



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE CURVELO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
MECÂNICA DOS SOLOS I

NOTAS DE AULA PRÁTICAS DE LABORATÓRIO MECÂNICA DOS SOLOS I

Elaboração:
Professora Juliana Reinert
Professor Mateus Justino da Silva
Estagiária Francielle Cristina Pereira Diniz

CURVELO
2015

| | REV. 0 | REV. 1 | REV. 2 | REV. 3 | REV. 4 | REV. 5 | REV. 6 | REV. 7 | REV. 8 |
|-----------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| DATA | 19/03/2015 | 17/08/2015 | | | | | | | |
| EXECUÇÃO | FRANCIELLE | JULIANA | | | | | | | |
| APROVAÇÃO | JULIANA | JULIANA | | | | | | | |



SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. UMIDADE NATURAL E UMIDADE HIGROSCÓPICA | 3 |
| 2. LIMITE DE PLASTICIDADE | 6 |
| 3. LIMITE DE LIQUIDEZ..... | 8 |
| 4. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS | 11 |
| 5. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA..... | 15 |
| 6. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO | 23 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 27 |

1. UMIDADE NATURAL E UMIDADE HIGROSCÓPICA

A umidade que um solo possui, na forma em que ele se encontra na natureza, é denominada *umidade natural*.

Quando certa quantidade de solo é coletada e deixada secar ao ar, o seu teor de umidade tenderá a se reduzir até certo limite. Ou seja, mesmo que se deixe a amostra secar por um longo período, sempre permanecerá uma umidade residual. Essa umidade, que o solo exibe quando seco ao ar, é denominada *umidade higroscópica*. O teor de umidade higroscópica tende a ser maior à medida que o solo for mais argiloso. Nos solos de granulação grossa (areias e pedregulho) ela é praticamente desprezível.

Tomando-se uma porção qualquer de solo, pode-se definir o seu teor de umidade como sendo a razão entre o peso da água P_w existente e o peso do solo seco P_s (ou seja, considerando apenas os grãos). Expressando-se essa relação em porcentagem tem-se:

$$w = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

1.1 Preparação da amostra

De acordo com a NBR 6457/86, deve-se tomar uma quantidade de material, função da dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, como indicado na Tabela 1, destorroá-lo e colocá-lo no estado fofo.

TABELA 1 - Quantidade de material em função da dimensão dos grãos maiores.

| Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente (mm) | Quantidade de material (em massa seca) a tomar (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 |

Fonte: NBR 6457/86.

1.2 Procedimento de ensaio

O procedimento de determinação de teor de umidade de solos é dado pela norma NBR 6457/86. Os dados obtidos devem ser preenchidos na Ficha de Ensaio 001.

1.3 Cálculos

Para cada cápsula, calcula-se a umidade do solo através da fórmula:

$$w = \frac{P_w}{P_s} \times 100 = \frac{P_{\text{cápsula mais solo úmido}} - P_{\text{cápsula mais solo seco}}}{P_{\text{cápsula mais solo seco}} - P_{\text{cápsula}}} \times 100$$

A umidade do solo é calculada a partir da média dos valores:

$$w = \frac{\sum w_i}{i}$$

1.4 Observações

- A norma prevê que sejam efetuadas pelo menos três determinações por amostra de solo.
- Ainda segundo a norma, o resultado final deve ser expresso com uma casa decimal.
- Embora a NBR 6457 não faça menção a respeito, recomenda-se desprezar os resultados de cápsulas que eventualmente acusarem umidades discrepantes em relação às demais.



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE CURVELO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MECÂNICA DOS SOLOS I

TEOR DE UMIDADE

**Ficha de
ensaio
001**

| | | | | | | |
|----------------|-------------------|----|-----------------------|-------|-----------|--------------|
| Cápsula | | N° | | | | OBS.: |
| PESOS | cápsula+solo+água | g | | | | |
| | cápsula+solo | g | | | | |
| | Cápsula | g | | | | |
| | Água | g | | | | |
| | solo seco | g | | | | |
| Umidade | % | | | | | |
| Umidade média | % | | | | | |
| Cápsula | | N° | | | | OBS.: |
| PESOS | cápsula+solo+água | g | | | | |
| | cápsula+solo | g | | | | |
| | Cápsula | g | | | | |
| | Água | g | | | | |
| | solo seco | g | | | | |
| Umidade | % | | | | | |
| Umidade média | % | | | | | |
| Cápsula | | N° | | | | OBS.: |
| PESOS | cápsula+solo+água | g | | | | |
| | cápsula+solo | g | | | | |
| | Cápsula | g | | | | |
| | Água | g | | | | |
| | solo seco | g | | | | |
| Umidade | % | | | | | |
| Umidade média | % | | | | | |
| INTERESSADO: | | | CLASSIF. DO MATERIAL: | | | REG. N° |
| SOLICITAÇÃO: | | | | | | |
| DADOS DA OBRA: | | | CERTIFICADO N° | DATA: | LAB/CALC: | ENG.° RESP.: |

2. LIMITE DE PLASTICIDADE

O limite de plasticidade (LP) representa o teor de umidade a partir do qual um solo passa a exibir a plasticidade. Na definição clássica de Atterberg, o LP é a fronteira entre o “estado semi-sólido” e o “estado plástico”. Ou seja, para umidades superiores ao limite de plasticidade, o solo deixaria de apresentar a consistência de um material “sólido”, tornando-se moldável.

