

1. ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS

1.1 Introdução

A porção externa e superficial da crosta terrestre é formada por vários tipos de corpos rochosos que constituem o manto rochoso. Estas rochas estão sujeitas a condições que alteram a sua forma física e sua composição química. Estes fatores que produzem essas alterações são chamados de agentes de intemperismo. Pode-se então conceituar o intemperismo como o conjunto de processos físicos e químicos que modificam as rochas quando expostas ao tempo.

O processo do intemperismo se dá em duas fases:

- intemperismo físico – que é a desintegração da rocha;
- intemperismo químico – que é a decomposição da rocha.

A desintegração (intemperismo físico) é a ruptura das rochas inicialmente em fendas, progredindo para partículas de tamanhos menores, sem, no entanto, haver mudança na sua composição. Nesta desintegração, através de agentes como água, temperatura, pressão, vegetação e vento, formam-se os pedregulhos e as areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partícula intermediária entre areia e argila). Somente em condições especiais são formadas as argilas (partículas finas), resultantes da decomposição do feldspato das rochas ígneas.

A decomposição (intemperismo químico) é o processo onde há modificação mineralógica das rochas de origem. O principal agente é a água, e os mais importantes mecanismos modificadores são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos resultantes do apodrecimento de vegetais e animais.

Normalmente a desintegração e a decomposição atuam juntas, uma vez que a ruptura física da rocha permite a circulação da água e de agentes químicos. Os organismos vivos concorrem também na desagregação puramente física e na decomposição química das rochas.

1.2 Formação dos solos

Cada rocha e cada maciço rochoso se decompõem de uma forma própria. Porções mais fraturadas se decompõem mais intensamente do que as partes maciças, e certos constituintes das rochas são mais solúveis que outros.

As rochas que se dispõem em camadas, respondem ao intemperismo de forma diferente para cada camada, resultando numa alteração diferencial. O material decomposto pode ser transportado pela água, pelo vento, etc.

Os solos são misturas complexas de materiais inorgânicos e resíduos orgânicos parcialmente decompostos. Para o homem em geral, a formação do solo é um dos mais importantes produtos do intemperismo. Os solos diferem grandemente de área para área, não só em quantidade (espessura de camada), mais também qualitativamente.

Os agentes de intemperismo estão continuamente em atividade, alterando os solos e transformando as partículas em outras cada vez menores. O solo propriamente dito é a parte superior do manto de intemperismo, assim, as partículas diminuem de tamanho conforme se aproximam da superfície.

Os fatores mais importantes na formação do solo são:

- ação de organismos vivos;
- rocha de origem;
- tempo (estágio de desintegração/decomposição);
- clima adequado;
- inclinação do terreno ou condições topográficas.

1.3 Classificação dos solos quanto à sua origem

Quanto à sua formação, podemos classificar os solos em três grupos principais: solos residuais, solos sedimentares e solos orgânicos.

Solos residuais – são os que permanecem no local da rocha de origem (rocha-mãe), observando-se uma gradual transição da superfície até a rocha. Para que ocorram os solos residuais, é necessário que a velocidade de decomposição de rocha seja maior que a velocidade de remoção pelos agentes externos. Estando os solos residuais apresentados em horizontes (camadas) com graus de intemperismos decrescentes, podem-se identificar as seguintes camadas: solo residual maduro, saprolito e a rocha alterada.

Solos sedimentares ou transportados– são os que sofrem a ação de agentes transportadores, podendo ser aluvionares (quando transportados pela água), eólicos (vento), coluvionares (gravidade) e glaciares (geleiras).

Solos orgânicos– originados da decomposição e posterior apodrecimento de matérias orgânicas, sejam estas de natureza vegetal (plantas, raízes) ou animal. Os solos orgânicos são problemáticos para construção por serem muito compressíveis. Em algumas formações de solos orgânicos ocorre uma importante concentração de folhas e caules em processo de decomposição, formando as turfas (matéria orgânica combustível).

1.4 Física dos solos

O solo é constituído de uma fase fluida (água e/ou gases) e de uma fase sólida. Pode-se dizer que solo é um conjunto de **partículas sólidas** que deixam espaços vazios entre si, sendo que estes vazios podem estar preenchidos com **água**, com **gases** (normalmente o ar), ou com ambos.

1.4.1 Partículas sólidas:

As partículas sólidas dão características e propriedades ao solo conforme sua forma, tamanho e textura. A forma das partículas tem grande influência nas suas propriedades. As principais formas das partículas são:

- a) *poligonais angulares* → são irregulares, exemplo de solos: areias, siltes e pedregulhos.
- b) *poligonais arredondadas* → possuem a superfície arredondada, normalmente devido ao transporte sofrido quando da ação da água. Exemplo: seixo rolado.
- c) *lamelares* → possuem duas dimensões predominantes, típicas de solos argilosos. Esta forma das partículas das argilas responde por alguma de suas propriedades, como por exemplo, a compressibilidade e a plasticidade, esta última, uma das características mais importantes.
- d) *Fibrilares* → possuem uma dimensão predominante. São típicas de solos orgânicos.

As partículas poligonais (areia) apresentam menor superfície específica que as lamelares (argila), proporcionando às areias atrito interno.

1.4.2 Água:

A água contida no solo pode ser classificada em:

a) *água higroscópica* → a que se encontra em um solo úmido ou seco ao ar livre, ocupando os vazios do solo, na região acima do lençol freático. Pode ser totalmente eliminada quando submetida a temperaturas acima de 100°C.

b) *água adsorvida* → também chamada de água adesiva, é aquela película de água que envolve e adere fortemente às partículas de solos muito finos (argila), devido a ação de forças elétricas desbalanceadas na superfície dos argilo-minerais sólida.

c) *água de constituição* → é a que faz parte da estrutura molecular da partícula sólida.

d) *água capilar* → é a que, nos solos finos, sobe pelos vazios entre as partículas, até pontos acima do lençol freático (ascensão capilar). Pode ser totalmente eliminada quando submetida a temperaturas acima de 100°C.

e) *água livre* → é aquela formada pelo excesso de água no solo, abaixo do lençol freático, e que preenche todos os vazios entre as partículas sólidas. Pode ser totalmente eliminada quando submetida a temperaturas acima de 100°C.

1.4.3 Gases:

Dependendo do tipo de solo e das suas propriedades (principalmente porosidade), podemos ter os vazios preenchidos com ar. Em algumas regiões pantanosas (EUA), podemos ter gases (alguns tóxicos) preenchendo estes vazios.

1.5 Diferença entre solo para construção do solo para agronomia

Pode-se afirmar que quando um solo é apropriado para construção civil, deve ser impróprio para fins de agricultura. Assim um solo muito compacto, é conveniente para obras civis, mas é péssimo para agricultura. Do mesmo modo que um solo poroso, com muitos vazios, é bom para a agricultura, mas inadequado para construção.

2. ÍNDICES FÍSICOS DOS SOLOS

2.1 Introdução

Como vimos, o solo é composto por partículas sólidas que apresentam **vazios** entre si. Estes vazios podem estar preenchidos por água e/ou ar. Assim, temos 3 fases:

- * fase sólida – formada por partículas sólidas;
- * fase líquida – formada pela água;
- * fase gasosa – formada pelo ar (vapor, gases).

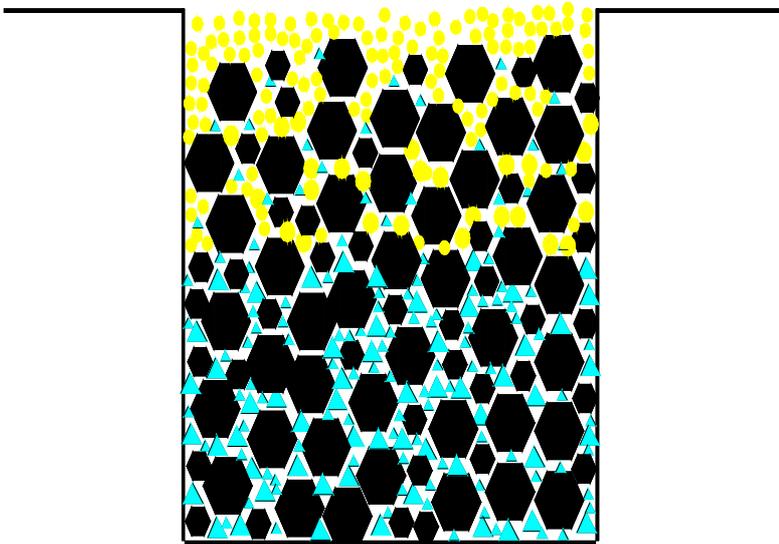


FIGURA I – EXEMPLO DA COMPOSIÇÃO DE UM SOLO

O comportamento de um solo depende das quantidades relativas de cada uma das fases constituintes. Chamamos de **índices físicos** as relações entre as fases.

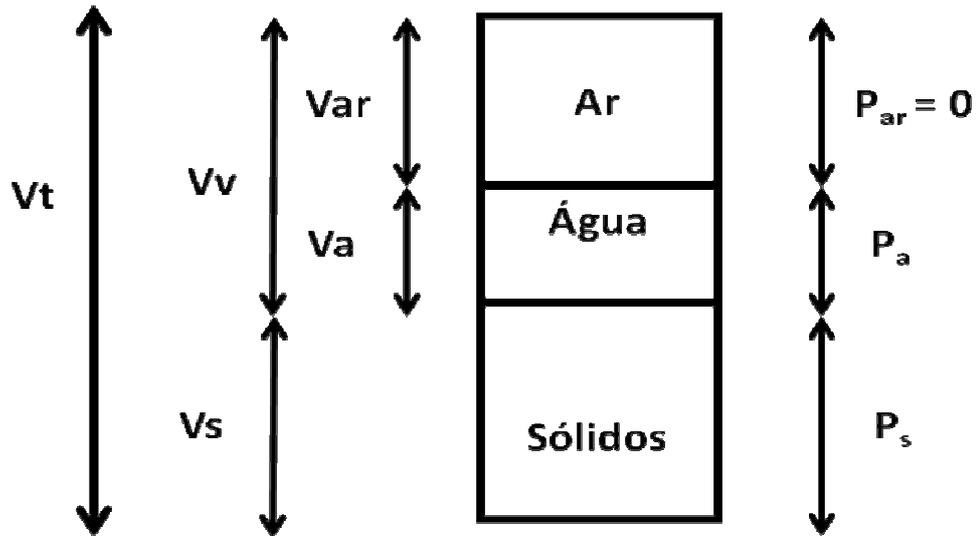


FIGURA II – ESQUEMA DE VOLUMES/PESOS

Devemos ter em mente os diversos estados que um solo pode estar sujeito, sendo afetados por fatores naturais (chuvas, insolação) ou não (compactação mecânica, cortes, aterros). Assim, por exemplo, após um período chuvoso, um determinado solo apresentará um estado em que os vazios serão preenchidos pela água, e o ar anteriormente presente será expulso. No verão, após a evaporação da água, este mesmo solo apresentará um novo estado, com o ar penetrando nos vazios deixados pela água.

