*

3.5. Pá e picareta;

3.6. Régua de aço biselada de 30 centímetros;

3.7. Espátulas de lâmina flexível com cerca de 10 cm de comprimento por 2 cm de largura, e 12 cm de comprimento por 10 cm de largura;

3.8. Extrator de corpo de prova.



4. CONFERÊNCIA DO CILINDRO DE CRAVAÇÃO:

O cilindro prescrito pela NBR9813 tem 115 mm de diâmetro externo, 110 mm de diâmetro interno e altura 116 mm. As dimensões do cilindro de cravação e soquete de cravação podem variar, desde que a relação abaixo definida esteja entre 10 e 15 %:

$$C_v = 100 V_d / V_c$$

onde:

C_v = relação percentual de volumes, em %;

V_d = volume das paredes do cilindro (volume do aço), em cm^3 ;

V_c = volume da amostra (volume interno do cilindro de cravação), em cm^3 .

4.1 Determinar, com resolução de 0,1 mm, a altura e o diâmetro interno do cilindro em quatro posições igualmente espaçadas e calcular o volume utilizando as médias dos valores assim obtidos. Anotar como V_c . Tomar quatro medidas do diâmetro externo do cilindro, calcular o volume externo V_e e anotar $V_d = V_e - V_c$. Pesquisar o cilindro e anotar a massa MC .

4.2 Verificar periodicamente C_v e se o corte da borda cortante apresentar-se insatisfatório ou se partes do cilindro estiverem danificadas ou deformadas, providenciar reparo ou descartá-lo, e proceder à nova determinação de C_v .

4.3 Operando com mais de um cilindro, proceder de forma análoga, identificando cada cilindro.

5. EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1 Nivelar e limpar o terreno de partículas soltas. Assentar o cilindro de cravação, cujo interior deve estar levemente lubrificado em óleo;

5.2 Montar o restante do equipamento e iniciar a cravação do cilindro por meio de queda livre do soquete de cravação, mantendo a haste em posição vertical. A cravação deve ser contínua, até que o cilindro fique com sua borda superior cerca de um (1) cm abaixo da superfície do terreno;

- 5.3 desmontar o conjunto de cravação e com auxílio da pá e picareta escavar o terreno em volta do cilindro, evitando esbarrar no mesmo. Cortar o solo em volta e em baixo do cilindro com as espátulas, e a uma profundidade mínima de 5 cm abaixo da borda inferior. Com uma espátula, remover o excesso de solo e rasar ambas as faces do corpo de prova, com auxílio da régua biselada.
- 5.4 repetir a operação, caso se verifique que:
- a) a amostra dentro do cilindro encontra-se amolgada, fissurada, ou não representativa do solo local;
 - b) a amostra contém pedregulhos, raízes ou outros corpos estranhos;
 - c) o cilindro não se encontra totalmente preenchido;
 - d) o cilindro danificou-se durante a operação.
- 5.5 A massa do cilindro contendo o material (MT) deve ser determinada imediatamente, de modo a evitar perda de umidade, com resolução de 1 g. Remover então o corpo de prova do cilindro, e do centro do mesmo tomar uma amostra para determinar o teor de umidade [h], de acordo com a NBR6457. Neste momento verificar se houve alguma das ocorrências descritas em (5.4). *Nos casos em que seja impraticável a utilização de estufa, o teor de umidade pode ser determinado por outro método, devendo o mesmo ser explicitamente indicado na apresentação dos resultados.*

6. CÁLCULOS

- 6.1 Calcular a massa específica aparente natural do solo, utilizando a expressão:

$$\rho_h = (M_t - M_c) / V_c$$

onde:

- ρ_h = massa específica aparente natural do solo “in situ”, em g/cm³;
 M_T = massa do cilindro com a amostra úmida, em g;
 M_C = massa do cilindro, em g;
 V_c = volume interno do cilindro, em cm³.

- 6.2 Calcular a massa específica aparente seca do solo “in situ”, por $\rho_s = 100 \rho / (100+h)$

7. RESULTADOS

- 7.1 A massa específica aparente natural (ou seca) do solo “in situ” deve ser expressa com três algarismos significativos, em g/cm³, e o teor de umidade com aproximação de 0,1 %;
- 7.2 Caso o teor de umidade não tenha sido obtido em estufa, indicar o processo usado.

Para orientar reflexões:

1. *Qual o interesse em determinar o peso específico aparente de um solo?*
2. *Que processo(s) você utilizaria para obter o peso específico aparente de um solo de aspecto:*
a) arenoso; b) argiloso; c) siltoso; d) silto-arenoso; e) silto-argiloso f) argilo-arenoso com presença de pedregulhos; g) areno-siltoso?
3. *Para que determinar o peso específico aparente natural de uma areia (sem ter sido artificialmente adensada)? Em que tipo de situação isto poderia ser necessário?*
4. *Ao quebrar uma amostra indeformada retirada com o cilindro, você encontrou, no meio da amostra, uma pedra de diâmetro 2 cm, aproximadamente. O ensaio está perdido? Por que?*
5. *Por que as dimensões dos cilindros de cravação podem diferir mas devem seguir as relações descritas na “conferência do cilindro”? Você utilizaria um cilindro que, atendendo às especificações, tivesse um volume igual a ¼ do volume daqueles que estivesse acostumado a usar? E se o cilindro tivesse o dobro do volume normal? Por que?*
6. *No controle da compactação de uma barragem de terra, sendo previstos centenas de ensaios, você veria alguma utilidade em contar o número de golpes necessário para cravar o cilindro? Justifique sua opinião, especificando se usou o ponto de vista do empreiteiro ou do fiscal.*
7. *No resumo inicial, foi recomendado colher uma amostra para determinação da umidade. A norma da ABNT não faz tal especificação. Isto é imprescindível? Recomendável? Completamente dispensável? Determinar a umidade é sempre necessário? Para que?*
8. *Para que serve o colarinho do cilindro de cravação? O peso do soquete é (ou deveria ser) padronizado? Por que ou para que?*
9. *Você não tinha óleo fino para untar o interior do cilindro de cravação e executou o ensaio assim mesmo. O ensaio tornou-se inválido?*

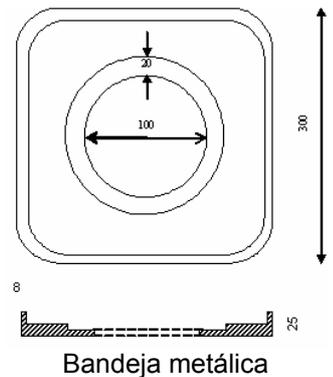
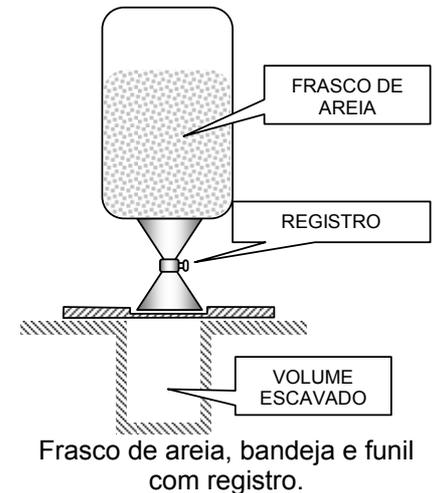
ANEXO 2: MÉTODO DO FRASCO DE AREIA

Aplicabilidade do método: aplica-se a solos com qualquer tipo de granulação, contendo ou não pedregulhos, que possam ser escavados com ferramentas manuais, e cujos vazios naturais sejam suficientemente pequenos para que a areia usada no ensaio neles não penetre. O material em estudo deve ser suficientemente coeso e firme para que as paredes da cavidade a ser aberta permaneçam estáveis e as operações realizadas não provoquem deformações na cavidade.

REFERÊNCIA: NBR 7185 /86

APARELHAGEM

1. Frasco de vidro ou plástico translúcido (cerca de 3,5 litro) com gargalo rosqueado, funil duplo metálico provido de registro e rosca;
2. Bandeja metálica plana quadrada com 30cm de lado e bordas de 2,5cm de altura e furo no centro (10 cm) com rebaixo;
3. Placa de vidro quadrada de 30cm de lado;
4. Molde cilíndrico de metal de 10cm de diâmetro e 1000cm³ de volume;
5. Balanças com capacidade 1,5 kg e 10 kg, com resolução de 0,1g e 1g, respectivamente, e sensibilidades compatíveis;
6. Peneiras de 1,2 mm a 0,59 mm (consultar NBR5734);
7. Talhadeira com cerca de 30 cm de comprimento;
8. Martelo de 1 kg;
9. Pá de mão (concha);
10. Pincel ou trincha;
11. Recipientes que permitam guardar amostra de solo sem perda de umidade.
12. Areia lavada e seca, de massa específica aparente conhecida e obtida como especificado no item 2, constituída pela fração passante no peneira de 1,2 mm e retida na peneira de 0,59 mm;
13. Nível de bolha (nível de pedreiro);
14. Cilindro metálico de volume conhecido (aproximadamente 2000cm³) com diâmetro interno igual ao diâmetro interno do funil do frasco de areia) para determinação da massa específica da areia.



Trabalho prévio no laboratório:

Preparação da areia:

1. secar ao ar;
2. peneirar com as peneiras 1,2 mm e 0,59 mm, recolhendo a areia entre elas;
3. lavar na peneira 0,59 mm;
4. secar em estufa;
5. peneirar na peneira 0,59 mm.

Determinação da massa de areia que preenche o funil e o orifício no rebaixo da bandeja:

1. Colocar sobre uma superfície plana a placa de vidro. Sobre a mesma colocar a bandeja de metal onde se encaixa o furo maior do funil;
2. pesar o conjunto frasco + funil (M1) estando o frasco cheio de areia. Colocar o conjunto frasco+funil+areia encaixado na bandeja e abrir o registro do funil, deixando a areia escoar livremente até cessar seu movimento. Fechar o registro do funil. Retirar o conjunto frasco + funil + areia restante, pesando-o [M2]. A diferença $M3 = M1 - M2$ é a massa de areia que preencheu funil e orifício.

3. Repetir (2) várias vezes (sugere-se cinco vezes), até obter pelo menos três valores M3 que não difiram da respectiva média mais que 1% do valor da média.
4. Adotar a média dos valores M3 que atendam esta especificação (3) como peso de areia no cone.

O modo como se procede ao ensaio no laboratório visa reproduzir em laboratório, tanto quanto possível, as mesmas condições de aleatoriedade ocorrentes no campo. Isto inclui a altura de queda das partículas e o modo como elas se acomodarão. Tanto no campo quanto em laboratório é proibida a ocorrência de vibrações (como as causadas por tráfego e motores ligados) durante os ensaios.

Determinação da massa específica aparente da areia :

1. pesar o conjunto frasco – funil contendo a sua máxima capacidade de areia, preparada. (M4);
2. colocar o conjunto frasco + funil + areia sobre a bandeja, e esta sobre o cilindro; abrir o registro do funil deixando a areia escoar livremente até que cesse seu movimento; fechar o registro do funil; retirar o conjunto frasco + funil + areia e pesá-lo (M5);
3. A massa de areia que enche o cilindro será
4. repetir as operações (1) e (2) várias vezes. Compor a média dos valores M6, não aceitando valores que difiram da respectiva média mais que 1% do valor da média.
5. Calcular a massa específica aparente da areia pela fórmula

$$M6 = M4 - M5 - M3$$

$$\rho \text{ areia} = M6 / V$$

onde

M6 é a média das massas de areia no cilindro (g);

V é o volume do cilindro (cm³)

Determinação do peso específico (aparente) do solo no campo:

1. Limpar a superfície do terreno, tornando-a, tanto quanto possível, plana e horizontal. (usar nível de bolha);
2. Colocar a bandeja, certificando-se se há bom contacto entre esta e a superfície do terreno, e escavar com martelo e talhadeira uma cavidade cilíndrica no terreno, limitada pelo orifício central da bandeja e com profundidade até 15 cm (ou que atinja toda a espessura da camada a ser analisada. Quando a camada possuir espessura superior a 15 cm, a profundidade máxima do furo será de 15 cm).
3. Recolher todo o solo extraído da cavidade, determinar sua massa com resolução de 1g e anotar como Mh.;
4. Determinar o teor de umidade (h) do solo extraído da cavidade, conforme prescreve a NBR 6457;
5. pesar o conjunto frasco + funil + areia (M7);
6. Ajustar o conjunto frasco + funil + areia sobre o rebaixo da bandeja. Abrir o registro do funil deixando a areia escoar livremente até cessar seu movimento no interior do frasco. Fechar o registro, retirar o conjunto frasco + funil + areia restante, pesando-o com resolução de 1 g e anotar (M8);
7. O peso de areia que preencheu a cavidade do terreno será
8. completar o frasco com areia não usada;
9. recolher a areia utilizada no furo para novo beneficiamento de laboratório.
10. A massa específica (aparente) seca do solo “in situ” será obtida por

$$M10 = M7 - M8 - M3$$

$$\rho_s = f_c \cdot \rho \text{ areia} \cdot Mh / M10 \text{ ou}$$

$$\rho_s = [100 / (100 + h)] \cdot \rho \text{ areia} \cdot Mh / M10 .$$

onde ρ_s = massa específica aparente seca do solo “in situ”, em g/cm³.

$\rho \text{ areia}$ = peso específico aparente da areia, em g/cm³.

Mh = massa do solo extraído da cavidade do terreno, em g

M10 = massa da areia que preencheu a cavidade no terreno, em g

h = teor de umidade do solo extraído da cavidade no terreno, em %

f_c = fator de correção da umidade = 100 / (100 + h)

Expressão dos resultados:

Massas específicas devem ser expressos em g/cm^3 com três algarismos significativos e o teor de umidade com aproximação de 0,1%.

Caso o teor de umidade não tenha sido determinado com o uso da estufa, indicar o processo utilizado.

RECOMENDAÇÕES DO DNER (processo do frasco de areia)

- a) *Tratando-se de camadas de sub-leito ou reforço de sub-leito que apresentem fissuras ocasionadas por perda de umidade [fendas de contração], deverá ser removida uma camada de no mínimo 5 cm de espessura a fim de se promover o assentamento da bandeja ;*
- b) *Para a execução de furos, usar a talhadeira de modo a retirar sucessivamente camadas de, no máximo, 3 cm de profundidade. Nunca deslocar o solo usando a talhadeira como alavanca.*
- c) *Se o solo retirado do furo apresentar uma fração retida na peneira de $\frac{3}{4}$ " superior a 20 % , deve ser repetido o ensaio para confirmação do resultado.*
- d) *Para a determinação da umidade em laboratório, usar uma amostra de, no mínimo, 100 g para solos coesivos, e 500 g para solos grossos;*
- e) *O ensaio só pode ser feito com ausência de vibrações oriundas de tráfego ou equipamentos, devendo o tráfego ser interrompido durante sua execução.*
- f) *Durante o corte do buraco no leito da estrada e depois no ato de abertura do funil não poderá haver deslocamento da bandeja;*
- g) *Este controle de densidade deve ser feito em diversas seções da estrada em distâncias de no mínimo 25 metros alternadamente no centro e nos bordos.*
- h) *Algumas normas aconselham excluir do buraco feito na pista o volume do pedregulho retido na peneira de 4,8 mm.*

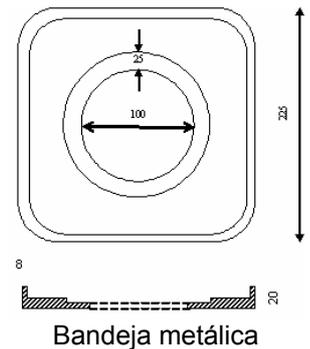
ANEXO 3: MÉTODO DO ÓLEO GROSSO

É o segundo método mais empregado e, na essência, é igual ao do frasco de areia. Apenas a areia é substituída por óleo grosso que é derramado de uma proveta graduada. Alguns empreiteiros argumentam contra este método, dizendo que uma camada mal compactada absorverá óleo, e, portanto, o volume calculado do buraco parecerá maior e a densidade menor. Deve ser preferido, se houver condições, no subleito e nas camadas siltosas ou argilosas quando nas paredes da cavidade onde se realiza o ensaio houver partículas de agregados salientes.

REFERÊNCIAS: ME 037 / 94 ME 037/71 (DNER)

APARELHAGEM:

- Proveta de vidro incolor, com capacidade de 1000 ml, graduada em 1 ml;
- Bandeja metálica (orifício central: 10 cm de diâmetro);
- Balanças sensíveis a 1 g e 0,1 g;
- Martelo de 1 kg;
- Pá de mão;
- Talhadeira de aço com comprimento 30 cm;
- Estufa capaz de manter temperatura entre 105°C e 110°C ou instrumental que permita a determinação da umidade;
- Reservatório para 5 litros de óleo;
- Óleo SAE 40.



ENSAIO

- limpar a superfície do solo onde será feita a determinação, tornando-a, tanto quanto possível, plana e horizontal;
- colocar a bandeja nessa superfície e fazer uma cavidade cilíndrica no solo, limitada pelo orifício central da bandeja e com a profundidade em torno de 10 a 15 cm;
- recolher todo o solo extraído da cavidade, pesando-o (MH) ;
- tomar, imediatamente, 100g deste solo e determinar seu teor de umidade;
- encher a proveta com óleo SAE 40, até o traço indicativo de 1000 ml (V1);
- verter o óleo da proveta na cavidade, rapidamente, e determinar o volume do óleo (V2) que permaneceu na proveta.

CÁLCULOS E RESULTADO

Volume da cavidade: $V = V1 - V2$

Massa específica (aparente) do solo úmido, “*in situ*”:

$$\rho_h = M_h / V$$

onde M_h é o volume do solo úmido retirado da cavidade;

Massa específica (aparente) do solo seco, “*in situ*”:

$$\rho_s = 100 \rho_h / (100 + h)$$

onde h é a percentagem de umidade do solo retirado da cavidade ;

Grau de Compactação:

$$GC = (\rho_s / \rho_{SL}) \times 100$$

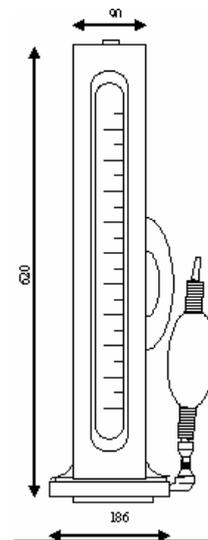
onde ρ_{SL} é a massa específica (aparente) seca máxima do solo, obtido em laboratório, durante o ensaio de compactação, de acordo com o método exigido para a obra.

ANEXO 4: MÉTODO DO BALÃO DE BORRACHA

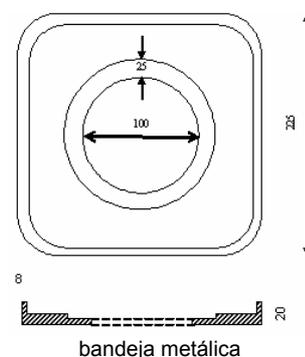
REFERÊNCIAS: ME 036/94, ME 036/71, PRO 101/93 (DNER)

APARELHAGEM

1. Conjunto balão de borracha;
2. Proveta de vidro incolor (1,5 litros) graduada em 5 ml, com tubo metálico de proteção com abertura para leituras e base metálica com dispositivos para adaptar o balão de borracha e o registro da bomba destinada a aumentar ou diminuir a pressão no interior da proveta;
3. bandeja metálica com orifício central de 10 cm de diâmetro, para adaptação da base;
4. balão de borracha;
5. pá de mão;
6. balança com capacidade 10 kg, sensível a 1 g;
7. talhadeira de aço com 30 cm de comprimento;
8. martelo de 1 kg;
9. estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C, ou outro instrumental para determinar o teor de umidade;
10. balança (cap. 1 kg, sensível a 0,1 g);
11. reservatório para 5 litros de água;



Proveta de vidro com protetor metálico e bomba



bandeja metálica

CALIBRAÇÃO DO APARELHO

- a) encher a proveta graduada até a última referência da escala;
- b) montar o aparelho sobre uma superfície plana e horizontal;
- c) ligar a bomba de borracha à base do aparelho;
- d) abrir o registro da base do aparelho;
- e) exercer pressão no interior da proveta, acionando a bomba de borracha, até ser obtida leitura constante L (indicando volume igual a zero);
- f) inverter a posição da bomba de borracha no dispositivo da base, acionando-a de modo a produzir vácuo no interior da proveta, a fim de promover o retorno do balão de borracha ao interior da proveta;
- g) fechar o registro.

ENSAIO

1. limpar a superfície do solo onde será feita a determinação, tornando-a, tanto quanto possível, plana e horizontal;
2. colocar a bandeja nessa superfície e fazer uma cavidade cilíndrica no solo, limitada pelo orifício central da bandeja e com a profundidade que atenda ao estabelecido na tabela a seguir;

Tabela 1 – Profundidade e volume da cavidade em função do diâmetro máximo das partículas de solo

Diâmetro máximo das partículas do solo (peneira)	Volume mínimo da cavidade (cm ³)	Altura mínima da cavidade (cm)
Nº 4	450	6
½ polegada	600	8
¾ polegada	700	9
1 polegada	750	10

3. recolher o solo extraído da cavidade, pesando-o. (Mh);
4. tomar, imediatamente após a pesagem uma porção de solo e determinar a umidade (h)
5. instalar o aparelho no rebaixo da bandeja, abrir o registro, acionar a bomba de borracha de modo a produzir pressão sobre a água até que o nível desta, na proveta, fique constante, indicando que o balão de borracha, cheio de água, ocupou todo o volume da cavidade. Fechar o registro e anotar a leitura (L);

6. Abrir o registro, inverter a posição da bomba de borracha, acionando-a de modo a produzir pressão no interior da proveta, até que o balão volte para o interior da proveta;

Somente se admite volume abaixo do mínimo especificado na tabela 1, no caso em que a espessura da camada ensaiada não permita a obtenção do volume mínimo especificado;

A borracha do balão para medida de volume da cavidade deve ser adequada para medir volume até 1 500 cm³, sem se romper.

CÁLCULOS E RESULTADOS

Volume da cavidade:

$$V = L_1 - L_2$$

Massa específica aparente do solo úmido, “in situ”:

$$\rho_h = M_h / V$$

onde M_h é a massa do solo úmido retirado da cavidade;

Massa específica aparente do solo seco, “in situ”:

$$\rho_s = \rho_h \times 100 / [100 + h]$$

onde h é o teor de umidade do solo retirado da cavidade ;

Grau de Compactação:

$$GC = 100 [\rho_s / \rho_{SL}]$$

onde ρ_{SL} é a massa específica aparente máxima do solo, obtida em laboratório de acordo com o método exigido para a obra.

Exercícios

- Compare as vantagens e desvantagens dos métodos de determinação do peso específico aparente, informando para que tipo de solo algum(s) deles não deveria ser usado.*
- Na impossibilidade de qualquer outra alternativa, e com o equipamento do processo do óleo, você poderia utilizar água na determinação do peso específico aparente de uma argila pura compactada? E se o solo fosse grosso? Analise situações particulares.*
- Controlando pelo método do óleo grosso a compactação de um aeroporto, você executou um furo do qual foi retirado 2,2 kg de solo com umidade 5 %, e gastou 0,8 l de óleo para preenchê-lo. A densidade do óleo utilizado era de 1,7 kg por cm³. No laboratório, você executou o ensaio Proctor Modificado, conseguindo com ele um peso específico máximo de 2 900 g/cm³ a uma umidade (ótima) de 9 %. Admitindo uma tolerância de 3% para o grau de compactação, o trabalho está aceitável ou deverá ser recusado?*
- As amostras A, B, C, e D foram colhidas por cilindro de cravação com 1000 cm³ e 400 g de peso, calibrados e atendendo às normas brasileiras. Em todas as amostras, a densidade dos grãos foi 2,650. Determine para cada amostra:
Peso específico aparente, peso específico aparente seco, teor de umidade natural, índice de vazios, porosidade, grau de saturação, peso específico submerso.*

<i>Pesos em gramas</i>	<i>Amostra A</i>	<i>Amostra B</i>	<i>Amostra C</i>	<i>Amostra D</i>
<i>Amostra + cilindro</i>	1820	2350	1750	2330
<i>Amostra seca (g)</i>	1210	1640	665	1720

- Em que condições deve ser utilizado cada um dos processos apresentados?*

Capítulo 8 - TEXTURA e ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Embora a NBR 6502 defina textura como “conjunto de características de forma, dimensão e arranjo dos elementos mineralógicos constituintes do solo”, neste texto consideraremos TEXTURA como a relação entre as dimensões das partículas de um solo e as proporções relativas com que as partículas com essas dimensões ocorrem no solo. A medida da textura é feita pela análise granulométrica.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

OBJETIVO DA ANÁLISE: Obter as coordenadas que permitam traçar a curva granulométrica.

CURVA GRANULOMÉTRICA é o gráfico semilogarítmico, cujos pontos representam: em ordenadas, em porcentagem, a massa dos grãos ou partículas de dimensões inferiores às indicadas, por seus logaritmos, nas abscissas. A escala das ordenadas é crescente, de baixo para cima e a das abscissas cresce a partir da esquerda.

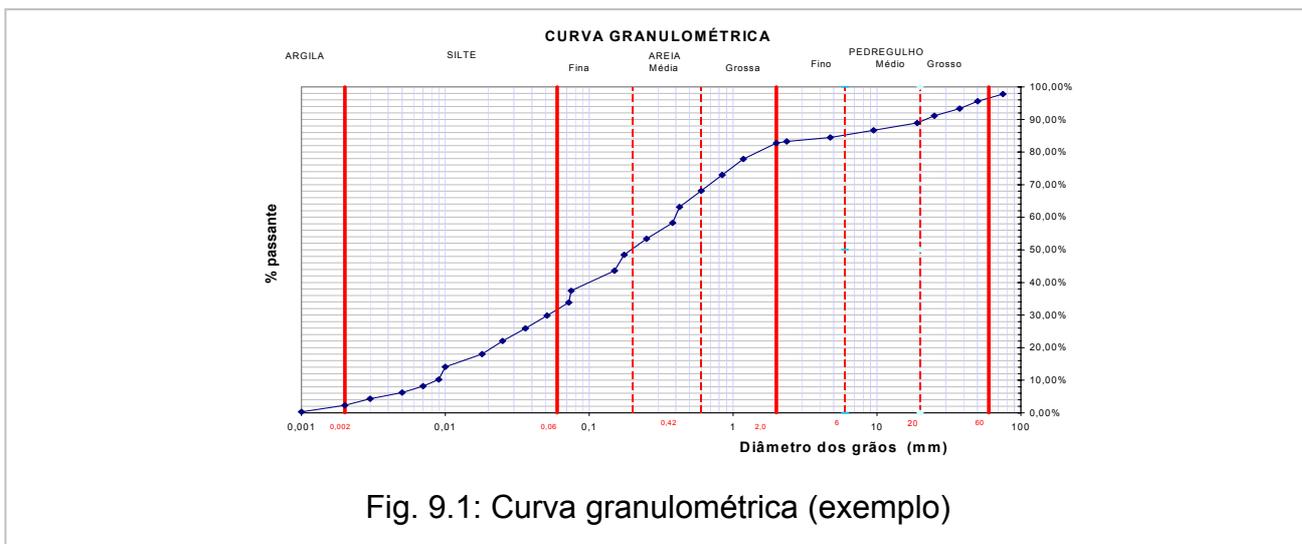
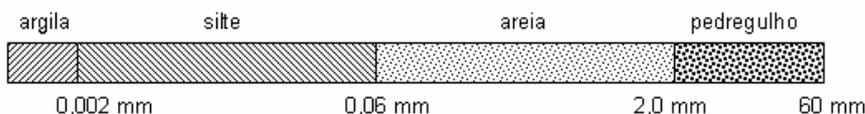


Fig. 9.1: Curva granulométrica (exemplo)

Neste texto, utilizaremos a escala granulométrica adotada pela ABNT 6502/95 na nomenclatura das partículas.



Atenção: são utilizados os mesmos termos (argila, silte, areia) para partículas em certa faixa de tamanhos e para solos que tem seu comportamento dominante devido à presença (atuante) destas partículas. Isto é motivo de confusão inicial para iniciantes nesta ciência.

A curva granulométrica permite distinguir tipos de textura diferentes: na figura 9.1 é identificado um solo bem graduado, com distribuição contínua. Nas figuras 9.2 a 9.4, outros tipos de textura são apresentados como exemplos.

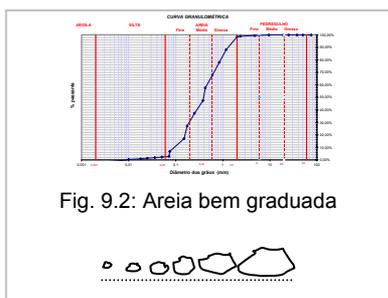


Fig. 9.2: Areia bem graduada

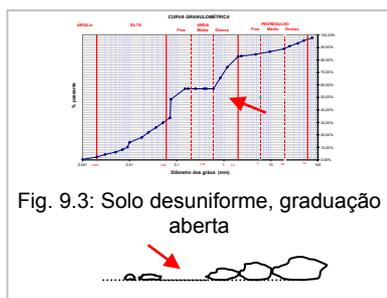


Fig. 9.3: Solo desuniforme, graduação aberta

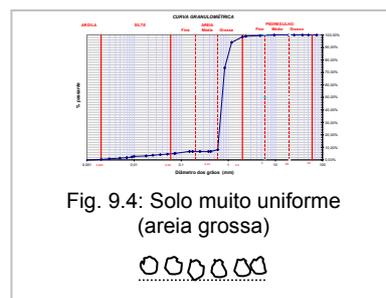


Fig. 9.4: Solo muito uniforme (areia grossa)

Obs: A classificação granulométrica de um de solo deve ser feita pelo comportamento do solo, não pela predominância de grãos de um determinado tamanho.

Para auxiliar a identificação das características de uniformidade e graduação dos solos, são definidos os seguintes índices, obtidos diretamente do gráfico (ver figura 9.5):

DIÂMETRO EFETIVO (D10 ou De): É o diâmetro correspondente a 10% em peso total de todas as partículas menores que ele.

O valor de D10 fornece uma das informações necessárias para o cálculo da permeabilidade, utilizado no dimensionamento de filtros e drenos.

D30 e D60: diâmetros correspondentes a 30% e 60% em peso total das partículas menores que eles.

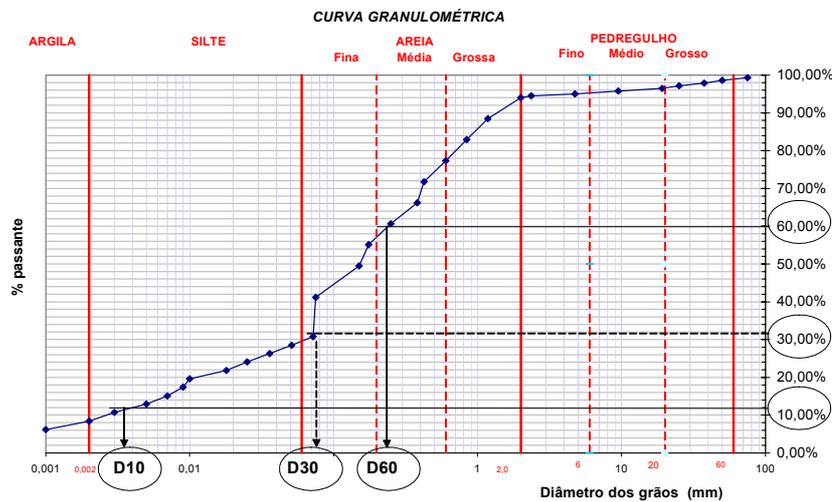


FIG 9.5: como se obtém D10, D30 e D60.

GRAU DE UNIFORMIDADE (U):

O grau de uniformidade indica a falta de uniformidade, sendo tanto menor quanto mais uniforme for o solo. *(Milton Vargas prefere chamá-lo grau de desuniformidade, e simbolizá-lo por D)*

$$U = D60 / D10$$

Quanto menor, maior é a inclinação da curva granulométrica, e o solo é melhor graduado, segundo a seguinte classificação:

- $U < 5 \rightarrow$ muito uniforme
- $5 < U < 15 \rightarrow$ uniformidade média
- $U > 15 \rightarrow$ desuniforme

Alguns autores consideram solos uniformes os que têm grau de uniformidade menor que 3, e desuniformes os que têm $U > 3$. Também prefiro esta última consideração.

COEFICIENTE DE CURVATURA (CC):

$$CC = (D 30)^2 / (D10 \cdot D60)$$

Solos bem graduados têm $1 < CC < 3$.

DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

O processo de determinação da composição granulométrica de um solo envolve três fases:

1. Obter uma amostra representativa;
2. Obter a dispersão das partículas da amostra de forma a conseguir a individualização das suas partículas;
3. Determinar a porcentagem das partículas com dimensões entre limites determinados.

Neste texto, é pressuposto que uma amostra de tamanho suficiente para a execução da análise granulométrica foi corretamente colhida no campo e foi preparada conforme as especificações da NBR6457 para os ensaios de caracterização (secagem ao ar, destorroamento). Após ser feita sua homogeneização dela é retirada quantidade suficiente para a execução dos diversos ensaios de caracterização. Um desses ensaios é a análise granulométrica, e o tamanho da amostra para este ensaio será detalhado mais adiante.

A análise granulométrica de solos pode ser realizada por peneiramento ou por uma combinação de peneiramento e sedimentação.