No laboratório, o limite de plasticidade é definido como sendo o teor de umidade com o qual um cilindro de solo começa a se fragmentar, quando se procura moldá-lo com 3 mm de diâmetro.

2.1. Preparação da amostra

De acordo com a NBR 6457/86, deve-se secar a amostra, até próximo da umidade higroscópica. Desmanchar os torrões, evitando a quebra de grãos, e homogeneizar a amostra. Com o auxílio do repartidor de amostras, ou pelo quarteamento, reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio.

Tomar uma fração da mostra obtida e passar na peneira de 0,42 mm, de modo a se ter cerca de 200 g de material passado. O material assim obtido constitui a amostra a ser ensaiada.

2.2. Procedimento de ensaio

O procedimento de determinação de teor de umidade de solos é dado pela norma NBR 7180/84. Os dados obtidos devem ser preenchidos na Ficha de Ensaio 002.

2.3. Cálculos

O limite de plasticidade é obtido a partir da média de umidade. Entretanto, os valores de umidade utilizados não devem diferir de 5% da respectiva média. Ou seja, deve-se verificar se cada valor de umidade atende a esse critério. Os valores que não se situarem na faixa de $\pm 5\%$ em relação à média são desprezados. Depois desta verificação, calcula-se uma nova média.

$$LP = \frac{\sum w_i}{i}$$

Verificação:

$$\begin{cases} LP - 5\% \times LP \\ LP + 5\% \times LP \end{cases}$$

2.4. Observações

- A norma prevê que sejam efetuadas pelo menos três determinações por amostra de solo, portanto pelo menos três valores devem se situar dentro da faixa de tolerância para compor a média.
- O limite de plasticidade é dado pelo arredondamento para o inteiro mais próximo da média das umidades.

3. LIMITE DE LIQUIDEZ

Convenciona-se o limite de liquidez (LL) de um solo como sendo o teor de umidade acima do qual o solo perde as características de plasticidade, passando a se comportar como um fluido viscoso. Na definição de Atterberg, o limite de liquidez representa a fronteira entre o “estado plástico” e o “estado líquido”.

Para a obtenção do LL em laboratório, utiliza-se um equipamento em forma de concha, conhecido como aparelho de Casagrande. O ensaio baseia-se na determinação do número de golpes necessários para fechar um sulco padrão, efetuado no solo colocado na concha. O ensaio é executado, no mínimo 3 vezes, fazendo-se variar o teor de umidade da amostra. O limite de liquidez corresponde à umidade que determina o fechamento do sulco com 25 golpes.

3.1. Preparação da amostra

De acordo com a NBR 6457/86, deve-se secar a amostra, até próximo da umidade higroscópica. Desmanchar os torrões, evitando a quebra de grãos, e homogeneizar a amostra. Com o auxílio do repartidor de amostras, ou pelo quarteamento, reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio.

Tomar uma fração da mostra obtida e passar na peneira de 0,42 mm, de modo a se ter cerca de 200 g de material passado. O material assim obtido constitui a amostra a ser ensaiada.

3.2. Procedimento de ensaio

O procedimento de determinação de teor de umidade de solos é dado pela norma NBR 6459/84. Os dados obtidos devem ser preenchidos na Ficha de Ensaio 002.

3.3. Cálculos

Para o solo contido em cada cápsula, calcula-se o teor de umidade pela fórmula:

$$w = \frac{P_w}{P_s} \times 100 = \frac{P_{\text{cápsula mais solo úmido}} - P_{\text{cápsula mais solo seco}}}{P_{\text{cápsula mais solo seco}} - P_{\text{cápsula}}} \times 100$$

Em seguida, deve-se construir um gráfico, colocando-se no eixo das abscissas (em escala linear) os teores de umidade, e no eixo das ordenadas (em escala logarítmica) o número de golpes. Aos pontos assim obtidos é ajustada uma reta. Pontos que eventualmente estiverem muito afastados da tendência dos demais devem ser desprezados.

O limite de liquidez do solo será o teor de umidade correspondente a 25 golpes, obtido com base na reta ajustada. O resultado final deve ser expresso como um número inteiro.



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE CURVELO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

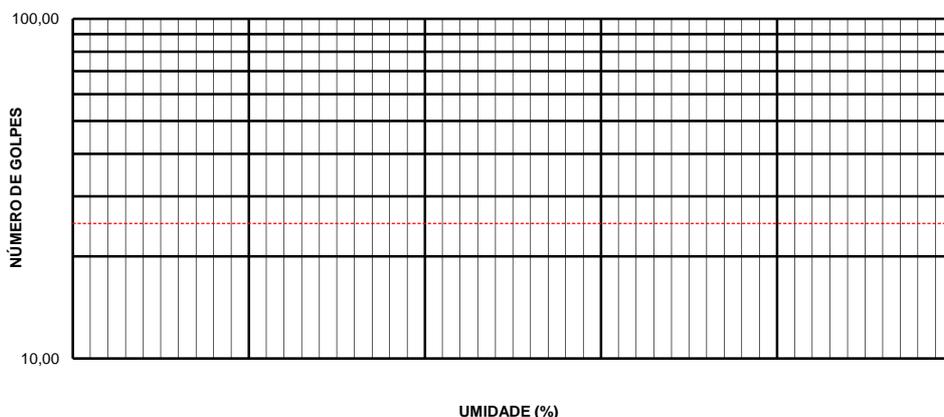
MECÂNICA DOS SOLOS I

LIMITES DE CONSISTÊNCIA

**Ficha de
ensaio
002**

LIMITE DE LIQUIDEZ

| | | | | | | | |
|---------|-------------------|---|--|--|--|--|--|
| Cápsula | n° | | | | | | |
| PESOS | cápsula+solo+água | g | | | | | |
| | cápsula+solo | g | | | | | |
| | Cápsula | g | | | | | |
| | Água | g | | | | | |
| | solo seco | g | | | | | |
| Umidade | % | | | | | | |
| Golpes | | | | | | | |