Para identificar o estado em que se encontra um determinado solo, num dado momento, utilizamos os índices físicos.

2.2 Grandezas envolvidas:

As principais grandezas de um solo são:

P_s – peso das partículas sólidas;

P_a – peso da água;

* o peso do ar é considerado desprezível.

V_s – volume das partículas sólidas;

V_a – volume da água;

V_{ar} – volume do ar;

V_v - volume de vazios;

Teremos sempre:

$$P_t = P_s + P_a;$$

$$V_v = V_a + V_{ar};$$

$$V_t = V_s + V_a + V_{ar} = V_s + V_v;$$

As unidades mais usuais são:

- para o peso: g; kg ; t.

- para o volume: cm³; dm³; m³.

2.3 Umidade (h %):

É a relação, expressa na forma percentual, entre o peso da água contida num certo volume de solo e o peso da parte sólida existente neste mesmo volume.

$$h\% = \frac{P_a}{P_s} \times 100$$

Para se determinar o teor de umidade de um solo, em laboratório, pesamos uma amostra do solo no seu estado natural (devemos ter o cuidado na retirada e no transporte para o laboratório de não alterarmos a umidade da amostra) e o peso após a completa secagem em estufa (T = 105°C). Assim teremos P1 e P2.

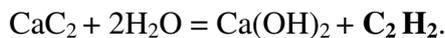
P1 – peso da amostra natural mais o peso da embalagem (tara);

P2- peso da amostra seca mais o peso da embalagem (tara).

$$P_a = P_1 - P_2 \text{ e}$$

$$P_s = P_2 - P_{\text{tara}}.$$

Um outro meio muito simples e rápido é a utilização do aparelho *Speedy*. Este aparelho consiste num reservatório metálico fechado que se comunica com um manômetro destinado a medir a pressão interna. Dentro do reservatório é colocada uma quantidade determinada da amostra de solo, juntamente com uma porção determinada de carbureto de cálcio (CaC₂). A reação da água contida na amostra de solo com o carbureto, resulta em gás acetileno, de acordo com a expressão:



Assim, estabelecemos uma relação entre a variação da pressão interna no reservatório, com o teor de umidade da amostra de solo.

Outro método utilizado é o chamado “método expedito do álcool”.

É grande a variação de umidade de um solo para outro, algumas argilas do México, por exemplo, apresentam umidade da ordem de 400%. A umidade é um índice muito expressivo, principalmente para os solos argilosos, que têm sua resistência dependente do teor de água presente nos mesmos.

Na natureza não existem solos com teor de umidade igual a zero. Esta condição é apenas obtida em laboratório, mesmo assim, após um determinado período exposto ao tempo, a amostra irá absorver a umidade do ar.

2.4 Peso específico aparente do solo natural (γ):

É a relação entre o peso total (Pt) e o volume total (Vt). A umidade h é diferente de zero.

$$\gamma = \frac{Pt}{Vt}$$

No campo, a determinação de γ pode ser feita entre outros métodos, pelo “processo do frasco de areia”.

A unidade padrão é o kN/m³, mas as mais usadas são: g/cm³; kg/dm³; t/m³.

OBS: Se o solo estiver saturado, ou seja, com todos os seus vazios preenchidos pela água, teremos o peso específico saturado γ_{sat} , se o solo, além de saturado, estiver submerso, as partículas sólidas sofrerão o empuxo da água, e o peso específico efetivo do solo será o γ_{sat} menos o γ_a . Assim, $\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_a = \gamma_{sat} - 1$.

2.5 Peso específico aparente do solo seco (γ_s):

É a relação entre o peso das partículas sólidas (Ps) e o volume total (Vt). A umidade (h) da amostra é retirada.

$$\gamma_s = \frac{Ps}{Vt}$$

A sua determinação é feita a partir do peso específico do solo natural (γ) e da umidade (h).

A unidade padrão é o kN/m³, mas as mais usadas são: g/cm³; kg/dm³; t/m³.

2.6 Peso específico real ou das partículas sólidas (γ_g):

É a relação entre o peso das partículas sólidas (Ps) e o volume das partículas sólidas (Vs). Varia pouco de um solo a outro, oscilando entre 25 e 29 kN/m³, tendo valor menor para um solo com elevado teor de matéria orgânica, e valor maior para solo rico em óxido de ferro.

$$\gamma_g = \frac{Ps}{Vs}$$

A unidade padrão é o kN/m³, mas as mais usadas são: g/cm³; kg/dm³; t/m³.

2.7 Peso específico da água (γ_a):

É a relação entre o peso (P_a) e o volume da água (V_a).

$$\gamma_a = \frac{P_a}{V_a} = 1,00\text{g/cm}^3 = 1,00\text{kg/dm}^3 = 1,00\text{t/m}^3 = 10,00\text{kN/m}^3$$

2.8 Densidade relativa das partículas (δ):

É a relação entre o peso específico das partículas sólidas (γ_g) e o peso específico da água (γ_a).

$$\delta = \frac{\gamma_g}{\gamma_a} = \frac{\gamma_g}{1,0} = \gamma_g$$

É adimensional. Para a maioria dos solos varia entre 2,50 e 3,00.

2.9 Índice de vazios (ε):

É a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume das partículas sólidas (V_s).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_s}$$

É adimensional e expresso em percentagem.

2.10 Porosidade (η):

É a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V_t).

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}$$

É adimensional e expresso em percentagem.

2.11 Grau de saturação ($S\%$):

É a percentagem de água que preenche os vazios do solo.

$$S\% = \frac{V_a}{V_v} \times 100$$

2.12 Relação entre os índices:

$$\text{I - } \gamma_s = \frac{\gamma}{(1+h)};$$

$$\text{II- } \eta = \frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)};$$

$$\text{III- } \varepsilon = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1;$$

$$\text{IV - } h = \frac{S \times \varepsilon}{\delta};$$

$$\text{V - } \gamma = \frac{(1+h)}{(1+\varepsilon)} \times \gamma_g;$$

$$\text{VI - } \gamma = \frac{(\delta + S \times \varepsilon)}{(1+\varepsilon)};$$

EXERCÍCIOS:

1) Uma amostra de um solo pesa 22kg. O volume correspondente a esta amostra é 12,20 litros. Desta amostra subtrai-se uma parte, para a qual determina-se: $P_t = 70\text{g}$; $P_s = 58\text{g}$; $\gamma_g = 2,67\text{g/cm}^3$. Pede-se determinar:

- a) $h\%$;
- b) P_s da amostra maior;
- c) P_a ;
- d) V_s ;
- e) V_v ;
- f) ε ;
- g) η ;
- h) γ ;
- i) γ_s da amostra maior;
- j) $S\%$;
- k) $h_{\text{sat}}\%$ (ou seja $h\%$ para quando tivermos $S\%=100\%$);
- l) γ_{sat} (ou seja γ para $S\%=100\%$).

2) O peso total de uma amostra saturada ($V_a = V_v$) é 805g. O volume correspondente é 500 cm³. Esta amostra depois de seca passou a pesar 720g. Pede-se calcular:

- a) $h\%$;
- b) P_s ;
- c) P_a ;
- d) V_s ;
- e) V_v ;
- f) ϵ ;
- g) η ;
- h) γ ;
- i) γ_s ;
- j) $S\%$;

3) Uma determinada amostra de solo tem peso específico aparente de 1,8g/cm³ e teor de umidade de 30%. Qual o peso específico aparente seco?

4) Uma determinada amostra de um solo tem peso específico aparente seco de 1,7g/cm³ e teor de umidade de 23%. Qual o peso específico aparente?

5) Demonstre matematicamente as seguintes relações:

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1+h\%)}; \eta = \frac{\epsilon}{(1+\epsilon)}; \epsilon = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1; h = \frac{S \times \epsilon}{\delta}; \gamma = \frac{(1+h)}{(1+\epsilon)} \times \gamma_g;$$

6) Uma determinada amostra de um solo tem peso específico aparente de 1,8g/cm³ e peso específico aparente seco de 1,6g/cm³. Qual o teor de umidade da amostra?

8) Um solo saturado tem teor de umidade igual a 42% e densidade de 2,68. Calcular:

- a) ϵ ;
- b) η ;
- c) γ ;
- d) quantidade de água por m³ de solo.

8) O peso específico de um solo no estado natural é $1,8\text{g/cm}^3$, o teor de umidade é de 25% e a densidade relativa das partículas sólidas é 2,65. Determinar:

- a) γ ;
- b) γ_s ;
- c) γ_g ;
- d) ϵ ;
- e) η ;
- f) S;
- g) Qual deve ser a quantidade de água, que deve chover, por m^3 de solo, para que se obtenha a saturação do solo?
- h) Qual será o peso da parte sólida de uma amostra que tem peso total = 3,5t?

9) O peso específico de um solo é $1,75\text{g/cm}^3$ e seu teor de umidade é de 6%. Qual a quantidade de água a ser adicionada, por m^3 de solo, para que o teor de umidade passe a 13%?

10) Do corte feito no terreno do novo Hospital de Palmas, foram retirados $17.000,00\text{ m}^3$ de solo, com índice de vazios igual a 1,25. Quantos m^3 de aterro com 0,85 de índice de vazios poderão ser adicionados a um terreno defronte ao terreno do Hospital?

11) Calcular o volume da escavação feito em um poço cilíndrico, com raio de base de 0,60 m e altura de 40m, sabendo-se que o índice de vazios do solo, após a escavação, aumentou 30%

12) O teor de umidade de uma amostra é de 25%, o peso inicial da amostra é de 300 g. Qual a quantidade de água existente na amostra?

13) O peso de uma amostra de solo saturado é de 870g. O volume correspondente é de 520 cm^3 . Sendo o índice de vazios igual a 65%, determinar o peso específico real do solo?

14) Uma amostra de solo úmido pesa 920 g, com o teor de umidade de 30%. Que quantidade de água é necessária acrescentar nessa amostra, para que o teor de umidade passe para 35%?

3. GRANULOMETRIA DE UM SOLO

3.1 Introdução

Granulometria é a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos. Para se proceder a uma análise granulométrica de um solo, faz-se necessário fazer com que os componentes deste atravessem peneiras, as quais são dispostas ordenadamente, superpondo-as na ordem de série, sempre iniciando com a de maior abertura de malha. A análise granulométrica consiste, em geral, em duas fases distintas: peneiramento e sedimentação. É a determinação das dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram, é representada, graficamente, pela curva granulométrica. Esta curva é traçada por pontos em um diagrama semi-logarítmico, no qual, sobre os eixos das abscissas, são marcados os logaritmos das dimensões das partículas e sobre o eixo das ordenadas as porcentagens, em peso, de material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada.