NORMAS PARA CONSULTA

NBR 7181 – Ensaio de Granulometria

NBR 5734 – Especificação de peneiras para ensaio

NBR 6457 – Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaios de caracterização

NBR 6508 - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica – Método de ensaio

APARELHAGEM PARA O ENSAIO DE GRANULOMETRIA:

1. Estufa capaz de manter a temperatura entre 60° C e 65° C e entre 105°C e 110°C;
2. Balanças que permitam pesar nominalmente 200 g, 1,5 kg, 5 kg e 10 kg, com resoluções de 0,01g, 0,1g, 0,5g e 1g, respectivamente, e sensibilidades compatíveis;
3. Recipientes adequados, tais como dessecadores, que permitam esfriar amostras sem absorção de umidade;
4. Aparelho de dispersão, com hélices substituíveis e copo munido de chicanas (a rotação da hélice do aparelho não deverá ser inferior a 9.000 rpm);
5. Proveta de vidro, com cerca de 450 mm de altura, com traço de referência indicando 1.000 cm³ a 20° C;
6. Proveta de vidro, c/ capacidade de 250 cm³ e resolução de 2 cm³;
7. Béquer de vidro, com capacidade de 250 cm³;
8. Tanque para banho, com dimensões adequadas à imersão das provetas até o traço de referência, capaz de manter a temperatura da suspensão aproximadamente constante durante a fase de sedimentação. *Este banho é dispensável quando o ensaio for efetuado em ambiente com temperatura aproximadamente constante.*
9. Densímetro de bulbo simétrico, calibrado a 20°C com resolução de 0,001, graduado de 0,995 a 1,050;
10. Termômetro graduado de 0°C a 50°C, com resolução 0,1° C;
11. Relógio com indicação de segundos;



Estufa



Dessecador

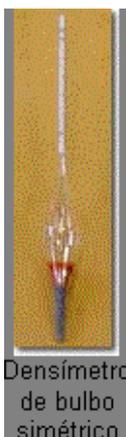


Aparelho de dispersão

12. Agitador mecânico de peneiras com dispositivo para fixação de até seis peneiras, inclusive tampa e fundo;
13. Escova de cerdas metálicas;
14. Baqueta (bastão) de vidro;
15. Bisnaga de borracha (piceta);
16. Peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8, 2,0 mm (peneiramento grosso), 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15, e 0,075 mm (peneiramento fino), conforme a NBR 5734;



Piceta ou bisnaga



Densímetro de bulbo simétrico



peneiras



agitador de peneiras

EXECUÇÃO DO ENSAIO (NBR 7181/84)

1. Preparação da amostra

Por quartearamento, tomar a quantidade* de amostra preparada com secagem prévia, de acordo com a NBR 6457.

*Tabela 9.1: Quantidade de amostra para análise granulométrica

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada por observação visual (mm)	Quantidade mínima a tomar (kg)
<5	1
5 a 25	4
>25	8

2. Operações preliminares

2.1 Determinar com as resoluções da Tabela 1 abaixo, a massa amostra seca ao ar e anotar como MT.

Tabela 1 – Balança para a determinação do peso da amostra seca ao ar

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra [mm]	Balança a ser utilizada	
	Capacidade Nominal [kg]	Resolução [g]
> 25	10	1
5 a 25	5	0,5
< 5	1,5	0,1

2.2. Passar este material na peneira de 2,0 mm, tomando-se a precaução de desmanchar no almofariz todos os torrões eventualmente ainda existentes, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que a abertura da malha.

Basicamente, o ensaio será dividido em três partes, o que pressupõe a existência das seguintes amostras:

- a) todo o material retido na peneira (# 10) de 2,0 mm;
- b) material que passa na peneira 2,0 mm, do qual:

- b.1) cerca de 100 g são usados para determinação da umidade, executada com três amostras de pelo menos 30 g ;
- b.2) 120 g, no caso de solos arenosos, ou cerca de 70 g, no caso de solos siltosos ou argilosos, para o ensaio de sedimentação e/ou peneiramento fino.

3. Peneiramento do material grosso:

Lavar a parte retida na peneira de 2,0 mm (#10) a fim de eliminar o material fino aderente e secar em estufa a 105°–110°C, até constância de massa.

- 3.1 Utilizando-se o agitador mecânico, passar esse material nas peneiras de 50, 38, 25,19, 9,5, 4,8 e 2,0mm. Anotar com a resolução indicada em 4.2.1 as massas retidas acumuladas em cada peneira. A soma de todas essas massas retidas (ou o retido acumulado na peneira de 2,0 mm) será anotada com MG (massa do material graúdo).

Nota: Quando não se vai fazer o ensaio de sedimentação*, e a determinação da distribuição granulométrica for feita apenas por peneiramento, proceder como se segue com a fração fina:

a) Do material passado na peneira de 2,0 mm, tomar cerca de 120 g. Pesar esse material com resolução de 0,01 g e anotar como Mh. Tomar ainda cerca de 100 g para três determinações de umidade higroscópica [h] , de acordo com a NBR 6457; O valor do fator de correção da umidade deve ser anotado com quatro casas decimais

b) Lavar na peneira de 0,075 mm (n°200) o material assim obtido, vertendo-se água potável à baixa pressão; *(recomenda-se usar junto uma peneira intermediária, como a de 0,25 mm, para não sobrecarregar a peneira n° 200, para aumentar sua durabilidade e evitar transbordamento, com perda de solo.)*

c) Proceder como descrito a partir de (5).

** A decisão de não fazer a sedimentação poderá ser tomada quando se verificar que a proporção do material fino for tão baixa que este material não terá influência significativa no comportamento do solo.*

4. Sedimentação

- 4.1 Do material passado na peneira de 2,0 mm tomar cerca de 120 g, no caso de solos arenosos, ou 70 g, no de solos siltosos e argilosos, para a sedimentação e o peneiramento fino. Pesar esse material com resolução de 0,01 g e anotar como Mh. Tomar ainda cerca de 100 g para três determinações de umidade higroscópica (h) , de acordo com a NBR 6457, o teor de umidade deve ser expresso em porcentagem e calculado com duas casas decimais e o fator de correção com quatro casas decimais;

- 4.2 Transferir o material assim obtido para um béquer de 250 cm³ e juntar, com auxílio de proveta, como defloculante, 125 cm³ de solução de hexametáfosfato de sódio ^[3] com a concentração de 45,7 g do sal por 1 000 cm³ de solução. Agitar o béquer até que todo o material fique imerso e deixar em repouso, no mínimo 12 horas.

[³] A solução de hexametáfosfato de sódio deve ser tamponada com carbonato de sódio até que a solução atinja um pH entre 8 e 9, evitando assim a reversão da solução para ortofosfato de sódio. Em solos para os quais o defloculante e a concentração indicados não forem satisfatórios na dispersão, deve-se investigar o tipo e a dosagem do defloculante mais adequados. São exemplos: polifosfato de sódio (21,6 g por litro de solução), trifosfato de sódio (18,8 g pls), tetra fosfato de sódio (35,1 g pls).

- 4.3 Verter a mistura no copo de dispersão, removendo-se com água destilada, com auxílio da bisnaga, o material aderido ao béquer. Adicionar água destilada até que a hélice fique imersa e submeter à ação do aparelho dispersor durante cerca de quinze minutos ^[4].

[⁴] Solos que contenham grãos susceptíveis de quebra podem ser dispersos em um intervalo de tempo menor.

- 4.4 Transferir a dispersão para a proveta e remover com água destilada, com auxílio da piceta, todo o material aderido ao copo. Juntar água destilada até atingir o traço correspondente a 1 000 cm³; em seguida, colocar a proveta no tanque para banho ou em local com temperatura aproximadamente constante. Agitar frequentemente a baqueta de vidro para manter, tanto quanto possível, as

partículas em suspensão. Logo que a dispersão atinja a temperatura de equilíbrio, tomar a proveta e tampando-lhe a boca com uma das mãos, executar, com auxílio da outra, movimentos enérgicos de rotação, durante 1 minuto, de forma que a boca da proveta passe de cima para baixo e vice-versa.

- 4.5 Imediatamente depois de terminada a agitação, colocar a proveta sobre uma mesa, anotar a hora exata do início da sedimentação e mergulhar cuidadosamente o densímetro na dispersão. Efetuar as leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação (t) de 0,5, 1 e 2 minutos ^[5]. Retirar lenta e cuidadosamente o densímetro da dispersão. Se o ensaio não estiver sendo realizado em local de temperatura constante, colocar a proveta no banho onde permanecerá até a última leitura. Fazer as leituras subseqüentes a 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas, a contar do início da sedimentação. *Se espuma resultante da agitação prejudicar as primeiras leituras, pulverização com éter a faz desaparecer sem prejudicar o ensaio.*

^[5] *Recomenda-se repetir as três primeiras leituras. Para tanto, agitar novamente a proveta, conforme descrito em (4.3.4) e refazer as leituras para os tempos de 0,5, 1, e 2 minutos.*

- 4.6 Cerca de quinze a vinte segundos antes de cada leitura, mergulhar cuidadosa e lentamente o densímetro na dispersão. Todas as leituras devem ser feitas na parte superior do menisco, com interpolação de 0,0002, após o densímetro ter ficado em equilíbrio. Assim que uma dada leitura seja efetuada, retirar o densímetro da dispersão e colocá-lo em uma proveta com água limpa, à mesma temperatura da dispersão.
- 4.7 Após cada leitura, excetuadas as duas primeiras, medir a temperatura de dispersão, com resolução de 0,1° C.
- 4.8 Realizada a última, verter o material da proveta na peneira de 0,075 mm [N°200], remover com água de todo o material que tenha aderido às suas paredes e efetuar a lavagem do material na peneira mencionada, empregando-se água potável à baixa pressão.

5. Peneiramento do material fino:

Secar o material retido na peneira de 0,075 mm (n°. 200) em estufa, à temperatura de 105°–110° C até constância de massa, e, utilizando-se o agitador mecânico, passar nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15, 0,075 mm. ^[6] Anotar com resolução de 0,01g as massas retidas acumuladas em cada peneira.

^[6] *No caso de solos muito uniformes, pode ser necessário utilizar, tanto no peneiramento fino como no grosso, peneiras intermediárias àquelas indicadas.*

6. CÁLCULOS

6.1 Massa total da amostra seca

Calcular a massa total da amostra seca, utilizando-se a expressão:

$$MS = (MT - MG).fc + MG$$

onde:

MS = massa total da amostra seca;

MT = massa da amostra seca ao ar;

MG = massa do material seco acumulado retido na peneira de 2,0 mm;

fc = fator de correção da umidade = $100 / (100 + h)$;

h = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2 mm.

- 6.2 Calcular as porcentagens de materiais que passam nas peneiras de 50, 38, 19, 9,5, 4,8, e 2,0 mm, utilizando a expressão:

$$Qg = 100 (Ms - Mi) / Ms$$

onde:

Qg = porcentagem de material passado em cada peneira

Ms = massa total da amostra seca

Mi = massa do material retido acumulado em cada peneira

6.3 Porcentagens do material em suspensão

Calcular as porcentagens correspondentes a cada leitura do densímetro, referidas à massa total da amostra, utilizando-se a expressão

$$Qs = N.\delta.V.\delta c.Lc / [(\delta - \delta d).Mh.fc]$$

onde:

Qs = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro ;
N = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm, calculado como indicado em (6.2);
 δ = massa específica dos grãos do solo, em g/ cm³ ;
 δd = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/ cm³ ;
V = volume da suspensão, em cm³ ;
 δc = massa específica da água, à temperatura de ensaio, em g/cm³ ;
Lc = leitura corrigida = L - Ld + (erro causado pelo menisco)*;
L = leitura do densímetro na suspensão;
Ld = leitura do densímetro no meio dispersor (ver anexo), na mesma temperatura da suspensão, durante o ensaio;
Mh = massa do material úmido submetido à sedimentação, em g ;
h = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm .

Para efeito de cálculo, considerar: $\delta d = 1 \text{ g/cm}^3$; $V = 1\ 000 \text{ cm}^3$ e $\delta c = 1 \text{ g/cm}^3$

6.4 Calcular o diâmetro máximo das partículas em suspensão ⁸, no momento de cada leitura do densímetro, utilizando-se a fórmula de Stokes:

$$\varnothing = [1800 \eta . a / \{t.(\delta-\delta d)\}]^{0,5}$$

onde:

\varnothing = diâmetro máximo das partículas, em mm ;
 η = coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g.s/cm² ;
a = altura de queda das partículas, com resolução de 0,1 cm, correspondente à altura do densímetro, em cm (ver Anexo);
t = tempo de sedimentação, em segundos;
 δ = massa específica dos grãos do solo, determinada de acordo com a NBR 6508, em g/ cm³ ;
 δd = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/cm³ ;

Para efeito de cálculo, considerar $\delta d = 1,000 \text{ g/cm}^3$ e η correspondente ao coeficiente de viscosidade da água (ver tabela 2);

[8] *O diâmetro máximo das partículas em suspensão, no momento de cada leitura do densímetro, pode também ser determinado pelo método gráfico de Casagrande.*

TABELA 2 – Viscosidade da água (valores em 10⁻⁶ g.s/cm²)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	13,36	12,99	12,63	12,30	11,98	11,68	11,38	11,09	10,81	10,54
20	10,29	10,03	9,80	9,56	9,34	9,13	8,92	8,72	8,52	8,34
30	8,16	7,98	7,82	7,66	7,50	7,35	7,20	7,06	6,92	6,79

Para temperaturas intermediárias, obter a viscosidade a água por interpolação linear.

(O valor da viscosidade da água a 35° está ressaltado por haver erro na NB7181)

6.5 Calcular as porcentagens dos materiais que passam nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075mm, utilizando-se a expressão

$$Q_f = N.(M_h.fc - M_i)/(M_h.fc)$$

onde:

Qf = porcentagem de material passado em cada peneira;
Mh = massa do material úmido submetido ao peneiramento fino ou à sedimentação, conforme o ensaio tenha sido realizado apenas por peneiramento ou por combinação de peneiramento e sedimentação, respectivamente;
fc = fator de correção = 100 / (100 + h);
h = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm;
Mi = massa do material retido acumulado em cada peneira;
N = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm, calculado conforme indicado em 5.2 .

7. RESULTADOS

O resultado final deve ser apresentado graficamente, dispondo-se em abscissas os diâmetros das partículas, em escala logarítmica, e em ordenadas as porcentagens das partículas menores do que os diâmetros considerados, em escala aritmética.

Observações: *Observando que, na fórmula para o cálculo da porcentagem de partículas em suspensão os valores Ps, N, V, δ e δc são constantes, e chamando (L - Ld+ r) de Lc (Leitura corrigida), calcular o*

fator $Q / Lc = N \times \delta / (Ps (\delta - 1))$ permitirá uma interessante simplificação na ficha de cálculo, diminuindo a possibilidade de erro humano, pois esse fator é constante. Mais tarde obteremos Q apenas multiplicando o fator constante Q/Lc por cada um dos valores Lc .

(r) é a correção devida ao erro de leitura devido ao menisco, e tem por ordem de grandeza 0,0012. A correção será feita quando as leituras densimétricas no meio dispersor, durante a calibração, são feitas na base do menisco.

ANEXO 1 – CALIBRAÇÃO DO DENSÍMETRO

1. Para cada densímetro, construir a curva de variação das leituras L_d , no meio dispersor, em função da temperatura. Para tanto, diluir em proveta (de um litro), 125 cm³ da solução indicada em 4.3.2, em 875 cm³ de água destilada;
2. Com a proveta imersa em um recipiente com água, provido de dispositivo para controle de temperatura, variar a temperatura do meio dispersor e obter diversas leituras da densidade, em uma faixa compreendida entre 10° C e 35° C, as quais devem ser feitas no limite inferior do menisco.
3. Com os valores obtidos construir uma curva, como exemplificado na figura seguinte.

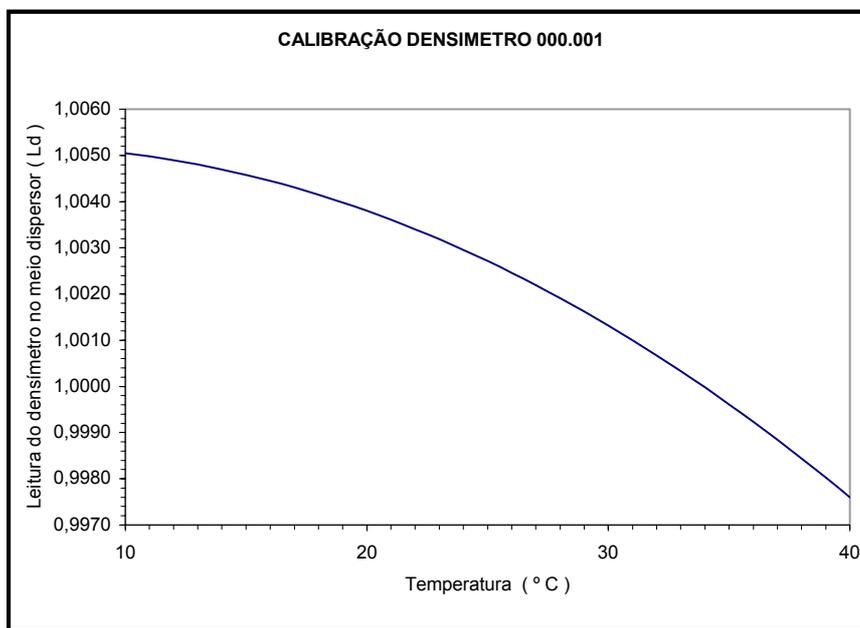
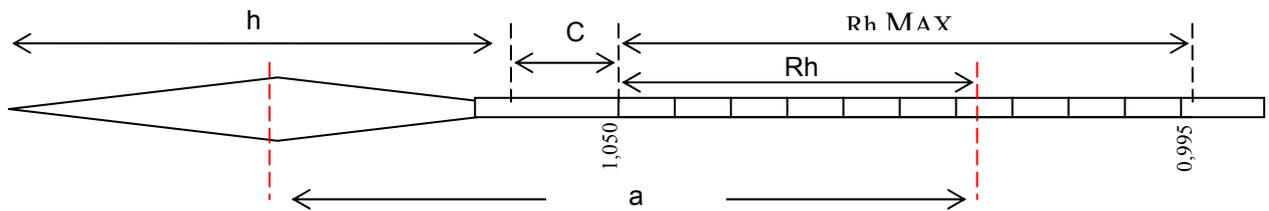


Figura 6 – Curva de calibração do densímetro

O uso de uma planilha eletrônica pode simplificar bastante a construção da curva de calibração, ou mesmo substituí-la por uma tabela ou pela identificação da equação da curva. As correções por processo computacional podem contribuir bastante na eliminação do erro humano na leitura e interpretação do gráfico, aumentando a precisão dos cálculos.

Anexo 2: VARIAÇÃO DA ALTURA DE QUEDA DAS PARTÍCULAS EM FUNÇÃO DA LEITURA DO DENSÍMETRO

(do artigo Calibração do densímetro, de Avelino Gonçalves Koch Torres)



1. Para cada densímetro, construir as curvas de variação da altura de queda das partículas, a e a' , em função da leitura do densímetro. Para tanto, é necessário determinar a distância a , do centro de volume do densímetro a qualquer ponto de leitura na escala do densímetro.

Para facilitar, projeta-se sobre um papel milimetrado com a haste paralela à folha e mede-se a distância ($Rh \text{ MAX}$) da marca de graduação mais baixa (1,050) à marca de graduação mais alta (0,995). Sendo a curva essencialmente uma reta, poderemos desenhar a reta de correção das leituras a partir desses dois pontos.

Para a leitura extrema inferior (1,050), $Rh = 0$ e $a1 = c + h/2$.

Para a leitura extrema superior (0,995), Rh é a máxima, e $a2 = Rh \text{ MAX} + c + h/2$

2. Com os valores obtidos construir uma curva (ou tabela) correlacionando as alturas de queda, a , com as leituras do densímetro, como exemplificado na figura 6. Essa curva é válida para as três leituras efetuadas nos dois primeiros minutos de ensaio, quando o densímetro permanece mergulhado na dispersão.

3. Para as leituras subseqüentes construir uma curva correlacionando as alturas de queda corrigidas, a' , com as leituras do densímetro, como exemplificado na figura 6, utilizando a expressão

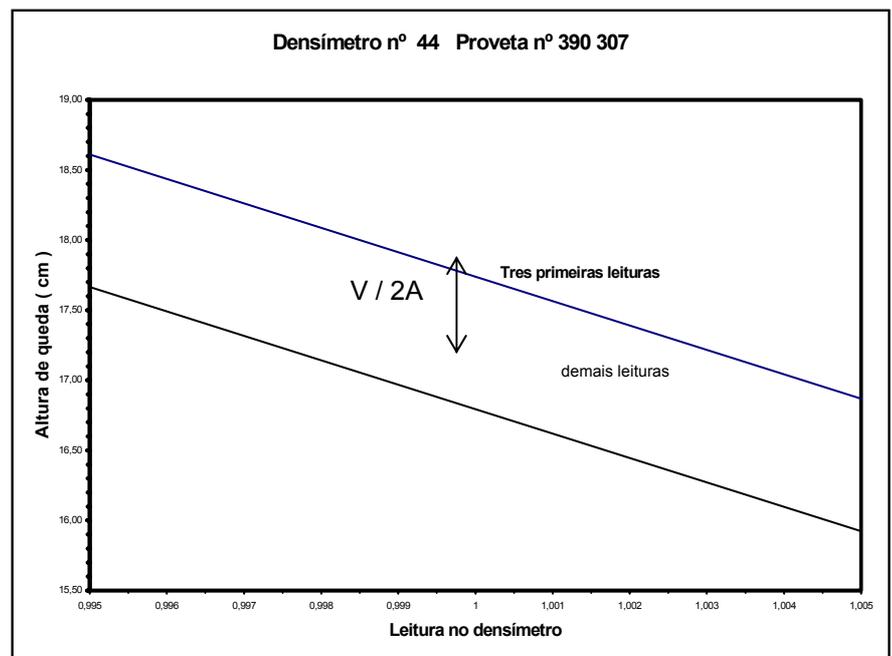
$$a' = a - (V / 2A)$$

onde:

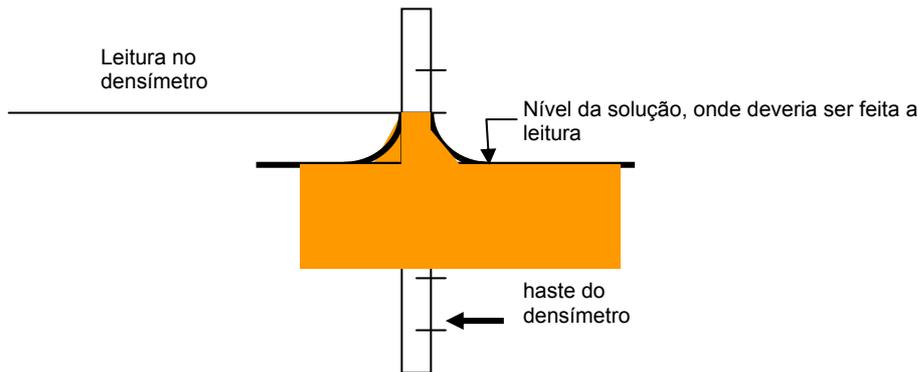
V = volume da parte imersa do densímetro, quando imerso em água em uma proveta graduada (esse valor é numericamente igual ao peso do densímetro);

A = área da seção interna da proveta, obtida dividindo-se um volume conhecido (em cm^3) pela distância medida entre os traços que delimitam na proveta a esse volume.

Durante as três primeiras leituras da fase de sedimentação (executadas aos 30 segundos, 1 e 2 minutos), a superfície livre da solução permanece estável. Antes das leituras subseqüentes, o densímetro é retirado nos intervalos das leituras e só é colocado na solução 20 segundos antes das mesmas, e as partículas percorrem um espaço (altura de queda) menor. A redução de altura da superfície livre da solução é V/A , e o trajeto das partículas até a altura do centro de gravidade do densímetro passa a ter, em média, comprimento $a - (V/A)/2$. Daí o fator de correção $-(V/2A)$, que reduz o valor das leituras feitas após a terceira.



ERRO DEVIDO AO MENISCO, NÃO ASSINALADO NA NBR 7181:



As leituras do densímetro, durante o ensaio, são feitas na parte superior do menisco, por causa da turbidez da solução. Isto provoca um erro negativo de leitura da ordem de grandeza de 0,0012. Podemos diminuir esse erro, somando o valor 0,0012 ao resultado de $(L-L_d)$, no numerador da fórmula de percentagem do material em suspensão, Q_s .

Exemplo:

$L = 1,023$, $L_d = 1,012$, $\delta = 2,730$, $N = 60\%$, $M = 70$ g, $h = 4\%$

$$Q\% = N \cdot \delta \cdot V \cdot dc \cdot (L - L_d + 0,0012) / ((\delta - 1) \cdot M \cdot h \cdot fc)$$

$$Fc = 100 / (100 + h) = 100 / 104 = 0,9615$$

$$Q\% = 60\% \cdot 2,730 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot (1,023 - 1,012 + 0,0012) / ((2,730 - 1) \cdot 70 \cdot 0,9615)$$

Observação: A norma apresenta a fórmula de Stokes para o cálculo da percentagem das partículas em suspensão mas permite, por causar erro desprezível, que os valores δ_d e δ_c sejam, para efeito de cálculo, considerados como iguais a 1,000 g/cm.

DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÁXIMO DAS PARTÍCULAS PELO NOMOGRAMA DE CASAGRANDE

A determinação do diâmetro máximo das partículas pela Lei de Stokes pode ser feita utilizando-se o nomograma elaborado por Casagrande. A figura 7 fornece as indicações necessárias para sua elaboração e a figura 8 apresenta um nomograma já construído. O nomograma, constitui uma representação gráfica da Lei de Stokes, e é adaptável a qualquer densímetro, desde que se tenha feito a correlação entre as alturas de queda e as leituras do densímetro. Esta correlação pode ser feita no próprio nomograma, marcando-se contiguamente à escala das alturas de queda as leituras correspondentes do densímetro, lembrando, porém, que a correlação para as três primeiras leituras, correspondentes aos tempos de sedimentação de 0, 5, 1 e 2 minutos, é diferente daquela para as leituras subseqüentes. A chave para a utilização do nomograma está apresentada na figura 8.

A.3.1.1 Para exemplificar, considerem-se os seguintes dados obtidos em ensaio:

L	[leitura do densímetro]	1,028
t	[tempo de sedimentação]	4 minutos
T	[temperatura da suspensão]	21° C
δ	[massa específica dos grãos do solo]	2,56 g/cm ³

Considere-se ainda que, para o densímetro utilizado no ensaio, as curvas de variação da altura de queda das partículas sejam aquelas exemplificadas na figura 6.

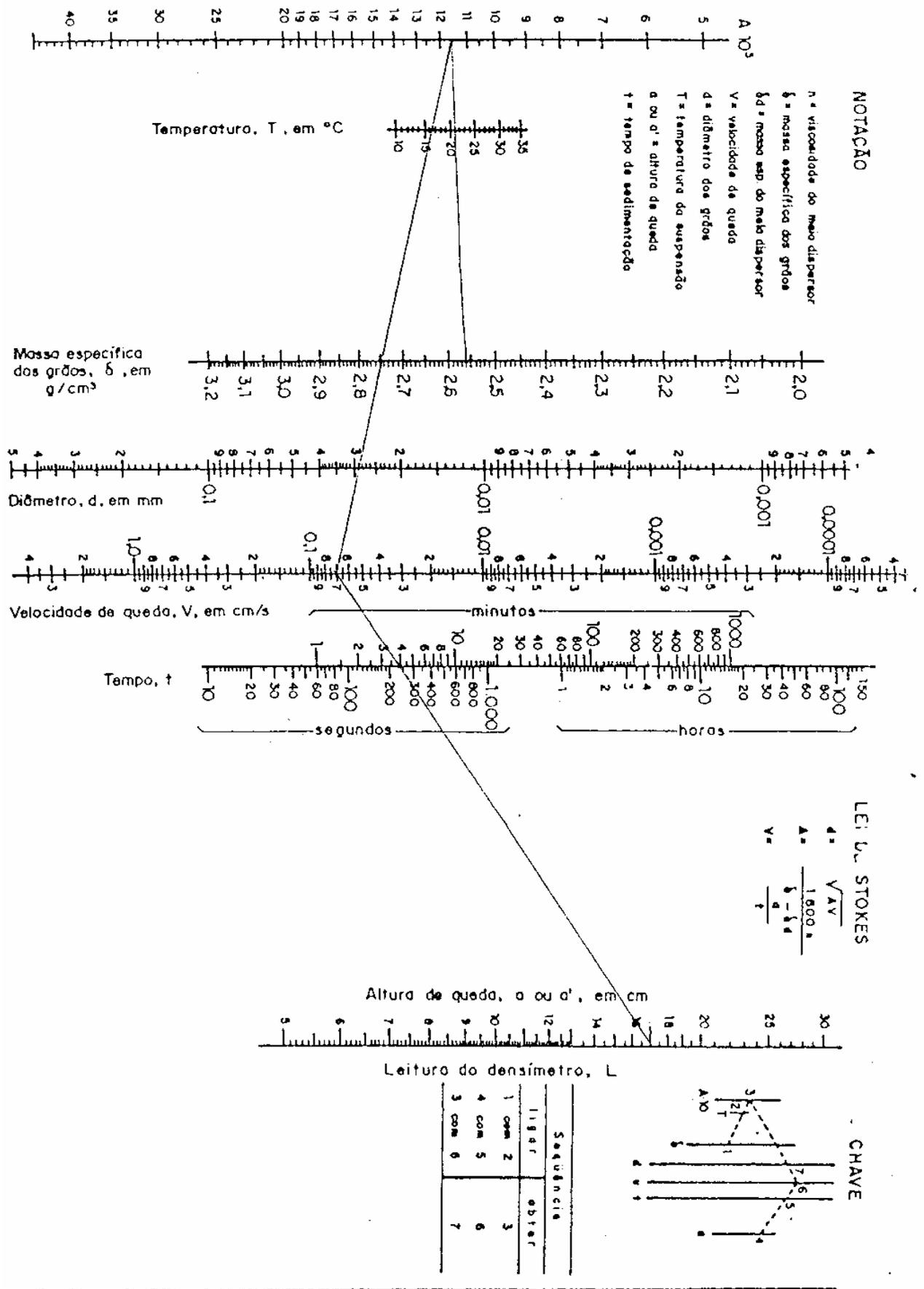
Para $L = 1,028$ obtém-se, portanto, $a' = 17$ cm.

A seguir, proceder como se segue:

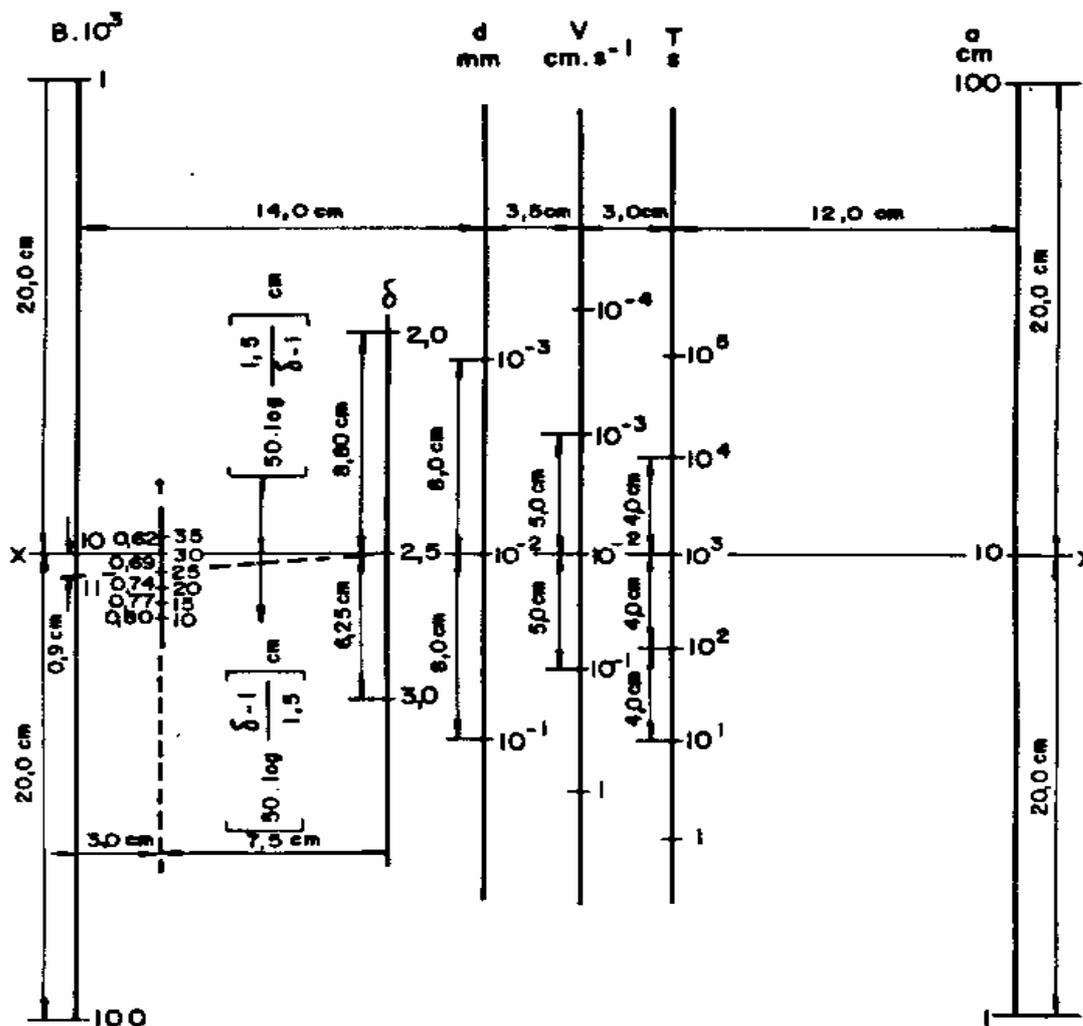
- ligar os valores 2,56 e 21, das respectivas escalas δ e T , por uma reta que cortará a escala A no ponto 11,6;
- outra reta ligando os valores de 17,0 cm e 4 minutos, das respectivas escalas a e t , determinará, na escala V , a velocidade de 0,068 cm/s;
- uma terceira reta, ligando esse valor ao ponto 11,6, na escala A , cortará a escala d no ponto 0,028, que é o diâmetro máximo procurado das partículas em suspensão, para esse exemplo.