LIMITE DE PLASTICIDADE

| | | | | | | | |
|---------|-------------------|---|--|--|--|--|--|
| Cápsula | n° | | | | | | |
| PESOS | cápsula+solo+água | g | | | | | |
| | cápsula+solo | g | | | | | |
| | Cápsula | g | | | | | |
| | Água | g | | | | | |
| | solo seco | g | | | | | |
| Umidade | % | | | | | | |

| | | |
|--------------|----------------------|--|
| Observações: | Quadro Resumo | |
| | LL (%) | |
| | LP (%) | |
| | IP (%) | |

| | | | | |
|----------------|-----------------------|---------|-----------|--------------|
| INTERESSADO: | CLASSIF. DO MATERIAL: | REG. N° | | |
| SOLICITAÇÃO: | | | | |
| DADOS DA OBRA: | CERTIFICADO N° | DATA: | LAB/CALC: | ENG.° RESP.: |

4. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

O peso específico dos grãos (γ_s) consiste na relação entre o peso e o volume de uma partícula individual de solo. Ou seja, no seu cálculo desconsideram-se completamente os vazios existentes no solo. Pode-se definir o peso específico dos grãos com a seguinte expressão:

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$$

Sendo P_s o peso seco e V_s o volume dos grãos.

Para a obtenção de peso específico dos grãos é necessário conhecer o volume ocupado pelos mesmos. No laboratório, isso se torna possível com base no princípio de que um corpo imerso em água desloca um certo volume de líquido. Esse volume é obtido indiretamente, através de uma relação com o peso da água deslocada. A execução do ensaio exige o uso de recipientes com volume conhecido (picnômetros).

4.1. Preparação da amostra

De acordo com a NBR 6457/86, deve-se secar a amostra, até próximo da umidade higroscópica. Desmanchar os torrões, evitando a quebra de grãos, e homogeneizar a amostra. Com o auxílio do repartidor de amostras, ou pelo quarteamento, reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio.

Tomar uma fração da amostra obtida e passar na peneira de 4,8 mm, de modo a se ter cerca de 500 g de material passado. O material assim obtido constitui a amostra a ser ensaiada.

4.2. Procedimento de ensaio

O procedimento de determinação da massa específica dos grãos menores que 4,8 mm é dado pela norma NBR 6508/84. Os dados obtidos devem ser preenchidos na Ficha de Ensaio 003.

4.3. Cálculos

A massa específica dos grãos de solo ρ_s é calculado através da seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{(P_2 - P_1) \frac{100}{100 + w_{hig}}}{(P_2 - P_1) \frac{100}{100 + w_{hig}} + P_4 - P_3} \cdot \rho_w$$

P_1 - Peso do picnômetro

P_2 - Peso do picnômetro + solo

P_3 - Peso do picnômetro + solo + água

P_4 - Peso do picnômetro + água

w_{hig} - umidade higroscópica (Obs.: caso o solo seja seco em estufa antes da execução do ensaio, considera-se $w_{hig} = 0$)

$\rho_{w(t)}$ - peso específico da água destilada na temperatura t do ensaio (ver tabela no item Observações)

Os resultados são considerados satisfatórios quando os mesmos não diferirem entre si mais de $0,02 \text{ g/cm}^3$. Ou seja, a diferença entre o maior e menor dos γ_s obtidos não deve exceder $0,02 \text{ g/cm}^3$.

Para obter o peso específico dos grãos, deve-se multiplicar o resultado da massa específica dos grãos pela gravidade (adotada igual a 10 m/s^2).

4.4. Observações

- A norma prescreve que o resultado final seja calculado com base em pelo menos duas determinações consideradas satisfatórias.
- O valor de γ_s deve ser expresso com três algarismos significativos.

TABELA 2 - Massa específica da água em função da temperatura.

| Temperatura (°C) | Massa específica ρ_w (g/cm ³) | Temperatura (°C) | Massa específica ρ_w (g/cm ³) |
|------------------|--|------------------|--|
| 10 | 0,9997 | 23 | 0,9976 |
| 11 | 0,9996 | 24 | 0,9973 |
| 12 | 0,9995 | 25 | 0,9971 |
| 13 | 0,9994 | 26 | 0,9968 |
| 14 | 0,9993 | 27 | 0,9965 |
| 15 | 0,9991 | 28 | 0,9963 |
| 16 | 0,9990 | 29 | 0,9960 |
| 17 | 0,9988 | 30 | 0,9957 |
| 18 | 0,9986 | 31 | 0,9954 |
| 19 | 0,9984 | 32 | 0,9950 |
| 20 | 0,9982 | 33 | 0,9947 |
| 21 | 0,9980 | 34 | 0,9944 |
| 22 | 0,9978 | 35 | 0,9941 |



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE CURVELO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
MECÂNICA DOS SOLOS I