3.2 Peneiramento: (NBR 7181)***PENEIRAS CONFORME A EB-22:***

Abertura de malha
76
50
38
25
19
9,5
4,8
2,4
2,0
1,2
0,6
0,42
0,30
0,15
0,075

PENEIRAS NORMAIS DA A.S.T.M.:

NÚMERO	ABERTURA (mm)	NÚMERO	ABERTURA (mm)
3"	76,20	18	1,00
2"	50,80	20	0,84
1.1/2"	38,10	25	0,71
1"	25,40	30	0,59
3/4"	19,00	35	0,50
1/2"	12,70	40	0,42
3/8"	9,50	45	0,35
4 OU 3/16"	4,76	50	0,297
5	4,00	60	0,250
6	3,36	70	0,210
7	2,83	80	0,177

8	2,38	100	0,149
10	2,00	120	0,125
12	1,68	140	0,105
14	1,41	200	0,074
16	1,19	270	0,037

DEFINIÇÕES IMPORTANTES:

PORCENTAGEM QUE PASSA → É o peso de material que passa em cada peneira, referido ao peso seco da amostra;

PORCENTAGEM RETIDA → É a percentagem retida numa determinada peneira. Obtemos este percentual, quando conhecendo-se o peso seco da amostra, pesamos o material retido, dividimos este pelo peso seco total e multiplicamos por 100;

PORCENTAGEM ACUMULADA → É a soma dos percentuais retidos nas peneiras superiores, com o percentual retido na peneira em estudo;

MÓDULO DE FINURA → É a soma dos percentuais acumulados em todas as peneiras da série normal, dividida por 100. Quanto maior o módulo de finura, mais grosso será o solo;

DIÂMETRO MÁXIMO → Corresponde ao número da peneira da série normal na qual a percentagem acumulada é inferior ou igual a 5%, desde que essa percentagem seja superior a 5% na peneira imediatamente abaixo;

DIÂMETRO EFETIVO → Segundo Allen-Hazen, é o diâmetro correspondente a 10% em peso total, de todas as partículas menores que ele; $d_{ef} = d_{10}$

COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE → Ainda segundo Allen-Hazen, é a razão entre os diâmetros correspondentes a 60% e 10%, tomados na curva granulométrica. Esta relação indica, na realidade, falta de uniformidade, pois seu valor diminui ao ser mais uniforme o material; $Cu = \frac{d_{60}}{d_{ef}}$

$Cu < 5 \rightarrow$ solo uniforme;

$5 < Cu < 15 \rightarrow$ solo de uniformidade média;

$Cu > 15 \rightarrow$ solo desuniforme.

$$\underline{\text{COEFICIENTE DE CURVATURA}} \rightarrow Cc = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \times d_{10}}$$

3.3 Sedimentação

Para se obter a granulometria da porção fina dos solos, emprega-se a técnica da sedimentação, que se baseia na lei de Stokes, onde: a velocidade (v) de queda das partículas esféricas num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material constituinte (γ_s), do peso específico do fluido (γ_w), da viscosidade do fluido (μ) e do diâmetro da esfera (D), conforme a expressão:

$$v = \frac{(\gamma_s - \gamma_w) \times D^2}{18 \cdot \mu}$$

Em termos práticos, colocando-se uma certa quantidade de solo (60g) em suspensão em água (cerca de 01 litro), as partículas cairão com velocidades proporcionais ao quadrado dos seus diâmetros.

4. PLASTICIDADE E CONSISTÊNCIA DOS SOLOS:

4.1. Introdução

Plasticidade é a propriedade que os solos têm de serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume e sem ruptura. Nas argilas, esta é a propriedade mais importante. Já a elasticidade, é a propriedade que os corpos têm, de, ao serem deformados, voltarem ao seu estado inicial.

4.2 Limites de consistência

Quando um solo tem umidade muito elevada, apresenta-se como um fluido denso (lama líquida), isto é, no estado líquido. À medida que a água evapora, ele se endurece e, para um certo teor de umidade h , ele perde sua capacidade de fluir, porém poderá ser moldado e conservar a sua forma. Este teor de umidade $h = LL$, isto é, o **Limite de Liquidez**, e o solo encontra-se no estado plástico.

A água continuará a evaporar até que o estado plástico desapareça e o solo se desmanchará ao ser trabalhado. Este é o estado semi-sólido, com $h = LP$, isto é, o **Limite de Plasticidade**. Continuando-se a secagem, o solo atingirá, gradualmente, o estado sólido. O limite entre os estados semi-sólido e sólido é o **Limite de Contração**. Os limites LL e LP foram estabelecidos pelo cientista sueco Albert Atterberg, enquanto o LC foi estabelecido por Haines.

O LL é determinado através do Aparelho de Casagrande (em homenagem ao cientista Arthur Casagrande), o qual usa a energia potencial para fazer a acomodação de uma amostra de solo.

- Estado sólido → não há variação de volume do solo com a secagem;
- Estado semi-sólido → verifica-se variação de volume com a secagem;
- Estado plástico → facilmente moldável;
- Estado líquido → comportamento de um fluido denso.

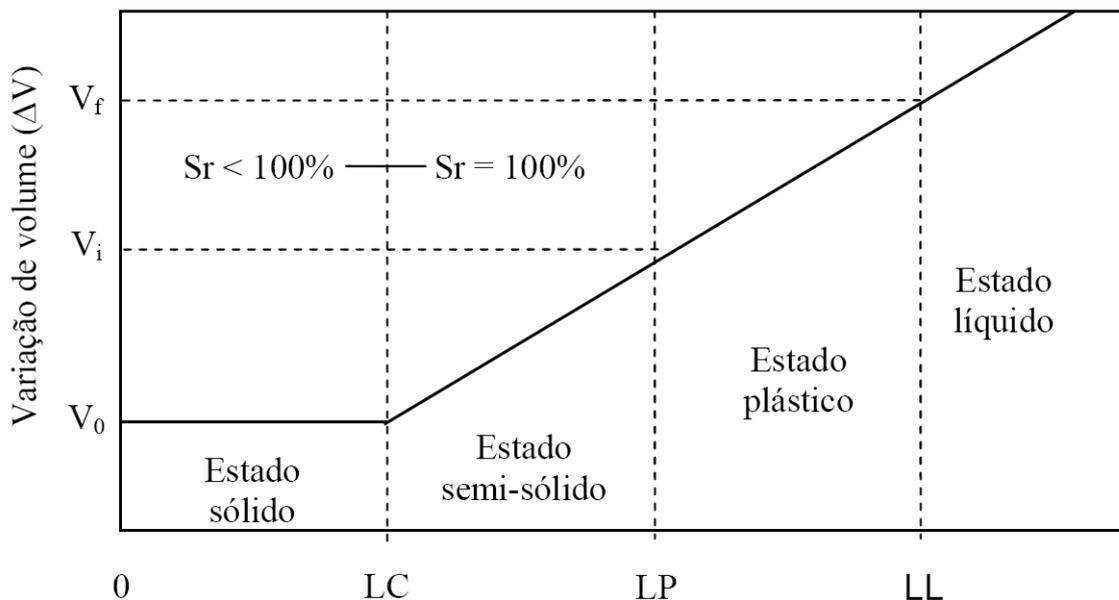


FIGURA 4.1. ESTADOS DO SOLO.

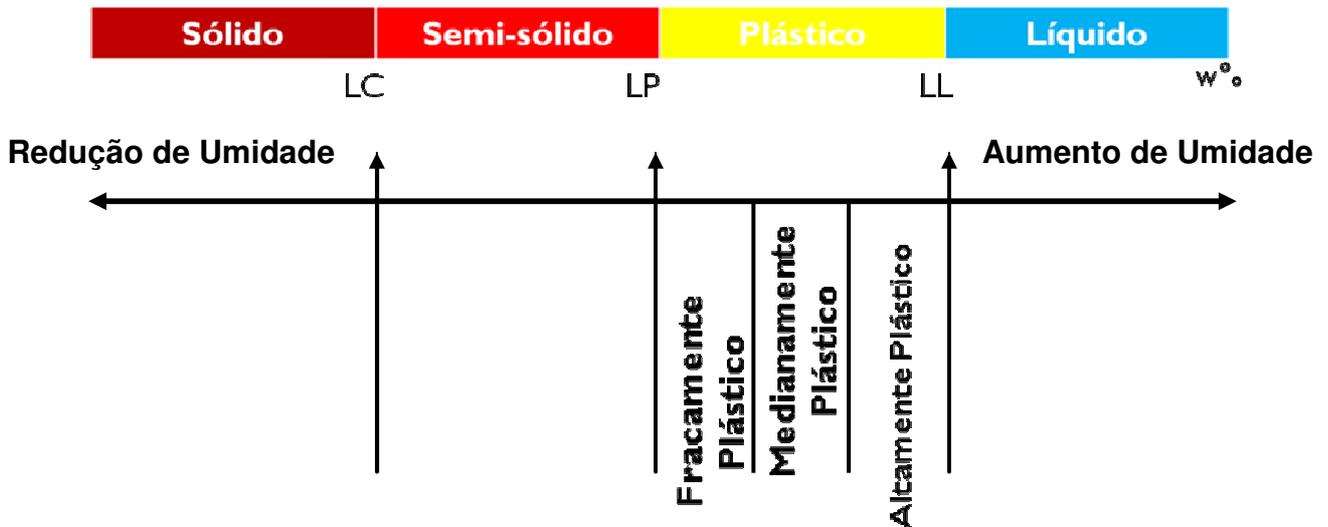


FIGURA 4.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA.

4.3 Método do Aparelho de Casagrande (NBR 6459/84)

O LL equivale ao teor de umidade no qual se fecha uma ranhura feita no solo disposto em uma concha metálica, por meio de 25 golpes, a uma velocidade constante, desta concha contra uma base fixa.

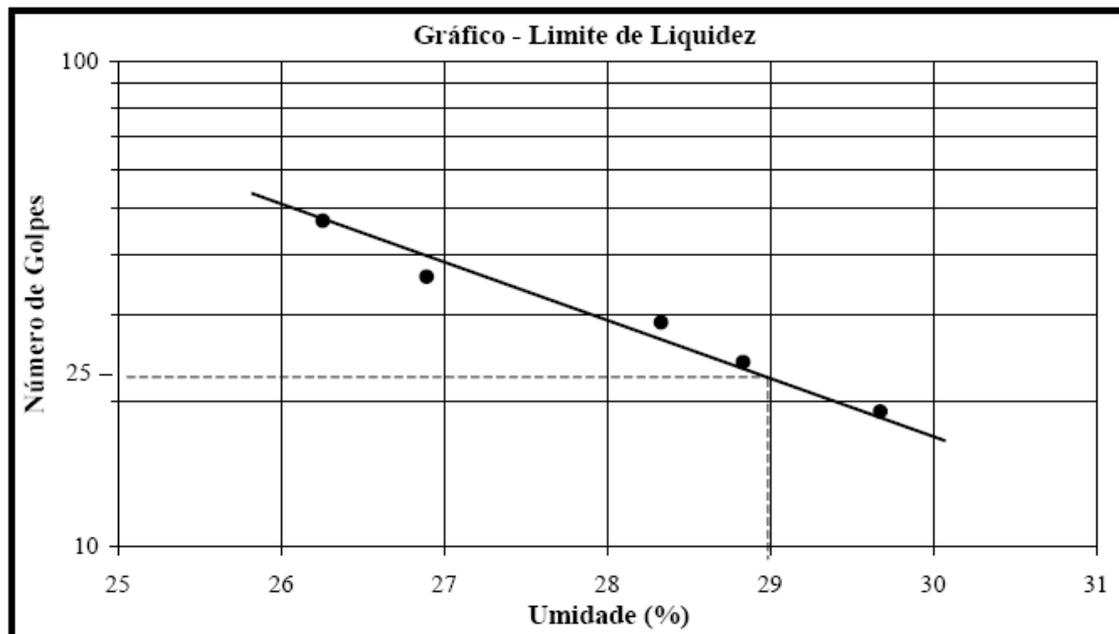


FIGURA 4.3. DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ – LL.

$$h = -IL \times \log N + C \text{ (eq. geral);}$$

$$LL = -IL \times \log 25 + C \text{ (eq. particular).}$$

onde:

$h \rightarrow$ umidade;

$IL \rightarrow$ índice de liquidez;

$N \rightarrow$ número de golpes;

$C \rightarrow$ coesão do solo.