Com o advento dos computadores, este nomograma passou a ter apenas valor histórico. Neste trabalho, tem a finalidade de mostrar que, mesmo em época em que os primeiros conceitos da Mecânica dos Solos estavam em discussão, já existia a preocupação em reduzir tanto o trabalho de calcular quanto a probabilidade de cometer erros de cálculo. Não é mais razoável fazer manualmente todos os cálculos do ensaio de granulometria. Por exemplo, planilhas de cálculo podem ser usadas, com grande economia de trabalho. Uma planilha Excel com essa finalidade, está disponível no cd-rom.

Exemplo do Nomograma de Casagrande



MODO DE CONSTRUÇÃO DO NOMOGRAMA DE CASAGRANDE



Fonte: DNER

Em anexo, modelo de ficha de ensaio para o ensaio de granulometria sem sedimentação e exemplo de cálculo do ensaio de granulometria completa (com peneiramento e sedimentação).

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA SEM SEDIMENTAÇÃO

TEOR DE UMIDADE			
Recipiente nº			
Massa da tara com solo úmido			
Massa da tara com solo seco			
Massa da tara			
Massa da água			
Massa do solo seco			
Teor de umidade			
Umidade média (%)			
Fator de correção fc =			

PENEIRAMENTO DO MATERIAL GROSSO:

Peso total da amostra úmida:

MT= _____ g

Peso do pedregulho lavado e seco:

MG= _____ g

Peso total da amostra seca:

MS = (MT-MG). FC + MG = _____ g

PENEIRAS		MASSA DO MATERIAL			% PASSANDO
Número	Abertura mm	Retido (Mi)	Retido acumulado ΣMi	Passante = Ms - ΣMi	
2"	50,80				
1 1/2"	38,10				
1"	25,40				
3/4"	19,10				
1/2"	12,70				
3/8"	9,50				
# 4	4,80				
# 10	2,00				
					N=

PENEIRAMENTO DO MATERIAL FINO:

Massa amostra parcial ÚMIDA Mh= _____ SECA Mfs= _____

PENEIRAS		MASSA DO MATERIAL			PORCENTAGENS	
Número	mm	Retido Mi	Retido Acumulado Σ Mi	MPi= Mfs - ΣMi	% parcial=PP= 100 MPi/Mfs	% total= PP X N
16	1,20					
20	0,84					
30	0,60					
40	0,42					
50	0,30					
60	0,25					
80	0,175					
100	0,15					
200	0,075					

Operador _____ Data: _____

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA COM SEDIMENTAÇÃO

PREPARAÇÃO DO MATERIAL

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

capsula nº			
peso tara+amostra+água			
peso amostra + tara			
peso água			
peso tara			
peso solo seco			
umidade higroscópica			
umidade média			
fator de correção			

AMOSTRA TOTAL

Peso bruto úmido			
Tara			
Peso Total úmido			
peso pedregulho			
peso solo miúdo úmido			
peso solo miúdo sedo			

AMOSTRA PARA SEDIMENTAÇÃO

Peso úmido			
teor de umidade			
Peso seco			

CÁLCULO DO FATOR Q / Lc

$$Q / Lc = \frac{N \cdot \delta \cdot V}{Ps (\delta - 1)} =$$

DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DOS GRÃOS

Picnômetro nº			
P (a + s)			
Temperatura			
P (a)			
P s			
Densidade			
Densidade média			

PENEIRAMENTO DO SOLO GRAÚDO

peneira	M retida	ret. acum	passante	% passa
50,80				
38,10				
25,40				
19,10				
12,70				
9,50				
4,80				
2,00				

PENEIRAMENTO SOLO MIÚDO

Peneira (mm)	Massa retida	massa ret.acum	massa passante	% passa parcial	% passa TOTAL
1,20					
0,84					
0,60					
0,42					
0,30					
0,25					
0,175					
0,15					
0,075					

SEDIMENTAÇÃO

DENSIMETRO Nº

PROVETA Nº

Data	Hora	Tempo em segundos	Temperatura °C	Leitura L	Leitura Calibr. Ld	η	Altura Queda a	Leitura corrigida Lc = L - Ld + ε	Ø max. em suspensão (mm)	% < Ø da amostra total Q
		30 seg								
		1 min								
		2 min								
		4 min								
		8 min								
		15 min								
		30 min								
		1 hora								
		2 h								
		4 h								
		8 h								
		24 h								

Data inicial

Data Final

Operador

Calculista

EXEMPLO/EXERCÍCIO: CÁLCULOS DE UMA GRANULOMETRIA COMPLETA

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE: A amostra para a determinação de h é retirada do material que passa na peneira de 2,0 mm, após homogeneização. Deve ser apresentado o resultado em porcentagem, com pelo menos uma casa decimal. O fator de correção deverá ter, no mínimo, quatro casas decimais.

Como exemplo, supondo $h=5,0\% \rightarrow fc = 100/(100+5) = 0,9524$

AMOSTRA TOTAL E AMOSTRA TOTAL SECA:

A massa do pedregulho (MG) é preferencialmente obtido pela soma (acumulada) das massas retidas nas peneiras iguais e maiores que 2,0 mm (é preciso consultar a planilha de peneiramento do material grosso e somar os retidos naquelas peneiras.).

Neste exemplo, a massa total úmida da amostra é $MT = 1000\text{ g}$

A massa da amostra seca é obtida apenas pela fórmula $MS = (MT-MG) \cdot Fc + MG$

Não é admitida outra forma para o cálculo da massa total seca da amostra. Observe-se que a massa do material grosso não pode sofrer correção devida à umidade.

Obtendo $MG = 40,0\text{g}$ na planilha do peneiramento grosso,

$MS = (1000-40) \cdot 0,9524 + 40 = 954,3$

AMOSTRA PARA SEDIMENTAÇÃO e PENEIRAMENTO FINO

A massa da amostra parcial é integralmente corrigida pelo fator de correção da umidade.

Suponhamos que, por presença significativa de areia tenha sido escolhida uma amostra com $Mh=120\text{ g}$ para a execução da sedimentação: $Mfs = Mh \cdot fc = 120 \cdot 0,9524 = 114,3\text{ g}$

DENSIDADE DOS GRÃOS

A ficha de cálculo da determinação da densidade costuma fazer parte da ficha de ensaio de granulometria porque é utilizado o valor da densidade dos grãos menores que 2,0 mm nos cálculos relativos à fase de sedimentação. Neste exemplo supomos que o ensaio realizado com o picnômetro de 500 ml tenha resultado $\delta = 2,698$. É prática comum adotar para a massa específica o mesmo valor numérico ($\mu=2,698\text{g/cm}^3$).

PENEIRAMENTO DO SOLO GRAÚDO: (calcule os valores que faltam)

$MT = 1000\text{g}$ $Ms = 954,3\text{ g}$

Peneira	retido	ret. acum	massa pass.	% passa
50.80	5	5	949,3	
38.10	5	10	944,3	98,96
25.40	5	15		
19.10	5	20	934,3	
12.70	5	25		
9.50	5	30	924,3	
4.80	5	35		
2.00	5	40		
		↑ MG ↑		↑ N ↑

Observe que o valor da massa de pedregulho (MG) é obtido aqui.(massa retida acumulada na peneira de 2,0 mm).

Cálculo da linha 2, utilizada como exemplo:

$Ret\ ac = 5 + 5 = 10$, $M_{passa} = 954,3 - 10 = 944,3$,

$\% \text{ passante} = 100 \cdot 944,3 / 954,3 = 98,96\%$

(verifique que, neste exemplo, $N = 95,8\%$)

Não se admitem erros de cálculo, mas especialmente o valor da porcentagem passante na peneira de 2,0 mm (N) deve ser cuidadosamente conferido, já que fará parte de todos os cálculos da sedimentação e do peneiramento do material miúdo.

PENEIRAMENTO SOLO MIÚDO – (preencha as lacunas).

$Mh = 120\text{g}$

$Mfs = fc \cdot Mh = 114,3\text{g}$

PENEIRAS		MASSA DO MATERIAL			PORCENTAGENS	
Número	mm	Retido Mi	Retido Acumulado Σ Mi	MPi= MFs - ΣMi	% parcial = 100 MPi/Mfs	% total = %Parcial X N
16	1,20	10	10	104,3	91,16	87,3
20	0,84	5	15	99,3		
30	0,60	5	20	94,3		
40	0,42	5	25			
50	0,30	5	30			
60	0,25	5				
80	0,175	5				
100	0,15	5				
200	0,075	5				

CÁLCULOS DA FASE DE SEDIMENTAÇÃO:

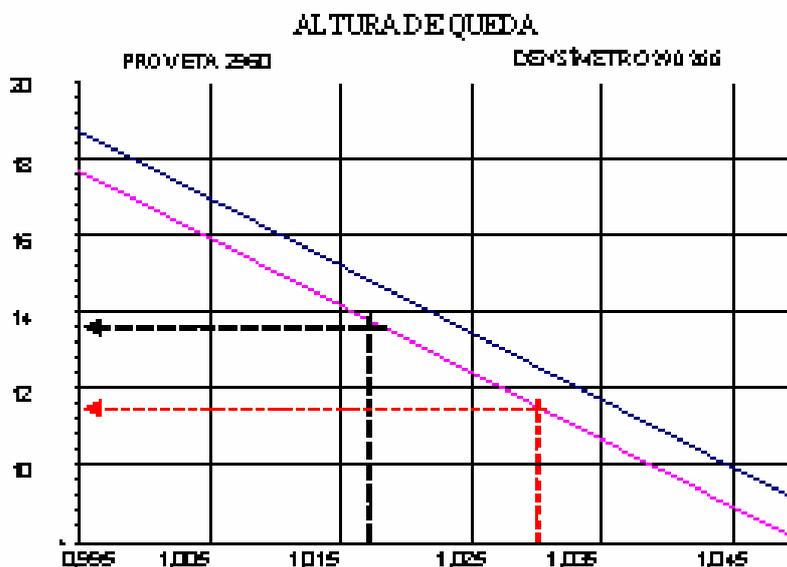
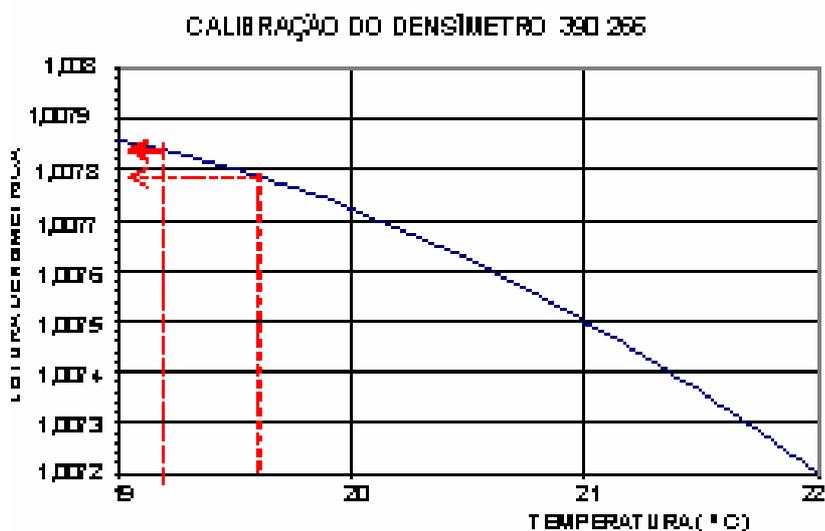
Suponha que a curva de variação da densidade do meio dispersor em função da temperatura obtida por calibração do densímetro utilizado no ensaio, e que o gráfico de alturas de queda para o par densímetro x proveta (utilizados no ensaio) sejam os apresentados a seguir. Da curva de calibração são obtidos os valores “Ld” (leitura densimétrica no meio dispersor) e do gráfico de altura de queda, os valores “a” com que serão preenchidas as correspondentes colunas na planilha da página seguinte. Foi usado um densímetro de volume (V) 1000 ml.

Os valores da viscosidade são obtidos em função da temperatura de cada leitura, utilizando-se a tabela de viscosidade da água, apresentada anteriormente. Não deixe de notar que os valores anotados devem ser multiplicados por 10^{-6} .

Para reduzir o trabalho de cálculo da porcentagem de material que está em suspensão, em um dos momentos de leitura, calcula-se primeiro o fator Q/Lc, que é constante. Depois bastará multiplicá-lo pelo resultado de Lc, em cada linha, para obter Q (%).

$$Q/LC = N \cdot \delta \cdot V \cdot \delta c / [mfs \cdot (\delta - 1)] = 98,96\% \cdot 2,689 \cdot 1000 \cdot 1 / [114,29 \cdot (2,698 - 1)]$$

$$Q/LC = 13,71$$



CÁLCULOS DA SEDIMENTAÇÃO (preencha as lacunas)

Mh=120g		Mfs=114,3 g		$\phi = [1800 \eta \cdot a / \{t \cdot (\delta - \delta_d)\}]^{0,5}$						
DENSIMETRO N° 390266		PROVETA N° 2960			Q/LC= N.δ / [mfs.(δ-1) = 13,71					
hora de leitura	Tempo decorrido		Temperatura °C	L	Ld	Lc=L-Ld +0,0012	a = Altura de queda	$\eta \times 10^6$ (Viscosidade)	Ø max do grão em suspensão (mm)	Q% = % < Ø da amostra total
		Em seg								
8:00'30"	30 seg	30	19,2							
8:01'00"	1 min	60	19,2	1,031	1,00784	0,0244	14,8	10,48	0,052	33,45
8:02'	2 min	120	19,2	1,030						
8:04	4 min	240	19,2	1,028						
8:08'	8 min	480	19,2	1,026						
8:15'	15 min	900	19,2	1,024						
8:30	30 min	1800	19,2	1,020						
9:00'40"	1 hora	3640	19,6	1,017	1,00778	0,0104	11,2	10,36	0,006	14,25
10:00	2 h	7200	20	1,016						
12:00	4 h	14400	20,2	1,015						
16:00	8 h	28800	21	1,014						
8:00	24 h	86400	19,3	1,011						

Observe que o laboratorista fez a leitura de 1 hora com quarenta segundos de atraso. O tempo(t), expresso em segundos, teve de ser corrigido (de 3600 para 3640 s).

Neste exemplo, calculamos a segunda e oitava linhas da planilha. Como exercício, consulte os gráficos e preencha todas as lacunas (L e Ld devem ser lidos com pelo menos quatro casas decimais) e a altura de queda com pelo menos uma casa decimal.

O cálculo da viscosidade foi feito por interpolação entre os valores para as temperaturas de 19° (10,54 . 10⁻⁶) e 20° (10,24 . 10⁻⁶) obtidos na tabela da NBR7181:

Por exemplo, na segunda linha:

$$\eta \cdot 10^6 = 10,54 + 0,2 \cdot (10,54 - 10,24) / (19-20) = 10,54 - 0,06 = 10,48$$

(lembre-se de multiplicar por 10⁻⁶, que é o mesmo que dividir por 1 000 000).

Onde for necessário, faça você também as interpolações necessárias.

Complete o exercício, desenhando a curva granulométrica e calculando o diâmetro efetivo, d30 e d60, calculando o coeficiente de uniformidade e o grau de curvatura. Conclua sobre a uniformidade e a graduação do solo estudado. Após estudar “classificações dos solos”, v. poderá fazer a classificação granulométrica, com auxílio do triângulo de Feret. Uma classificação de maior valor geotécnico, como a do TRB (Transportation Research Board) ou SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) só poderá ser feita com o conhecimento dos limites de consistência, ainda não estudados.

Exercícios

1. Determinar a percentagens de areia, silte e argila de um solo, de acordo com a escala granulométrica da ABNT, sabendo que

Peneiras de aberturas (mm)	% que passa
2,5	100
0,94	80
4,8	72
2,0	67
0,42	56
0,25	44
0,074	24
0,06	21
0,002*	11
0,001*	4

(*) percentagens e diâmetros determinados por sedimentação

Encontre também o diâmetro efetivo, o grau de uniformidade e coeficiente de curvatura e explique por que o solo é bem (ou mal) graduado.

2. Quando se corrige o erro de imersão, no ensaio de análise granulométrica? Como é feita a correção?
3. Explique, detalhadamente, como se determina a massa total da amostra seca no ensaio de análise granulométrica.. Justifique porque não se permite o uso de outra fórmula para o cálculo.
4. Defina “altura de queda” no ensaio de análise granulométrica .
5. Trace a curva granulométrica do solo que apresenta as seguintes percentagens (passando) e, a seguir,

peneira 4	peneira 10	peneira 40	peneira 200	$\varnothing < 0,06 \text{ mm}$	$\varnothing < 0,002 \text{ mm}$
100 %	95 %	85 %	40 %	30 %	15 %

- a) indique as percentagens correspondentes de pedregulho, areia, silte, argila;
- b) calcule o diâmetro efetivo;
- c) calcule o grau de (des)uniformidade;
- d) explique (justificando) se o solo é bem graduado ou não.
6. Explique, desenhando, o erro devido ao menisco, informe a sua ordem de grandeza e se na correção do erro deve-se somar ou subtrair o valor de correção. Esse erro varia conforme a proveta? Varia conforme o densímetro? Varia conforme o tipo de solo? Varia conforme o defloculante utilizado? Que variações são suficientemente grandes para alterar significativamente o resultado do ensaio?
7. Quando se vai fazer o peneiramento fino, utilizamos (geralmente) uma amostra de peso menor que a amostra total do ensaio de granulometria. a) Por quê? b) Obtidas as percentagens de material passante nesta amostra parcial, como obtemos as percentagens correspondentes da amostra total?
8. Construir a curva granulométrica e fazer a classificação granulométrica do solo descrito adiante. Calcule o diâmetro efetivo e o coeficiente de uniformidade. Massa da amostra seca = 63 g

Peneira (mm)	Massa retida (g)	Massas acumuladas	Massa passante	% passante
20	3			
40	4			
60	9			
140	7			
200	11			
sedimentação < 0,06 mm	24			
sedimentação < 0,002 mm	5			

(Este exercício é teórico. Na prática não se conseguem as massas mencionadas nas ultimas duas linhas)

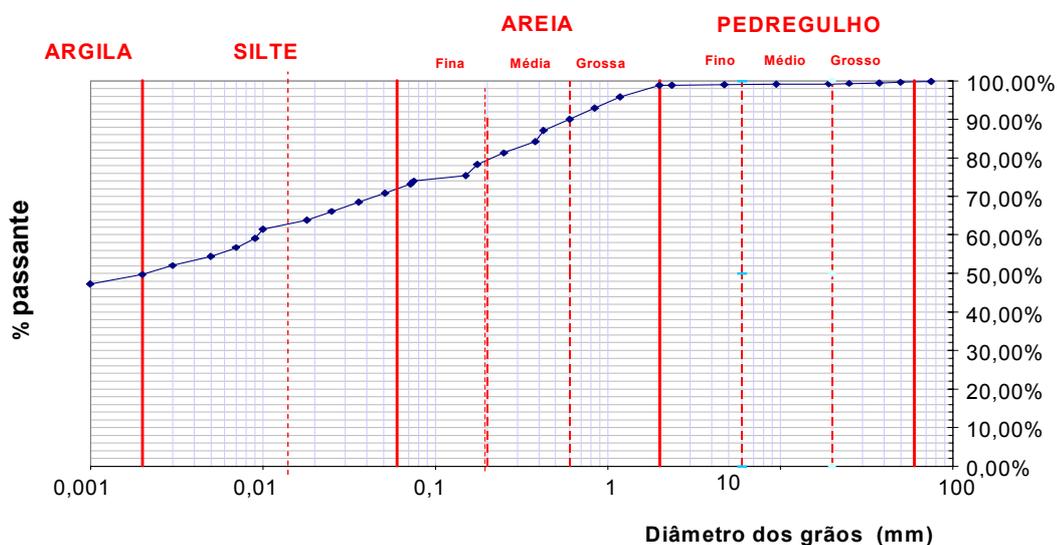
9. Sabe-se que a análise granulométrica é constituída por peneiramento e sedimentação. Você é o engenheiro responsável por um laboratório de solos e recebeu duas amostras de solo “A” e “B” para serem analisadas granulometricamente.

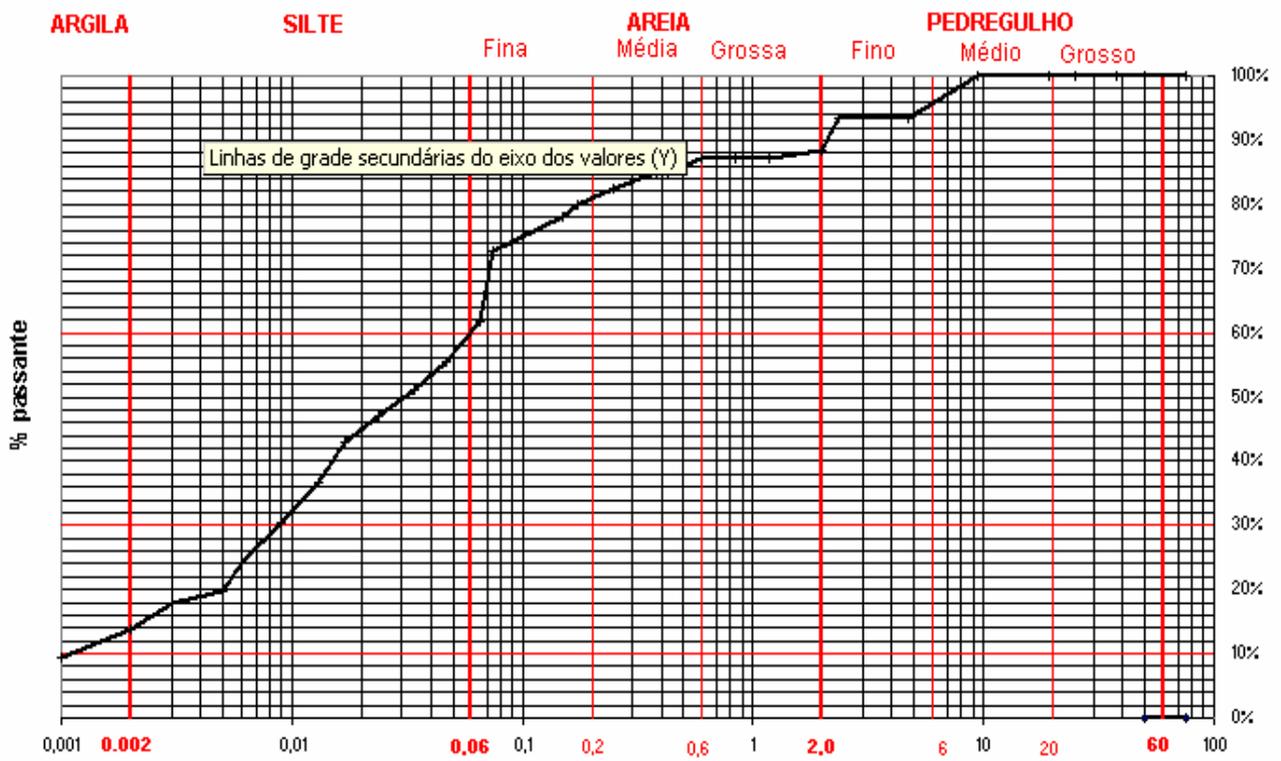
A amostra "A" parece ser uma areia grossa siltosa, e provem de uma construtora de estradas e aeroportos, e a outra, "B", parece ser uma argila pura ou quase pura. Que tratamento daria você à cada uma delas?

- 10) Ao executar a sedimentação, algumas leituras não puderam ser executadas nos exatos tempos preconizados pela Norma. Em sua opinião, o ensaio fica invalidado por isso? Esse fato introduziu erros? Por que?
- 11) Durante a última agitação da proveta antes do início da sedimentação, um pouco da solução água + solo + defloculante fica sempre aderida à mão do operador, e às vezes, algumas gotas se perdem. Você teria alguma sugestão para eliminar ou minorar esta causa de erro? A ordem de grandeza do erro é significativa?
- 12) Construa a curva granulométrica e faça a classificação (granulométrica) do solo descrito adiante. Determine também o d_{10} e o coeficiente de uniformidade.

Peneira (abertura em mm)	% que passa
25	100
0,94	80
4,8	72
2,0	67
0,42	50
0,25	44
0,074	24
0,06 (obtido na sedimentação)	21
0,002 (obtido na sedimentação)	11
0,001 (obtido na sedimentação)	4

- 13) Vários fatores (teóricos e de execução) causam erros no ensaio de granulometria. Você consegue enumerá-los? A ordem de grandeza dos erros é grande o bastante para que se perca a confiança no ensaio de granulometria? Que fator ou parcela da fórmula corrige o erro devido ao menisco? A correção anula completamente o erro? A temperatura ambiente pode causar erro, se o ensaio for corretamente executado?
- 14) Se você tivesse decidido analisar a granulometria de um solo apenas por peneiramento, e mudado de idéia após o ensaio ter sido executado, poderia completar ainda a análise fazendo apenas a sedimentação com uma outra amostra do mesmo solo? Defenda sua opinião.
- 15) Para que e por que, no ensaio de granulometria (sem sedimentação), se separa a amostra para executar dois peneiramentos (fino e grosso)? Seria este hábito um refinamento desnecessário da Norma? Defenda sua opinião.
- 16) Por que não se corrige o valor da massa do pedregulho com o fator de correção? Por que a amostra para a determinação do teor de umidade é retirada da fração que passa na peneira #10, e não da amostra total? Explique a fórmula usada para determinar a massa da amostra seca no ensaio de granulometria, em função do teor de umidade.
- 17) Se a soma das frações retidas nas peneiras for menor que o total seco original, isto é normal ou ocorreu erro?
- 18) Granulométricamente, como você classificaria os solos com as curvas a seguir? Que outras informações podem ser obtidas da curva granulométrica?





Capítulo 9 - ESTADOS E LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Advertência: *Este texto é uma compilação de muitos trabalhos. Em diferentes épocas, diversos professores e profissionais da área geotécnica o aperfeiçoaram e enriqueceram, contribuindo para o desenvolvimento da ciência e do aprendizado. Muitas frases, e até parágrafos inteiros são plágio confessado. É o que consideramos “a explicação perfeita”, a informação cuja forma não podemos modificar sem prejuízo do conteúdo. Algumas repetições podem tornar a leitura cansativa em alguns trechos mas foram mantidas por permitir aprofundamentos progressivos na compreensão do assunto.*

CONSISTÊNCIA

Segundo Terzaghi, o termo *consistência* refere-se ao grau de adesão entre as partículas de solo e à resistência oferecida a forças que tendam a deformar ou romper a massa do solo.

A consistência das argilas e de outros solos coesivos é qualitativamente descrita como *mole, média, rija* ou *dura*. (NBR – 6502)

Segundo Milton Vargas, a consistência refere-se sempre aos solos coesivos e é definida como a maior ou menor rigidez com que uma argila (ou solo com alto teor de argila) se apresenta. Sabe-se que a rigidez de um solo argiloso varia inversamente com o seu teor de umidade, isto é, à medida que a umidade de uma massa argilosa diminui, a argila vai se tornando mais dura. Para grandes teores de umidade ela é mole (como uma lama); para pequenos teores, dura como um tijolo (mas para o teor de umidade zero, ou quase nulo, pode sofrer uma redução brusca em sua resistência a esforços externos).

PLASTICIDADE

Os solos grossos têm comportamento previsível por suas *curvas granulométricas*. Entretanto a experiência mostra que isto não acontece nos solos finos. Milton Vargas define solos finos como aqueles cuja maioria dos grãos têm diâmetro inferior a 0,1 mm.

Para fins práticos e didáticos, iremos (provisoriamente) preferir uma descrição qualitativa mais intuitiva:

- Nos solos finos, as partículas grossas (quando existem) estão totalmente envolvidas por partículas finas, que preenchem todos os espaços deixados por aquelas. Neste caso, o comportamento do solo será devido predominantemente à fração fina do solo. Uma pequena variação na proporção de partículas grossas pouco ou nada altera seu comportamento mecânico e hidráulico.
- Nos solos grossos, parte dos espaços entre as partículas de maiores tamanhos estará parcialmente ocupada por partículas menores, que (dentro de certas proporções) não terão influência significativa no comportamento mecânico do solo (conforme a proporção poderá haver alteração no comportamento hidráulico, por modificar o índice de vazios e a porosidade do solo).

No comportamento dos solos finos, intervêm, além do tamanho, a forma dos grãos. Esta, por sua vez, depende da constituição mineralógica (espécie do argilo-mineral). Nos solos finos a forma dos grãos é tão importante na definição do seu comportamento, quanto as suas dimensões.

Nos pedregulhos e areias os grãos são arredondados e angulosos; em maioria com forma quase esférica. Nas argilas os grãos tendem a ter formas lamelares, escamosas, filiformes (ou outras).

Na massa de solo estes grãos em que pelo menos uma das dimensões é muito pequena estão envolvidos pela água intersticial. Sendo muito grande a relação entre a área superficial das partículas e o seu volume, os grãos ficam ligados entre si pela ação da água, por *forças capilares* que lhes emprestam uma resistência a esforços externos chamada *coesão*. Por isso os solos finos são chamados *coesivos*. Como as formas dos grãos desses solos são (principalmente) lamelares, eles poderão deslizar uns sobre os outros quando o solo é deformado por ação de uma força externa. O teor de umidade do solo influi também nas distâncias relativas entre as superfícies das partículas, alterando a força de atração entre estas.

Ao se definir *plasticidade* como sendo a propriedade de certos sólidos serem moldados (deformações rápidas) sem apreciável variação de volume (ou ruptura), entende-se que a plasticidade de certas argilas existe porque a forma lamelar de seus grãos permite um deslocamento relativo das partículas sem que haja variação de volume e que também a plasticidade depende muito do *teor de umidade* da argila.

A plasticidade está associada aos solos finos e depende do argilo-mineral que deu origem à argila presente nesses solos. Como a forma dos grãos depende da estrutura cristalina, e que essa é peculiar à cada espécie mineral, conclui-se que cada espécie de mineral argila dará à argila plasticidade diferente. Tal propriedade depende principalmente do teor de umidade da argila. Para se notar a plasticidade, este teor de umidade deve ser tal que permita a lubrificação entre as partículas, possibilitando o deslizamento de umas sobre as outras.

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS – NOÇÕES

A propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade, depende da resistência ao cisalhamento do solo; toda massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida.

Das características de resistência ao cisalhamento dependem importantes problemas de engenharia de solos e fundações tais como: estabilidade de taludes (aterros, cortes e barragens), empuxo de terra sobre paredes de contenção e túneis, capacidade de carga de sapatas e estacas.

Segundo Milton Vargas, qualquer resistência do solo é redutível à sua resistência ao cisalhamento, a qual se desenvolve quando se tenta deformar o solo, isto é, fazer com que uma parte dele se movimente em relação às outras. A resistência ao cisalhamento de um solo se compõe basicamente de duas componentes:

- Coesão (c)
- Atrito entre as partículas ($tg \phi$)

Segundo a equação de COULOMB, $\tau_r = c + \sigma tg \phi$. Na teoria da pressão efetiva adota-se $\tau_r = c + (\sigma - u) tg \phi$, onde

τ_r - resistência ao cisalhamento

c - coesão

σ - tensão normal à superfície de cisalhamento

u - pressão neutra na água

ϕ - ângulo de atrito interno do material

Sob a denominação genérica de *atrito interno*, inclui-se não só o atrito físico entre suas partículas, como o atrito fictício proveniente do entrosamento de suas partículas. Nos solos não existe uma superfície nítida de contato, ao contrário, há uma infinidade de contatos pontuais.

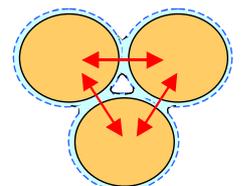
CONCEITO DE COESÃO

Podemos conceituar coesão como a resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pela qual ele se torna capaz de se manter coeso, em forma de torrões ou blocos, ou pode ser cortado em formas diversas e manter esta forma. Os solos que têm essa propriedade chamam-se *coesivos*. Os solos não coesivos, que são as areias e os pedregulhos, esboroam-se facilmente ao serem cortados ou escavados.