**Ficha de
ensaio
003**

MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

| | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------|-----------|--------------|
| Picnômetro | | N° | | | OBS.: | |
| 1. Temperatura | | °C | | | | |
| 2. PIC+Solos+Água | | g | | | | |
| 3. PIC+Água | | g | | | | |
| 4. Solo Úmido | | g | | | | |
| 5. Solo Seco (P _s) | | g | | | | |
| 6. Densidade da água T°C | | g/cm ³ | | | | |
| 7. Volume deslocado (5+3-2) | | | | | | |
| 8. Massa Específica dos Grãos | | g/cm ³ | | | | |
| Média | | g/cm ³ | | | | |
| Umidade | | Data: | | | | |
| Cápsula | | N° | | | | |
| PESOS | cápsula+solo+água | | g | | | |
| | cápsula+solo | | g | | | |
| | Cápsula | | g | | | |
| | Água | | g | | | |
| | solo seco | | g | | | |
| Umidade | | % | | | | |
| Umidade média | | % | | | | |
| Fator de Correção Fc=100/(100+w) | | | | | | |
| Picnômetro | | N° | | | OBS.: | |
| 1. Temperatura | | °C | | | | |
| 2. PIC+Solos+Água | | g | | | | |
| 3. PIC+Água | | g | | | | |
| 4. Solo Úmido | | g | | | | |
| 5. Solo Seco (P _s) | | g | | | | |
| 6. Densidade da água T°C | | g/cm ³ | | | | |
| 7. Volume deslocado (5+3-2) | | | | | | |
| 8. Massa Específica dos Grãos | | g/cm ³ | | | | |
| Média | | g/cm ³ | | | | |
| Umidade | | Data: | | | | |
| Cápsula | | N° | | | | |
| PESOS | cápsula+solo+água | | g | | | |
| | cápsula+solo | | g | | | |
| | Cápsula | | g | | | |
| | Água | | g | | | |
| | solo seco | | g | | | |
| Umidade | | % | | | | |
| Umidade média | | % | | | | |
| Fator de Correção Fc=100/(100+w) | | | | | | |
| INTERESSADO: | | | CLASSIF. DO MATERIAL: | | REG. N° | |
| SOLICITAÇÃO: | | | | | | |
| DADOS DA OBRA: | | | CERTIFICADO N° | DATA: | LAB/CALC: | ENG.° RESP.: |

5. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica consiste na determinação dos diâmetros das diversas partículas existentes no solo. A forma mais direta de obter o diâmetro dos grãos é passando-os através de uma série de peneiras, com aberturas conhecidas. Esse procedimento permite conhecer os diâmetros dos grãos superiores a 0,075 mm, que é a menor abertura de peneira disponível. Para os grãos inferiores a essa dimensão, utiliza-se o processo da sedimentação. Esse método baseia-se no princípio de que, dispersando-se as partículas de solo em água, a velocidade de sedimentação dos grãos aumenta com o diâmetro dos mesmos (Lei de Stokes).

Portanto, é usual efetuar a análise granulométrica de forma combinada. O procedimento compõe-se de três etapas: peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação.

5.1. Preparação da amostra

De acordo com a NBR 6457/86, deve-se secar a amostra, até próximo da umidade higroscópica. Desmanchar os torrões, evitando a quebra de grãos, e homogeneizar a amostra. Com o auxílio do repartidor de amostras, ou pelo quarteamento, reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio.

Tomar uma fração da amostra obtida e passar na peneira de 76 mm, desprezando o material eventualmente retido. Do material passado na peneira de 76 mm, tomar uma quantidade, função da dimensão estimada dos grãos maiores, conforme a tabela abaixo:

TABELA 3 - Quantidade de amostra para análise granulométrica.

| Dimensão dos grãos maiores contidos na mostra determinada por observação visual (mm) | Quantidade mínima a tomar (Kg) |
|--|--------------------------------|
| <5 | 1 |
| 5 a 25 | 4 |
| >25 | 8 |

Fonte: NBR 6457/86

5.2. Procedimento de ensaio

O procedimento de determinação de teor de umidade de solos é dado pela norma NBR 7181/84. Os dados obtidos devem ser preenchidos na Ficha de Ensaio 004 e 005.

5.3. Cálculos

5.3.1. Peneiramento Grosso

Dados:

- Peso total da amostra seca ao ar;
- Peso do material seco retido na peneira 2,0 mm;
- Umidade higroscópica;
- Peso do material retido nas peneiras de 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8 e 2 mm.

Cálculo:

a) Inicialmente, determina-se o peso seco total da amostra, através da seguinte fórmula:

$$P_s = \frac{P_t - P_g}{100 + w_{\text{hig}}} \times 100 + P_g$$

P_s - peso seco total da amostra

P_T - peso da amostra seca ao ar

P_g - peso do material seco retido na peneira 2,0 mm

w_{hig} - umidade higroscópica (%)

b) Com base nos pesos retidos em cada peneira, calculam-se os pesos retidos acumulados P_i .

c) Na sequência, podem-se calcular as porcentagens de material que passam em cada peneira:

$$Q_g = \frac{P_s - P_i}{P_s} \times 100$$

Q_g - porcentagem de material passando na peneira

P_s - peso seco total da amostra

P_i - peso retido acumulado até a peneira em questão

5.3.2. Peneiramento Fino

Dados:

- Peso do material submetido à sedimentação;
- Umidade higroscópica;
- Porcentagem do material que passa na peneira 2,0 mm;
- Peso do material retido nas peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm.