Assim, com apenas 2 umidades diferentes, encontramos os respectivos números de golpes. Podemos então encontrar IL e C , usando a equação geral e, usando a equação particular, calculamos o LL .

Note que quanto maior for o teor de umidade, menor será o número de golpes necessário para fechar o sulco. O Limite de Liquidez – LL – é definido como o teor de umidade para o qual temos que dar 25 golpes no Aparelho de Casagrande, para que se feche 1,00cm de comprimento de sulco. Os teores de umidade utilizados na experiência de Casagrande são manipulados. Normalmente a umidade inicial coincide com a natural (obtida in loco), já a segunda é provocada adicionando-se ou retirando-se água da amostra colhida.

4.4 Ensaio do Limite de Plasticidade (NBR 7180/84)

Determina-se o teor de umidade no qual um cilindro de solo executado com a palma da mão, por meio de movimentos regulares de vaivém, sobre uma placa de vidro fosco, começa a fissurar ao atingir dimensões padrões: $\square = 3\text{mm}$, e $L = 10\text{cm}$.

4.5 Ensaio do Limite de Contração (NBR 7183/82)

4.5.1. Método do deslocamento de mercúrio:

Busca-se determinar o teor de umidade que ainda ocuparia os vazios de um solo colocado a secar em estufa até não mais contrair.

$$LC = h_{ini} - h_{sec}$$

$$LC = \frac{P_{ini} - P_s}{P_s} - \frac{(V_{ini} - V_{sec}) \times \gamma_{ag}}{P_s}$$

onde:

h_{ini} → teor de umidade inicial da amostra;

h_{sec} → teor de umidade associado à redução de volume com a secagem;

P → peso inicial da amostra úmida;

P_s → peso da amostra seca;

V_{ini} → volume inicial da amostra;

V_{sec} → volume da amostra após seca em estufa;

4.5.2. Determinação do LC através dos índices físicos:

$$LC = \left(\frac{1}{\gamma_s} - \frac{1}{\delta} \right)$$

4.6 Índices de consistência

$$IP = LL - LP;$$

IP → índice de plasticidade;

Solos fracamente plásticos → $1 < IP < 7$;

Solos medianamente plásticos → $7 < IP < 15$;

Solos altamente plásticos → $IP > 15$.

$$IC = \frac{LL - h}{IP};$$

IC → índice de consistência;

Solos muito moles → $IC < 0$;

Solos moles → $0 < IC \leq 0,50$;

Solos médios → $0,50 < IC \leq 0,75$;

Solos rijos $\rightarrow 0,75 < IC \leq 1,00$;

Solos duros $\rightarrow IC > 1,00$.

$$C = \frac{(V_{ini} - V_{sec})}{V_{ini}}$$

$C \rightarrow$ grau de contração do solo;

Solos bons $\rightarrow C < 5\%$;

Solos regulares $\rightarrow 5 < C < 10\%$;

Solos ruins $\rightarrow 10 < C < 15\%$;

Solos péssimos $\rightarrow C > 15\%$

**OBS: Diferentemente com o que ocorre para o LL, não foi ainda possível mecanizar, satisfatoriamente, a obtenção do LP.*

Alguns solos (esmectitas) podem apresentar LL superior a 600%, necessitando de muita água para mudar de estado. Porém, os valores típicos para solos brasileiros encontram-se tabelados abaixo:

SOLOS	LL	IP
Arenoso fino, laterítico (a)	29	11
Arenoso fino, laterítico (b)	44	13
Solos de basalto, laterítico	43	16
Solo saprolítico de gnaisse	48	16
Solo saprolítico de granito	48	16
Argila orgânica de várzeas quaternárias	70	30
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	120	60

EXERCÍCIOS:

1) Na determinação do LL de um solo, utilizou-se o método do aparelho de Casagrande.

Assim, foram obtidos os seguintes valores:

- para um teor de umidade de 22%, foram necessários 36 golpes;
- para um teor de umidade de 28% foram necessários 30 golpes.
- Qual o valor do LL deste solo?

2) Para um determinado solo foi colhida uma amostra, a qual foi analisada no laboratório, sendo obtidos os seguintes dados:

- teor de umidade natural da amostra igual a 30%;
- experiência de Casagrande: $h_1 = 30\% \rightarrow N_1 = 30$ golpes; $h_2 = 45\% \rightarrow N_2 = 20$;
- LP = 24%;
- peso específico aparente do solo seco igual a $26,00 \text{ kN/m}^3$;
- densidade relativa das partículas igual a 3,00;
- o volume inicial da amostra que era de $5,00 \text{ dm}^3$, passou a ser de $4,50 \text{ dm}^3$ após a secagem na estufa.

Determinar:

- a) LL;
- b) IP;
- c) IC;
- d) LC;
- e) C (grau de contração do solo);
- f) As características do solo quanto à plasticidade, à consistência e à contração;
- g) Se tivermos um período de estiagem prolongado, com a umidade do solo passando a ser de 15%, o que aconteceria com a consistência do solo?
- h) Se tivéssemos um período chuvoso, no qual o teor de umidade do solo passasse a ser de 50%, o que aconteceria com a consistência do solo?

5. IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

5.1 Materiais constituintes do solo

PEDREGULHOS:

Solos cujas propriedades dominantes são devidas à sua parte constituída pelos grãos minerais de diâmetro máximo superior a 4,8mm e inferior a 76mm. São caracterizados pela sua textura, compactidade e forma dos grãos.

AREIAS:

Solos cujas propriedades dominantes são devidas à sua parte constituída pelos grãos minerais de diâmetro máximo superior a 0,05mm e inferior a 4,8mm. São caracterizados pela sua textura, compactidade e forma dos grãos. Quanto à textura, a areia pode ser:

- grossa: grãos cujo diâmetro máximo compreendido entre 2,00mm e 4,80mm;
- média: grãos cujo diâmetro máximo compreendido entre 0,42mm e 2,00mm;
- fina: grãos cujo diâmetro máximo compreendido entre 0,05mm e 0,42mm.

Quanto à compactidade, a areia pode ser:

- fofa (pouco compactada);
- medianamente compacta;
- compacta.

SILTE:

Solo que apresenta apenas a coesão necessária para formar, quando seco, torrões facilmente desagregáveis pela pressão dos dedos. Suas propriedades dominantes são devidas à sua parte constituída pelos grãos minerais de diâmetro máximo superior a 0,005mm e inferior a 0,05mm. São caracterizados pela sua textura e compactidade.

ARGILA:

Solo que apresenta características marcantes de plasticidade; quando suficientemente úmido, molda-se facilmente em diferentes formas; quando seco, apresenta coesão bastante para constituir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos; suas propriedades dominantes são devidas à sua parte constituída pelos grãos

minerais de diâmetro máximo inferior a 0,005mm. São caracterizados pela sua plasticidade, textura e consistência em seu estado e umidade naturais. Quanto à textura, são as argilas identificadas quantitativamente pela sua distribuição granulométrica. Quanto à plasticidade, podem ser subdivididas em:

- gordas;
- magras.

Quanto à consistência, podem ser subdivididas em:

- muito moles (vazas);
- moles;
- médias;
- rijas;
- duras.

Os três grupos principais de minerais argílicos são: caolinitas, ilitas e montmorilonitas. As montmorilonitas são as que causam mais preocupação, pois são muito expansivas e, portanto, instáveis em presença de água.

As bentonitas são argilas muito finas, formadas, em sua maioria, pela alteração física de cinzas vulcânicas. Este material foi descoberto em 1888, em Fort Benton (EUA), daí a sua denominação. Em sua composição predomina a montmorilonita, o que explica a sua tendência ao inchamento. Graças a esta propriedade, as injeções de bentonita são usadas para vedação em barragens e escavações. A bentonita é um material que exhibe propriedades *tixotrópicas*.

Tixotropia → propriedade que possui alguns solos finos coesivos, de, após ter a sua estrutura molecular destruída (amassando-se o solo, por exemplo), quando deixado em repouso, recuperar a sua resistência coesiva (através da sua reordenação da estrutura molecular).

As “lamas tixotrópicas”, ou sejam, suspensão, em água, desta argila especial, que é a bentonita, são muito usadas em perfurações petrolíferas, fundações profundas, etc.

MATÉRIA ORGÂNICA:

Cada solo pode apresentar teor de matéria orgânica, oriundo de restos vegetais e animais. São de fácil identificação, pois possuem cor escura e odor característico. A norma D2487 da ASTM classifica como solo orgânico àquele que apresenta LL de uma amostra seca em estufa menor que 75% do LL de uma amostra natural sem secagem em estufa. Geralmente são problemáticos, devido à sua grande compressibilidade. Apresentam elevados índices de vazios. As turfas são solos orgânicos com grande porcentagem de partículas fibrosas de material carbonoso (folhas e caules) ao lado de matéria orgânica no estado coloidal. Esse tipo de solo pode ser identificado por ser fofo e não plástico e ainda combustível.

SOLO RESIDUAL

Solo que se origina da decomposição da rocha-mãe no próprio local aonde esta se encontra. Assim, dependendo da distância até a rocha original, poderemos encontrar características diferentes entre os solos originários da mesma rocha. Para que ocorram se faz necessário que a velocidade de decomposição da rocha seja maior que a velocidade de remoção por agentes externos. Nas regiões tropicais a velocidade de composição das rochas é elevada, motivo pelo qual encontramos grandes quantidades de solos residuais no Brasil. As camadas dos solos residuais originam as diferenciações abaixo:

- solo residual maduro → superficial, e que perdeu toda a estrutura original da rocha-mãe, tornando-se relativamente homogêneo;
- saprolito → mantém a estrutura original da rocha-mãe, mas perdeu a consistência de rocha, também conhecido como solo residual jovem ou solo de alteração de rocha. Solo proveniente da desintegração de rocha, in situ, pelos diversos agentes geológicos. É descrito pela respectiva textura, plasticidade e consistência ou compacidade, sendo indicados ainda o grau de alteração e, se possível, a origem de rocha.
- rocha alterada → horizonte em que a alteração progrediu ao longo de fraturas ou zonas de menor resistência, deixando intactos grandes blocos da rocha original.

Solos residuais de basalto são predominantemente argilosos, os de gnaiss são siltosos, os de granito apresentam teores aproximadamente iguais de areia média, silte e argila.