De uma forma geral, poder-se-ia definir coesão como a resistência ao cisalhamento de um solo quando, sobre ele, não atua pressão externa alguma. Esta resistência pode ter causa:

1) Na existência de um cimento natural aglutinando os grãos do solo entre si. Esse cimento é, em geral, constituído por grãos extremamente finos coagulados entre os grãos maiores, ligando-os da mesma forma que, no concreto, o cimento *Portland* aglutina o agregado. Nos solos residuais, o aparecimento desse cimento é notável e às vezes empresta ao solo resistências elevadas.

2) Em eventual ligação entre os grãos, muito próximos uns dos outros, que é exercida por um potencial atrativo de natureza molecular ou coloidal. O potencial atrativo dos grãos coloidais exerce pressão também sobre a água intersticial. Forma-se assim, uma camada de *água adsorvida* (água adesiva) envolvendo os grãos. A camada de água adsorvida mais próxima dos grãos sofre pressões colossais (ordem de grandeza de 20000 kg/cm^2), e encontra-se em estado sólido (também é chamada água dura). As camadas mais distantes têm alta viscosidade mas ficam imobilizadas pelas forças atrativas. Essas



Pequena atração (areia, silte)

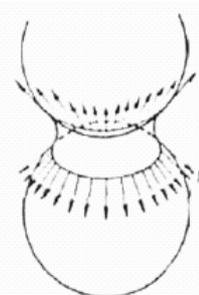


camadas de água adsorvida contribuem para o aumento da ligação entre os grãos. Essa é a origem da chamada *coesão verdadeira*. No comum dos casos ela é pequena, mas não desprezível. Tenderá a diminuir ou anular-se quando o solo permanece por muito tempo em contato com as intempéries. Seu valor depende: da natureza mineralógica da fração argilosa; dos íons adsorvidos na superfície dos grãos e do espaçamento entre os grãos.



Grande atração
(argila)

- 3) Por efeito da pressão capilar na água intersticial, quando o corpo de prova, torrão ou camada de solo sofre um esforço de ruptura. Os grãos tendem a moverem-se uns em relação aos outros e, então, formam-se meniscos capilares entre seus pontos de contato como a figura ao lado. Os grãos são, neste caso, pressionados uns contra os outros pelo efeito da tensão superficial que age ao longo da linha de contato entre o grão sólido e o filme de água. É a chamada *coesão aparente* ou simplesmente *coesão*.



Meniscos capilares entre grãos
esféricos

Pode-se visualizar este fenômeno tentando-se separar duas placas de vidro entre as quais existe um filme d'água. Ver-se-á que aparecerá uma força que resiste a separação, força esta oriunda dos meniscos que se formam entre as placas. Quando a espessura do filme d'água é pequena, a força necessária para a separação é enorme e quando o filme for de grande espessura a força será pequena. No caso dos solos finos os espaços entre os grãos serão pequenos. Os filmes d'água terão pequena espessura e pressão capilar elevada. No caso das areias os espaços entre grãos serão grandes e as forças capilares desprezíveis. É o caso dos solos não coesivos.

A coesão aparente é um efeito temporário, pois os meniscos tenderão a desfazer-se à medida que o movimento entre os grãos aumente e as deformações sejam muito grandes. Os meniscos desfazem-se, também, por efeito de saturação ou movimento da água intersticial. Dessa forma o efeito da capilaridade poderá ser compreendido como de uma pressão temporária confinante envolvendo a massa de argila. Como se verá no estudo da resistência ao cisalhamento dos solos, essa pressão confinante emprestará ao solo uma resistência ao cisalhamento, independente das pressões aplicadas, mesmo que não haja *cimentação* nem ligação de natureza *molecular / coloidal* entre os grãos.

ESTADOS E LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Se a umidade de um solo coesivo é muito elevada, a ponto de este solo se apresentar como um fluido denso, se diz que o solo se encontra no *Estado Líquido*. Neste estado o solo praticamente não apresenta resistência ao cisalhamento.

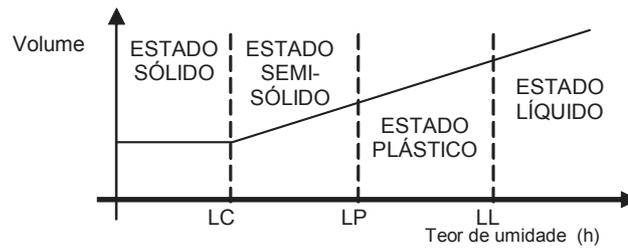
À medida que perde água, o solo (coesivo) endurece (ou fica mais viscoso). A partir de um certo teor de umidade $h_1 = LL$ (Limite de Liquidez), perde sua capacidade de fluir, porém pode ser moldado facilmente e conservar sua forma. Então o solo está no *Estado Plástico*.

Com a continuação de perda de umidade, a capacidade de ser moldado diminui, até que a partir de um teor de umidade $h_2 = LP$ (Limite de Plasticidade), uma amostra se fratura ao se tentar moldá-la. Este é o chamado *Estado Semi-sólido*, no qual o solo tem aparência sólida, mas sofre reduções de volume enquanto continuar a secar.

Continuando a secagem, ocorre a passagem gradual para o *Estado Sólido*, onde praticamente não mais ocorre variação de volume devida à perda de umidade. O limite entre esses dois últimos estados é um teor de umidade $h_3 = LC$ (Limite de Contração).

Embora fundamentadas em extensas investigações experimentais, as definições desses limites são convencionais. Ainda assim permitem, de uma maneira simples e rápida, dar uma idéia bastante clara do tipo de solo e suas propriedades.

A figura seguinte ilustra esquematicamente esses estados físicos, chamados *Estados de Consistência* e suas fronteiras, os *Limites de Consistência*.



Esquema dos Estados de Consistência

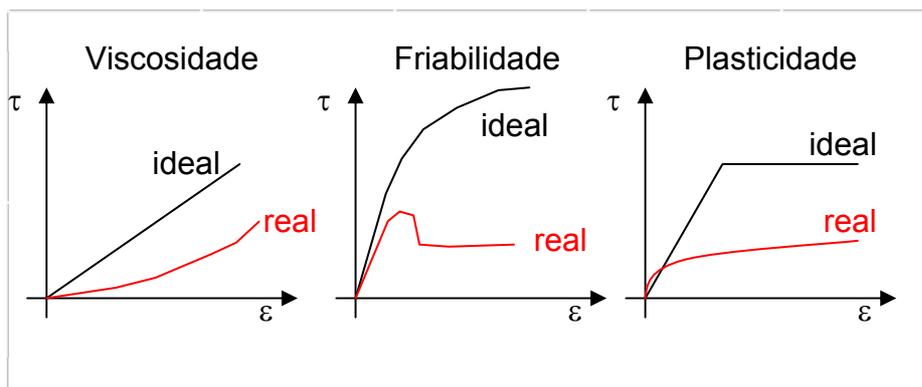
A conceituação dos limites LL e LP são atribuídos ao cientista sueco Atterberg (1911) e o LC a Haines.

Em cada uma das regiões citadas o solo terá comportamento mecânico diferente das demais:

- Acima do L.L. ele se comportará como um líquido (viscoso) no qual a resistência ao cisalhamento é proporcional à velocidade de deformação. O coeficiente de proporcionalidade entre resistência ao cisalhamento e o gradiente da velocidade de deformação dv/dz é chamado viscosidade.
- Na zona plástica a resistência ao cisalhamento é proporcional à deformação até um certo ponto; daí por diante ela é constante e independente da deformação.
- No estado semi-sólido há um ponto limite onde o solo se fratura, correspondente à propriedade de friabilidade perfeita.

Para complementar os conceitos fundamentais de coesão e plasticidade, serão vistos, dentro em pouco, os ensaios que determinam os limites de Atterberg para um solo. Ao final do capítulo, serão feitas interpretações quando tais limites têm valores conhecidos.

As relações entre resistência ao cisalhamento e deformações não são exatamente como idealizadas na teoria. Conforme o estado do solo, predominando a viscosidade, plasticidade ou a friabilidade, variam aproximadamente como mostrado nos diagramas seguintes.



Observação:

As argilas orgânicas podem ser diferenciadas dos siltes inorgânicos pelo odor característico e pela presença de partículas de cor negra, parda ou roxa. Sua secagem a temperaturas superiores a 100°C altera profundamente os limites de Atterberg. O efeito da temperatura sobre solos inorgânicos é muito menor. Casagrande, em 1948, relatou que após secagem em estufa o LL da argila orgânica de Connecticut variou de 84% para 51% e o LP de 50% para 42%.

Ao utilizar o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, recomenda-se que para a definição da origem orgânica, sejam realizados dois ensaios de LL: um com o solo secado em estufa (LLs) e o outro nas condições naturais, (LLn). Se a relação LLs / LLn for menor que 0,75, o solo deverá ser considerado orgânico. Existem também ensaios específicos para se obter o teor de material orgânico em um solo.

LIMITE DE PLASTICIDADE

Atterberg convencionou que a condição para que uma amostra de solo esteja no estado plástico é a possibilidade de com ela ser possível moldar um cilindro de 10 cm de comprimento por 3 mm de diâmetro, por rolagem sobre uma placa de vidro.

O Limite de Plasticidade é o teor de umidade em que o solo, estando do estado plástico, se perder umidade, passa para o estado semi-sólido.

DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PLASTICIDADE

O Limite de Plasticidade (LP) é o teor de umidade em que o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar com ele, um cilindro com as dimensões já mencionadas (3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento).

O texto a seguir explica os procedimentos detalhados pela norma NBR-7180 de OUT/1984 - Solo - Determinação do Limite de Plasticidade - Método de ensaio.

Referências:

ME 082/94 (DNER/DNIT);
MS-61 (DER / SP);
NBR 6457(Preparação de amostras);
NBR 6459 (Limite de Liquidez).

Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio (NBR-7180/1984)

Aparelhagem:

1. estufa (capaz de manter... 60°C-65°C e de 100°C-105°C);
2. bacia de porcelana com cerca de 120 mm de diâmetro;
3. espátula de lâmina flexível, com aproximadamente 80 mm de comprimento e 20 mm de largura ;
4. recipientes adequados que evitem perda de umidade da amostra, tais como pares de vidros de relógio com grampo ou cápsulas com tampa;
5. balança que permita pesar nominalmente 200 g, com resolução 0,01 g e sensibilidade compatível;
6. gabarito cilíndrico para comparação, com 3 mm de diâmetro e cerca de 100 mm. de comprimento;
7. dessecador, para resfriamento dos recipientes com amostras já secas, sem absorção de umidade do ar.
8. peneira nº 40 (0,42mm de malha)

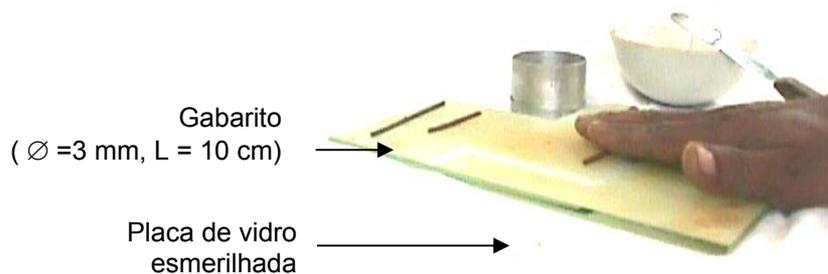
Amostra para o ensaio:

O ensaio deve ser executado com amostras preparadas com secagem prévia (estufa ...100-105°C) e com amostras sem tal secagem.

Geralmente os ensaios para a determinação dos Limites de Plasticidade, Liquidez e Contração são feitos em conjunto. De uma amostra previamente preparada de acordo com a norma NBR 6457 (seca ao ar, destorroada, homogênea) deve ser separada por sucessivas passagens no repartidor de amostras uma quantidade que permita que do passante na peneira 40 (0,42mm) sejam tomadas 250 gramas, para a execução dos três ensaios. Para cada ensaio de determinação do LP serão separados cerca de 100 gramas.

Ensaio:

1. Colocar a amostra na bacia de porcelana, adicionar água destilada com pequenos incrementos, amassando e revolvendo, vigorosa e continuamente, com a espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica. O tempo de homogeneização deve estar entre 15 e 30 minutos, sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos;
2. Tomar cerca de 10 g da amostra assim preparada e formar com os dedos uma pequena bola, que deve ser rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar forma de cilindro *(melhor usar os dedos, posicionados de forma inclinada em relação à direção de movimento da mão)*;
3. Enquanto a amostra se fragmentar antes de atingir o diâmetro de 3 mm, retorná-la à bacia de porcelana, adicionar água destilada, homogeneizar durante pelo menos 3 minutos, amassando e revolvendo vigorosa e continuamente com auxílio da espátula e repetir o procedimento descrito em (2);



4. Quando a moldagem do cilindro com as dimensões mencionadas for conseguida, estará caracterizado que o solo está no estado plástico. Refazer a esfera e repetir a rolagem até que haja fragmentação do cilindro com dimensões próximas às do gabarito de comparação;
5. Transferir imediatamente as partes fragmentadas para um recipiente adequado, para determinação da umidade pelo método da estufa (NBR 6457);
6. Repetir as operações (2) à (5) para obter pelo menos três valores de umidade que difiram de sua respectiva média menos que cinco por cento do valor dessa média. Na prática, obtêm-se cinco ou seis valores, para que haja boa probabilidade de que pelo menos três valores satisfaçam à esta condição (os que não a satisfaçam são descartados).

O ensaio deve ser executado em condições ambientais que minimizem a perda de umidade do material por evaporação, preferencialmente em recinto climatizado.

LIMITE DE LIQUIDEZ

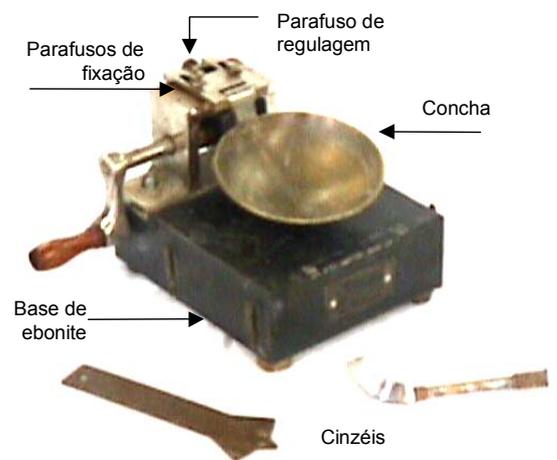
O limite de liquidez foi concebido como o menor teor de umidade com que uma amostra de um solo pode ser capaz de fluir. *Embora tal capacidade seja mais relacionada com o grau de saturação do solo do que com o teor de umidade, os ensaios para determinar o limite de liquidez de solos finos têm o teor de umidade como parâmetro, por causa da dificuldade de medir e controlar o grau de saturação.*

Originalmente Atterberg colocava uma porção de solo, com umidade aparentemente próxima do Limite de Liquidez, numa bacia de porcelana e abria uma ranhura em sua massa. Aplicava, então, um golpe de mão na base da cápsula. Se a ranhura se fechasse o solo estaria no estado líquido e, portanto, sua umidade acima do L.L. Repetia o ensaio com umidades mais baixas até verificar que a ranhura não mais se fechava. A menor umidade com que se fechasse ou a maior com que não se fechasse a ranhura, seria a umidade correspondente ao L.L. A variância dos resultados era muito grande.

Arthur Casagrande padronizou o ensaio, mecanizando o processo primitivo de Atterberg conforme detalhado mais adiante. No processo padronizado, utiliza-se o aparelho de Casagrande, com o qual se aplicam golpes deixando a concha do aparelho cair de uma altura padrão até que a ranhura se feche em uma extensão convencional.

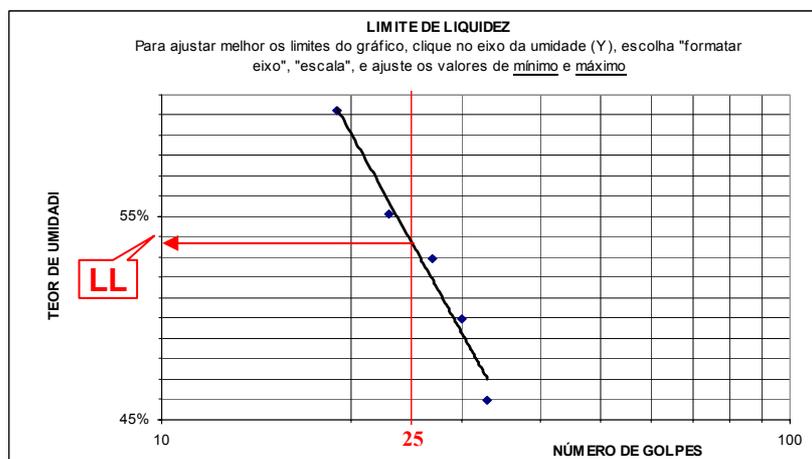
A suposição do processo é que com as pancadas, a água se encaminhe para essa região, aumentando o teor de umidade (o que diminui a resistência ao cisalhamento). Experimentalmente se descobriu que no limite de liquidez, a resistência ao cisalhamento de todos os solos plásticos é muito pequena (25 g/cm^2 , aproximadamente). O choque da concha produz o esforço de cisalhamento, mas a ranhura apenas começa a se estreitar quando a umidade (na região de fechamento) se aproxima do Limite de Liquidez.

A resistência que o solo oferece ao fechamento do sulco, medida pelo número de golpes requerido, é devida à “resistência ao cisalhamento” para aquela umidade.



Aparelho de Casagrande

A seqüência de operações do ensaio é executada pelo menos por cinco vezes. Amostras pequenas são retiradas na região de fechamento, para a determinação de seu teor de umidade. Anota-se o número de golpes necessários para fechar a ranhura, a cada tentativa. Colocam-se esses valores em gráfico semilogarítmico (ver figura seguinte). Quando o ensaio é bem executado e todos os pontos obtidos são válidos, esses pontos dispõem-se próximos de uma linha reta, denominada *reta de escoamento*. (A teoria da resistência ao cisalhamento dos solos plásticos confirma essa linearidade).



Reta de escoamento – LL é a % inteira mais próxima

Casagrande estabeleceu que o limite de liquidez (LL) do solo é o teor de umidade para o qual o sulco se fecha com 25 golpes, sendo este valor obrigatoriamente obtido no gráfico da reta de escoamento.

Descobriu-se uma correlação estatística entre a inclinação da reta de escoamento (índice de fluxo) e o limite de liquidez, que é expressa, aproximadamente por $I_f = 0,3.LL$. Com base nisto, o Bureau of Public Roads (BPR), desenvolveu uma fórmula empírica que oferece uma avaliação do LL a partir de um único ponto do gráfico da reta de escoamento:

$$LL_i = h / (1,419 - 0,3 \log N)$$

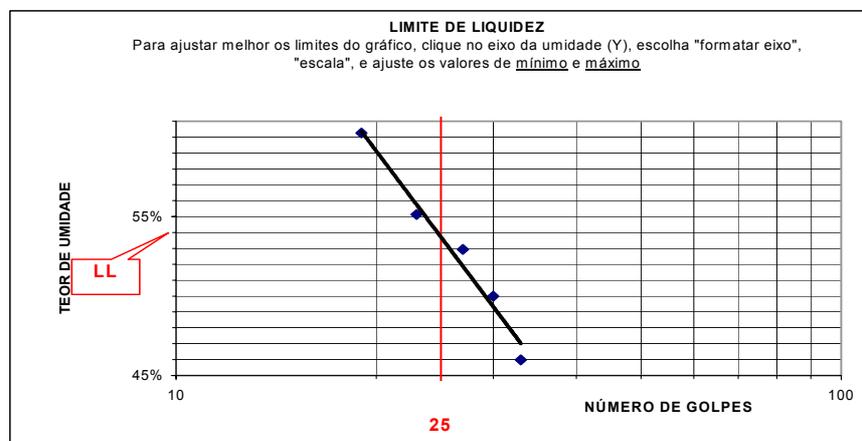
A utilização da fórmula do BPR é programável, e fornece tantos resultados quantas amostras tenham sido obtidas. Se for usado o mesmo critério de aceitação de resultados utilizado no ensaio do Limite de Plasticidade (*aceitar apenas resultados que não difiram de sua respectiva média mais que 5% do valor dessa média*), o uso da fórmula produzirá praticamente os mesmos resultados que se obtém com o traçado do gráfico da reta de escoamento (os pontos eliminados do cálculo são os mesmos que seriam eliminados no traçado do gráfico. A falta de um razoável alinhamento indica defeitos ou erros na execução do ensaio, evidenciada pelos pontos fora de alinhamento.).

N	1,419 – 0,3 Log N	N	1,419 – 0,3 Log N
15	1,066	28	0,985
16	1,059	29	0,980
17	1,050	30	0,976
18	1,043	31	0,972
19	1,036	32	0,968
20	1,029	33	0,964
21	1,023	34	0,960
22	1,017	35	0,956
23	1,011	36	0,952
24	1,005	37	0,948
25	1	38	0,945
26	0,995	39	0,942
27	0,990	40	0,939

Exemplo: Em um ensaio de determinação do LL foram obtidos os seguintes valores:

Nº golpes	33	30	27	23	19
hi	45,98%	50,00%	52,94%	55,14%	60,26%
LLi	47,7%	51,2%	53,5%	54,6%	58,2%

Os valores LL_i são avaliações do Limite de Liquidez, calculadas por intermédio da fórmula do BPR. Traçando o gráfico $\text{Log}(N) \times h$ (sem censurar valores), obtém-se:



Observe-se no gráfico que o teor de umidade correspondente a 25 golpes está entre 53% e 54%. A porcentagem inteira mais próxima deveria ser adotada como o Limite de Liquidez (no caso, LL=54%). Este processo atende as especificações da norma brasileira.

Repetindo a avaliação pela fórmula do BPR e utilizando o critério de censura sugerido na análise dos resultados LLi, obtemos $\mu(LL_i) = 53,04\%$, $5\% \mu = 2,65\%$, limite inferior de aceitação = 50,39% e limite superior de aceitação = 55,70%. Se não utilizarmos algum critério de censura, adotaríamos LL = 53%.

Houve diferença (ainda que pequena) entre os dois resultados.

Ao perceber que o primeiro e o último valores LLi não se encontram na faixa de aceitação sugerida, deve ser eliminado apenas o pior (por exemplo, experimentar escolher dos mais distantes da média, o de maior variância).

53,04-47,7=5,66 e 58,2-53,04=5,16

O pior será 47,7%, que é descartado. Restam

51,2%	53,5%	54,6%	58,2%
-------	-------	-------	-------

Calculando a nova média, e os novos limites, fica:

Nova média = 54,38%, Novo L inferior = 51,66%, Novo L superior = 57,09%.

É preciso eliminar ou o primeiro ou o último valor da nova série: escolhendo eliminar o último (58,2%), por sua maior variância, restarão: 51,2%, 53,50%, 54,57% com:

Nova média 53,10%, novo limite inferior 50,45% e novo limite superior 55,76%. Como todos esses valores estão dentro da faixa de aceitação, a nova média será arredondada para a porcentagem inteira mais próxima (LL=53%).

A vantagem de usar este critério é obter certeza de que o ensaio foi bem executado.

Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio

Referências

- NBR 6459 / 84 (ABNT) – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 6457 (preparação de amostras);
- M4-61 (DER / SP);
- ME 122 / 94 (DNER).

Aparelhagem

1. Estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C-110°C e entre 60°C-65°C (atualmente se prefere 100-105° para a primeira faixa);
2. Bacia de porcelana com cerca de 120 mm de diâmetro;
3. Espátula de metal flexível com aproximadamente 80 mm de comprimento e 20 mm de largura;
4. Aparelho de Casagrande com características e dimensões padronizadas (fig.1);
5. Cinzeis com as características e dimensões padronizadas;
6. Recipientes adequados, tais como pares de vidros de relógios com grampos, ou cápsulas de alumínio, que evitem perda de umidade da amostra;
7. Balança que permita pesar nominalmente 200 g, com resolução de 0,01 g e sensibilidade compatível;
8. Gabarito para verificação da altura de queda (1 cm) da concha ;
9. Esfera de aço com 8 mm de diâmetro .

VERIFICAÇÕES:

- 1) características da base de ebonite do aparelho: deixar a esfera de aço cair em queda livre de uma altura de 250 mm sobre sua superfície. A altura de restituição deve estar entre 185 e 230 mm;
- 2) a massa do conjunto concha + guia do excêntrico deve estar entre 185 e 230 g ;
- 3) o excêntrico deve ter forma tal que durante os últimos 3 mm o movimento do mesmo não provoque variações na altura da concha, em relação à base (raio constante).

INSPEÇÕES ANTES DO ENSAIO:

- 1) O pino que conecta a concha deve estar firme, não se deslocando lateralmente;
- 2) os parafusos que conectam a concha devem estar apertados;
- 3) os pontos de contato, tanto da base quanto da concha, não podem estar gastos;
- 4) a concha não deve apresentar ranhuras perceptíveis ao tato;
- 5) o cinzel deve estar em perfeito estado.

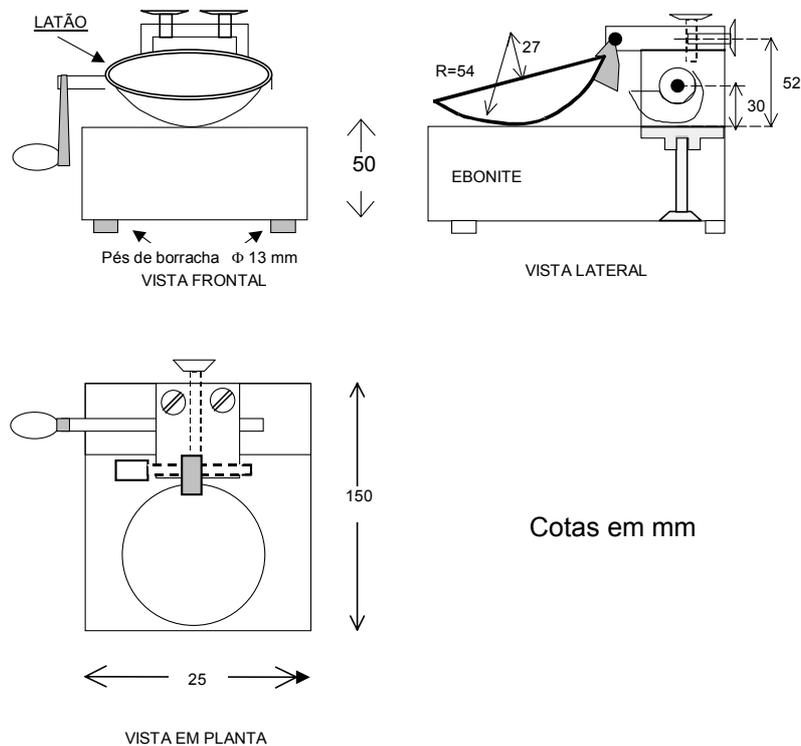


fig.1 - Detalhes do aparelho de Casagrande

AJUSTE FINAL:

Afrouxar os parafusos de fixação e ajustar o aparelho de modo que o ponto de contato da concha com a base esteja 10 mm acima da base, quando aquela estiver no ponto mais alto do seu curso, utilizando para tal um gabarito, como se vê na figura 3. Após o ajuste e o aperto dos parafusos, testar o ajuste girando rapidamente a manivela várias vezes e verificando novamente a altura de queda da concha.

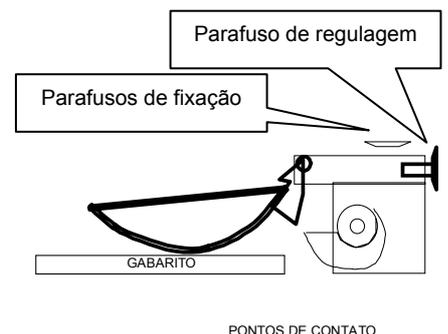
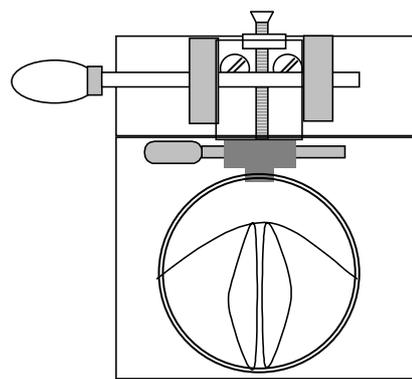


Fig. 3 – ajuste da altura de queda

EXECUÇÃO DO ENSAIO

AMOSTRA PREPARADA COM SECAGEM PRÉVIA:

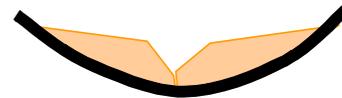
1. Colocar a amostra na bacia de porcelana, adicionar água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo vigorosa e continuamente com auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, com consistência tal que sejam necessários cerca de 35 golpes para fechar a ranhura; *O tempo desta primeira homogeneização deve estar entre 15 e 30 minutos sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos;*
2. Transferir parte da mistura para a concha, moldando-a de forma que na parte central a espessura seja da ordem de 10 mm, evitando que fiquem bolhas de ar no interior da mistura;
3. Dividir a massa de solo em duas partes, passando o cinzel através da mesma, de modo a abrir uma ranhura em sua parte central, normal à articulação da concha, como indicado na figura (4). O cinzel deve ser deslocado perpendicularmente à superfície da concha; *As operações (2) e (3) devem ser feitas com a concha na mão do operador. Quando houver dificuldade na abertura da ranhura, tentar obtê-la com sucessivas e cuidadosas passagens do cinzel.*



VISTA EM PLANTA



Antes do ensaio



Depois do ensaio

SEÇÕES

ASPECTO DA RANHURA

4. recolocar, cuidadosamente, a concha no aparelho e golpeá-la contra a base, deixando-a cair em queda livre, girando a manivela à razão de duas voltas por segundo. Anotar o número de golpes necessário para que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento, aproximadamente;
5. transferir, imediatamente uma pequena quantidade do material de junto das bordas que se uniram para um recipiente adequado para determinação da umidade, conforme a NBR 6457;
6. transferir o restante da massa para a bacia de porcelana. Lavar e enxugar (toalha de papel) a concha e o cinzel;
7. adicionar água destilada a amostra e homogeneizar durante um a três minutos, amassando e revolvendo vigorosa e continuamente com auxílio da espátula;
8. repetir as operações (2) a (6), obtendo o segundo ponto do ensaio;
9. Repetir as operações (7) e (2) a (6) de modo a obter pelo menos mais três pontos do ensaio, cobrindo o intervalo de 35 a 15 golpes de forma bem distribuída.

O ensaio deve ser executado em condições ambientais que minimizem a perda de umidade do material por evaporação, preferencialmente em recintos climatizados.

AMOSTRA PREPARADA SEM SECAGEM PRÉVIA:

Se a amostra apresentar umidade tal que permita a obtenção do primeiro ponto de ensaio, colocá-la na bacia de porcelana e misturá-la de forma a se obter uma pasta homogênea. A seguir, proceder como descrito de (2) a (9).

CÁLCULOS

- C1. Com os resultados obtidos, construir um gráfico no qual as abscissas (em escala logarítmica) são os números de golpes e as ordenadas (em escala aritmética) são os teores de umidade correspondentes e ajustar uma reta pelos pontos assim obtidos;
- C2. Obter na reta o teor de umidade correspondente a 25 golpes, que é o limite de liquidez do solo.

RESULTADOS:

1. O resultado obtido em C2 deve ser expresso em percentagem, aproximado para o número inteiro mais próximo ;
2. deve ser indicado o processo de preparação da amostra (com ou sem secagem prévia);
3. na impossibilidade de se conseguir a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes, considerar a amostra como não apresentando limite de liquidez (NL) .

RECOMENDAÇÕES (DNIT):

- ✓ *Siga rigorosamente os tempos prescritos na norma;*
- ✓ *É melhor partir do solo previamente seco ao ar;*
- ✓ *É proibido adição de solo seco à amostra já umedecida e homogeneizada;*
- ✓ *Tempo máximo de permanência do solo na capsula de porcelana: 30 min.;*
- ✓ *Tempo de colocação da amostra na concha e execução: máximo 3 minutos;*
- ✓ *Apenas aceitar pontos cujo número de golpes estiver entre 15 e 35 ;*
- ✓ *Para novas adições de água, tempo de mistura: 3 minutos;*

Ao utilizar o processo de cálculo do BPR, que utiliza a equação da reta de escoamento, recomenda-se:

- *Determinar no mínimo cinco (5) valores de LL, com números de golpes bem distribuídos entre 15 e 25;*
- *Estabelecer como aceitáveis os valores LL(i) entre média \pm 5% do valor da média entre eles; se houver valores não aceitáveis, excluir definitivamente o pior valor e calcular nova média; repetir este procedimento (excluir um de cada vez) se ainda houver valores não aceitáveis;*
- *Considerar válido o ensaio se pelo menos três valores de LL estiverem na faixa de enquadramento descrita em (2);*
- *O valor de LL final será a média aritmética das umidades aceitas em (3), após arredondamento para a porcentagem inteira mais próxima.*

CONCLUSÕES

1. ÍNDICE DE PLASTICIDADE :

O índice de plasticidade deve ser obtido pela expressão:

$$IP = LL - LP$$

onde:

- IP = índice de plasticidade
- LL = limite de liquidez, determinado de acordo com a NBR 6459
- LP = limite de plasticidade

- O Índice de plasticidade deve ser expresso em porcentagem (inteira);
- Quando não for possível determinar o limite de liquidez ou o limite de plasticidade, ou se for obtido LP maior ou igual à LL, anotar o índice de plasticidade como NP.