Cálculo:

a) Com base nos pesos retidos em cada peneira, obtém-se os pesos retidos acumulados P_i .

b) Calculam-se as porcentagens de material que passam nas peneiras usando-se a expressão:

$$Q_f = \frac{P_h \times 100 - P_i(100 + w_{\text{hig}})}{P_h \times 100} \times N$$

Q_f - porcentagem de material passado em cada peneira;

P_h - peso do material submetido à sedimentação, em gf;

w_{hig} - umidade higroscópica (%);

N - porcentagem de material que passa na peneira 2,0 mm (valor calculado no peneiramento grosso).

5.3.3. Sedimentação

Dados

- Peso do material (seco ao ar) submetido à sedimentação;
- Porcentagem do material que passa na # 2,0 mm;
- Peso específico dos grãos de solo;
- Umidade higroscópica;
- Número do densímetro utilizado;
- Leituras do densímetro nos tempos respectivos;
- Curvas de calibração de temperatura e altura de queda do densímetro utilizado.

Cálculo:

a) Obtém-se, para cada leitura do densímetro, o diâmetro máximo das partículas em suspensão, mediante a aplicação da Lei de Stokes:

$$d = \sqrt{\frac{1800 \mu}{\gamma_s - 1} \times \frac{a}{t}}$$

d - diâmetro máximo das partículas, em mm

μ - coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura do ensaio, em g.s/cm² (ver tabela abaixo)

a - altura de queda das partículas, correspondente à leitura do densímetro, em cm (este valor é obtido da curva de calibração do densímetro)

t - tempo de sedimentação, em s

γ_s - peso específico dos grãos do solo, em gf/cm³

TABELA 4 - Viscosidade da água em função da temperatura

| VISCOSIDADE DA ÁGUA μ (em 10 ⁻⁶ g.s/cm ²) | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| °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 | 7,45 | 7,20 | 7,06 | 6,92 | 6,79 |

b) Para cada leitura do densímetro, determina-se a porcentagem do solo em suspensão. Essa porcentagem refere-se à massa total da amostra. A seguinte expressão é empregada:

$$Q_s = N \times \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \times \frac{1000(L - L_D)}{\frac{P_h}{100 + w_{hig}} \times 100}$$

Q_s - porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro

N - porcentagem do material que passa na # 2,0 mm (valor calculado no peneiramento grosso)

γ_s - peso específico dos grãos de solo, em gf/cm^3

L - leitura do densímetro

L_D - leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da suspensão (valor obtido da curva de calibração de temperatura do densímetro utilizado)

P_h - peso do material submetido à sedimentação, em gf

w_{hig} - umidade higroscópica (%)

4.3. Observações

- As curvas de temperatura e altura de queda são específicas para cada densímetro. Assim, com o número do densímetro utilizado, devem-se obter no laboratório os gráficos apropriados.



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE CURVELO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

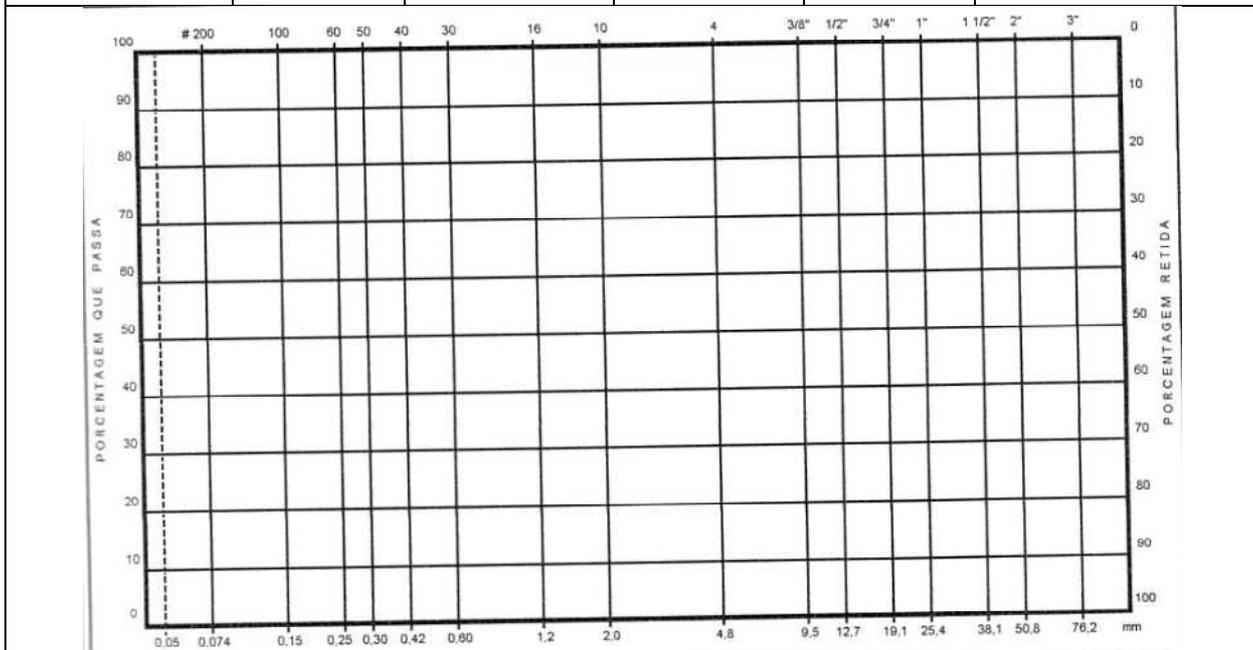
MECÂNICA DOS SOLOS I

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (Peneiramento)