SOLO TRANSPORTADO

Solo que foi carregado do seu lugar original por algum agente de transporte (vento, água, gravidade).

- solo coluvionar → transportado, através da ação da gravidade, de regiões altas para regiões mais baixas;
- solo aluvionar → transportado pela água dos rios.

SOLO LATERÍTICO

Solo típico da evolução de solos em clima quente, com regime de chuvas moderadas a intensas. Apresenta elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, daí a sua coloração avermelhada. Encontram-se, geralmente, recobrimo agregações de partículas argilosas. Apresentam-se na natureza, geralmente, não-saturados, com índice de vazios elevado, resultando disto sua baixa capacidade de suporte. Quando compactados, porém sua capacidade de suporte é elevada, sendo por isto muito empregados em pavimentação. Depois de compactado, apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água.

SOLO CONCRECIONADO:

Massa de solo que apresenta alta resistência, cujos grãos são ligados, naturalmente entre si, por um cimento qualquer. É designado pelo respectivo tipo seguido pela palavra “concrecionado”.

5.2 Principais diferenças entre argila e areia

AREIA:

- não apresenta plasticidade;
- permeável;
- poucas deformações;
- índice de vazios de médio a baixo;
- não retém água;
- baixa superfície específica;
- não se expande.

ARGILA:

- apresenta plasticidade;
- impermeável;
- grandes deformações;
- alto índice de vazios;
- retém bastante água;
- grande superfície específica (devido ao diâmetro reduzido);
- pode ser expansiva.

SUPERFÍCIE ESPECÍFICA → É a soma das superfícies de todas as partículas contidas na unidade de volume (ou peso) do solo.

Imaginando-se uma partícula de forma cúbica, com 1cm de aresta, e subdividindo-a, decimalmente, em cubos cada vez menores, poderemos organizar o quadro de valores abaixo:

Aresta	Volume total	Número de cubos	Área total	Superfície específica
1cm	1cm ³	1	6cm ²	6cm ² /cm ³
0,1cm	1cm ³	1000	60cm ²	60cm ² /cm ³
0,01cm	1cm ³	1000000	600cm ²	600cm ² /cm ³
0,001cm	1cm ³	1000000000	6000cm ²	6000cm ² /cm ³

Conclui-se, portanto, que quanto mais fino for o solo, maior será a sua superfície específica, o que constitui uma das razões da diferença entre as propriedades físicas dos solos argilosos e arenosos.

Para os minerais argílicos, as superfícies específicas são:

- Caolinita → 10m²/g;
- Ilita → 80m²/g;
- Montmorilonita → 800m²/g.

5.3 Sistema Unificado de classificação:

Este sistema de classificação foi elaborado por Casagrande, para obras de aeroporto,

E atualmente é utilizado principalmente pelos geotécnicos que trabalham com barragens de terra.

Em linhas gerais, os solos são classificados, neste sistema, em três grandes grupos:

- a) Solos grossos → aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é maior que 0,074mm (mais que 50% em peso, dos seus grãos, são retidos na peneira n. 200);
Pedregulhos – areias – solos pedregulhosos ou arenosos com pouca quantidade de finos (silte e argila).
- b) Solos finos → aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074mm;
Siltos - argilas
- c) Turfas → solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e extremamente compressíveis.

Neste sistema, todos são identificados pelo conjunto de duas letras. A primeira letra indica o principal tipo de solo, podendo ser:

- G** Pedregulho (do inglês Gravel);
- S** Areia (do inglês Sand);
- M** Silte (do sueco Mo);
- C** Argila (do inglês Clay);
- O** Solo orgânico (do inglês Organic).

A segunda letra indica as características complementares do solo:

- W** Bem graduado (do inglês Well graded);
PMal graduado (do inglês Poorly);
HAlta compressibilidade (do inglês High compressibility);
LBaixa compressibilidade (do inglês Low compressibility);
PtTurfas (do inglês Organic).

Exemplos:

- CL – solo argiloso de baixa compressibilidade;
 SM – solo argiloso com certa quantidade de siltes (finos não plásticos);
 SW – solo arenoso, bem graduado;
 CH – solo argiloso, altamente compressível.

5.3.1. Solos de granulação grossa (pedregulhos e areias):

Sendo de granulação grosseira, o solo será classificado como pedregulho ou areia, dependendo de qual destas duas frações granulométricas predominar. Por exemplo, se o solo possui 30% de pedregulho, 40% de areia e 30% de finos, ele será classificado como areia – S.

Os solos granulares deverão ainda ser classificados em bem graduados ou mal graduados. A expressão “bem graduado” expressa o fato de que a existência de grãos com diversos diâmetros confere ao solo, em geral, melhor comportamento sob o ponto de vista de engenharia. As partículas menores ocupam os vazios correspondentes às maiores, criando um maior entrosamento (vide figura), do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência.

O Sistema Unificado considera o pedregulho bem graduado quando o seu coeficiente de uniformidade (C_{nu}) é superior a 4, e que uma areia é bem graduada quando seu C_{nu} é superior a 6. Além disso, é necessário que o coeficiente de curvatura (C_c) esteja entre 1 e 3.

Quando o solo de graduação grosseira tem mais de 12% de finos, a uniformidade da granulometria já não aparece como característica secundária, pois importa saber mais sobre as propriedades destes finos. Neste caso, os pedregulhos ou areias serão

identificados secundariamente como argilosos (GC ou SC) ou como siltosos (GM ou SM).

Quando o solo de granulação grosseira tem de 5 a 12% de finos, o Sistema Unificado recomenda que se apresentem as duas características secundárias, uniformidade da granulometria e propriedade dos finos. Assim, ter-se-ão classificações intermediárias, como por exemplo: **SP-SC** - areia mal graduada, argilosa.

5.3.2 Solos de granulação fina (siltes e argilas):

Quando a fração fina é predominante, o solo será classificado em silte (M), argila (C) ou solo orgânico (O), não em função da porcentagem das frações granulométricas silte ou argila, mas pela atividade da argila. São os índices de consistência que melhor indicam o comportamento argiloso.

Analisando os índices e o comportamento de solos, Casagrande notou que colocando o IP do solo em função do LL, num gráfico, como apresentado na figura, os solos de comportamento argiloso se faziam representar por um ponto acima de uma reta inclinada, denominada linha A. Solos orgânicos, ainda que argilosos, e solos siltosos, são representados por pontos abaixo da linha A, que tem como equação a reta:

$IP = 0,73 \times (LL - 20)$, que no seu trecho inicial é substituída por uma faixa horizontal correspondente a IP de 4 a 7.

Este gráfico é denominado de Carta de Plasticidade, e para a classificação destes solos, basta localizar o ponto correspondente ao par de valores IP e LL.

Os solos orgânicos se distinguem dos siltes pelo seu aspecto visual, pois se apresentam com uma coloração escura típica (marrom escuro, cinza escuro ou preto).

Como característica complementar dos solos finos, indica-se a sua compressibilidade, definindo-se como de alta compressibilidade (H) os solos possuem $LL > 50$. Da mesma forma, defini-se como de baixa compressibilidade (L) os solos que apresentam $LL < 50$.

Quando os índices indicam uma posição muito próxima às linhas, é considerado um caso intermediário e as duas classificações são apresentadas. Abaixo temos um esquema para classificação pelo Sistema Unificado.

%P#200 < 50	G > S : G		GW Cnu>4 e 1 < Cc < 3
			GP Cnu<4 e 1 > Cc > 3
		%P#200 > 12	GC
			GM
	5 < %P#200 < 12	GW-GC, GP-GM,	
	G > G : S		SW Cnu>6 e 1 < Cc < 3
			SP Cnu<6 e 1 > Cc > 3
		%P#200 > 12	SC
SM			
5 < %P#200 < 12	SW-SC, SP-SC,		
%P#200 > 50	C	CL	DE ACORDO COM A CARTA
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

6. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO H.R.B (SISTEMA RODOVIÁRIO)

Este sistema de classificação se diferencia da classificação unificada em três pontos:

- d) Considera a diferença entre solos granulares e finos a partir de 35% de percentual passante na peneira 200;
- e) Considera os percentuais passantes das peneiras n^o 10 e n^o 40;
- f) Não oferece parâmetros qualitativos de graduação e compressibilidade.

Mas este sistema se assemelha ao Sistema Unificado pela sistemática de classificação baseada na granulometria e nos limites de Atterberg.

Neste sistema, os solos com menos de 35% passando na peneira 200 (solos grossos ou granulares) são divididos nos grupos A-1a, A-1b, A-2 e A-3. Os solos com percentual mínimo passante na peneira 200 igual a 35% (solos finos) são classificados em A-4, A-5, A-6 e A-7. Abaixo se apresentam as características desta classificação:

A-1a – solos grossos, com menos de 50% passando na peneira nº 10 (2,0mm), menos de 30% passando na peneira de nº 40 (0,42mm) e menos de 15% passando na peneira 200. O IP dos finos deve ser menor do que 6. Correspondem aproximadamente aos pedregulhos bem graduados, GW, do Sistema Unificado. Predominam fragmentos de pedra ou pedregulho com ou sem ligante, bem graduado de material fino.

A-1b – solos grossos, com menos de 50% passando na peneira nº 40 e menos de 25% na peneira 200, também com IP menor que 6. Corresponde à areia bem graduada, SW, do Sistema Unificado. Predomina areia média, com ou sem ligante, bem graduado.

Obs: Os solos A-1 apresentam ligeira proporção de finos, suficiente apenas para preencher parcialmente os vazios entre os grãos de areia e cimentar os grãos entre si, porém muito pequena para induzir mudança de volume na massa de solo, isto é, expansão ou contração, como consequência das variações do teor de umidade. Consistem numa mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulho, areia grossa, areia média, areia fina e um ligante não-plástico ou fracamente plástico.

A-2 – são areias em que os finos presentes constituem a característica secundária. São subdivididos em A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7, em função dos índices de consistência. Os solos finos, a exemplo do Sistema Unificado, são subdivididos só em função dos índices. O que distingue um solo A-4 de um solo A-2-4 é apenas a porcentagem de finos. São semelhantes aos solos A-1, porém menos graduados, ou

são mais susceptíveis às variações de volume decorrentes de mudanças no teor de umidade.

A-2-4 e A-2-5 – contêm vários materiais granulares, com 35% ou menos passando na peneira 200, e com uma parte mínima passando na peneira nº 40, tendo características dos materiais dos solos A-4 (caso A-2-4) ou A-5 (caso A-2-5). Inclui também pedregulhos com porcentagem de silte ou índice de plasticidade acima dos limites dos solos A-1, e areia fina com silte não plástico em porcentagem acima dos limites dos solos A-3.

A-2-6 e A-2-7 - contêm materiais semelhantes aos dos solos A-2-4 e A-2-5, exceto a porcentagem passando na peneira nº 40, que contém argila plástica, tendo as características dos solos A-6 (caso A-2-6) ou A-7 (caso A-2-7).