Observações:

- ✓ *A desagregação no final da rolagem difere para cada tipo de solo. Solos muito argilosos podem requerer mais pressão da mão.*
- ✓ *É permitido reduzir o número de rolagens no caso de solos pouco plásticos, fazendo o diâmetro inicial de forma elipsoidal próxima dos 3 mm requeridos.*

Quando os solos são arenosos, recomenda-se fazer o ensaio de LP antes do ensaio de LL. Se o solo for considerado NP neste ensaio, anotar ambos os limites como NP.

OUTROS ÍNDICES:

O índice de consistência, $IC = (LL - h) / IP$ indica a consistência aproximada de um solo (identificação de camadas argilosas ao natural). É um indicativo da capacidade de resistência à esforços de compressão (sem caráter decisivo), no teor de umidade h (geralmente a umidade natural). É pouco utilizado.

IC < 0 MUITO MOLE (vasa)	0 < IC < 0,5 CONSISTÊNCIA MOLE	0,5 < IC < 0,75 CONSISTÊNCIA MÉDIA	0,75 < IC < 1 CONSISTÊNCIA RIJA	IC > 1 CONSISTÊNCIA DURA
--------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	-----------------------------

O índice relativo de plasticidade $R = (h - LP) / IP$ indica o estado de consistência do solo no estado plástico. Tem pouca utilidade, e a semelhança de termos pode causar confusão com o IC.

CONSISTÊNCIA NO ESTADO PLÁSTICO

$0 < R < \frac{1}{4}$ RIJA	$\frac{1}{4} < R < \frac{1}{2}$ MEDIANAMENTE MOLE	$\frac{1}{2} < R < \frac{3}{4}$ MOLE	$\frac{3}{4} < R < 1$ MUITO MOLE
-------------------------------	--	---	-------------------------------------

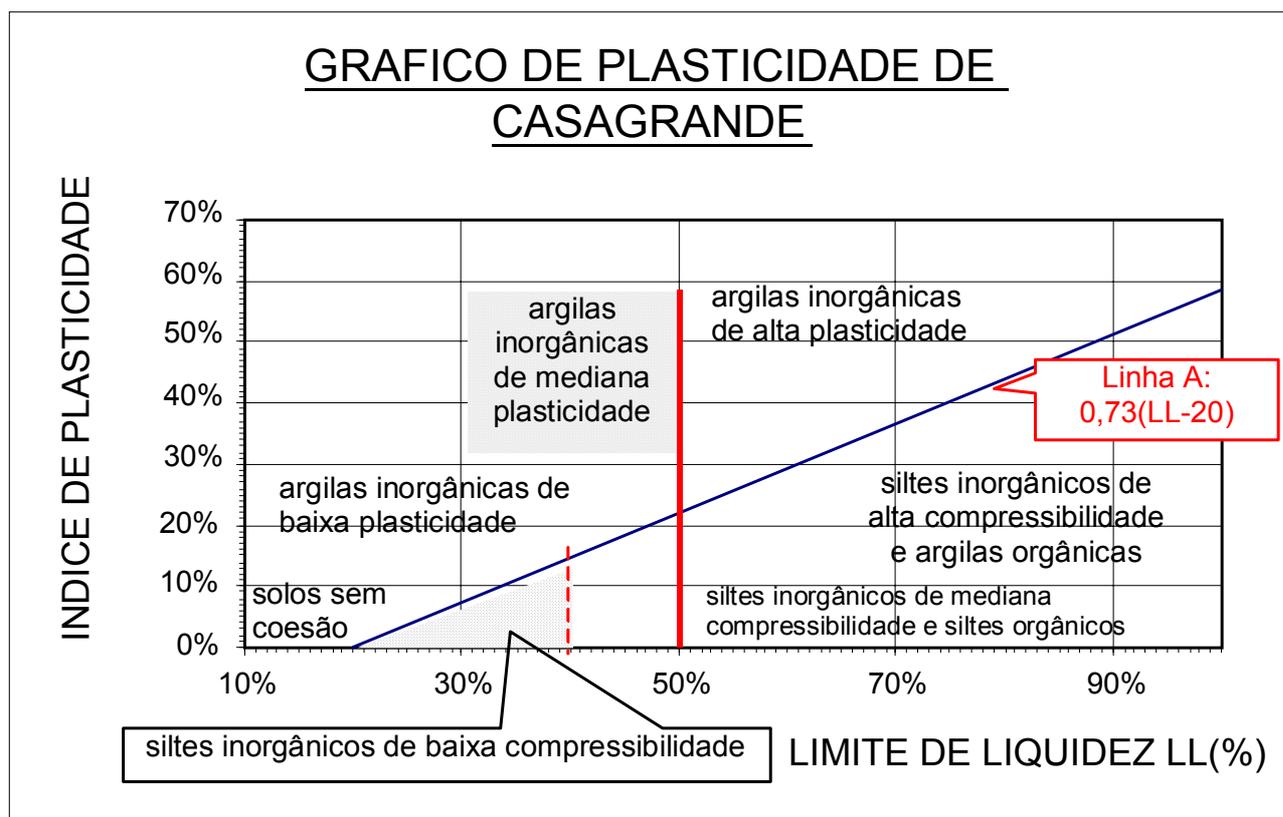
O índice de atividade (IA) indica a capacidade da argila do solo de transmitir plasticidade, e seu valor fornece uma indicação mineralógica sobre sua parte argilosa.

$$IA = IP / (\% \text{ de argila})$$

IA < 0,7 Atividade normal	0,7 < IA < 1,5 Atividade média	IA > 1,5 Atividade grande
------------------------------	-----------------------------------	------------------------------

O gráfico de plasticidade de Casagrande permite caracterizar solos finos a partir do IP e do LL: Os solos com LL maior que 50% são muito compressíveis e abaixo de 40% tem baixa ou nenhuma (LL < 20%) compressibilidade. Acima da linha A situam-se as argilas inorgânicas (mais plásticas) e abaixo, argilas orgânicas e siltes.

Para a definição da origem orgânica, deverão ser realizados dois ensaios para a determinação do Limite de Liquidez: um com o solo secado em estufa (LLs) e o outro nas condições naturais, (LLn). Se a relação: LLs / LLn for menor que 0,75, o solo deve ser considerado orgânico.



LIMITE DE CONTRAÇÃO:

CONCEITOS:

Limite de contração do solo é o teor de umidade onde ocorre a transição entre o estado de consistência sólida e semi-sólida, ou, convencionalmente, o máximo teor de umidade a partir do qual uma redução dessa umidade não ocasiona diminuição do volume do solo.

Alguns autores o definem como “o menor teor de umidade capaz de saturar uma amostra do solo”, mas é preciso perceber que a saturação ($S=V_a/V_v$) depende também da maneira como as partículas sólidas estejam dispostas, e do estado de tensões a que a amostra esteja sujeita (para um mesmo teor de umidade, podem existir diferentes graus de saturação). Tem símbolo LC e é expresso em percentagem (inteira).

DETERMINAÇÃO DO LIMITE E DO GRAU DE CONTRAÇÃO

O Limite de Contração deve ser determinado sempre que o Índice de Plasticidade for alto. O Grau de Contração indica a tendência de aparecerem fissuras quando sofre secagem, e em consequência sua qualidade para aterro de barragem (permite uma avaliação dos efeitos negativos dos solos de alto IP).

O valor do LC tem pouca utilidade prática. Mas quando se executa o ensaio, determina-se também o Grau de Contração, que permite prever e evitar ocorrência de vários acidentes causados por fissuração causada por secagem em maciços. Seu valor tem forte relação com o da expansão (obtido no ensaio CBR) de solos argilosos.

REFERÊNCIAS

NBR 7183/82(ABNT), ME087/94(DNER), M7-54T (DER/SP), NBR6457, NBR 6508

APARELHAGEM

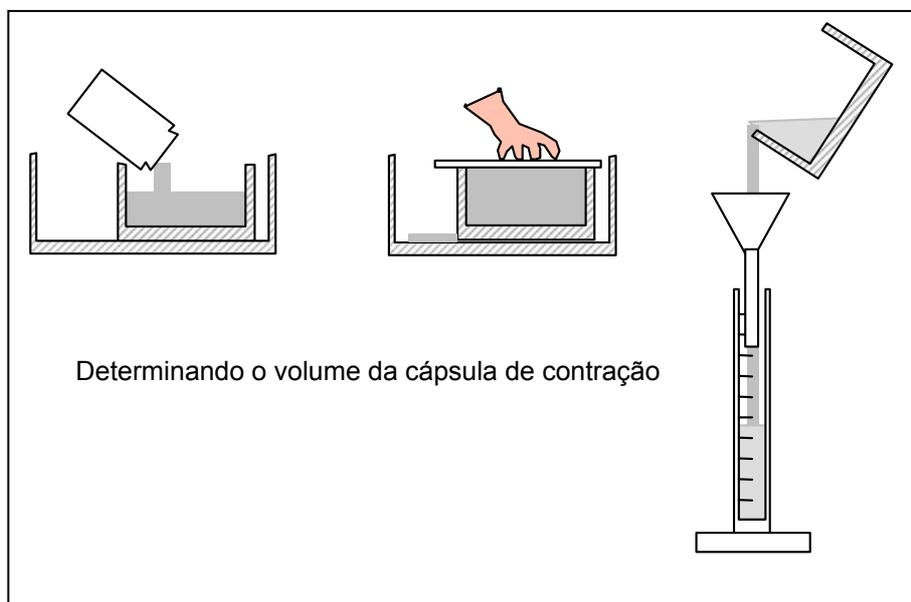
1. Bacia de porcelana (12 cm de diâmetro e 5 cm de altura);
2. Espátula com lâmina flexível (8 cm de comprimento);
3. Cápsula circular de porcelana (ou aço inoxidável), de fundo plano, com cerca de 4 cm de diâmetro e 1 cm de altura, que será chamada cápsula de contração (figura 1);
4. Régua de aço de cerca de 30 cm de comprimento;
5. Cuba de vidro de cerca de 5 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura;
6. Placa de vidro, com três pinos de metal (dimensões na figura 2);
7. Placa de vidro com aproximadamente as mesmas dimensões de (6);
8. Proveta com 25 cm³ de capacidade, graduada de 0,1 em 0,1 cm³;
9. Balança que permita pesar 100 g, sensível a 0,1 g;
10. Mercúrio em quantidade suficiente para encher a cuba de vidro;
11. Estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C;
12. Funil de vidro;
13. Luvas de proteção (o mercúrio é cancerígeno).



FIGURA 1

ENSAIO

1. Tomar cerca de 50 g do material que passa na peneira 40 (de uma amostra homogênea);
2. Determinar o volume da cápsula de contração (V_1) enchendo-a de mercúrio, removendo o excesso por pressão da placa de vidro contra a face superior da cápsula, e medindo o volume de mercúrio que a encheu, na proveta graduada de 25 cm^3 ;



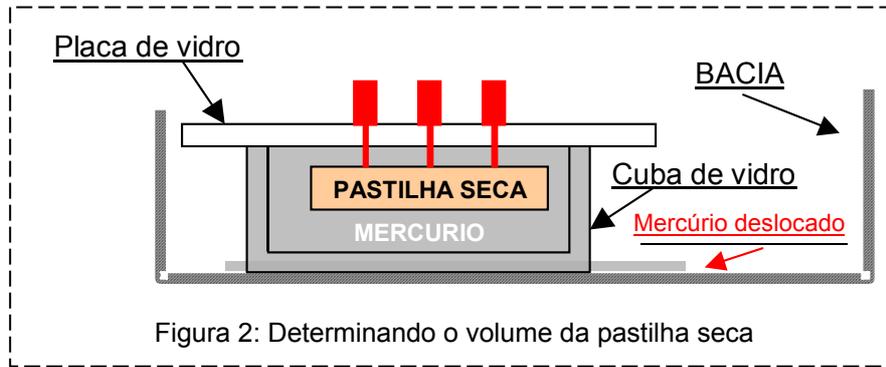
3. Colocar a amostra na bacia de porcelana e misturar lentamente água suficiente para saturar o solo, até obter massa fluida, homogênea, facilmente manipulável com a espátula e sem apresentar inclusão de bolhas de ar;
4. Lubrificar com vaselina ou óleo apropriado as paredes da cápsula de contração, de modo a impedir aderência do corpo de prova. Colocar no centro da cápsula de contração aproximadamente $1/3$ do volume do solo necessário para enchê-la, batendo-a, em seguida, de encontro a uma superfície firme, de modo que o solo ocupe todo o fundo. Repetir por mais duas vezes esta operação, enchendo completamente a cápsula de contração, de forma a obter uma superfície plana de solo. Em todo o processo sempre evitar formação de bolhas de ar;
5. Secar ao ar até sensível mudança de tonalidade, deixando depois em estufa a 105°C - 110°C até constância de peso;



- Determinar, com aproximação de $0,1\text{g}$ a massa do solo seco contido na cápsula de contração (M_2);
6. Determinar o volume da pastilha seca da seguinte forma:
 - 6.1. colocar na cápsula de porcelana a cuba de vidro, cheia de mercúrio, removendo o excesso por aplicação da placa com pinos;
 - 6.2. retirar a pastilha da cápsula de contração, colocando-a cuidadosamente sobre o mercúrio, na cuba; fazer pressão com a placa de vidro, de modo que os três pinos obriguem a pastilha imergir inteiramente no mercúrio, como na figura 2, medindo na proveta de 25 cm^3 o volume de mercúrio deslocado pela pastilha, que deverá ser anotado como volume de solo seco (V_2);



Evite a permanência de ar entre a placa de vidro e a pastilha.



RESULTADOS:

LIMITE DE CONTRAÇÃO (LC):

$$LC = 100 \cdot (V2 \cdot \mu \text{ água} / M2 - 1 / \delta) \quad (\%)$$

onde

δ = massa específica dos grãos de solo, obtida conforme a NBR 6508;
 $\mu \text{ água} = 1,000 \text{ g/cm}^3$ (massa específica da água);

GRAU DE CONTRAÇÃO (C)

$$C = 100 (V1 - V2) / V1 \quad (\%)$$

onde

V1 = volume inicial do corpo de prova (volume da cápsula de contração);
 V2 = volume do corpo de prova após a contração.

Segundo Scheidig, e sem caráter decisivo,

C < 5% BOM	5% < C < 10% REGULAR	10% < C < 15% POBRE	C > 15% PÉSSIMO
---------------	-------------------------	------------------------	--------------------

A análise de Scheidig é voltada à aplicação de solos como barragens, mas também pode ser aplicada à solos em encostas, como taludes de corte ou aterro, em que a terraplanagem retirou a proteção natural da vegetação.

Por exemplo: em um solo com grau de contração regular ou boa, normalmente não há necessidade de proteções especiais contra a ação do sol. Soluções simples como o plantio de vegetação (p.exemplo, grama) podem ser suficientes para evitar o aparecimento de trincas ou fissuras na superfície do talude.

Quando o solo tiver grau de contração pobre ou péssimo, a secagem produzirá fissuras que facilitarão a posterior entrada de água (p. exemplo, de chuva). No interior da fissura, estando à sombra, não haverá evaporação e a água é absorvida, aumentando o teor de umidade na região do fim da fissura. Eventualmente, em período chuvoso, o teor de umidade do solo pode se aproximar do limite de liquidez (em que a resistência ao cisalhamento é muito pequena). Torna-se então muito grande a possibilidade de deslizamento da encosta (queda de barreira por deslizamento), que é uma das muitas causas de desmoronamentos. ([ver simulação de um escorregamento nos slides da apresentação “limite de contração”](#)).

FICHA DE ENSAIO PARA OS LIMITES DE CONSISTÊNCIA

LIMITE DE LIQUIDEZ						
Cápsula nº						
Número de golpes N =						
Massa da cápsula (tara) Mc =						
Massa cápsula+solo+água Mas =						
Massa cápsula + solo seco Mcs =						
Massa da água Ma =						
Massa do solo seco Ms =						
Teor de umidade h =						
$h / (1,419 - 0,3 \text{ Log } (N))$ LLi =						
Média de pelo menos três LLi que não difiram da média mais que 5 % da média (arredondar) LL =						%

LIMITE DE PLASTICIDADE (massas em gramas)						
Cápsula nº.						
Massa da cápsula (tara) Mc =						
Massa da cápsula+solo úmido Mas=						
Massa da cápsula + solo seco Mas =						
Massa da água Ma =						
Massa do solo seco Ms =						
Teor de umidade % hi =						
Média de pelo menos três hi que não difiram da respectiva média mais que 5% da média (arredondar) LP=						

LIMITE DE CONTRAÇÃO						
Volume da cápsula de contração V1 =						
Massa do solo seco + cápsula de contração Mcs=						
Massa da cápsula de contração pc =						
Massa de solo seco p2=						
Volume da pastilha de solo seco V2=						
Densidade dos grãos δ =						
Grau de contração $100 \cdot (V1-V2)/V1$ C =						
$(V2 \cdot \rho \text{ água} / P2 - 1 / \delta) \times 100$ LC i =						
(média das determinações LCi)						LC=

A planilha de cálculo “Limites de Consistência”, disponível no cd, executa os cálculos e orienta a interpretação dos resultados.

Exercícios

- No ensaio para a determinação do Limite de Liquidez, se o sulco se fechar com 20 golpes no primeiro ponto, como deverá proceder o operador?
- Em que ensaio usamos a face esmerilhada de uma placa de vidro? Com que finalidade ela foi esmerilhada?
- Descreva sucintamente como obter o LL (limite de liquidez) e o LP (limite de plasticidade) de um solo.
- Com qual ensaio e como você quantificaria a plasticidade de uma areia pura?
- Que entende por coesão? E plasticidade? Em que tipos de solo ocorrem esses fenômenos?
- Qual é o IP de uma areia pura amarela cujo limite de liquidez é 5%?

7. O que indica o Índice de Consistência de um solo?
8. O que significa a abreviatura NP? Que observações conduzem a esta anotação?
9. A foto ao lado mostra o fundo de um reservatório de água, ao fim de um período de seca, no Suldo Brasil. Explique o fenômeno e faça uma previsão de conseqüências futuras, se esse solo for usado na construção de uma barragem de terra ou se ocorrer no alto de um talude de corte.
- 
10. Seria possível concluir, do gráfico de plasticidade de Casagrande, que:
- Solos sem coesão são sempre pouco compressíveis?
 - Argilas inorgânicas de baixa plasticidade são pouco compressíveis?
 - Solos orgânicos são sempre de baixa plasticidade?
 - Solos orgânicos são sempre muito compressíveis?
11. Um silte rosado tem $LL = 78\%$ e $LP = 50\%$. O que v. pode prever sobre sua compressibilidade?
12. No ensaio para determinar o Limite de Liquidez, você obteve:

Nº de golpes	33	30	27	23	19
umidade	45,98%	50,00%	52,94%	55,14%	60,26%
LL(i)					
Limite de Liquidez		LL =			

Calcule os valores $LL(i)$ pelo processo de cálculo do BPR e decida se o ensaio foi válido e o valor do Limite de liquidez. Confira o resultado pelo processo gráfico.

13. Na determinação do limite de plasticidade, foram obtidos os valores abaixo. Se o ensaio for válido, calcule o LP. Se não, informe a decisão apropriada.

31,0%	33,9%	34,8%	35,5%	36,2%
-------	-------	-------	-------	-------

INTRODUÇÃO

A elaboração de um sistema de classificação deve partir dos conhecimentos qualitativos e quantitativos existentes e, ao longo do tempo, ir acumulando informações e corrigindo distorções, até que em um mesmo grupo possam estar colocados solos com características semelhantes. No desenvolvimento de um sistema, deve-se ter o cuidado para que o volume de informações requeridas do usuário seja de fácil memorização para que se torne prático. Estas informações poderão ser obtidas, tanto através da identificação visual e táctil como através de ensaios simples de laboratório. A identificação fornecerá dados para um conhecimento qualitativo, enquanto que dos ensaios de laboratório resultarão dados quantitativos sobre o solo.

Existem diversos sistemas de classificação podendo cada um deles ser específico ou não. Por exemplo, sistemas com base na movimentação dos sedimentos, classificação pedológica, textura e aqueles que levam em consideração mais de um parâmetro do solo.

Os solos naturais não formam grupos distintos, com características bem definidas. As linhas divisórias usadas na classificação são necessariamente arbitrarias. Todas as classificações de solo são baseadas nas suas propriedades índices e podem servir como nomenclatura para descrever solos e fornecer alguma indicação às significativas propriedades físicas. Nenhum sistema de classificação de solos estabelece tais propriedades (p. exemplo, resistência a esforços externos ou compressibilidade). Um sistema de classificação rígido não pode abranger todas as propriedades dos solos necessárias para resolver variados problemas na Mecânica dos Solos.

IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS

A identificação do solo deverá ser o início do processo de classificação, realizada tanto em campo quanto no laboratório, precedendo a todo e qualquer ensaio que se pretenda realizar sobre o solo. A identificação pode ser feita através de testes visuais e tácteis, rápidos e específicos a cada tipo de solo. A NBR 7250 orienta a identificação e descrição de amostras obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos.

Para a fração grossa, pedregulhos e areias, informações quanto a composição granulométrica, forma das partículas, existência ou não de finos são sempre necessárias; estas partículas são ásperas ao tato, visíveis ao olho nu e se separam quando secas.

Para os solos finos, siltes e argilas, são importantes informações sobre plasticidade, resistência à compressão do solo quando seco, comportamento do solo quando imerso em água e cor. Partículas de silte são invisíveis a olho nu e os torrões secos quando imersos em água desagregam rapidamente. As argilas quando molhadas apresentam-se saponáceas ao tato e torrões quase secos apresentam uma superfície lisa e lustrosa e alta resistência à compressão.

Para os solos orgânicos, a cor e, às vezes, a proporção de matéria orgânica são informações úteis. Nestes, resistência à compressão do solo seco é geralmente pequena.

De acordo com o resultado dos testes, o solo será identificado por um nome, conforme recomendado pela NBR 7250/62.

COMENTÁRIOS GERAIS

Na Mecânica dos Solos procura-se criar um sistema de classificação que permita o agrupamento de solos dotados de características similares tanto do ponto de vista genético como do comportamento. A grande variedade de sistemas de classificação existente procura quase sempre, em bases mais ou menos arbitrarias, encontrar um princípio qualificador universal que possibilite agrupar a grande variedade de solos existentes em classes. O objetivo seria não só facilitar os estudos de caracterização como também antever o comportamento diante das solicitações, a que serão submetidos. Diferentemente das outras ciências, deve interessar à Mecânica dos Solos um sistema de classificação que priorize o comportamento dos solos à sua constituição, à sua origem, à sua formação, etc.

Sob aspecto mais prático pode-se dizer que é necessário haver várias classificações, que possam atender mais especificamente aos vários campos da Geotecnia. Um sistema de classificação que atenda aos

interesses da área de estradas pode não atender com a mesma eficiência à área de fundações. Em síntese, devem-se utilizar os sistemas de classificação existentes, com certa reserva, tendo em conta para que fim o sistema foi proposto e sobre que solos o processo foi elaborado. Sob este aspecto devemos ter um cuidado maior uma vez que os países criadores destes sistemas de classificação possuem climas bem diferentes do nosso e, portanto solos com condições particulares.

Nos países de origem dos sistemas de classificação tradicionais, geralmente do hemisfério norte com climas temperados, a fração areia e silte é quase totalmente composta por quartzo enquanto nos solos tropicais podem ocorrer minerais como feldspatos, micas, limonitas, magnetitas, etc., além de fragmentos de rochas e concreções lateríticas e que, por vezes, o mineral quartzo pode mesmo estar ausente da fração areia de muitos destes solos. Dentre os vários sistemas de classificação existentes serão tratados a seguir alguns dos mais comuns.

SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

A classificação a partir dos tamanhos das partículas é uma das formas mais comuns. Como a fração argila pode diferenciar amplamente nas suas propriedades físicas, a classificação apenas pelo tamanho é inadequada quando os solos contêm finos, especialmente os argilo-minerais. Sistemas de classificação mais elaborados têm surgido, levando em conta os limites de Atterberg associada à granulometria.

CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A identificação de amostras de solo pela granulometria inicia na classificação nas duas grandes divisões, solos grossos (ásperos) ou solos finos (macios ao tato). O exame visual das amostras permite avaliar a predominância do tamanho de grãos. Quando predominam grãos maiores que 2 mm, o solo deve ser classificado como pedregulho. Se percebida a predominância de grãos na faixa de 0,1 mm a 2 mm, deve ser classificado como areia. Um exame mais acurado de areias permite a classificação em areias grossas (ordem de grandeza 1mm), médias (0,5mm) ou finas (0,1mm). A classificação em solos grossos ou solos finos também pode ser feito com auxílio de lavagem da amostra em uma peneira de 0,075mm (nº. 200) e avaliação da porcentagem retida.

A composição granulométrica do solo determina, principalmente para os solos grossos, as características de seu comportamento. Nesta classificação os solos são designados pelo nome da fração preponderante. Esta afirmação deve ser analisada com rigor, pois se sabe que as definições não deveriam ser baseadas simplesmente nas frações majoritárias, uma vez que nem sempre são elas que ditam o comportamento de um solo. Assim, preferindo-se agrupar os solos quanto ao comportamento e não quanto às constituições, a classificação deveria denominá-lo de acordo com a fração mais ativa no seu comportamento. Embora hoje recomendada mais para os solos grossos (que não apresentam propriedades correlacionadas com a plasticidade) a classificação granulométrica tomou-se universalmente empregada.

Classificações granulométricas são prejudicadas por não existir concordância universal quanto ao intervalo de variação dos diâmetros de cada uma das frações que compõem os solos (escalas granulométricas).

Para a classificação granulométrica podem-se utilizar as próprias curvas granulométricas indicando a finura do solo e a forma da curva, ou diagramas triangulares, como o de FERET, muito utilizados para fins agrícolas, mas pouco em Mecânica dos Solos.

Nos diagramas triangulares, fazem-se corresponder aos três lados do triângulo as porcentagens respectivas de argila, silte e areia. É mais comum somar as porcentagens de pedregulho e areia antes de utilizar o diagrama triangular, e mencionar após a classificação, conforme o caso, a predominância de areia ou de pedregulho. Havendo o improvável interesse em classificar a fração fina do solo pela granulometria, se ocorrer pedregulho (grãos maiores que 2,0 mm), as porcentagens de areia, silte e argila são divididas pela porcentagem de material passante na peneira de 2,0 mm. Isto faz com que a soma das porcentagens do material fino se aproximem de 100% e o triângulo de Feret possa ser usado.

Por exemplo, o solo correspondente ao ponto "S" na figura seguinte é formado por 20% de areia, 30% de silte e 50% de argila. Foi classificado como "argila".

O solo descrito pelo ponto "T", com 28% de argila, 49% de areia e 23% de silte, recebeu a classificação "lemo argiloso".

Lemo" foi o termo proposto para substituir "barro", que corresponde à "loam" em inglês, com o qual se designa uma mistura em proporções variadas de partículas de areia, silte e argila, com comportamento mal definido.

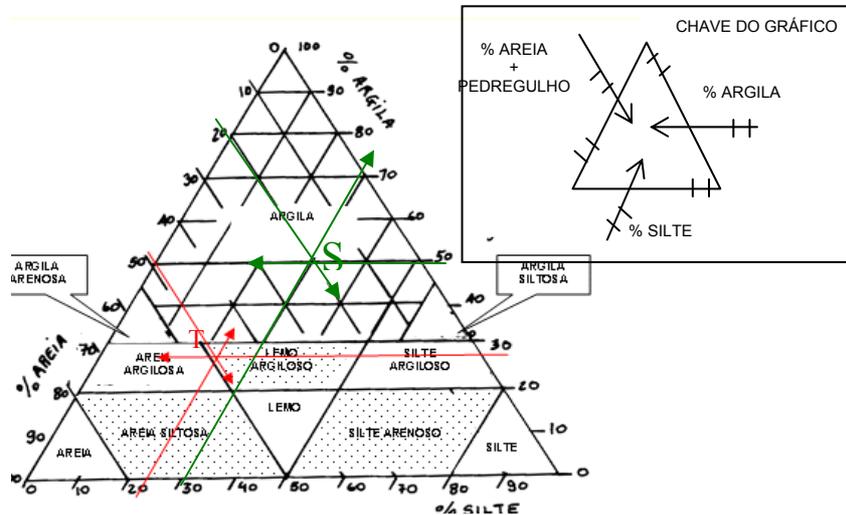


Figura 10.1: Diagrama de Feret (uma versão)

Tal classificação dos solos não tem valor geotécnico porquanto não leva nem mesmo em conta a forma das curvas granulométricas, que são importantes na determinação das propriedades geotécnicas dos solos grossos. Também não considera a plasticidade, cuja importância na resistência, compressibilidade e permeabilidade dos solos é enorme. O Sistema de Classificação baseado apenas na textura utiliza a curva granulométrica e uma escala de classificação.

A curva granulométrica define a distribuição das diferentes dimensões das partículas enquanto a escala define a posição relativa aos quatro grupos: pedregulhos, areias, siltes e argilas. As diferenças entre as diversas escalas granulométricas (ver capítulo 1) não alteram sensivelmente o nome dado ao solo.

Para a classificação do solo segundo a textura a partir da curva granulométrica obtida em laboratório, serão determinadas as porcentagens de cada fração de acordo com a escala adotada. Quando não se está empregando o triângulo de Feret, a fração predominante dará nome ao solo, que será adjetivado pela fração imediatamente inferior em termos percentuais.

Exemplo:

FRAÇÃO	% DE OCORRÊNCIA		
Pedregulho	0		
Areia	≈ 63	Grossa:	0
		Média:	8
		Fina:	55
Silte	9		
Argila	28		

Da curva granulométrica, obtiveram-se as porcentagens correspondentes a cada fração, mostradas no quadro acima. A fração predominante, em termos percentuais, é a areia, vindo a seguir a fração argila e finalmente silte.

Da observação dos valores, nota-se que o solo não tem pedregulhos, nem areia grossa. A subdivisão da fração arenosa mostrou uma predominância da parte fina sobre os demais. Em face dos valores obtidos e da escala adotada o solo será classificado como: areia fina argilosa.

Se duas frações não predominantes se equivalerem em termos percentuais, o nome do solo continua ser o da fração predominante adjetivado pelas duas outras*.

Exemplo: um solo constituído principalmente de areia fina, com leve predominância da fração silte sobre a fração argila: areia fina silto-argilosa.

* A NBR 7250 recomenda: Não deve ser utilizada a nomenclatura quando aparece mais do que duas frações de solo (por exemplo: argila silto-arenosa), como resultado de análises de campo, exceto para mencionar a presença de pedregulhos. Tal detalhamento deve ser restrito a resultado de ensaios laboratoriais de classificação.

A cor do solo, quando seco, e a compactidade das areias ou a consistência das argilas, são informações que normalmente acompanham a classificação textural.

A compactidade das areias e as consistências das argilas estão relacionadas com os índices de resistência a penetração, que são obtidos durante a realização do ensaio de penetração em uma sondagem de simples reconhecimento, conforme descrito na NBR 7161/82.

SISTEMA AASHO

Esta classificação teve origem nos sistemas do *Bureau of Public Roads e Public Roads Administration*. Foi elaborada principalmente para uso dos engenheiros rodoviários e classifica subleitos em rodovias. É pouco usada atualmente, mas inspirou o sistema TRB, que será detalhado adiante. Os solos são classificados em grupos, de A-1 a A-7.

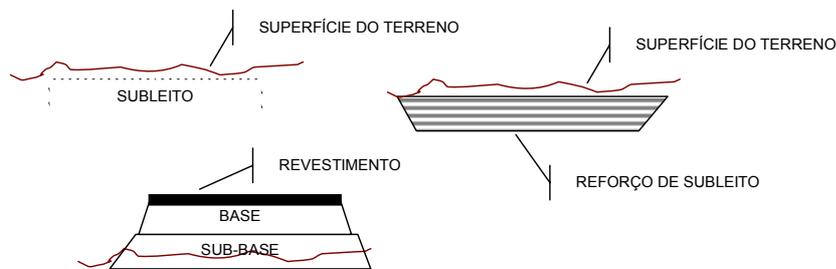


Figura 2: esquema da estrutura de pavimentos

O melhor material de subleito é um solo bem graduado constituído principalmente de pedregulho e areia mas contendo pequena quantidade de finos para servir de liga (A-1). Solos mal graduados, como areias finas, são difíceis de serem compactados para alcançar altas densidades e são menos desejáveis para suportar pavimentos (veja solo A-3). Solos contendo grande proporção de finos são inadequados como materiais de subleito. Estes são classificados de A-4 a A-7, na ordem decrescente de adequação como material de sub-leito. (Quando o subleito é inadequado, é executado um reforço de subleito, ou o material é substituído.). Argilas com altos índices de limite de liquidez e de plasticidade estão sujeitas a amplas variações na resistência durante os ciclos de secagem e umedecimento, que são indesejáveis. Quando nestes solos estão presentes em quantidades suficientes para influir no seu comportamento, o solo é enquadrado como A-6 ou A-7.

A classificação AASHO usa o mesmo índice de grupo, descrito adiante no sistema TRB.

SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO TRB*

A classificação TRB tem origem na classificação do *Public Roads Administration*. Fundamenta-se na granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade e foi proposta para analisar materiais para base e sub-base de pavimentos.