**Ficha de
ensaio
004**

| TEOR DE UMIDADE | | | | AMOSTRA TOTAL SECA | | | | OBS.: |
|-------------------|-------------------|---|--|------------------------------|--|--|--|-------|
| Cápsula | N° | | | 1. Amostra total úmida | | | | |
| PESOS | cápsula+solo+água | g | | 2. Peso retido #N°10 Seco | | | | |
| | cápsula+solo | g | | 3. Peso retido #N°10 Úmido | | | | |
| | Cápsula | g | | 4. Peso da Água | | | | |
| | Água | g | | 5. Passando #N°10 Seco | | | | |
| | solo seco | g | | 6. Amostra Total Seca | | | | |
| Umidade | % | | | 7. Amostra Menor #N°10 úmida | | | | |
| Umidade média | % | | | 8. Amostra Menor #N°10 seca | | | | |
| Fator de Correção | | | | | | | | |

| PENEIRA | | MATERIAL RETIDO | | | | | OBS.: |
|-----------|-------|-----------------|------------------|-----------------|-------------|------------------------------|-------|
| Polegadas | mm | Peso (g) | % Am. Menor N°10 | % Amostra Total | % Acumulada | % que passa da Amostra Total | |
| 2" | 50,8 | | | | | | |
| 1 1/2" | 38,1 | | | | | | |
| 1" | 25,4 | | | | | | |
| 3/4" | 19,1 | | | | | | |
| 3/8" | 9,5 | | | | | | |
| N° 4 | 4,8 | | | | | | |
| N° 10 | 2,0 | | | | | | |
| N°16 | 1,2 | | | | | | |
| N° 30 | 0,6 | | | | | | |
| N° 40 | 0,42 | | | | | | |
| N° 60 | 0,25 | | | | | | |
| N° 100 | 0,15 | | | | | | |
| N° 200 | 0,074 | | | | | | |
| Fundo | | | | | | | |



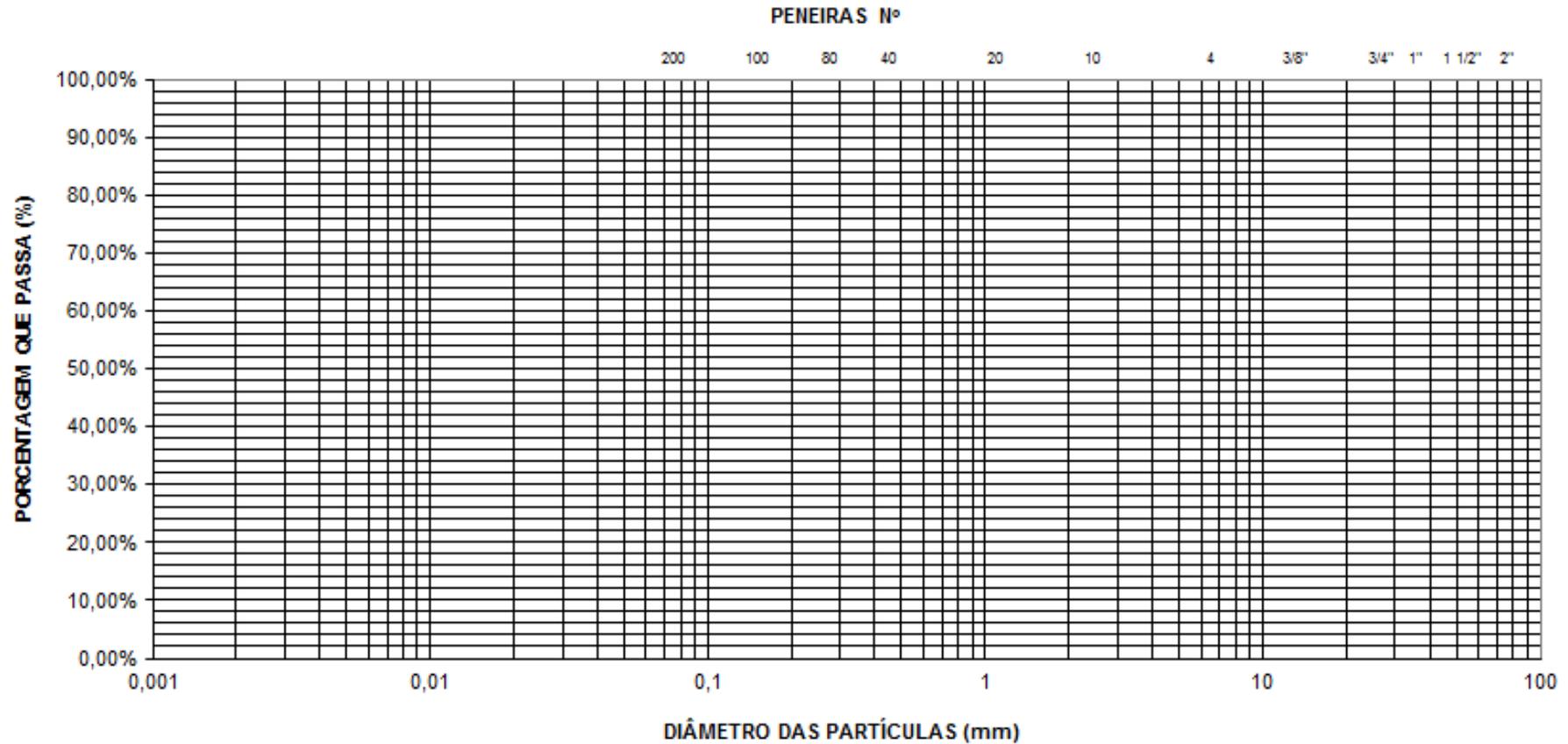
| RESUMO | |
|-----------------------------|---------|
| Pedregulho: >4,8mm | _____ % |
| Areia Grossa: 4,8-2,0 mm | _____ % |
| Areia Média 2,0-0,42 mm | _____ % |
| Areia Fina: 0,42-0,05 mm | _____ % |
| OBS.: | |