A-3 – areias finas, com mais de 50% passando na peneira de nº 40 e menos de 10% na peneira 200. São, portanto, areias finas mal graduadas, com IP nulo. Correspondem às SP do Sistema Unificado. São solos constituídos de areias e pedregulhos sem finos, capazes de cimentá-los. Areia fina de praia ou de deserto, sem material siltoso ou argiloso, inclui também areia fina mal graduada.

A-4 – solos formados por siltes e argilas com graus variáveis de plasticidade. Contém material siltoso não-plástico ou moderadamente plástico, geralmente com 75%, ou mais, passando na peneira 200. Pode conter eventualmente, misturas de material siltoso e mais de 64% de areia e pedregulho.

A-5 – contém material semelhante ao do solo A-4, sendo todavia, do tipo diatomáceo ou micáceo e podendo ser altamente plástico, como indica o seu alto índice de liquidez.

A-6 – contém argila, tendo normalmente 75% ou mais passando na peneira 200. Pode conter misturas de materiais argilosos e mais de 64% de areia e pedregulho. Materiais deste tipo de solo têm normalmente alta variação de volume entre os estados úmido e seco.

A-7 – contém material semelhante ao descrito para o solo A-6, tendo, entretanto, alto limite de liquidez, características dos solos A-5, podendo ser elástico, bem como sofrer grande variação de volume.

A-7-5 – contém materiais com moderado índice de plasticidade em relação ao limite de liquidez e podendo ser altamente plástico, bem como sofrer grande variação de volume.

A-7-6 – contém materiais com alto índice de plasticidade em relação ao limite de liquidez e sujeitos a excessivas variações de volume.

6.1. Índices a serem observados

P10 – percentual passante na peneira nº 10;

P40 – percentual passante na peneira nº 40;

P200 – percentual passante na peneira 200;

LL – limite de liquidez;

IP – índice de plasticidade;

IG – índice de grupo, número inteiro variando de 0 a 20, definidor da capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento. Quanto maior o IG, mais pobre será o material do subleito.

$$IG = 0,20 \times a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d$$

onde:

a e b - coeficientes granulométricos;

c e d – coeficientes de plasticidade.

a = P200 – 35, para 35 < P200 < 75;

a = 0, para $P_{200} \leq 35$;

a = 40, para $P_{200} \geq 75$.

b = P200-15, para 15 < P200 < 55;

$b = 0$, para $P_{200} \leq 15$;

$b = 40$, para $P_{200} \geq 55$.

$c = LL - 40$, para $40 < LL < 60$;

$c = 0$, para $LL \leq 40$;

$c = 20$, para $LL \geq 60$.

$d = IP - 10$, para $10 < IP < 30$;

$d = 0$, para $IP \leq 10$;

$d = 20$, para $IP \geq 30$.

Particularidades:

a) se $P_{200} \leq 15$, $IG = 0$;

b) se $15 < P_{200} \leq 35$ e $IP \leq 10$, $IG = 0$.

7. ROTEIROS DE CLASSIFICAÇÃO:

7.1) CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PELO SISTEMA UNIFICADO:

A) Observar o valor da percentagem passante na peneira 200, obtido através da análise granulométrica;

I – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA:

a) Achar a percentagem retida em cada peneira:

a percentagem retida numa peneira P, será o peso retido na peneira P, dividido pelo peso total da amostra, multiplicado por 100;

b) Achar a percentagem passante em cada peneira:

a percentagem passante numa peneira P, será 100 menos a percentagem retida na peneira P;

B) Se a percentagem passante na peneira 200 for maior que 50, será um solo fino, assim devemos proceder da seguinte maneira:

I-DETERMINAÇÃO DO LL:

a) Através da equação geral, usar h_1 , N_1 , h_2 , N_2 (lembrando que as umidades manipuladas, h_1 e h_2 , na forma decimal);

$$h = -IL \times \log N + C \text{ (eq. geral);}$$

onde:

$h_1 \rightarrow$ umidade 1 manipulada no ensaio de Casagrande;

$N_1 \rightarrow$ número de golpes necessários, usando h_1 ;

$h_2 \rightarrow$ umidade 2 manipulada no ensaio de Casagrande;

$N_2 \rightarrow$ número de golpes necessários, usando h_2 ;

$IL \rightarrow$ índice de liquidez;

$C \rightarrow$ fator de coesão do solo.

Assim teremos um sistema de 2 equações lineares:

$$h_1 = -iL \times \log N_1 + C$$

$$h_2 = -iL \times \log N_2 + C$$

multiplicamos uma das equações por (-1) e somamos à outra, eliminamos o **C**, achamos o iL . Com o valor de iL , entramos em uma das equações e achamos o valor de **C**. Com o valor de C e iL , entramos na equação particular, e obtemos **LL**.

$LL = -IL \times \log 25 + C$ (eq. particular); o valor de **LL** é usado na forma percentual, portanto deve-se multiplicar por 100.

II – DETERMINAÇÃO DO IP:

$IP = LL - LP$; com este valor determina-se o grau de plasticidade do solo (fraco, médio ou alto);

III – DETERMINAÇÃO DO IC:

$$IC = \frac{LL - h}{IP};$$

onde h é o teor de umidade em que se encontra o solo. Com o **IC** determinamos a consistência do solo (muito mole, mole, médio, rijo ou duro);

IV – DETERMINAÇÃO DO LC:

$$LC = \left(\frac{1}{\gamma_s} - \frac{1}{\delta} \right);$$

onde o peso específico do solo seco é dado, e a densidade real é dada ou obtida do peso específico das partículas sólidas (ρ_s).

Com os valores de LL, LP e LC, poderemos determinar o estado do solo para qualquer teor de umidade.

V – CARTA DE PLASTICIDADE:

Com os valores de LL e IP, entramos na Carta de Plasticidade, e determinamos o tipo de solo, lembrando que solos com $LL < 50$ terão baixa compressibilidade (L), e solos com $LL > 50$ terão alta compressibilidade (H). Solos acima da Linha A, serão argilosos (C), e solos abaixo desta linha serão siltosos (M) ou orgânicos (O).

C) Se a percentagem passante na peneira 200 for menor que 50, será um solo grosso, assim devemos proceder da seguinte maneira:

I-DETERMINAÇÃO DE C_u E C_c :

a) Através da percentagem passante e da abertura de malha (log), traçamos o gráfico no papel milimetrado, achando d_{10} , d_{30} e d_{60} , assim:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}};$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{(d_{10} \times d_{60})}$$

I-DETERMINAÇÃO DOS PERCENTUAIS DOS COMPONENTES:

a) Através da percentagem passante, isolada, de cada peneira, determinam-se os percentuais dos grãos menores que a peneira, e observando-se as dimensões de cada componente do solo, acham-se os percentuais de cada componente do solo.

Com os valores de %P200, Cu e Cc, e os percentuais dos componentes do solo, entramos no quadro de classificação e determinamos o tipo do solo: GW, GP,GC, GM, GW-GC, GP-GM, SW, SP, SC, SM, SW-SC, SP-SC, etc.

7.2) CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PELO HRB:

A) Observar o valor da percentagem passante na peneira 200, obtido através da análise granulométrica;

I – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA:

a) Achar a percentagem retida em cada peneira:

a percentagem retida numa peneira P, será o peso retido na peneira P, dividido pelo peso total da amostra, multiplicado por 100;

b) Achar a percentagem passante em cada peneira:

a percentagem passante numa peneira P, será 100 menos a percentagem retida na peneira P;

B) Se a percentagem passante na peneira 200 for maior que 35, será um solo silto-argiloso, se não será um solo granular. De qualquer forma devemos proceder da seguinte maneira:

I-DETERMINAÇÃO DO LL:

a) Através da equação geral, usar h1, N1, h2, N2 (lembrando que as umidades manipuladas, h1 e h2, na forma decimal);

$$h = -IL \times \log N + C \text{ (eq. geral);}$$

onde:

h1 → umidade 1 manipulada no ensaio de Casagrande;

N1 → número de golpes necessários, usando h1;

h2 → umidade 2 manipulada no ensaio de Casagrande;

N2 → número de golpes necessários, usando h2;

IL → índice de liquidez;

C → fator de coesão do solo.

Assim teremos um sistema de 2 equações lineares:

$$h1 = -il \times \log N1 + C$$

$$h2 = -il \times \log N2 + C$$

multiplicamos uma das equações por (-1) e somamos à outra, eliminamos o **C**, achamos o **iL**. Com o valor de **iL**, entramos em uma das equações e achamos o valor de **C**. Com o valor de **C** e **iL**, entramos na equação particular, e obtemos **LL**.

$LL = -IL \times \log 25 + C$ (eq. particular); o valor de **LL** é usado na forma percentual, portanto deve-se multiplicar por 100.

II – DETERMINAÇÃO DO IP:

$IP = LL - LP$; com este valor determina-se o grau de plasticidade do solo (fraco, médio ou alto);

III – DETERMINAÇÃO DO IG:

Primeiro devemos determinar os coeficientes **a**, **b**, **c** e **d**, conforme lista de aula, e depois calcular o **IG**.

IV – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO:

Com os valores de **%P200**, **%P40** e **%P10**, **LL**, **IP** e **IG**, entramos em uma das tabelas dadas e, da esquerda para a direita, por eliminação, classificamos o solo.

8. COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Vimos nos itens anteriores que o solo apresenta vazios entre as partículas sólidas. Em construção civil, se desejarmos que um solo resista às cargas, devemos minimizar estes vazios, isto é, compactá-los. Quando se compacta o solo, tem-se como objetivo deixá-lo com o menor índice de vazios possível. Assim, quando receber carga ele irá apresentar uma menor deformação. Em outras palavras, compactação é o processo manual ou mecânico, que visa reduzir o volume dos vazios do solo, aumentando a resistência deste, tornando-o mais estável. Na prática, o estado do solo, após compactação, é expresso pelo seu *peso específico seco*, γ_s , por ser um índice de fácil obtenção, que não se altera, praticamente, se ocorrer pequena variação do teor de umidade.

Em 1933, Ralph Proctor divulgou suas observações sobre a compactação de solos, mostrando que, para uma determinada energia de compactação (energia potencial), γ_s varia em função da umidade em que o solo estiver. A existência de maior quantidade de água, a partir de um valor baixo, provoca um certo efeito como que de lubrificação entre as partículas sólidas, o que favorece a compactação. Com a energia aplicada, as partículas deslizam mais facilmente e se acomodam com menor índices de vazios. A partir de um certo ponto, porém, o grau de saturação se torna elevado, a compactação não consegue expulsar o ar existente nos vazios, que se encontra em forma de bolhas fechadas (a curva de compactação não poderá alcançar nunca a curva de saturação). Assim, existe, portanto, para a energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado *umidade ótima*, a qual conduz a um peso específico seco máximo.

Dos trabalhos de Proctor surgiu um ensaio universalmente padronizado, freqüentemente citado como *Ensaio de Proctor*, que no Brasil foi padronizado como *Ensaio Normal de Compactação* (Método MB-33, da ABNT). O solo, em diferentes umidades, é compactado em um cilindro com 10 cm de diâmetro e 1000cm³ de capacidade, por meio da aplicação de 26 golpes (na norma antiga eram 25 golpes) de um soquete pesando 25N e caindo de 30,5cm, em três camadas. Os teores de umidade e os pesos específicos secos de cada determinação são colocados num gráfico (vide figura), donde os parâmetros de interesse são determinados. Neste gráfico podem ser representados, também, os pares de valores correspondentes aos diversos graus de saturação. Observa-se que os pontos ótimos das curvas de compactação se situam em torno de 80% a 90% de saturação.