Tabela TRB

Classificação Geral	SOLOS GRANULARES (P200 < 35 %)							SOLOS SILTO-ARGILOSOS (P200 > 35%)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
P10	< 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P40	< 30	< 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-
P200	< 15	< 25	< 10	< 35	<35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35
LL	-	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
IP	< 6	< 6	NP	< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10
Índice de grupo (IG)	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Tipos de material	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		areia fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Classificação como subleito	Excelente a bom						Regular a mau				
Podemos acrescentar à estes o tipo A-8:solos orgânicos/turfas, imprestáveis como bases de pavimentos											

- 1) *P10, P40 e P200 são as % que passam nas peneiras #10, #40 e #200;*
 - 2) *LL e IP referem-se à fração passando na # 40;*
 - 3) *Para o subgrupo A-7-5: IP<LL-30 e para o A7-6: IP>LL-30;*
 - 4) *A classificação é feita da esquerda para a direita, razão porque o A-3 é colocado antes do A-2, sem que isso signifique superioridade...*
 - 5) *IG = 0,2 a + 0,005 a.c + 0,01 b.d*
- onde

$$a = p_{200-35} \text{ (se } P_{200} > 75 \rightarrow a=40 \text{ e se } P_{200} < 35 \rightarrow a=0)$$

(a) varia de 0 a 40;

$$b = p_{200-15} \text{ (se } P_{200} > 55 \rightarrow b = 55 \text{ e se } P_{200} < 15 \rightarrow b=0)$$

(b) varia de 0 a 40;

$$c = LL-40 \text{ (se } LL > 60 \rightarrow c = 20 \text{ e se } LL < 40 \rightarrow c=0)$$

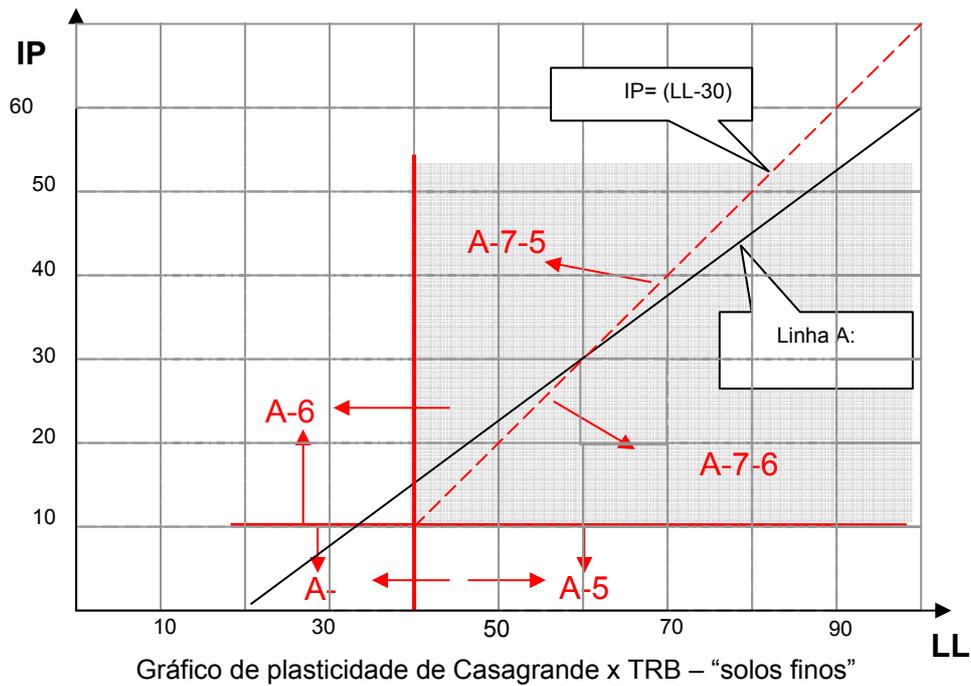
c varia de 0 a 20;

$$d = IP-10 \text{ (se } IP > 30 \rightarrow d= 20 \text{ e se } IP < 10 \rightarrow d=0)$$

d varia de 0 a 20.

Os valores de *a*, *b*, *c*, *d* e *IG* deverão ser expressos em números inteiros positivos.

Nesta classificação os solos são reunidos em grupos e subgrupos. Os "solos granulares" compreendem os grupos A-1; A-2, A-3 e os "solos finos" os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, três dos quais divididos em subgrupos. Na "tabela TRB" são indicados os tipos de material e a forma de identificação e classificação.



O gráfico de plasticidade permite facilmente classificar os "solos finos", conhecidos o LL e o IP.

Embora existam ábacos para a determinação do Índice de Grupo, recomendo a utilização de uma planilha, baseada na fórmula do IG. Uma planilha Excel que calcula o IG e ainda faz a classificação TRB está disponível no cd-rom. (Também no cd-rom está disponível uma planilha, desenvolvida no IME pelo Professor Álvaro Vieira, que executa a classificação SUCS e TRB).



Gráfico para determinação do Índice de Grupo (IG)

SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS – SUCS

TABELA III - Classificação Unificada dos Solos						
Processo para identificação no campo				Grupo	Designação característica	
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais de metade é maior que a abertura da peneira de malha nº 40	PEDREGULHOS Mais de metade da fração grosseira e maior que a # nº 10	PEDREGULHOS PUROS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		GW	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.
			Predominância de um tamanho de grão ou graduação falhada (ausência de alguns tamanhos de grão)		GP	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino.
		PDREGULHOS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH).		GF	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.
			Finos plásticos (CL ou CH)		GC	Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila bem graduados.
	AREIAS Mais que metade da fração grosseira menor que a # nº 10	AREIAS PURAS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		SW	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			Predominância de um grão ou graduação falhada		SP	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		AREIA COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (ML ou MH)		SF	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte.
			Finos plásticos (CL ou CH ou OH)		SC	Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila.
	SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA Mais que a metade do material é menor que a abertura de malha da # 200	Processo de identificação executado sobre a fração < # nº 40			A abertura da malha # nº 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu	
		ENSAIO EXPEDITO →	RESISTENCIA a SECO (esmagamento pelos dedos)	DILATÂNCIA (DILAÇÃO) (sacudindo na palma da mão)		
SILTES E ARGILAS Limite de Liquidez menor que 50		nenhuma a pequena	rápida a lenta	nenhuma	ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade.
		média a elevada	Nenhuma a muito lenta	média	CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.
		Pequena à média	lenta	pequena	OL	Siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade
SILTES E ARGILAS Limite de liquidez maior que 50		Pequena a média	Lenta a nenhuma	Pequena a média	MH	Siltes inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltes elásticos.
		Elevada a muito elevada	nenhuma	elevada	CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.
		Média a elevada	Nenhuma a muito lenta	Pequena a média	OH	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade
TURFAS		Facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e freqüentemente pela textura fibrosa.			Pt	Solos com elevado teor de matéria orgânica

(fonte: Milton Vargas, "Introdução à Mecânica dos Solos")

Para classificar uma amostra pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos, percorra a tabela III da direita para a esquerda, e de cima para baixo.

O sistema SUCS (ou U.S.C.) é o aperfeiçoamento da classificação de Casagrande para utilização em aeroportos, adaptada para uso no laboratório e no campo pelas agências americanas "*Bureau of Reclamation*" e "*U.S. Corps of Engeneers*", com simplificações que permitem a classificação sistemática. Foi proposto por Arthur Casagrande no início da década de 40.

Pela primeira vez os solos orgânicos foram considerados como um grupo de características e comportamento próprio e diferente dos outros dois. As mais significativas mudanças e revisões, da norma antiga, podem ser resumidas em 4 itens:

- A classificação de um solo é feita através de um símbolo e de um nome;
- Os nomes dos grupos, simbolizados por um par de letras, foram normalizados;
- Argilas e siltes orgânicos foram redefinidas;
- Foi estabelecida uma classificação mais precisa.

Termos e símbolos utilizados:

SOLOSGROSSOS:

- G = *gravel* (pedregulho)
- S = *sand* (areia)
- W = *well graded* (bem graduado)
- P = *poorly graded* (mal graduado)
- C = *clay* (com argila)
- F = *fine* (com finos)

SOLOS FINOS:

- L = *low* (baixa compressibilidade)
- H = *high* (alta compressibilidade)
- M = *mo* (silte em suco)
- O = *organic* (silte ou argila, orgânicos)
- C = *clay* (argila inorgânica)

TURFAS (Pt):

Solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e muito compressíveis.

Os solos estão distribuídos em 6 grupos: pedregulhos (G), areias (S), siltes inorgânicos e areias finas (M), argilas inorgânicas (C), e siltes e argilas orgânicos (O). Cada grupo é então dividido em subgrupos de acordo com suas propriedades índices mais significativos.

Os pedregulhos e areias com pouco ou nenhum material fino são subdivididos de acordo com suas propriedades de distribuição granulométrica como bem graduado (GW e SW) ou uniforme (GP e SP).

Se o solo (grosso) contém mais que 12% de finos, suas propriedades devem ser levadas em conta na classificação. Como a fração fina nos solos pode ter influência substancial no comportamento do solo, os pedregulhos e areias têm outras duas subdivisões.

Se o solo (grosso) contém 5% a 12% de finos, deverá ser representado por símbolo duplo: primeiro o do solo grosso (GW, GP, SW, SP), seguido pelo que descreve a fração fina:

- Aqueles com fração fina silte são GM ou SM.
- Se os finos contêm argilas plásticas, os solos são GC ou SC.
- Se os finos são orgânicos, acrescentar “com finos orgânicos”.
- Se em pedregulho a areia >15%, acrescentar “com areia”.
- Se em areia o pedregulho ultrapassa 15%, acrescentar “com pedregulho”.

Exemplos:

GW-GM = “pedregulho bem graduado com silte”

SP-SC = “Areia mal graduada com argila”

“GW com areia”

Para solos finos, se o retido na peneira 200 for maior que 30%, devemos acrescentar, conforme o caso: “arenoso” ou “pedregulhoso”. Se entre 15% e 30%, “com areia” ou “com pedregulho”. Para solos finos as

propriedades índices mais importantes são os limites de consistência, usados para subdividir as argilas dos siltes.

TABELA II – CLASSIFICAÇÃO GERAL SUCS		
Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (menos que 50 % passando na # 200)	Pedregulho ou solo pedregulhoso (<i>Gravel</i>)	GW,GP,GC e GM
	Areia (<i>Sand</i>) ou solo arenoso	SW, SP, SC E SM
SOLOS FINOS (mais que 50 % passando na # 200)	Silte(M) ou argila(C)	Baixa compressibilidade (LL < 50) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL > 50) MH, CH, OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfa (<i>Peat</i>)	Pt

No gráfico de plasticidade, a linha A é uma fronteira arbitrária entre argila orgânica (CL e CH) que estão acima desta linha e os siltes inorgânicos e argilas orgânicas (ML, MH, OL, e OH) que estão abaixo. As argilas e siltes são ainda divididas naqueles de alta e baixa compressibilidade de acordo com o LL. Isto é baseado na observação empírica em que a compressibilidade do solo cresce com o LL. Solos com LL superior a 50% são classificados como de alta compressibilidade (MH, CH).

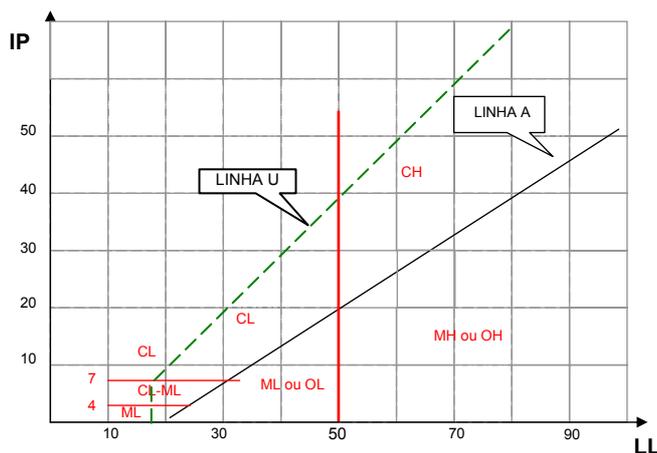


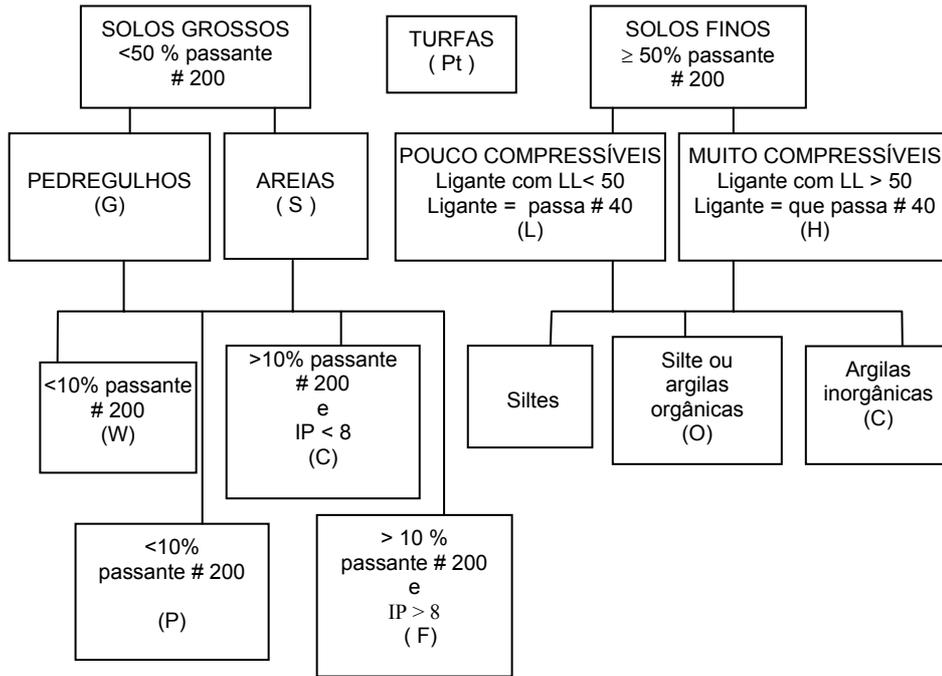
GRÁFICO DE PLASTICIDADE x SOLOS FINOS (SUCS)

A linha U é um limite superior (empírico) para solos naturais: quando o LL e o IP situam o solo na região acima da Linha U, os resultados de ensaios devem ser verificados. Inicia vertical para LL = 16% até IP = 7% e a partir desse ponto é representada pela equação $IP = 0,9 (LL - 6)$.

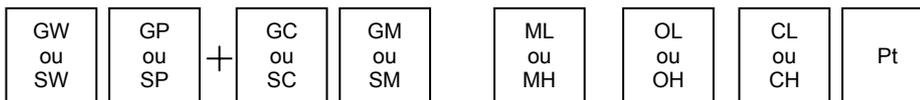
A não consideração de $LL < 16\%$ foi devido a um trabalho da *United States Bureau Reclamation*, que ensaiando mais de mil amostras obteve apenas quatro com $LL = 17\%$, uma com $LL = 16\%$ e nenhuma com valor menor (Howard, 1984).

Obs.: O símbolo duplo CL-ML designa “argila siltosa”(com baixa compressibilidade).

Esquematisando um pouco mais:



São classificações possíveis:



Exemplos:

GW (pedregulho bem graduado),

GW-GC (pedregulho bem graduado, com a pequena fração fina constituída por argila),

GW-GM (pedregulho bem graduado, com a pequena fração fina constituída por silte),

GP, GP-GC, GP-GM,

SW, SW-SC, SW-SM,

SP, SP-SC, SP-SM,

ML, MH, OL, OH, CL, CH, Pt,

CL com pedregulho (solo CL com pedregulho, 15 a 30% em peso retido na #200)

CL pedregulhoso (solo CL tendo pedregulhos, com mais de 30% retido na #200).

Classificação Visual dos Solos (SUCS) (com ajuda da tabela III)

O exame da granulometria, no campo, exige paciência e método. Secar a amostra do solo, espalhando-a sobre um papel branco. Com auxílio de uma lupa (lente de aumento), separar e avaliar a quantidade de grãos individualmente visíveis. Se a maioria for visível, o solo é grosso, se não, fino. Separar então, dentre os visíveis, os grãos maiores que 2 mm (diâmetro). Se formarem mais da metade da fração de grãos visíveis, é um solo pedregulhoso, se não, arenoso.

Com a parte fina, fazer os exames de Dilatância (Dilação), Resistência a seco e Rigidez.

OBS. O termo dilatância é mal empregado, embora subscrito pelo costume. O correto é DILAÇÃO, pois trata da rapidez ou demora (e nitidez) com que a água aparece na superfície ao ser sacudida horizontalmente a amostra, na mão. Quanto mais rápido e nítido for essa manifestação, maior possibilidade a amostra tem de conter alta proporção de silte e/ou areia fina. O ensaio de dilatação é pouco utilizado, e pode ser substituído pela observação da maneira como a amostra se fragmenta quando amassada entre os dedos, com objetivo de secagem, ao passar do estado plástico para o estado semi-sólido: se ocorre uma "pulverização", provavelmente terá muito silte ou areia fina, se fragmentar-se em pequenos torrões, argila.

No exame de RIGIDEZ, no campo, proceder de forma semelhante ao ensaio de plasticidade. Umedecida a amostra, formar um cilindro como o do exame mencionado, até que este comece a se romper. Neste momento, redobra-se a atenção, verificando sua rigidez e aspereza. A aspereza indica presença de areia. Quanto mais rija a massa, maior a presença e atividade da fração argilosa.

Completa-se a classificação visual do solo com a observação de seu estado indeformado, ao natural. Aos solos grossos acrescenta-se o julgamento de sua COMPACIDADE (densa ou fofa). Para os solos finos, interessa a CONSISTÊNCIA. Se uma amostra indeformada de solo fino pode ser amassada com os dedos, tem consistência mole. Se não, rija ou dura.

Os estados de compactidade e consistência podem ser avaliados por correlação com o índice de resistência à penetração, obtido com o *Standart Penetration Test* (SPT) por exemplo. Areias e siltes arenosos são classificados por sua compactidade, argilas e siltes argilosos pela consistência, conforme a tabela seguinte.

Tabela – Classificação dos solos conforme a resistência a penetração		
Solo	Índice de resistência à penetração	Designação
Areia e silte arenoso	≤ 4	Fofa
	5 a 8	Pouco compacta (o)
	9 a 18	Medianamente compacta
	19 a 40	Compacta (o)
	> 40	Muito compacta (o)
Argila e silte argiloso	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

A SENSIBILIDADE de um solo argiloso pode ser avaliada depois de ser amolgada a amostra. Argilas sensíveis são rijas ao natural, e ficam moles e pegajosas após serem amassadas com os dedos.

A COR do solo (avaliada logo após a coleta) deve ser descrita por códigos numéricos quando se dispõe de tabela de cores (por exemplo, tabela de Munsell). Apesar do caráter subjetivo, podem ser usadas as designações: branco, cinza, preto, marrom, amarelo, vermelho, rosa, azul e verde, complementadas por claro e escuro. Podem ser usadas até duas designações de cores. Havendo mais de duas cores, deve ser utilizado o termo “variegado” no lugar do relacionamento de cores.

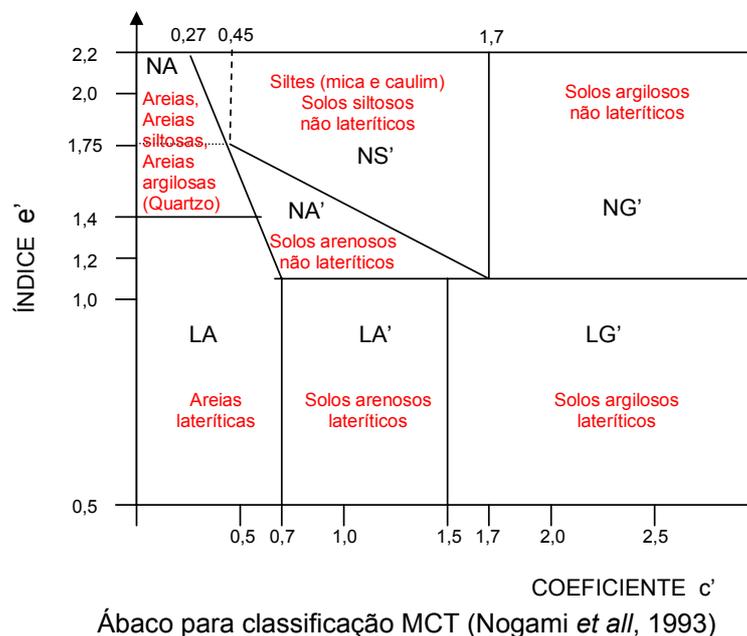
Finalmente, deve-se observar a ORIGEM GEOLÓGICA do solo, isto é, se porventura se trata de solo residual, coluvial, etc. Também deve ser observada a macroestrutura, sua proveniência, se teve evolução pedogênica (comum em solos porosos), e a existência de furos de raízes, formigueiros e fissuras. Todos estes fatores têm influência e importância na previsão das propriedades estruturais de um solo, sob o ponto de vista geotécnico.

Para adquirir experiência: Faça classificações expeditas (anote suas avaliações) e compare-as com resultados obtidos após ensaios. A experiência adquirida pela atenção constante aliada a comparações permite que a frequência de erros se torne cada vez menor, e as inseguranças de um recém-formado tornem-se as certezas de um engenheiro sênior.

CLASSIFICAÇÃO PARA OS SOLOS TROPICAIS (MCT) (primeira apresentação)

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos não se mostra satisfatório para solos tropicais em face do seu comportamento diferenciado. Uma classificação mais apropriada aos solos tropicais, com ênfase em projetos de estradas, foi proposta por (Nogami e Vollibor, 1961), separando-se os solos em dois grupos: um de comportamento laterítico e outro não laterítico. O sistema de classificação MCT (Mini-Compacto-Tropical) procura determinar as características dos solos por meio de ensaios realizados com corpos de prova de dimensões reduzidas, compactados dinamicamente e considerando também a granulometria e propriedades pedológicas.

A classificação MCT nasceu da percepção de que solos tropicais, por estarem sujeitos a chuvas abundantes e frequentes, costumam comportar-se de modo diferente dos solos originalmente estudados no hemisfério norte. Tem como parâmetros principais os resultados do ensaio mini-CBR: esforço de penetração, absorção, expansão e contração, mais permeabilidade, perda de massa por imersão, granulometria entre 2,00 e 0,075 mm.



O ábaco de classificação MCT é subdividido em sete regiões, onde os solos de comportamento não laterítico ocupam a parte superior e os de comportamento laterítico estão situados na parte inferior do gráfico.

A cada uma das regiões foram associadas duas letras: a primeira letra N ou L indica o comportamento não laterítico ou laterítico e a segunda (A,A',S',G') complementa a classificação, indicando a fração granulométrica dominante.

Neste gráfico os solos coesivos estão localizados à direita e os não coesivos à esquerda.

O gráfico é definido com base nos resultados do ensaio de Mini-MCV (*Mini-Moisture Condition Value*) (Soria e Fabbri, 1960).

A primeira variável usada como abscissa e simbolizada por c' representa a inclinação do trecho reto da curva Mini-MCV para 10 golpes e em ordenadas estão colocados os valores e' calculados pela equação empírica

$$e' = (20/d + \text{Pi}/100)^{1/3}$$

onde

d' é a inclinação do ramo seco da curva de compactação para uma energia correspondente a 12 golpes (aproximadamente igual à do Proctor Normal, 560 kJ/m^3) e Pi é a percentagem de perda de material por imersão.

CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PEDOLOGIA

Pedologia é o estudo do desenvolvimento do solo próximo à superfície. O perfil do solo geralmente mostra uma seqüência de camadas (chamadas de horizontes) que se estende de 1,5 m a 3,0 m abaixo da superfície. As propriedades destes horizontes refletem nos materiais que lhe deram origem e afeta fatores ambientais tais como clima, inclinação do talude, e a vegetação sobre o processo de formação. Este sistema classifica os solos de acordo com as características dos horizontes sucessivos.

As características usadas para classificação incluem cor, textura, espessura dos horizontes, etc. Aos solos são designados nomes especiais, freqüentemente os nomes da localidade onde tais perfis do solo foram primeiramente identificados. Perfis semelhantes encontrados subsequentemente em outros locais são designados pelo mesmo nome.

Pedologia é designação de um sistema de classificação dos solos e que os considera como parte natural da paisagem e tem seu interesse maior no estudo da origem e de sua evolução ao longo do tempo. Após a intemperização da rocha o solo começa a sofrer transformações e a se organizar em horizontes, de aspectos e condições diferentes e aproximadamente paralelos à superfície do terreno. O perfil de um solo bem desenvolvido possui quatro horizontes, que poderão ser subdivididos e convencionalmente identificados pelas letras O, A, B, C, e R

Principais características:

Horizonte O:

- Matéria vegetal cobrindo a parte superficial do solo mineral;
- Pequena espessura;
- Presente apenas em locais com muita vegetação;
- Sem valor para a engenharia, quer como material de construção ou de suporte;
- Deve sempre ser removido mesmo em obras de pequeno porte.

Horizonte A:

- Solo mineral mais próximo da superfície;
- Principal característica, matéria orgânica em decomposição;
- Fonte de sólidos carregados pela água para os horizontes inferiores;
- Muito poroso;
- Alta compressibilidade;
- Não deve ser aproveitado como material de construção nem como elemento de suporte, mesmo de pequenas obras.

Horizonte B:

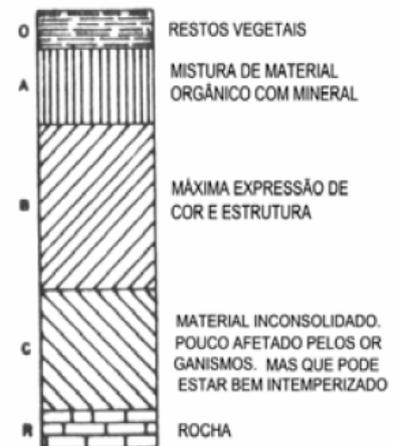
- É o receptor dos sólidos carregados de A;
- Apresenta um desenvolvimento máximo de cor e estrutura;
- Pode ser utilizado como fundação de pequenas estruturas e como material de construção.

Horizontes C e D:

- Zona de transição para a rocha;
- Não afetado pelos agentes de alteração (Biológicos, Físicos e Químicos) dos horizontes superiores;
- Mantém características próximas da sua origem geológica;
- Usado tanto como empréstimo ou fundação.



OS CORTES SÃO ÚTEIS À OBSERVAÇÃO DOS HORIZONTES



ESQUEMA DE UM PERFIL DE SOLO HIPOTÉTICO MOSTRANDO OS PRINCIPAIS HORIZONTES (LEPSCH, 1976)

Abaixo do horizonte C:

- Rocha, algumas vezes indicada pela letra R.

Os horizontes O, A, e B podem ser subdivididos para indicar diferentes graus de alteração e a passagem de um horizonte para subseqüente é gradual tanto na cor quanto na quantidade de matéria orgânica. O pedólogo considera como solo o conjunto dos horizontes O, A, e B, enquanto que para o engenheiro civil solo é o conjunto dos horizontes B e C. Existem diferentes sistemas de classificação pedológica dos solos. No Brasil, o sistema usado é uma adaptação às condições brasileiras distribuindo os solos em três ordens: zonais, azonais e intrazonais.

Características que refletem a influência do clima e dos organismos vegetais na sua formação:

Solos zonais:

- São bem desenvolvidos (maduros), pois houve tempo suficiente para que o estado de equilíbrio final com a natureza fosse alcançado;
- Profundos, com os horizontes A, B e C bem diferenciados e cujas características são bem mais desenvolvidas em regiões altas com taludes suaves e boa drenagem.

Solos intrazonais:

- Podem ser formados em locais de topografia suave com clima úmido e nível de água próximo a superfície;
- Em regiões áridas ou próximas do mar resultando uma concentração de sais solúveis muito grande;
- Alguns solos do grupo apresentam um alto teor de montmorilonita, com comportamento não desejado na engenharia geotécnica.

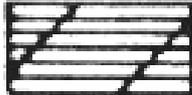
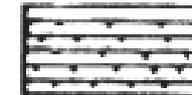
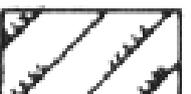
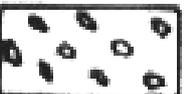
Solos azonais:

- Características pouco desenvolvidas, devido a formação recente. A natureza do relevo e do material original impede o desenvolvimento de características típicas do clima onde ocorrem.
- Não possuem o horizonte B e os horizontes constituintes são pouco espessos e apoiados sobre o horizonte C ou sobre a rocha.

Este sistema de classificação pedológica é muito usado em agronomia, sendo pouco usado na engenharia civil, embora possa ser de muita valia na fase de reconhecimento para uma obra de grande porte.

ORDENS E SUB-ORDENS DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA	
ORDEM	SUB-ORDEM
Zonal	Latossolos Podzólicos Podsol Brunizem (Solo de Pradana) Bruno não cálcico Desértico Tundra
Intrazonal	Salino (Haomórfico) Hidromórfico Grumossolo
Azonal	Litossolo Regussolo Aluvial Cambissolo

Convenções para a representação gráfica de solos.

				
PISO E ENTULHO	ATERRO	ATERRO ARGILOSO	ATERRO SILTOSO	ATERRO ARENOSO
				
TURFA (TERRENO VEGETAL ORGÂNICO)	MATÉRIA ORGÂNICA	AREIA	AREIA POUCA ARGILOSA	AREIA MUITO ARGILOSA
				
AREIA ARGILO-SILTOSA	AREIA SILTOSA	AREIA COM NÓDULOS DE ARGILA	AREIA COM PEDREGULHO	ARGILA
				
ARGILA SILTOSA	ARGILA ORGÂNICA	ARGILA ORGÂNICA SILTOSA	ARGILA ARENOSA	ARGILA SILTO-ARENOSA
				
ARGILA COM NÓDULOS DE AREIA	ARGILA COM LENTES DE AREIA	SILTE	SILTE ARENOSO	SILTE ARGILO
				
SILTE ARGILO-ARENOSO	PEDREGULHO	PEDREGULHO ARGILOSO	PEDREGULHO SILTOSO	SOLO RESIDUAL

CLASSIFICAÇÃO QUANTO À MOVIMENTAÇÃO DOS SEDIMENTOS

Assim que a ação do intemperismo se faz manifestar sobre uma rocha, gerando os sedimentos, poderão estes permanecer em seu local de origem ou serem movimentados para outros locais por agentes da natureza. Se os sedimentos permanecem no local de origem, com o processo de alteração que se seguirá, resultará um solo com textura bem graduada, denominado de solo residual. Embora para os geólogos não seja esta a melhor denominação, está consagrada para os engenheiros de solos e deverá permanecer.

Nos depósitos de solos residuais, as dimensões das partículas são muito variadas por causa da diferença das resistências à ação do intemperismo dos minerais constituintes da rocha matriz. Com isso estes depósitos poderão ter blocos de grandes dimensões denominados matacões. A sua existência pode impedir a penetração das ferramentas utilizadas na investigação do subsolo e podendo induzir o técnico responsável pelo serviço a uma interpretação errada do perfil ao supor ter encontrado o manto rochoso. Os sedimentos formados pela intemperização da rocha poderão ser movimentados para outros locais originando os solos de sedimentos transportados. Durante o transporte os sedimentos poderão sofrer alteração na forma e dimensões iniciais, além de sedimentos de origens diversas serem incorporados na massa em movimentação.

Os agentes de transporte mais comuns são a gravidade, água, geleira e vento, cada um deles originando a formação de solos com características próprias.

Os sedimentos transportados por gravidade, devido a diferença de nível entre dois pontos, se localizam na base de uma elevação, originando os solos coluvionares (talus). São solos bem graduados com ampla variação das dimensões partículas e com a fração grossa mantendo a forma original em face da pequena distância de transporte.

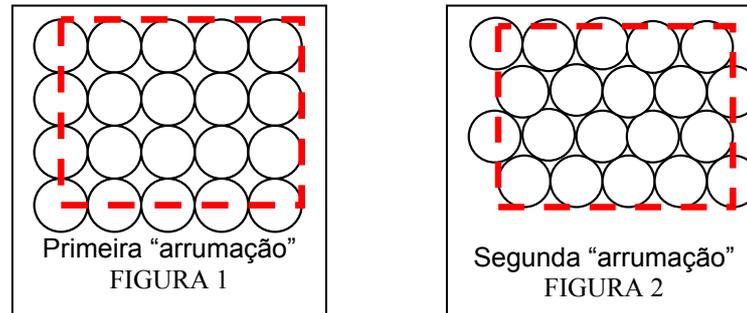
Quando os sedimentos são transportados pela água há uma seleção natural dos mesmos, com os maiores sendo depositados a uma distância menor e os menores a uma distância maior do local de início do transporte. Esta seleção dependerá da velocidade da água. Os solos assim originados são denominados aluvionares. Estes solos apresentam partículas com dimensões que variam em um intervalo menor do que os solos coluvionares. O transporte dos sedimentos pela água permite que mesmo aqueles com dimensões maiores sejam rolados a uma distância que provoque alterações na sua forma e dimensões iniciais.