| | | |
|----------------|-----------------------|--------------|
| INTERESSADO: | CLASSIF. DO MATERIAL: | REG. N° |
| SOLICITAÇÃO: | | |
| DADOS DA OBRA: | CERTIFICADO N° | DATA: |
| | LAB/CALC: | ENG.° RESP.: |



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
 UNIDADE CURVELO
 CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
 MECÂNICA DOS SOLOS I
CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

**Ficha de ensaio
006**



| | | | | | |
|----------------------|---------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| ARGILA _____ % | SILTE _____ % | AREIA FINA _____ % | AREIA MÉDIA _____ % | AREIA GROSSA _____ % | PEDREGULHO _____ % |
| INTERESSADO: _____ | | CLASSIF. DO MATERIAL: _____ | | | REG. Nº _____ |
| SOLICITAÇÃO: _____ | | | | | |
| DADOS DA OBRA: _____ | | CERTIFICADO Nº _____ | DATA: _____ | LAB/CALC: _____ | ENG.º RESP.: _____ |

6. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Experimentalmente, é possível constatar que a adição de água a um solo seco facilita a sua compactação. Em outras palavras, cada vez que se adiciona água a esse solo pouco úmido, a densidade final do material compactado aumenta.

Entretanto, isso não ocorre indefinidamente. Na verdade, o acréscimo de água tem um efeito benéfico enquanto não se alcança um certo teor de umidade, que é chamado de umidade ótima (w_{ot}). Quando a adição de água conduz a umidades superiores a w_{ot} , passasse a verificar o processo inverso. Ou seja, a densidade do material compactado tende a se reduzir com o acréscimo de umidade.

Assim, o ensaio de compactação tem basicamente dois objetivos:

- Determinar a umidade ótima do solo, para uma dada energia de compactação;
- Determinar o peso específico seco máximo ($\gamma_{d \max}$) associado à umidade ótima.

6.1. Preparação da amostra

De acordo com a NBR 7182/86, deve-se secar a amostra, até próximo da umidade higroscópica. Desmanchar os torrões, evitando a quebra de grãos, e homogeneizar a amostra. Com o auxílio do repartidor de amostras, ou pelo quarteamento, reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio. Verificar se a amostra passa integralmente na peneira 4,8 mm. Após o peneiramento, proceder o indicado na tabela abaixo:

TABELA 5 - Procedimento após o peneiramento.

| Peneira (mm) | Material Retido (% em peso) | Cilindro a ser utilizado no ensaio | Observação |
|--------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| 4,8 | <7 | Grande ou pequeno | Desprezar o material retido |
| 19,1 | >10 | Grande | Desprezar o material retido |
| 19,1 | >10 | Grande | Ver nota abaixo |
| 19,1 | >30 | - | Recomenda-se não ensaiar de acordo com o método de compactação de solos |

Fonte: NBR 6457/86

Nota: Passar o material retido na peneira de 19,1 mm através da de 76,2 mm e desprezar o material retido nesta última. Substituir o material retido na peneira 19,1 mm e que passe na de 76,2 mm por igual quantidade de material retido na peneira de 4,8 mm e que passe na de 19,1 mm.

As quantidades de amostra a serem tomadas estão indicadas na tabela 6.

TABELA 6 - Quantidade de amostra a ser tomada.

| Ensaio de compactação | A amostra preparada passa integralmente na peneira (mm) | Cilindro a ser tomado | Quantidade de amostra a ser tomada (kg) |
|-----------------------|---|-----------------------|---|
| Com reuso de material | 4,8 | Pequeno Grande | 3 7 |
| | 19,1 | Grande | 7 |
| Sem reuso de material | 4,8 | Pequeno Grande | 15 35 |
| | 19,1 | grande | 35 |

Fonte: NBR 6457/86

6.2. Procedimento de ensaio

O procedimento do ensaio de compactação é dado pela norma NBR7182/86. Os dados obtidos devem ser preenchidos na Ficha de Ensaio 007.

6.3. Cálculos

Inicialmente, deve-se calcular para cada corpo de prova o “peso do solo compactado”. Esse valor é obtido subtraindo-se o “peso do cilindro” do “peso do cilindro + solo compactado”. O próximo passo consiste em calcular o peso específico do solo úmido γ :

$$\gamma = \frac{\text{Peso do solo compactado}}{\text{Volume do cilindro}}$$

Com os dados das cápsulas, pode-se calcular o teor de umidade associado a cada moldagem dos corpos de prova:

$$w = \frac{P_{\text{cápsula mais solo úmido}} - P_{\text{cápsula mais solo seco}}}{P_{\text{cápsula mais solo seco}} - P_{\text{cápsula}}} \times 100$$

Com os valores de γ e w , pode-se calcular o peso específico seco γ_d :

$$\gamma_d = \gamma \times \frac{100}{100 + w}$$

A etapa seguinte consiste no traçado da “curva de compactação”. Para tanto, cria-se um gráfico em que o teor de umidade w é colocado no eixo das abscissas, e o peso específico seco γ_d no eixo das ordenadas. Plota-se então os dados de cada ensaio e ajusta-se uma curva aos mesmos, desprezando-se os pontos mais afastados.