Os resultados dos ensaios de compactação dependem de diversos fatores. De particular importância, para os solos brasileiros, tem sido a preparação do solo a compactar. Com freqüência, a amostra é previamente seca ao ar, mas tal procedimento provoca alterações sensíveis em alguns solos, modificando seu comportamento quando compactados. Considerando que na construção dos aterros o solo não tem sua umidade muito alterada em relação ao seu estado na área de empréstimo, é recomendável que a amostra não seja seca ao ar. Esta secagem geralmente tende a provocar menores umidades ótimas e maiores pesos específicos secos, em relação aos resultados de ensaios com amostras a partir de sua umidade natural.

Para um mesmo solo, aumentando-se a energia de compactação, a curva se desloca para a esquerda e para cima (vide figura). Quando o solo se encontra com umidade abaixo da ótima, a aplicação de mais energia provoca aumento de densidade;

quando a umidade é maior do que a ótima, entretanto, maior esforço de compactação tem pouco efeito, pois não consegue expelir o ar dos vazios, única forma de aumentar a densidade. Quando isto ocorre na compactação de campo, o fenômeno é referido como a ocorrência de *borrachudo*, expressão que descreve o aspecto do solo. Por esta razão é que não se compacta a base de um pavimento após a ocorrência de chuva.

Existem inúmeras energias de compactação. A norma brasileira contempla, além da energia Normal, duas outras, denominadas *Intermediária* e *Modificada*, de emprego comum em pavimentação. As energias de compactação usuais são de 6 kgf/cm³ para o Proctor Normal, 12,6 kgf/cm³ para o Proctor Intermediário e 25 kgf/cm³ para o Proctor Modificado.

De maneira geral, os solos apresentam densidades máximas baixas e umidades ótimas elevadas quando são muito argilosos. Solos siltosos apresentam também valores baixos de densidade, freqüentemente com curvas de laboratório mal definidas, e são de difícil compactação no campo. Densidades secas máximas elevadas e umidades ótimas baixas são típicas de solos granulares, pouco argilosos.

O solo compactado fica com uma estrutura que depende da energia aplicada e da umidade do solo por ocasião da compactação. A figura mostra este comportamento. Vemos que, para uma baixa energia de compactação, teremos uma umidade ótima maior e um peso específico seco menor, quando comparada a uma energia de compactação maior.

Tão importante quanto uma boa densidade de um solo compactado, pois dela dependem suas propriedades mecânicas, é a obtenção de material razoavelmente uniforme. Isto é obtido, no campo, com um bom planejamento do emprego dos equipamentos, e, dependendo das características do projeto, verificando periodicamente a umidade e a densidade seca do solo, em relação aos parâmetros de laboratório, por meios de ensaios de campo.

As especificações não fazem referência ao teor de umidade em si, ou ao peso específico seco a ser obtido, mas a um desvio de umidade em relação à umidade ótima de laboratório e a um grau de compactação, definido pela relação entre o peso específico seco obtido e o peso específico seco máximo de laboratório. Isto porque numa área de empréstimo o solo sempre apresenta uma certa heterogeneidade. O comportamento de dois solos de uma mesma área, com curvas de compactação um pouco diferentes, é mais semelhante se os dois forem compactados com o mesmo

desvio de umidade e o mesmo grau de compactação, do que se os dois forem compactados com a mesma umidade e a mesma densidade seca.

Areias puras não são objetos de ensaios de compactação; sua compacidade é obtida por meio de equipamentos vibratórios, tanto no laboratório quanto no campo.

A técnica de compactação pode ser empregada para aumentar a capacidade de suporte dos solos. Destacamos um caso (descrito por Vargas em 1951) em que um solo, originalmente com pressão admissível de 80kPa, depois de compactado, passou a 250kPa.

Não devemos confundir compactação com adensamento. Na compactação temos a expulsão do ar dos vazios, enquanto no adensamento há a expulsão da água.

Temos como fato comprovado, que a resistência do solo está vinculada diretamente à sua densidade, ou seja, quanto mais conseguirmos compactar o solo, aumentando sua densidade, maior resistência e estabilidade obteremos. Para cada 1% de incremento de densidade há um aumento correspondente de 10-15% em resistência deste solo. Em contrapartida à medida que a densidade aumenta diminui a sua compressibilidade e permeabilidade.

A compactação é função de quatro variáveis: a) Peso específico seco; b) Umidade; c) Energia de compactação e d) Tipo de solo.

$$GC = \frac{\gamma_{scampo}}{\lambda_{s \max}}$$

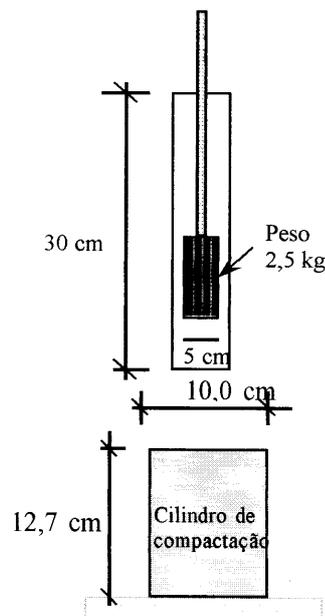


Figura 8.1: Equipamento de Compactação

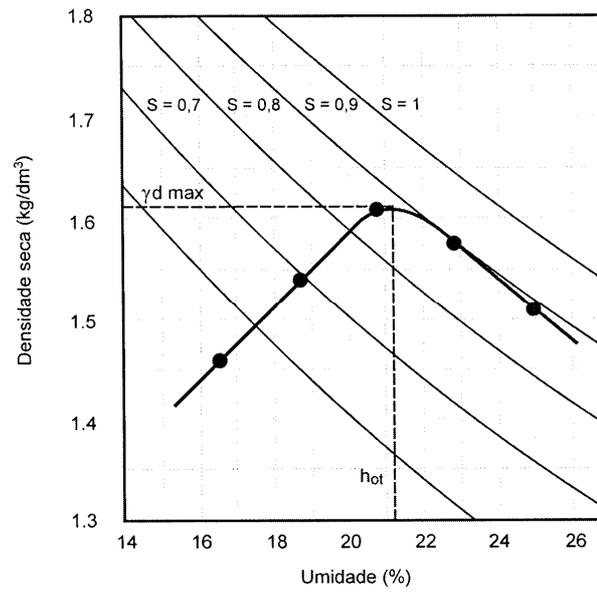


Figura 8.2: Curva de Compactação

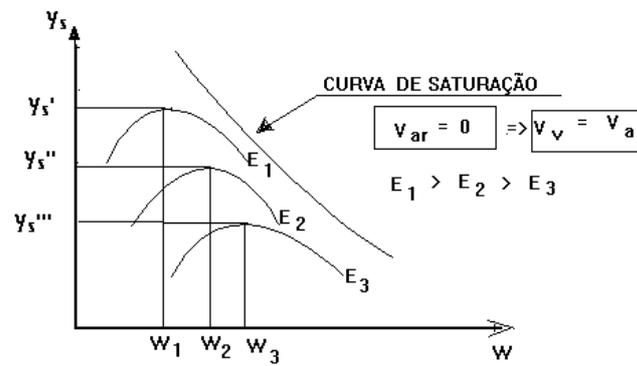


Figura 8.3: Influência da energia de compactação $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e $h_{\acute{o}timo}$

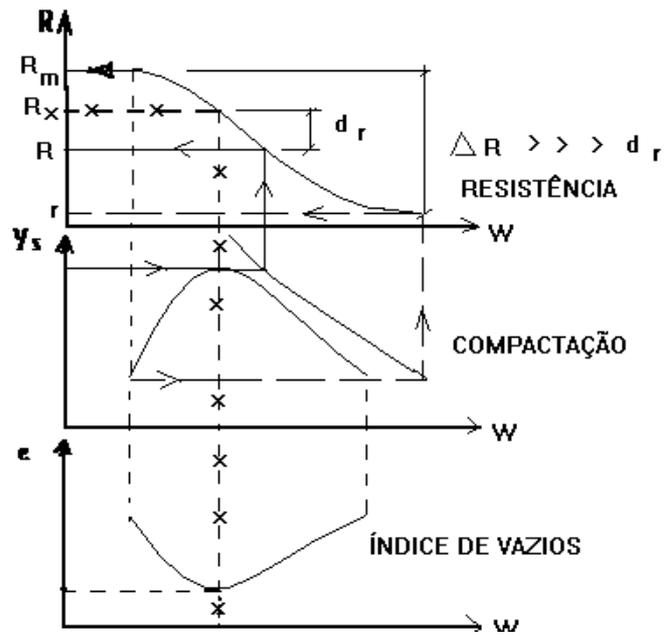


Figura 8.4: Curva de Resistência, compactação e índice de vazios

EQUIPAMENTOS DE CAMPO

Os princípios que estabelecem a compactação dos solos no campo são essencialmente os mesmos discutidos anteriormente para os ensaios em laboratórios. Assim, os valores de peso específico seco máximo obtidos são fundamentalmente função do tipo do solo, da quantidade de água utilizada e da energia específica aplicada pelo equipamento que será utilizado, a qual depende do tipo e peso do equipamento e do número de passadas sucessivas aplicadas.

A energia de compactação no campo pode ser aplicada, como em laboratório, de três maneiras diferentes: por meios de esforços de pressão, impacto, vibração ou por uma combinação destes. Os processos de compactação de campo geralmente combinam a vibração com a pressão, já que a vibração utilizada isoladamente se mostra pouco eficiente, sendo a pressão necessária para diminuir, com maior eficácia, o volume de vazios interpartículas do solo.

Os equipamentos de compactação são divididos em três categorias: os soquetes mecânicos; os rolos estáticos e os rolos vibratórios.

Soquetes

São compactadores de impacto utilizados em locais de difícil acesso para os rolos compressores, como em valas, trincheiras, etc. Possuem peso mínimo de 15Kgf,

podendo ser manuais ou mecânicos (sapos). A camada compactada deve ter 10 a 15cm para o caso dos solos finos e em torno de 15cm para o caso dos solos grossos.

Rolos Estáticos

Os rolos estáticos compreendem os rolos pé-de-carneiro, os rolos lisos de roda de aço e os rolos pneumáticos.

- **Pé-de-Carneiro**

Os rolos pé-de-carneiro são constituídos por cilindros metálicos com protuberâncias (patas) solidarizadas, em forma tronco-cônica e com altura de aproximadamente de 20cm. Podem ser alto propulsivos ou arrastados por trator. É indicado na compactação de outros tipos de solo que não a areia e promove um grande entrosamento entre as camadas compactadas.

A camada compactada possui geralmente 15cm, com número de passadas variando entre 4 e 6 para solos finos e de 6 e 8 para solos grossos. A Figura 05 ilustra um rolo compactador do tipo pé-de-carneiro.