Os sedimentos transportados por geleiras darão origem a solos glaciários com textura bem graduada, podendo conter desde matacões até partículas de dimensão argila. Em face do grande volume de uma geleira, os sedimentos transportados preservam a forma e dimensões iniciais, enquanto aqueles que se encontram no plano de deslizamento têm face polida. Quando a geleira termina a sua movimentação e inicia o processo de degelo, deixará no local os sedimentos transportados para geração de depósitos de solos denominados glaciários.

Os sedimentos transportados pelo vento dão origem aos solos eólicos, que são mal graduados, porosos, pouco densos e estruturalmente instáveis. Durante o transporte de sedimentos ocorrerá sempre a possibilidade de serem agregados elementos de fontes diferentes que poderão dificultar a identificação da fonte principal de origem dos sedimentos. As dunas constituem o principal exemplo deste tipo de solo.

Capítulo 11 – Compacidade dos solos granulares

A compacidade de um solo granular depende da maneira com que suas partículas sólidas se dispõem. Como primeira apresentação, imaginemos que as partículas sólidas de um solo sejam perfeitamente esféricas e sejam cuidadosamente arrumadas segundo os modelos seguintes:



Analisando as duas configurações (planas) nota-se, por uma simples contagem de círculos nas áreas delimitadas por linha tracejada, que na primeira arrumação existem 12 partículas inteiras, mais sete metades, mais um quarto de partícula. Vale dizer que existem aproximadamente 15,75 partículas naquela área. Na segunda configuração, existem 16 partículas inteiras, mais quatro metades, o que soma 18 partículas. A quantidade de partículas na mesma área cresceu aproximadamente 14% ($18/15,75=1,14$). Supondo (por baixo) o mesmo crescimento na terceira dimensão, poderemos considerar que a quantidade de partículas em um volume atingirá uma diferença de 30% ($1,14 \times 1,14=1,299$), conforme as partículas estejam “mal arrumadas” ou “bem arrumadas”. No caso da primeira configuração, o solo encontra-se em estado mais fofo (ou menos compacto) do que na segunda. Observar que na segunda arrumação o índice de vazios é bem menor que na primeira. Arrumação ainda melhor que a segunda pode ser conseguida, submetendo o recipiente à vibração enquanto as esferas são nele derramadas.

Em modelos como os apresentados, o índice de vazios varia de 0,91 a 0,35 e a porosidade de 48% a 26%. (Caputo,1967).

Descreve-se a compacidade de um solo granular por expressões qualitativas (muito fofo, fofo, medianamente compacta, compacta) quando esta tiver sido apenas avaliada. A avaliação pode ser feita, por exemplo, por correlação com a dificuldade de penetração observada durante ensaios de campo, como o *Standart Penetration Test (SPT)*, ou o *Cone Penetration Test (CPT)*.

O Grau de Compacidade (GC) ou Grau de Compacidade Relativa (CR) exprime quantitativamente a mesma informação. É utilizado quando foram obtidos o Índice de Vazios Máximo (e_{MAX}), o Índice de Vazios Mínimo (e_{MIN}) e o Índice de Vazios Natural (e_{NAT}). Chamamos “natural” ao índice de vazios que o solo apresenta em seu local de origem (como o obtido com base em amostra indeformada), mesmo após a execução e um trabalho. À informação quantitativa deve-se acrescentar a interpretação qualitativa mencionada anteriormente.

O GC também pode ser calculado a partir do Peso Específico Aparente Máximo (γ_{MAX}), Mínimo (γ_{MIN}), e Natural (γ_{NAT}).

Grau de Compacidade (GC) ou Compacidade Relativa (CR)

Por definição:

$$GC = (\epsilon_{MAX} - \epsilon_{NAT}) / (\epsilon_{MAX} - \epsilon_{MIN})$$

onde

ϵ_{MAX} = índice de vazios do solo no estado o mais solto possível;

ϵ_{NAT} = índice de vazios do solo ao natural;

ϵ_{MIN} = índice de vazios do solo no estado mais denso possível.

ou

$$GC = \gamma_{sMAX} \cdot (\gamma_{sNAT} - \gamma_{sMIN}) / \gamma_{sNAT} \cdot (\gamma_{sMAX} - \gamma_{sMIN})$$

onde

γ_{sMAX} = peso específico aparente máximo, obtido conforme especificado pelo método de ensaio MB-3324 (ABNT);

γ_{sMIN} = peso específico aparente mínimo, obtido conforme especificado pelo método de ensaio MB-3388 (ABNT);

γ_{sNAT} = peso específico aparente do solo, obtido no campo ou por amostra indeformada.

(os mesmos resultados aparecem se forem substituídos todos os pesos específicos pelas massas específicas)

O grau de compactidade (GC) é definido apenas para solos granulares, não coesivos, contendo no máximo 12% em massa de material que passa na peneira de 0,075 mm (#200).

Para calcular o Grau de Compactidade de um solo granular, necessitamos obter os índices de vazios mencionados. Para tanto, devem ser consultadas as seguintes normas técnicas:

Determinação do Índice de vazios máximo (ϵ_{MAX}): MB-3324(ABNT);

Determinação do Índice de vazios mínimo (ϵ_{MIN}): MB 3388 (ABNT).

Para a determinação do índice de vazios natural obtém-se o peso específico aparente seco e o peso específico dos grãos (processos vistos anteriormente) e calcula-se

$$\epsilon_{NAT} = (\gamma_g / \gamma_s) - 1$$

Recomenda-se leitura dos seguintes documentos da ABNT:

MB-28 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica;

MB-29 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.

MB33 – Solo – Ensaio de compactação.

A compactidade relativa fornece uma indicação do estado de compactidade de uma massa de solo (natural ou manipulado). No entanto, diversas propriedades utilizadas na engenharia, como resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade, de um solo tornado mais denso por métodos distintos, podem variar muito. E solos distintos, no mesmo estado de compactidade, também podem apresentar diferenças nessas propriedades. Deve ser usado muito discernimento ao relacionar propriedades de engenharia ao estado de compactidade.

Segundo Terzaghi, as areias se classificam como:

Fofas ou soltas, se $0 < CR < 1/3$

Medianamente compactas se $1/3 < CR < 2/3$

Compactas se $2/3 < CR < 1$.

Não é incomum encontrar $GC > 1$. A própria norma alerta ser muito difícil conseguir o índice de vazios mínimo em laboratório, senão impossível. Na passagem dos séculos, uma jazida arenosa pode ter sofrido terremotos (vibrações) simultaneamente com pressões e/ou inundações, e as partículas podem ter se desorganizado e organizado muitas vezes, até atingir um posicionamento ideal que não mais permite acomodação. O fenômeno é chamado “pré-adensamento”.

VISÃO GERAL (muito simplificada) para a determinação de eMAX, eMIN e eNAT, para o cálculo do Grau de Compacidade:

O índice de vazios do solo ao natural (e NAT) é obtido a partir dos ensaios de determinação da massa específica aparente (γ) e da massa específica real das partículas (γ_g), estudados anteriormente.

$$e_{NAT} = (\gamma_g / \gamma_s) - 1 = (\rho_g / \rho_s) - 1$$
$$\gamma_s = 100 \gamma / (100 + h) \text{ e } \rho_s = 100 \rho / (100 + h)$$

Para a determinação de eMAX e eMIN, o equipamento (em resumo) consiste de: molde cilíndrico, mesa vibratória, balanças apropriadas, funil, régua biselada, paquímetro.

Operações preliminares:

Medir altura e diâmetro interno do molde, calcular seu volume interno.

Obter a massa (pesar) do cilindro vazio (M_c).

Determinação do índice de vazios máximo (eMAX):

Colocar suavemente o material granular em estudo no cilindro, sem permitir qualquer vibração e evitando acomodação das partículas.

Rasar o excesso, limpar externamente o cilindro, pesar o conjunto (M_x).

Esvaziar e limpar o cilindro. Calcular a massa da amostra $M_1 = M_x - M_c$ e calcular

$$e_{MAX} = (V - M_1 / \rho_g) / (M_1 / \rho_g)$$

Determinação do índice de vazios mínimo (eMIN):

Sob vibração (ver especificações na norma), tornar a encher o molde, rasar o excesso, limpar externamente o cilindro, pesar o conjunto (M_y).

Calcular a massa da amostra densificada $M_2 = M_y - M_c$ e calcular:

$$e_{MIN} = (V - M_2 / \rho_g) / (M_2 / \rho_g)$$

O Grau de Compacidade ou Compacidade Relativa é então calculado por

$$GC = (e_{MAX} - e_{NAT}) / (e_{MAX} - e_{MIN})$$

Obs. Não produzirá erro notável considerar a massa específica dos grãos com o mesmo valor numérico da densidade.



DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO (eMAX):
(extrato da norma MB 3324 / 1990, ABNT)

Advertência (MB-3324) – “Um índice de vazios máximo absoluto não é necessariamente obtido pelos métodos especificados nesta norma”.

APARELHAGEM GERAL

- a) Estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C;
- b) Peneiras de 75mm; 38mm; 19mm; 9,5mm; 4,8mm; 2,0mm e 0,075mm, de acordo com a EB-22;
- c) Balanças que permitam pesar nominalmente 40 kg e 10 kg, com resoluções de 5g e 1g, respectivamente, e sensibilidades compatíveis;
- d) Outros equipamentos como bandejas metálicas, conchas metálicas, pá, escova de cerdas macias, funil e régua de aço biselada.

Aparelhagem para o método A:

- a) Moldes cilíndricos metálicos padronizados com volumes nominais de 2830 cm³ e 14200 cm³, com as dimensões indicadas na Figura 3.
- b) Dispositivo para verter o material no molde, constituído de funil relativamente rígido de volume aproximadamente 1,5 vezes o volume do cilindro usado, dotado com bico de aproximadamente 15 cm de comprimento e saída larga; dois bicos são necessários, sendo um com 1,3 cm de diâmetro e outro com 2,5 cm.

Aparelhagem para o método B:

- a) Cilindro de Proctor com volume 1000 cm³, de acordo com a MB-33;
- b) Tubo rígido de parede delgada, com volume da ordem de 1300 cm³ e diâmetro interno de aproximadamente 7 cm.
- c) A escolha do método deve atender ao indicado na Tabela 1:

	Porcentagem em massa de material passante		Porcentagem máxima em massa passante	Porcentagem máxima, em massa, de material retido	
Peneira (mm)	75	19	0,075	38	9,5
Método A	100%	-	12%	30%	-
Método B	-	100%	12%	-	10%

PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

1. O material deve estar adequadamente acondicionado, de forma a evitar contaminação por outros materiais, perda de solo ou identificação.
2. A quantidade necessária de materiais e a aparelhagem são função do diâmetro máximo dos grãos, como indicado na Tabela 2:

Diâmetro máximo dos grãos	Massa necessária de material seco	Aparelhagem para colocação do material no molde	Volume do molde a ser usado
75 mm	30 kg	Pá ou concha metálica grande	14200 cm ³
38 mm	30 kg	Concha metálica	14200 cm ³
19 mm	6 kg	Concha metálica	2830 cm ³
9,5 mm	6 kg	Funil (diâmetro 2,5 cm)	2830 cm ³
4,8 mm ou menor	6 kg	Funil (diâmetro 1,3 cm)	2830 cm ³

Ao se utilizar o método B, a massa necessária de material seco é 2,5 kg

3. Para a formação da amostra, as quantidades acima indicadas devem ser obtidas com uso do repartidor de amostras ou quarteamento.

4. Secar a amostra em estufa, à temperatura de 105-110°C, até constância de massa. Resfriar em recipiente fechado.
5. Agregações fracamente cimentadas devem ser cuidadosamente destorroadas, evitando quebra de grãos.

Calibração dos moldes:

O volume e a massa dos moldes devem ser determinados por ocasião do uso inicial e anualmente ou a cada mil utilizações (o que ocorrer primeiro). O volume determinado não pode diferir do volume nominal mais que 1,5%. Recomenda-se utilizar os dois métodos de calibração abaixo indicados, e se a diferença entre os volumes assim determinados for maior que 0,5%, descartar o molde (por excesso de deformação).

Método de calibração direta:

Calcular o volume do molde, utilizando as médias de pelo menos três medidas do diâmetro interno e da altura, efetuadas igualmente espaçadas e com resolução de 1 mm ou 0,1 mm, conforme o molde seja de 14200 cm³ ou 2830 cm³, respectivamente.

Método do enchimento com água:

- a) Encher completamente o molde com água, aplicando uma placa de vidro plana sobre a borda superior, para assegurar que ele se encontra completamente preenchido. Uma película delgada de silicone aplicada previamente na borda formará uma junta impermeável entre a placa e a borda;
- b) Determinar a temperatura com resolução de 1°C e a massa de água que encheu o molde com resolução de 5g ou 1g, conforme o molde seja de 14200 cm³ ou 2830 cm³, respectivamente.
- c) Calcular o volume do molde, multiplicando a massa de água pelo volume unitário de água, na temperatura observada, conforme a tabela 3.

Temperatura (°C)	Volume unitário (cm ³ /g)	Temperatura (°C)	Volume unitário (cm ³ /g)
12	1,00048	24	1,00268
14	1,00073	26	1,00320
16	1,00103	28	1,00375
18	1,00138	30	1,00435
20	1,00177	32	1,00497
22	1,00221		

Utilizar nos cálculos a média entre os valores obtidos pelos dois processos, anotando o volume do molde (V_m) com quatro algarismos significativos.

Massa do molde: Determinar e anotar a massa do molde vazio, com resolução de 5g ou 1g, conforme o molde seja de 14200 cm³ ou 2830 cm³, respectivamente.

ENSAIO:

MÉTODO A:

1. Homogeneizar a amostra previamente seca.
2. Se for utilizado o funil, colocar o solo no molde, tão fofo quanto possível, vertendo-o através do bico em fluxo constante e mantendo o funil em posição vertical. Ajustar continuamente a altura do bico, de modo que a queda livre do material seja igual ou inferior a 1 cm e suficiente para evitar o contacto do bico com o material já depositado. Mover o funil em trajetória espiralada, de forma a resultar camadas com espessuras uniformes, minimizando a segregação de partículas. Encher o molde até 1 a 2 cm acima do topo e rasar o excesso com auxílio da régua biselada. Evitar vibrações no molde que possam causar rearranjo das partículas e recalque na amostra.
3. Se for usada pá ou concha metálica, colocar o solo no molde, tão fofo quanto possível, de forma que a deposição não seja efetuada por queda sobre o material já colocado. Se necessário, os grãos maiores podem ser colocados manualmente. Encher o molde até que haja excesso de, no máximo 2 cm acima do topo do molde. Para solos com diâmetro máximo dos grãos de até 19 mm, nivelar com a régua de aço (e com os dedos, se necessário). Quando os grãos têm diâmetros maiores, compensar

o volume emergente na superfície (aproximadamente) por depressões, que podem ser executadas com os dedos.

4. Determinar e anotar a massa do molde preenchido com solo, com resolução de 5g ou 1g, conforme o molde seja de 14200 cm³ ou 2830 cm³, respectivamente.
5. Calcular e anotar como Ms, com a resolução anteriormente indicada, a massa do solo que preencheu o molde, por subtração da massa do molde vazio.
6. Repetir o ensaio, reutilizando a amostra mas sem permitir absorção de umidade de modo a obter, pelo menos três valores da massa.

MÉTODO B:

1. Homogeneizar a amostra previamente seca.
2. Colocar o tubo de parede delgada dentro do molde
3. Preencher o tubo com a amostra até 1cm abaixo do topo, com auxílio da concha ou funil, tomando o cuidado de minimizar a segregação do material durante o enchimento.
4. Sacar o tubo rapidamente, de modo a que o solo preencha totalmente o molde.
5. Rasar o excesso de solo, conforme já descrito anteriormente.
6. Com resolução de 1g, calcular e anotar como Ms a massa do solo que preencheu o molde, como descrito anteriormente.
7. Repetir o ensaio, reusando a amostra, mas sem permitir absorção de umidade, de forma a obter, pelo menos, três valores da massa.

RESULTADOS:

1. Calcular a massa específica seca da amostra, em cada determinação, de acordo com a expressão
$$\rho_s = M_s / V$$
onde
 ρ_s = massa específica aparente seca do solo, em g/cm³;
Ms= massa do solo seco que preencheu o molde, em g;
Vm=volume do molde, em cm³.
2. Considerar satisfatórios os valores da massa específica aparente seca obtidos que não diferirem da correspondente média mais que 1,5% ou 2,5%, conforme o material ensaiado tenha sido uma areia fina à média ou não.
3. Uma vez obtidos pelo menos três valores que atendam ao preconizado em (2), com o valor médio, doravante denominado massa específica seca mínima (ρ_{sMIN}), calcular o índice de vazios máximo da amostra, de acordo com

$$e_{MAX} = (\delta / \gamma_{sMIN}) - 1$$

onde

e_{MAX} = índice de vazios máximo do solo;

δ = massa específica dos grãos do solo, determinada de acordo com a MB-28 ou MB-29, em g/cm³;

ρ_{sMIN} =massa específica aparente seca mínima do solo, em g/cm³.

EXPRESSÃO DOS RESULTADOS:

- a) O índice de vazios máximo do solo deve ser expresso com aproximação de 0,01.
- b) Em determinadas situações, por exemplo quando não se dispõe do valor da massa específica dos grãos do solo, facultar-se a apresentação apenas do valor da massa específica aparente seca mínima (ρ_{sMIN}), expresso com aproximação de 0,01 g/cm³.
- c) Devem ser indicados o método (A ou B) e o molde utilizados.

Notas:

A própria MB 3388 alerta que nesta norma, o índice de vazios mínimo absoluto não é necessariamente obtido, e o procedimento deve evitar que haja quebra e segregação de partículas. Um razoável grau de certeza é obtido por repetição exaustiva dos ensaios, sem reaproveitar material, principalmente se houver suspeita de quebra de partículas.

Com objetivo exclusivamente didático, o ensaio pode ser simulado com equipamento não padronizado, e podem até ser atingidos resultados razoavelmente próximos dos reais.

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO (e_{MIN})

(extrato da norma MB 3388/1991, da ABNT)

Advertência: o índice de vazios mínimo absoluto não será necessariamente obtido.

A amplitude dupla de vibração vertical das mesas vibratórias utilizadas neste ensaio tem efeito significativo no resultado, e o mesmo pode ocorrer quando varia o tipo de solo. A NB3388/91 reconhece este fato e permite o uso de mesas vibratórias com amplitudes duplas de vibração diferentes das preconizadas, em certas circunstâncias especiais (previstas na norma).

Aparelhagem geral:

- a) Estufa (capaz de manter temperatura... 105-110°C);
- b) Peneiras (75 mm, 38 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 0,075 mm);
- c) Balanças (40 kg, 10 kg, 1,5 kg) com resoluções de 5g, 1g e 0,1g, respectivamente;
- d) Outros equipamentos (bandeja, conchas, pá, escova de cerdas macias, cronômetro e paquímetro que permita leituras de no mínimo 30 mm, com resolução de 0,2 mm)

Aparelhagem para o método A (A-1 e A-2) (ver figura 4):

- a) Moldes cilíndricos metálicos padronizados, com volumes nominais 2830 cm³ e 14200 cm³, com as dimensões indicadas na figura 3.
- b) Tubo-guia com dispositivo de fixação ao molde, para cada tamanho do molde. Ver detalhes da fixação na figura 3(a) do Anexo B da NB3388/91;
- c) Disco-base da sobrecarga, para cada tamanho de molde, perfurado e dotado de três pinos para centralização da sobrecarga, conforme a figura 4 do anexo B;
- d) Sobrecarga de seção circular com alça, para cada tamanho do molde, conforme a figura 4 do Anexo B. A massa total do disco-base e sobrecarga deve ser suficiente para aplicação de uma pressão de (13,8 ± 0,1) kPa;
- e) Alça com rosca para colocação e retirada do disco-base. Exemplo na figura 3(b) do anexo B;
- f) Suporte encaixável no guia do molde, ao qual fica acoplado um defletômetro, para medir a diferença de elevação entre o topo do molde e o disco base da sobrecarga após a densificação, como mostrado na figura 3(c) do Anexo B. O defletômetro deve possibilitar medições de no mínimo 50 mm com resolução 0,02 mm, devendo ser instalado de modo que sua haste fique paralela ao eixo vertical do molde;
- g) Barra de calibração metálica (opcional) com largura 7 cm (aprox.), altura 0,5 cm e comprimento adequado;
- h) Mesa vibratória eletromagnética de aço, com vibração vertical acionada por um vibrador eletromagnético do tipo impacto sólido, de massa maior que 45 kg. A mesa deve ser instalada sobre piso ou laje de concreto com massa da ordem de 500 kg, de modo que vibrações excessivas não sejam transmitidas a outras áreas onde estejam sendo realizados outros ensaios. O tampo da mesa vibratória deve ter dimensões adequadas que confirmam rigidez suficiente para que o conjunto molde+tubo-guia+sobrecarga fique firmemente fixado e rigidamente apoiado durante o ensaio e deve ser dotado de dispositivo de fixação ao conjunto mencionado. A mesa deve vibrar verticalmente o conjunto, com deslocamento senoidal com o tempo, de amplitude dupla média (pico a pico) de (0,33 ± 0,05) mm para frequência de 60 Hz ou de (0,48 ± 0,08) mm para frequência de 50 Hz, nas condições do ensaio. A mesa deve ter recurso de ajustamento da frequência de vibração entre 0 e 60 Hz ou cerca de 0,20mm a 0,48mm para frequência de 50 Hz, para ensaios com material úmido. Para uso em ensaios especiais, tal ajustamento deve estar compreendido entre 0,20mm e 0,64mm para frequência de 60 Hz e entre 0,30mm e 0,91mm para 50 Hz.

Como a mesa vibratória pode produzir ruído acima do aceitável, o operador deve trabalhar com protetor auditivo e a mesa vibratória deve ser instalada em ambiente acusticamente isolado do restante do laboratório.

Aparelhagem para o método B (B.1 e B.2):

- a) Cilindro de Proctor, com volume nominal de 1000cm^3 , soldado à base, de modo que o conjunto resulte estanque. A base do molde deve ser mais espessa que a utilizada no ensaio de compactação e ser dotada de dispositivo de fixação à mesa vibratória, como está exemplificado na figura 5 do anexo B (MB-3388);
- b) Tubo-guia, constituído por outro cilindro de Proctor solidário ao colarinho;
- c) Disco-base da sobrecarga, perfurado e dotado de dispositivo para centralização da sobrecarga;
- d) Sobrecarga de seção circular dotada de alça. A massa total do disco-base e sobrecarga deve ser suficiente para aplicação de uma pressão de $(13,8 \pm 0,1)$ kPa;
- e) Mesa vibratória, do tipo utilizado para realizar o peneiramento de amostras na análise granulométrica.

Execução do ensaio:

Processos para determinação do índice de vazios mínimo: podem ser utilizados quatro processos, como se segue:

- a) Processo A.1 – usando o material seco em estufa e uma mesa eletromagnética de vibração vertical;
- b) Processo A.2 – usando o material úmido e uma mesa eletromagnética de vibração vertical;
- c) Processo B.1 – usando o material seco em estufa e uma mesa vibratória do tipo utilizado para realizar o peneiramento de amostras na análise granulométrica;
- d) Processo B.2 - usando o material úmido e uma mesa vibratória do tipo utilizado para realizar o peneiramento de amostras na análise granulométrica;

Os métodos B.1 e B.2 podem ser utilizados somente quando não se dispuser da mesa eletromagnética de vibração vertical. Os resultados podem revelar-se menos satisfatórios.

Recomenda-se a realização do ensaio pelos dois processos (via seca e via úmida) por ocasião de novo trabalho ou quando houver mudança no tipo de material, visto que para alguns solos o ensaio realizado por via úmida pode fornecer índice de vazios mínimo significativamente menor que o ensaio realizado por via seca.

Para cada um dos métodos, a granulometria deve ser a indicada na Tabela 1 (ver ensaio de determinação do eMIN).

Quando forem executadas quantidades apreciáveis de ensaios sobre materiais semelhantes, é permitida a realização dos ensaios pelo método B, desde que os ensaios executados *a priori* pelos dois métodos indiquem não ocorrer diferenças significativas entre os resultados obtidos. Nesse caso, a granulometria deve atender ao especificado para o método B.

Se, durante a realização dos ensaios, ocorrer quebra de grãos em quantidade relevante, haverá redução do índice de vazios mínimo. A quebra mencionada pode ser avaliada pela análise granulométrica do material, realizada antes e depois do ensaio.

Preparação da Amostra:

1. O material deve chegar ao laboratório devidamente acondicionado, de forma a evitar perda de quantidade ou identificação.
2. Ao utilizar o processo A, a quantidade necessária de material para cada determinação e o molde a ser usado são função do diâmetro máximo dos grãos, como indicado na Tabela 2 (ver ensaio de determinação do eMIN).
3. Ao utilizar o processo B, a massa necessária de material seco é 2,5kg.
4. A amostra deve ser obtida por uso do repartidor de amostras ou quartejamento.
5. Se o ensaio for realizado de acordo com o processo A.1 ou B.1, a amostra deve ser seca em estufa, até constância de massa, à temperatura de $105-110^\circ\text{C}$. A seguir, deve esfriar em recipiente fechado.
6. Depois da secagem, agregações fracamente cimentadas devem ser destorroadas, evitando-se quebra de grãos.

Calibração

Calibração da aparelhagem:

(deve ser efetuada por ocasião do uso inicial e anualmente ou a cada 1000 utilizações, prevalecendo o que ocorrer primeiro).

Molde:

Determinar volume e massa. O volume não pode diferir do volume nominal de mais que 1,5%. Fazer a determinação pelos dois métodos abaixo descritos, repetindo a calibração se houver diferença superior a 0,5% entre os dois resultados. Se a diferença exceder tal tolerância em sucessivas determinações, descartar o molde, por estar excessivamente deformado.

Método da medição direta: Com as médias de pelo menos três medidas igualmente espaçadas da altura e do diâmetro interno e com resolução de 1mm ou 0,1mm (conforme o molde seja de 14200 cm³ ou 2830 cm³), calcular a área da seção transversal e determinar o volume do molde, com quatro algarismos significativos.

Método do enchimento com água:

- Encher completamente o molde com água; deslizar uma placa de vidro sobre o topo (borda) do molde para assegurar que ele se encontra completamente cheio. Uma fina película de silicone aplicada previamente forma uma junta impermeável entre a placa de vidro e a borda do molde;
- Determinar a temperatura com resolução de 1°C e a massa do molde preenchido com água, com resolução de 5g ou 1g, respectivamente para os moldes de 14200cm³ ou 2630 cm³;
- Calcular o volume do molde, multiplicando a massa de água que preencheu o molde pelo volume unitário da água, na temperatura observada conforme a tabela 3.

Volume do molde:

Usar nos cálculos do ensaio o volume do molde, constituído pela média dos valores obtidos pelos processos da medição direta e preenchimento com água. Anota-lo como V_m, em cm³, com quatro algarismos significativos.

Massa do molde:

Determinar e anotar a massa do molde, com resolução de 5g ou 1g, conforme o molde utilizado tenha sido de 14200cm³ ou 2630 cm³;

Disco-base da sobrecarga:

Determinar e anotar a espessura média do disco-base da sobrecarga, resultante de pelo menos quatro medidas executadas com o paquímetro, com resolução de 0,02mm.

Barra de calibração:

Determinar e anotar a espessura média da barra de calibração, resultante de pelo menos quatro medidas executadas com o paquímetro, com resolução de 0,02mm.

Mesa eletromagnética de vibração vertical:

A calibração consiste na determinação, sob condições simuladas de ensaio e para cada tamanho do molde, da posição do reostato que confira ao molde uma amplitude dupla de variação de (0,33±0,05) mm, para frequência de 60Hz ou de (0,48±0,08) mm, para frequência de 50 Hz. A amplitude média de vibração vertical deve ser medida no molde, com resolução de 0,015 mm.

Recomenda-se que, por ocasião da calibração, estabeleça-se a correlação entre a amplitude dupla de vibração vertical e as leituras do reostato. Os procedimentos para calibração e a aparelhagem necessária são apresentados por Kaufman, L.P., Strickland, E.A. e Benavidez, A.A., "Suggested Method for the Calibration of Vibration Tables for Maximum Index Density Testing", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, vol. 2, No.3, Setembro 1979, pp. 152-157.

A mesa eletromagnética deve ser novamente calibrada sempre que surgir algum evento que possa alterar sua operação.

Mesa vibratória do tipo usado para realizar peneiramento:

A calibração consiste na determinação, minuto a minuto e sob condições simuladas de ensaio, da variação da massa específica aparente seca com o tempo de vibração. O tempo de vibração a ser utilizado no ensaio

é aquele a partir do qual as variações passam a ser pouco significativas. Para materiais semelhantes, tal calibração pode ser realizada uma única vez.

Temperatura	Volume de água (cm ³ / g)
12	1,00048
14	1,00073
16	1,00103
18	1,00138
20	1,00177
22	1,00221
24	1,00268
26	1,00320
28	1,00375
30	1,00435
32	1,00497

Procedimento para execução do ensaio:

Método A.1 (mesa eletromagnética e material seco)

- a.1.1 Homogeneizar a amostra de solo previamente seca em estufa;
- a.1.2 Com o auxílio da concha ou funil, encher a amostra até 1cm a 2cm acima do topo do molde e rasar o excesso. Golpear a parede externa do molde para recalcar o material, facilitando o posicionamento do disco-base da sobrecarga;
- a.1.3 Colocar o disco base da sobrecarga (se necessário, com papel-filtro) sobre a superfície da amostra de solo e girá-lo levemente algumas vezes, de forma que ele fique firme e uniformemente em contacto com a superfície do material. Remover a alça.
- a.1.4 Fixar o molde à mesa vibratória
- a.1.5 Fixar firmemente o tubo-guia ao molde, verificando previamente que as paredes internas destes estão alinhadas, e assentar a sobrecarga sobre o disco-base.
- a.1.6 Selecionar a amplitude dupla de vibração, da seguinte forma:
 - a.1.6.1 Ajustar a posição do reostato, de sorte a obter uma amplitude dupla de vibração vertical de (0,33±0,05)mm ou (0,48±0,08)mm, para freqüência de 60 Hz ou 50 Hz, respectivamente.
 - a.1.6.2. Como já mencionado, há uma correlação entre o índice de vazios e a amplitude dupla de vibração. O eMIN pode não ocorrer para a amplitude mencionada no ítem anterior. Por isso, quando os resultados dos ensaios forem utilizados em estudos especiais, permite-se o uso de outras amplitudes duplas de vibração vertical, que deve ser:
 - a) amplitude ótima - ver obtenção no Anexo A
 - b) maior que 0,20 mm e menor que 0,54 mm, para uma freqüência de 60 Hz, ou maior que 0,30 mm e menor que 0,94 mm, para freqüência de 50 Hz. Em termos de aceleração nominal de pico, estes valores estão compreendidos entre 1,5g (14m/s²) e 4,8g (45m/s²).

Nota: a aceleração nominal de pico pode ser calculada pela expressão:

$$A_p = 0,0020 (2Y_p).f^2$$

onde:

A_p = aceleração nominal de pico, em g;

2Y_p = amplitude dupla de vibração vertical, em mm;

f = freqüência, em Hz.

- a.1.7 Vibrar o molde contendo a amostra durante (8±2)min ou 12±3)min, respectivamente para freqüência de 60 Hz ou 50 Hz, remover a sobrecarga e o tubo-guia do molde; verificar se o disco-base da sobrecarga está firme e uniformemente em contacto com a superfície da amostra (não cambaleia quando se pressiona suas bordas). Se tal fato ocorrer, anotar na folha de ensaio para posterior julgamento da validade do ensaio.

- a.1.8 Determinar a altura final do molde não preenchido pela amostra do solo. Para tanto, podem ser utilizados dois processos:
- a.1.8.a) Com a barra de calibração – apoiar a barra de calibração nas bordas do molde e na direção dos guias do suporte; encaixar o suporte do defletômetro em um dos guias, com o apalpador da haste apoiado no topo da barra de calibração; obter três leituras do defletômetro com resolução de 0,02mm e de modo que o apalpador fique apoiado no centro e próximo às bordas da barra de calibração; determinar a média, a qual se constitui na leitura inicial. A seguir, retirar a barra de calibração e, com uma escova, retirar quaisquer finos que possam ter se depositado no disco-base, onde as leituras são realizadas. Obter três leituras do defletômetro, com o apalpador da haste apoiado em posições igualmente espaçadas no disco-base da sobrecarga, e determinar a média, que se constitui na leitura final. Por diferença das leituras inicial e final e levando em conta as espessuras da barra de calibração e do disco-base, determinar a altura útil do molde não preenchido pela amostra de solo. Proceder identicamente no lado oposto. Obter a média das duas alturas assim determinadas, a qual se constitui na altura útil final do molde não preenchido pela amostra do solo (Δh).
- a.1.8.b) Sem a barra de calibração – Encaixar o suporte do defletômetro em um dos guias, com o apalpador da haste apoiado na parte central da borda do molde; obter com resolução de 0,02mm, duas leituras e determinar a média, a qual se constitui na leitura inicial. Afastar quaisquer finos do disco-base, onde as leituras são realizadas. Obter três leituras do defletômetro, com o apalpador apoiado em posições igualmente espaçadas no disco-base da sobrecarga, e determinar a média, que se constitui na leitura final. Descontando a espessura do disco-base, determinar a altura útil do molde não preenchido pela amostra, proceder identicamente do lado oposto e obter a média das duas alturas assim determinadas, a qual se constitui na altura útil final do molde não preenchido pela amostra de solo (Δh).
- a.1.9. Remover o disco-base do molde e soltar o molde da mesa vibratória, evitando que quaisquer finos que possam ter-se introduzido na superfície do disco e nas bordas do molde sejam introduzidos no seu interior.
- a.1.10. Determinar e anotar a massa do molde preenchido parcialmente com o solo, com resolução de 5g ou 1g, respectivamente para moldes de 14200 ou 2830cm³. Calcular e anotar como Ms, com a mesma resolução, a massa da amostra do solo contida no molde.
- a.1.11. Repetir as operações (1 a 10), preferencialmente com amostras ainda não submetidas ao ensaio, de forma a obter pelo menos três valores de massa. Se houver suspeita de excessiva quebra de grãos durante o ensaio, não reusar o material.