O ponto de máximo da curva ajustada corresponderá ao peso específico seco máximo do solo ($\gamma_{d\text{max}}$). O teor de umidade associado a esse valor é denominado “umidade ótima” (w_{ot}).

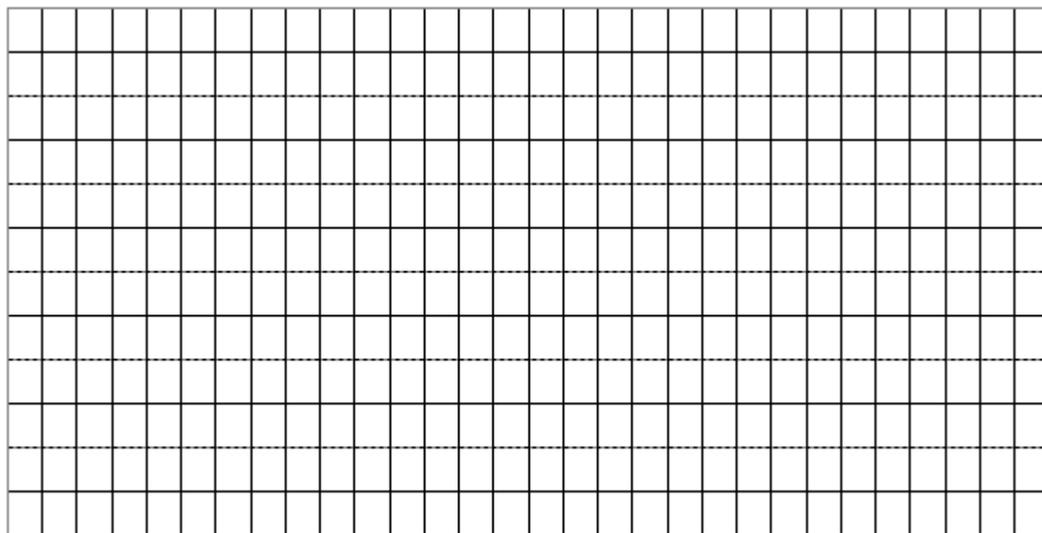


COMPACTAÇÃO

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|-----------------------------|--|
| Cápsula | | N° | | | | | | | | | | | | | | W _{média} | |
| PESOS | cápsula+solo+água | g | | | | | | | | | | | | | | F _c | |
| | cápsula+solo | g | | | | | | | | | | | | | | F _c =100/(100+w) | |
| | Cápsula | g | | | | | | | | | | | | | | Peso Solo Úmido (g) | |
| | Água | g | | | | | | | | | | | | | | P _w = | |
| | solo seco | g | | | | | | | | | | | | | | Peso Solo Seco (g) | |
| Umidade | % | | | | | | | | | | | | | | P _s = | | |
| Umidade média | % | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Umidade de Calculo | % | | | | | | | | | | | | | | P _s = P _w x F _c ou | | |
| Cilindro | N° | | | | | | | | | | | | | | P _s = P _w (1+w) | | |
| Água Adicionada | % | | | | | | | | | | | | | | Peso água (g) | | |
| Água Adicionada | cm ³ | | | | | | | | | | | | | | P _a = | | |
| PESOS | Cil. +Solo +Água | g | | | | | | | | | | | | | Energia: | | |
| | Cilindro | g | | | | | | | | | | | | | N° Golpes: | | |
| | Solo +água P | g | | | | | | | | | | | | | | | |
| Volume V | cm ³ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\gamma = P / V$ | g/cm ³ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| γ_d | g/cm ³ | | | | | | | | | | | | | | | | |

Curva de compactação

Massa especifica seca (g/cm³)



Umidade (%)

| | | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------|-----------|--------------|
| RESULTADOS | | OBS.: | | | |
| $\gamma_{dm\acute{a}x}$ | g/cm ³ | | | | |
| W _{ot} | % | | | | |
| INTERESSADO: | | CLASSIF. DO MATERIAL: | | REG. N° | |
| SOLICITAÇÃO: | | | | | |
| DADOS DA OBRA: | | CERTIFICADO N° | DATA: | LAB/CALC: | ENG.° RESP.: |

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT. *NBR 6457 – Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.* 1986

ABNT. *NBR6459 – Solo - Determinação do limite de liquidez.* 1984

ABNT. *NBR 6508 – Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa específica - Método de Ensaio.* 1984.

ABNT. *NBR 7180 – Solo - Determinação do limite de plasticidade.* 1984

ABNT. *NBR 7181 – Solo - Análise Granulométrica - Método de Ensaio.* 1984.

ABNT. *NBR 7182 – Solo - Ensaio de compactação.* 1986

KORMANN, A. C. M. *Ensaio de compactação e caracterização.* Apostila de Laboratório de Mecânica dos Solos. Curitiba: UFPR, 1997.

PENA, Ana Lucia C. Cordeiro. *Notas de aula da Disciplina de Mecânica dos Solos I.* Belo Horizonte: PUC-MG.

PINTO, Carlos de Souza. *Curso Básico de Mecânica dos Solos.* 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.