Método A.2 (mesa eletromagnética e material úmido)

a.2.1. O método úmido pode ser empregado sobre uma amostra previamente seca, à qual se acrescenta água suficiente, ou, se preferível, sobre a amostra na umidade natural. Homogeneizar o material. No caso de se acrescentar água sobre o material seco, deixar, em seguida, em repouso por um período mínimo de 30 minutos. A quantidade de água acrescentada deve ser suficiente para que não se acumule água livre no recipiente e portanto a amostra saturar-se-á somente durante o processo de densificação.

Nota: A equação seguinte pode ser usada para estimar a quantidade de água necessária a se acrescentada à amostra previamente seca. Também se pode utilizar cerca de 250cm³ para cada quilograma de amostra.

$$Ma = Mm \cdot [(1/\rho_{se}) - (1/d)]$$

onde

Ma = mssa de água, em g;

ρ_{se} = massa específica aparente seca estimada, imediatamente após a colocação no molde, em g/cm³. (Tipicamente entre 1,6 e 1,9 g/cm³).

Mm = massa da amostra do solo, em g.

d = massa específica dos grãos da amostra do solo, em g/cm³.

a.2.2 Fixar o molde à mesa vibratória.

a.2.3 Com a mesa vibratória ligada, lentamente colocar a amostra no molde, usando concha ou pá. Depois que cada porção da amostra do solo for acrescentada, verificar se acumulou-se água na superfície do material. Em caso negativo, adicionar água até que tal aconteça. No decorrer do

processo, que deve durar 5 a 6 minutos, a amplitude dupla de vibração deve ser ajustada de modo a evitar excessivo borbulhamento e afofamento da amostra do solo. Durante e ao final do último minuto de vibração, a água que aflorar acima da superfície da amostra deve ser removida. Evitar, contudo, a remoção do material, sendo que sua superfície deve situar-se cerca de 1 cm abaixo do topo do molde.

- a.2.4. Proceder à fixação e colocação do disco-base da sobrecarga, sobrecarga e tubo-guia, como indicado em (a.1.3 a a.1.5).
- a.2.5. Vibrar o conjunto, como especificado em (a.1.6 a a.1.7); remover a sobrecarga e o tubo-guia do molde; remover a água livre presente acima, ao redor e no disco-base da sobrecarga.
- a.2.6. Obter a altura útil final do molde não preenchido pela amostra do solo, de acordo com (a.1.8).
- a.2.7. Remover o disco-base da sobrecarga e soltar o molde da mesa vibratória, como em (a.1.9). Se desejável obter o teor de umidade da amostra, determinar e anotar a massa do molde contendo a amostra. Cuidadosamente, remover toda a amostra do molde para um recipiente de massa conhecida, remover, por lavagem, todas as partículas aderidas no interior do molde e na face inferior do disco-base da sobrecarga, para o recipiente; proceder à secagem do material em estufa (100-110°C) até constância de massa. Determinar e anotar como Ms a massa da amostra seca, com resolução de 5g ou 1g, conforme o molde utilizado seja de 14200 ou 2830 cm³.
- a.2.8. Repetir as operações (a.2.1 a a.2.7), preferencialmente com amostras ainda não submetidas ao ensaio, de modo a obter pelo menos três valores de massa. Se houver suspeita de excessiva quebra de partículas, não reusar o material.

Método b.1 (mesa vibratória de peneiramento e material seco)

- b.1.1. Secar a amostra em estufa; homogeneizar.
- b.1.2. Fixar firmemente o tubo-guia ao molde, tendo garantido previamente que as paredes internas destes estão alinhadas.
- b.1.3. Usando concha ou funil, encher parcialmente com a amostra de solo o conjunto molde + tubo-guia, de forma que, após submetido à vibração, haja um excesso de 1 a 2 cm acima do topo do molde. Golpear a parede externa do molde para recalcar o material, facilitando o posicionamento da sobrecarga.
- b.1.4. fixar o conjunto à mesa vibratória do tipo utilizado para realizar peneiramento.
- b.1.5. Colocar o disco-base (com papel-filtro, se necessário) sobre a superfície da amostra e gira-lo levemente, para garantir contato firme e uniforme com a superfície do material.
- b.1.6. Assentar a sobrecarga sobre o disco-base e vibrar o conjunto durante o tempo previamente determinado, como indicado em (a.1.7).
- b.1.7. Soltar o conjunto da mesa vibratória, remover a sobrecarga, o disco base e o tubo-guia e rasar o excesso da amostra, com régua de aço biselada. Retirar, com escova, o material que eventualmente tenha-se depositado na base do molde ou aderido na sua superfície externa.
- b.1.8. determinar e anotar a massa do molde preenchido com a amostra do solo, com resolução de 1g. Calcular e anotar como Ms, com resolução de 1g, a massa da amostra do solo contido no molde, por subtração da massa do molde vazio.
- b.1.9. Repetir as operações (a.3.1 a a.3.8) preferencialmente com amostras ainda não submetidas ao ensaio, de modo a obter pelo menos três valores de massa. Havendo suspeita de quebra excessiva de grãos, não reusar o material.

Método B-2 (mesa vibratória de peneiramento e material úmido)

- b.2.1. Preparar o material como descrito em (a.2.1).
- b.2.2. Fixar firmemente o tubo-guia ao molde, após garantir que as paredes internas destes estão alinhadas.
- b.2.3. Colocar lentamente a amostra do solo no interior do conjunto tubo-guia e molde, utilizando concha. Depois, golpear várias vezes a parede externa do molde e verificar se uma pequena quantidade de água acumulou-se na superfície. Em caso negativo, acrescentar água em quantidade suficiente para tal. Durante e ao final da seqüência de golpes que suceder à colocação da última porção da amostra, remover a água que aflorar à superfície, evitando remoção do material. A

quantidade de amostra colocada deve ser suficiente para que, depois de submetido à vibração, haja um excesso de 1 a 2cm acima do topo do molde.

- b.2.4. Proceder à fixação e colocação do disco-base de sobrecarga, e depois, vibrar o conjunto, como indicado em (b.1.4 a b.1.6).
- b.2.5. Proceder da mesma forma que em (b.1.7). Se for desejável obter o teor de umidade da amostra de solo, determinar e anotar a massa do molde contendo a amostra. Cuidadosamente, remover toda a amostra úmida do molde para um recipiente de massa conhecida, remover por lavagem, todas as partículas aderidas na face interior do molde e na face inferior do disco-base da sobrecarga para o recipiente; proceder à secagem do material, em estufa a 100-105°C até constância de massa. Determinar e anotar como Ms a massa de amostra seca, com resolução de 1g.
- b.2.6. Repetir as operações (b.2.1 a b.2.5), preferencialmente com amostras ainda não submetidas ao ensaio, de modo a obter pelo menos três valores de massa. Se houver suspeita de excessiva quebra de grãos durante o ensaio, não reutilizar o material.

Cálculos:

1. Calcular a massa específica aparente seca da amostra do solo em cada determinação, por

$$\rho_s = M_s / V_s$$

onde

ρ_s = massa específica aparente seca da amostra do solo, em g/cm³.

M_s = massa da amostra do solo seca, em g.

V_s = volume da amostra do solo densificado

= $V_m - (A_m \cdot \Delta h)$ em cm³ (método A)

= V_m , em cm³ (método B)

V_m = volume do molde, em cm³.

A_m = área da seção transversal do molde, em cm².

Δh = altura útil do molde não preenchido pela amostra, em cm.

2. Considerar satisfatórios os valores da massa específica aparente seca obtidos que não diferirem, da correspondente média, mais que 1,5% ou 2,5%, respectivamente para areia fina a média ou para outra, dependendo do material ensaiado.
3. Uma vez obtidos três valores, no mínimo, que atendam ao preconizado em (2), como o valor médio, doravante chamado massa específica aparente seca máxima (γ_s MAX), calcular o índice de vazios mínimo da amostra, pela expressão:

$$e_{MIN} = (\delta / \rho_s MAX) - 1$$

onde

e_{MIN} = índice de vazios mínimo da amostra de solo;

δ = massa específica dos grãos da amostra do solo, determinada de acordo com a MB-25 ou MB-29, em g/cm³;

$\rho_s MAX$ = massa específica aparente seca máxima da amostra, em g/cm³.

4. Se o índice de vazios máximo (e_{MAX}) tiver sido determinado e o índice de vazios (e_{NAT}) do solo ou aterro for conhecido, a compacidade relativa CR pode ser calculada por

$$CR = 100 \cdot (e_{MAX} - e_{NAT}) / (e_{MAX} - e_{MIN})$$

A compacidade relativa também pode ser obtida por

$$CR = 100 \cdot \rho_s MAX (\rho_s NAT - \rho_s MIN) / [\rho_s NAT (\rho_s MAX - \rho_s MIN)]$$

Resultados:

1. O índice de vazios mínimo do solo deve ser expresso com aproximação de 0,01
2. Quando não se dispõe do valor da massa específica dos grãos do solo, faculty-se a apresentação apenas da massa específica aparente seca máxima, expressa com aproximação de 0,01g/cm³.
3. Devem ser indicados o método (A.1, A.2, B.1 ou B.2) e o molde utilizado.

4. Deve ser assinalada a amplitude dupla de vibração vertical utilizada, quando diferente da especificada.
5. Indicar qualquer anormalidade ocorrida, como perda de material, segregação, etc.
6. Se calculada a compacidade relativa, expressa-la em porcentagem, aproximada para o inteiro mais próximo.

ANEXO A – Método recomendado para obtenção da amplitude dupla de vibração ótima

A-1 Por facilidade deve-se utilizar material seco (método A.1). O tamanho do molde utilizado deve estar de acordo com a Tabela 2 (ver preparação da amostra).

A-2 Estabelecer a correlação entre a amplitude dupla de vibração vertical do molde e a posição do reostato, sob condições simuladas de ensaio.

A-3 Selecionar de quatro a seis porções de amostra previamente seca em estufa, a 100-105°C, por quarteamento ou uso repetido do repartidor de amostras. As determinações devem ser executadas sem reusar o material, de forma a reduzir efeitos de degradação cumulativa do solo.

A-4 Procedendo como descrito em (a.1), exceto (a.1.6.1), fazer cerca de quatro determinações com a amplitude dupla de vibração vertical variando entre os extremos indicados na Tabela 4 (apresentada adiante). Se o pico da massa específica aparente seca não ficar claramente definido (ver A-5), fazer determinações adicionais usando valores como os indicados na Tabela 4 ou intermediários aos valores usados anteriormente.

A-5 Traçar uma curva conectando os pontos obtidos, marcando-se em abscissas a amplitude dupla de vibração vertical e em ordenadas a massa específica aparente seca correspondente. O pico da curva corresponde a amplitude dupla de vibração vertical ótima.

A-6 Para solos susceptíveis à degradação, o pico da curva pode não ficar claramente definido, isto é, a massa específica pode continuar aumentando com o incremento da amplitude dupla de vibração, além de um valor razoável (extremo superior da Tabela 4). Neste caso, recomenda-se adotar como amplitude dupla de vibração ótima a assinalada em (a.1.6.1)

Tabela 4 – Valores sugeridos de amplitude dupla de vibração vertical

Frequência de vibração	Amplitude dupla de vibração vertical (mm)					
50 Hz	0,30	0,43	0,56	0,66	0,76	0,91
60 Hz	0,20	0,30	0,38	0,46	0,53	0,64

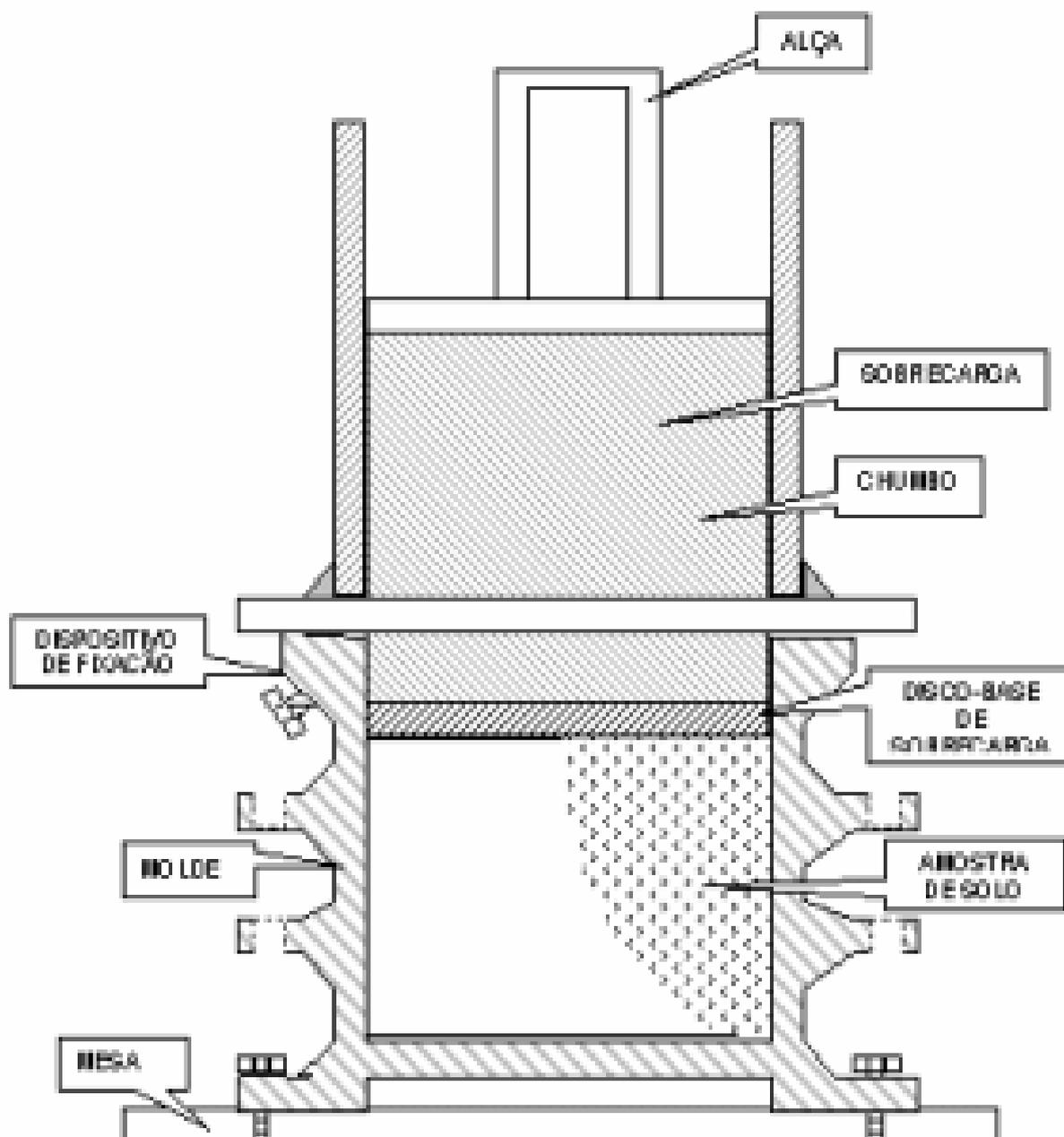
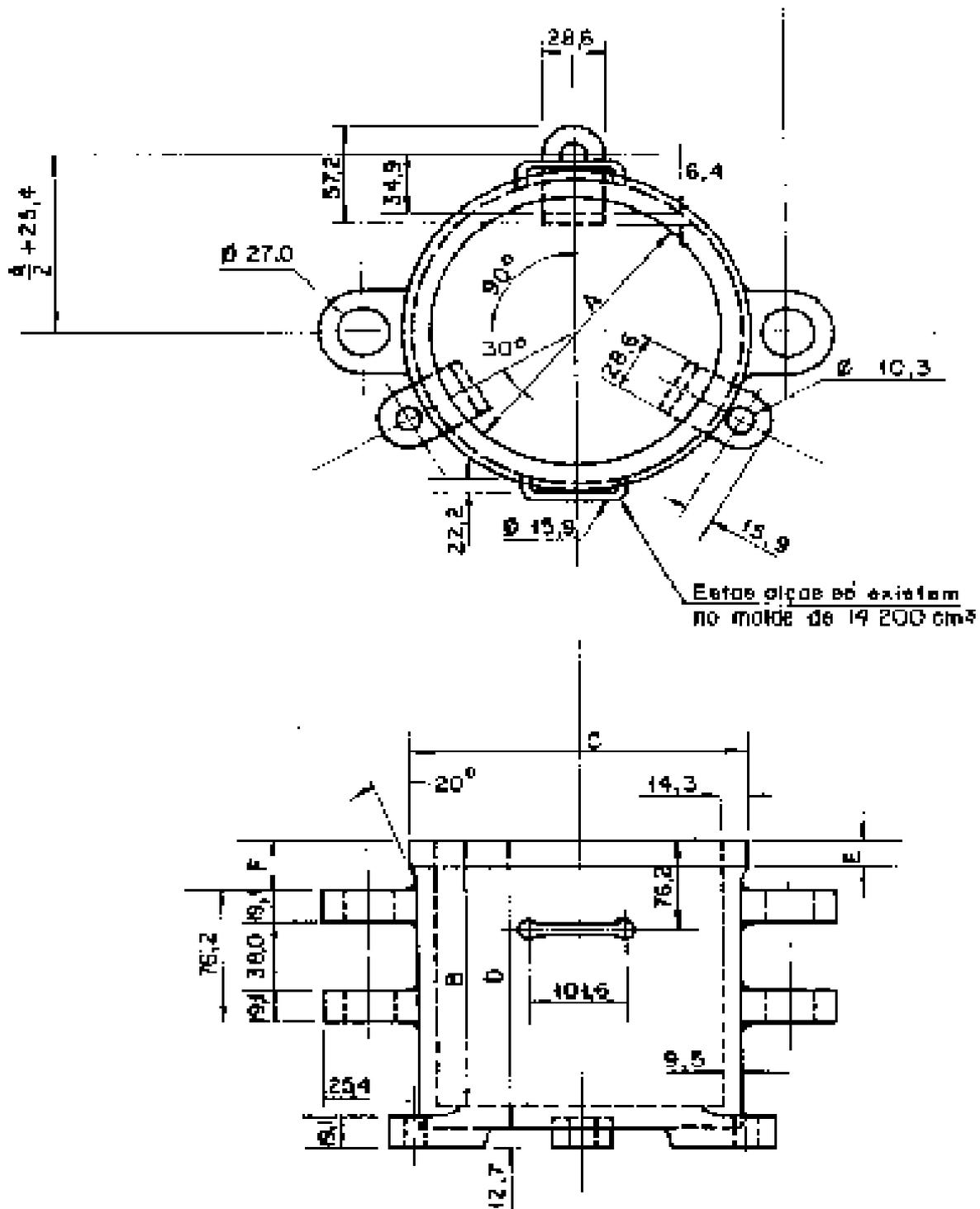


Figura 1 – Desenho esquemático de um conjunto para ensaio
(Método A)
consulte o desenho original na MB-3388

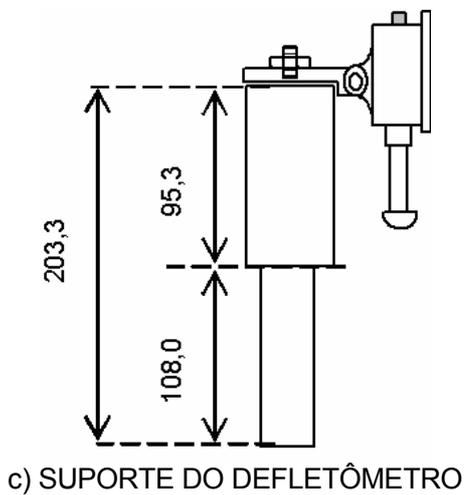
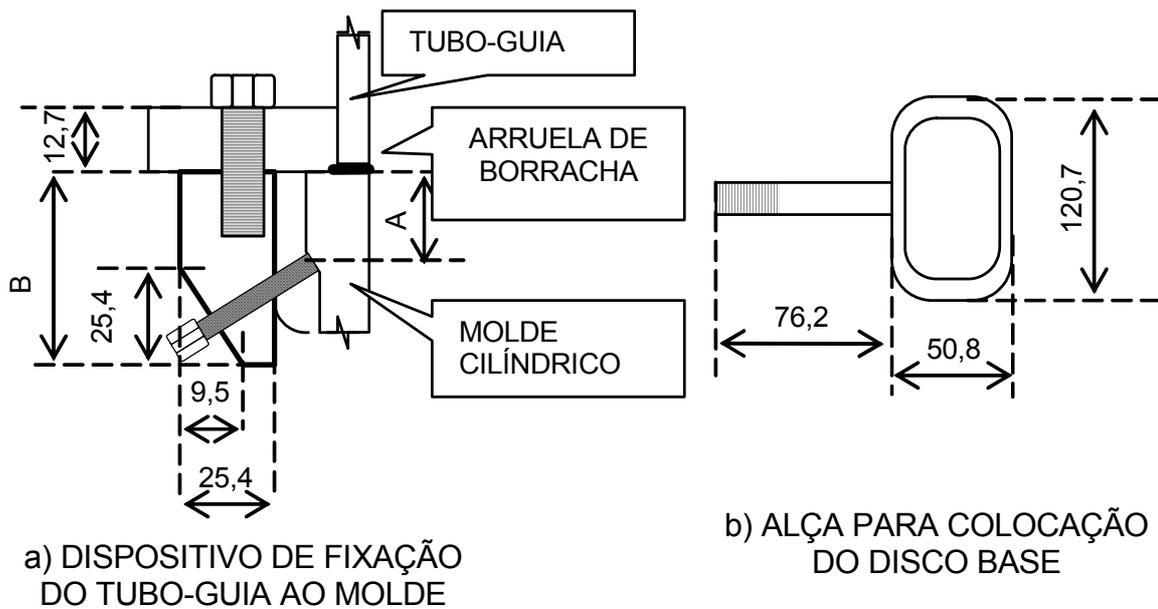


Unid.: mm

Tamanho do molde (cm ³)	Dimensões (mm)					
	A	B	C	D	E	F
2830	152,4	155,2	181,0	165,1	12,7	28,6
14200	279,4	230,9	308,0	241,3	15,9	50,8

Tolerância: 0,4 mm

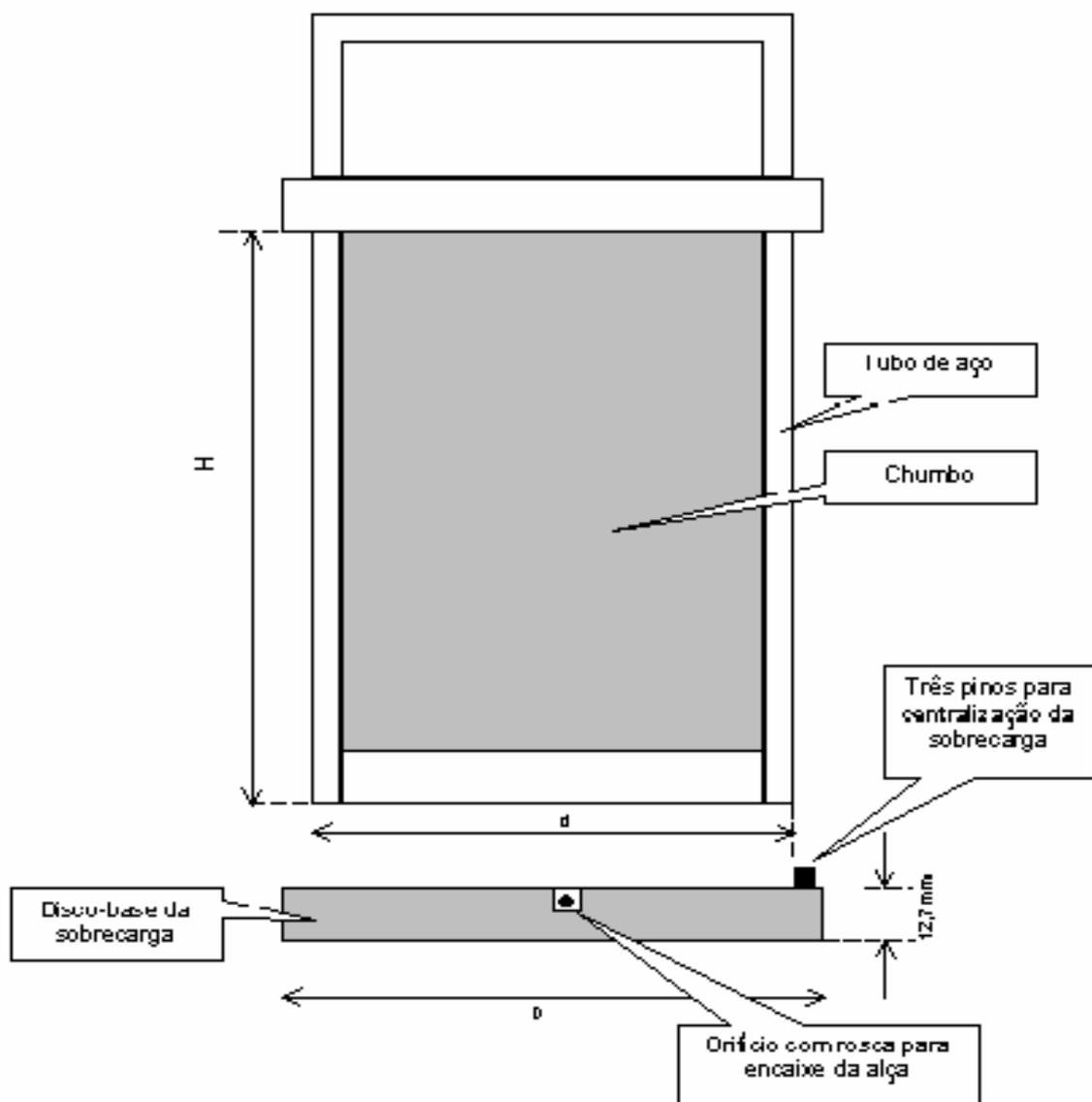
Figura 2 – Detalhes dos moldes
 Consulte original: MB3388/91, anexo 2



manho do molde (cm ³)	A (mm)	B (mm)	Tubo-guia
2830	12,7	34,9	Tubo de aço – Φ interno = 152 mm Espessura de parede=9,5mm;compr=200 mm
14200	15,9	38,1	Tubo de aço – Φ interno = 280 mm Espessura de parede=9,5mm;compr=200mm

Tolerância $\pm 0,4$ mm

Figura 3 - Detalhes dos componentes



Tamanho do molde (cm ³)	D (mm)	H (mm)	d (mm)	Massa total sobrecarga + disco-base (kg)
2830	151,0	230,0	115,0	25,2 ± 0,2
14200	276,0	150,0	270,0	83,5 ± 0,6

Tolerância ± 0,4 mm

Figura 4 – Sobrecarga e disco-base

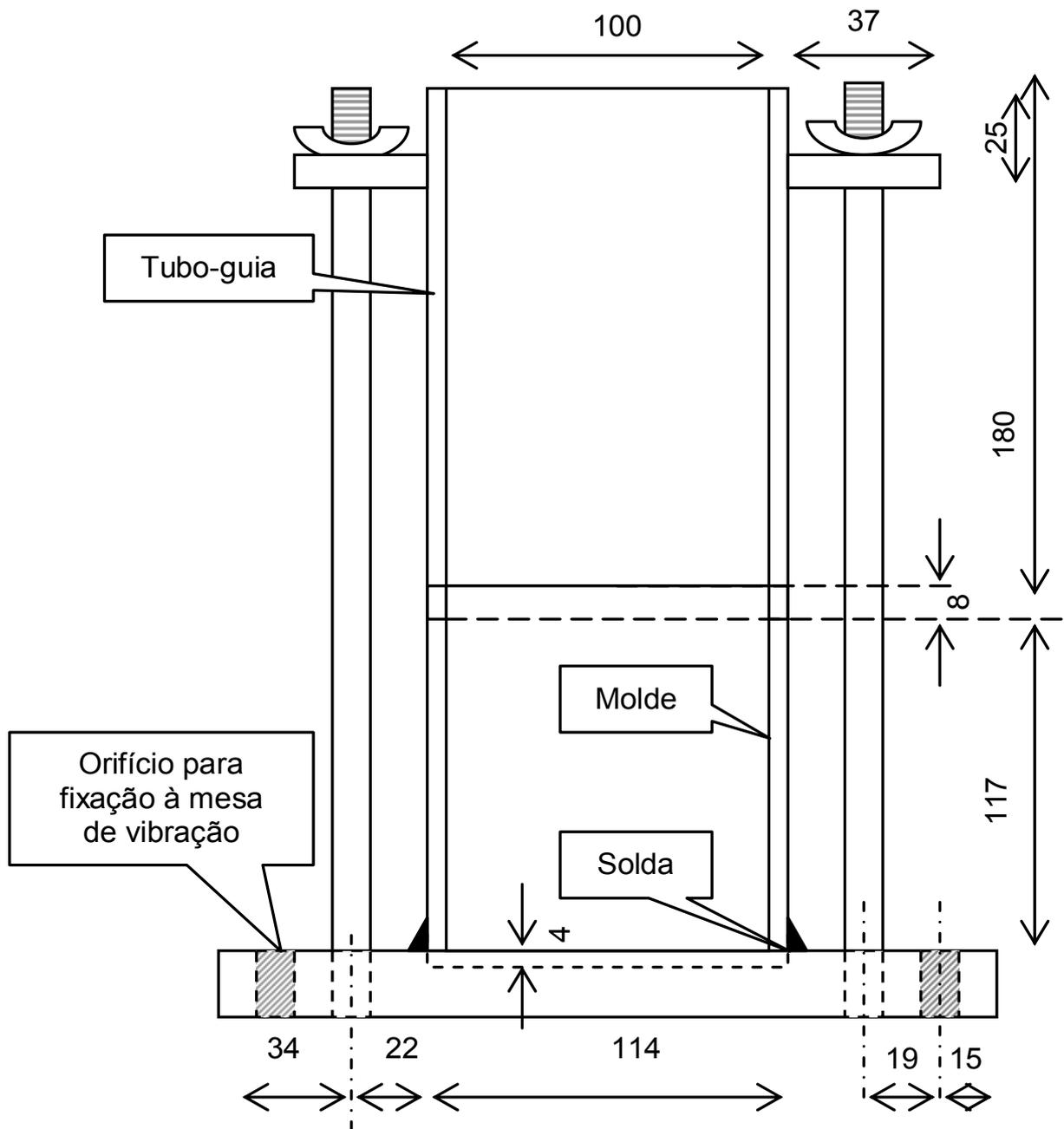


Figura 5: Desenho esquemático de um conjunto para ensaio Método B
Fonte: MB3388 / 91

Exercícios:

- Determinar o peso específico das partículas, o teor de umidade e o grau de compactação de um solo, dados os seguintes elementos:*

<i>peso do picnômetro com água</i>	<i>436,18 g</i>
<i>peso do picnômetro com 30 g de solo e água no mesmo nível</i>	<i>455,07 g</i>
<i>solo no estado natural</i>	<i>V t = 590 cm³ e Pt = 1 033 g</i>
<i>solo seco no estado solto</i>	<i>V t = 699 cm³ e Pt = 870 g</i>
<i>solo seco no estado compacto</i>	<i>V t = 487 g e Pt = 870 g</i>

- Trace a curva da função $e = f(n)$, onde (e) é o índice de vazios, e (n) é a porosidade.*

3. Uma amostra de areia no estado natural pesa 875 g e seu volume é 512 cm³. Tem peso seco 803 g e densidade relativa dos grãos 2,66. Determine índice de vazios, porosidade, teor de umidade e grau de saturação.
4. Uma amostra de areia seca enche um cilindro. Determine o índice de vazios do solo em função do volume do cilindro V_1 , da densidade dos grãos δ , do peso específico da água γ_a e do peso P_s da areia contida no cilindro.
- Resposta: $\varepsilon = [(V_1 \delta \gamma_a) / P_s] - 1$
5. De um corte são removidos 180 000 m³ de solo, com índice de vazios 1,22. Quantos m³ de aterro com índice de vazios 0,76 poderão ser construídos ?
6. Para a construção de uma pequena barragem de terra é previsto um volume de 300000 m³ de um solo com índice de vazios 0,8. Existem três jazidas designadas por A, B e C. O índice de vazios do solo em cada uma delas, bem como a estimativa de custo do movimento de terra até o local da barragem, são indicados no quadro abaixo. Qual a jazida mais economicamente explorável ?

Jazida	Índice de vazios	Custo do movimento de terra R\$ / m ³
A	0,9	10,20
B	2,0	9,00
C	1,6	9,40