As características que afetam a performance dos rolos pé-de-carneiro são a pressão de contato, a área de contato de cada pé, o número de passadas por cobertura e estes elementos dependem do peso total do rolo, o número de pés em contato com o solo e do número de pés por tambor.

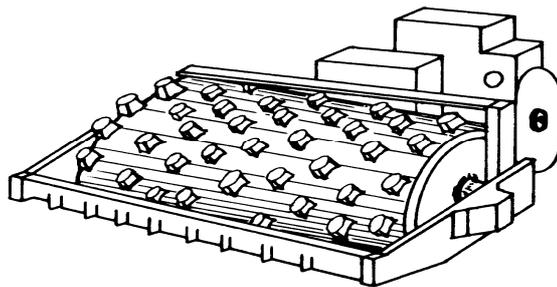


Figura 8.5: Rolo Pé-de-Carneiro

- **Rolo Liso**

Trata-se de um cilindro oco de aço, podendo ser preenchido por areia úmida ou água, a fim de que seja aumentada a pressão aplicada. São usados em bases de estradas, em capeamentos e são indicados para solos arenosos, pedregulhos e pedra britada, lançados em espessuras inferiores a 15cm.

Este tipo de rolo compacta bem camadas finas de 5 a 15cm com 4 a 5 passadas. Os rolos lisos possuem pesos de 1 a 20t e frequentemente são utilizados para o acabamento superficial das camadas compactadas. Para a compactação de solos finos utilizam-se rolos com três rodas com pesos em torno de 7t para materiais de baixa plasticidade e 10t, para materiais de alta plasticidade. A Figura 06 ilustra um rolo compactador do tipo liso.

Os rolos lisos possuem certas desvantagens como, pequena área de contato e em solos mole afunda demasiadamente dificultando a tração.

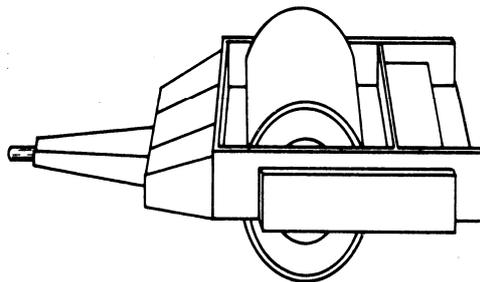


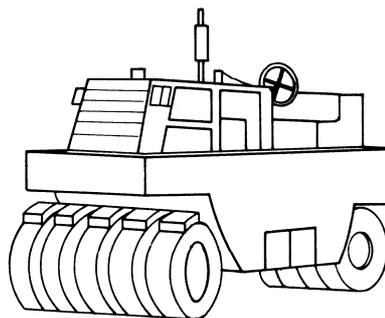
Figura 8.6: Rolo Liso

- **Rolo Pneumático**

Os rolos pneumáticos são eficientes na compactação de capas asfálticas, bases e subbases de estradas e indicados para solos de granulação fina e arenosa. Os rolos pneumáticos podem ser utilizados em camadas de até 40 cm e possuem área de contato variável, função da pressão nos pneus e do peso do equipamento.

Pode-se usar rolos com cargas elevadas obtendo-se bons resultados. Neste caso, muito cuidado deve ser tomado no sentido de se evitar a ruptura do solo. A Figura 07 ilustra um rolo pneumático.

Figura 8.7: Rolo Pneumático



Rolos Vibratórios

Nos rolos vibratórios, a frequência da vibração influi de maneira extraordinária no processo de compactação do solo. São utilizados eficientemente na compactação de solos granulares (areias), onde os rolos pneumáticos ou pé-de-carneiro não atuam com eficiência. Este tipo de rolo quando não são usados corretamente produzem super compactação. A espessura máxima da camada é de 15cm. O rolo vibratório pode ser visto na figura 08.

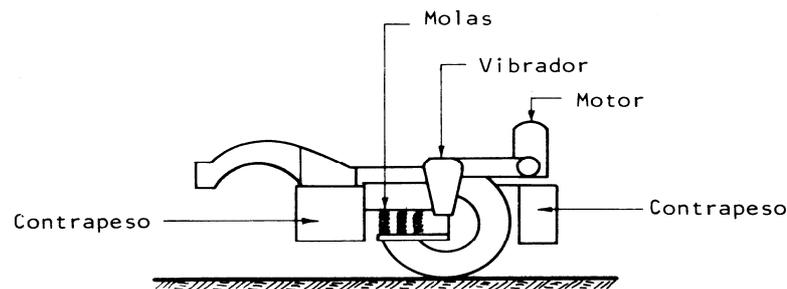


Figura 8.8: Rolo Vibratório

ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO

a) Solos Coesivos

Nos solos coesivos há uma parcela preponderante de partículas finas e muito finas (silte e argila), nas quais as forças de coesão desempenham papel muito importante, sendo indicado a utilização de rolos pé-de-carneiro e os rolos conjugados.

b) Solos Granulares

Nos solos granulares há pouca ou nenhuma coesão entre os grãos existindo, entretanto atrito interno entre os grãos existindo, entretanto atrito interno entre eles, sendo indicado a utilização rolo liso vibratório.

c) Mistura de Solos

Nos solos misturados encontra-se materiais coesivos e granulares em porções diversas, não apresenta característica típica nem de solo coesivo nem de solo granular, sendo indicado a utilização de pé-de-carneiro vibratório

d) Mistura de argila, silte e areia

Rolo pneumático com rodas oscilantes.

e) Qualquer tipo de solo

Rolo pneumático pesado, com pneus de grande diâmetro e largura.

13. CONTROLE DE COMPACTAÇÃO

Para que se possa efetuar um bom controle de compactação do solo em campo, temos que atentar para os seguintes aspectos:

- tipo de solo;
- espessura da camada;
- entrosamento entre as camadas;
- número de passadas;
- tipo de equipamento;
- umidade do solo;
- grau de compactação alcançado.

Assim alguns cuidados devem ser tomados:

- 1) A espessura da camada lançada não deve exceder a 30cm, sendo que a espessura da camada compactada deverá ser menor que 20cm.
- 2) Deve-se realizar a manutenção da umidade do solo o mais próximo possível da umidade ótima.
- 3) Deve-se garantir a homogeneização do solo a ser lançado, tanto no que se refere à umidade quanto ao material.

Bibliografia.

CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 6ª edição, v. 1, 1989.

PINTO, Carlos de Souza. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

KOSHIMA, Akira. et al. *FUNDAÇÕES: teoria e prática*. -- 2.ed.--São Paulo: Pini, 1998

LISTA DE EXERCÍCIOS

1) Uma determinada amostra de solo tem peso específico aparente de $1,8\text{g/cm}^3$ e teor de umidade de 30%. Qual o peso específico aparente seco?

2) O peso específico de um solo no estado natural é $1,8\text{g/cm}^3$, o teor de umidade é de 25% e a densidade relativa das partículas sólidas é 2,65. Determinar:

- | | |
|-----------------|-----------------|
| i) γ ; | d) ϵ ; |
| j) γ_s ; | e) η ; |
| k) γ_g ; | f) S; |

3) Para uma amostra de areia de origem aluvial do estado de São Paulo foram obtidos $\delta = 2,72$; $\epsilon = 0,75$ e $S = 50\%$. Pede-se determinar: γ_{sat} ; γ_{sub} e γ_s .

4) Para se construir um aterro, dispõe-se de uma quantidade de terra, que é chamada pelos engenheiros de “área de empréstimo”, cujo volume foi estimado em 3.000m^3 . Ensaios mostraram que o peso específico natural é da ordem de $1,78\text{ g/cm}^3$ e que a umidade é cerca de 15,8 %. O projeto prevê que no aterro o solo seja compactado com umidade de 18%, ficando com um peso específico seco de $1,68\text{ g/cm}^3$. Que volume de aterro é possível construir com o material disponível e que volume de água deve ser acrescentado?

5) A planilha abaixo apresenta o resultado do processo de peneiramento de um ensaio de granulometria de uma areia média do rio Verde – Santa Maria.

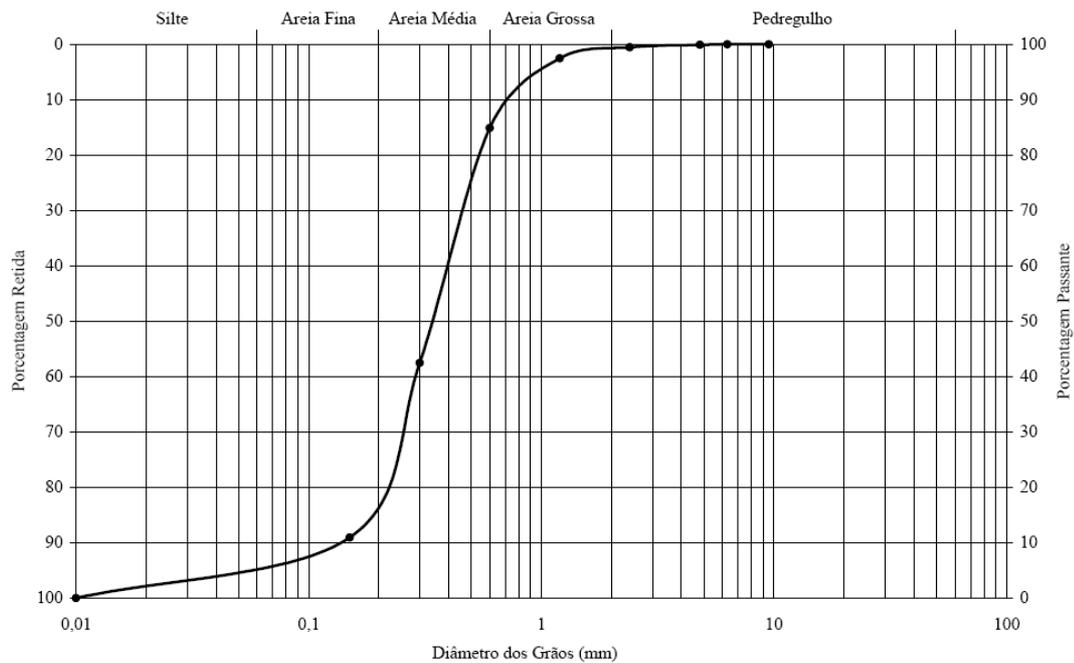
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL
Ensaio Físicos de Agregados Miúdos

Interessado: Prontomix
Amostra: Areia média do Rio Verde

Certificado Nº: 00123424
Data: 16/07/2009

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - NBR 7217 - AREIA							
PENEIRAS		1ª DETERMINAÇÃO		2ª DETERMINAÇÃO		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida		
3/8"	9,5						
1/4"	6,3						
4	4,8	1,30	0,13	0,90	0,08	0,11	0,11
8	2,4	5,00	0,49	4,40	0,41	0,45	0,55
16	1,2	20,50	2,00	21,10	1,95	1,98	2,53
30	0,60	130,30	12,74	134,30	12,44	12,59	15,12
50	0,30	415,90	40,65	477,30	44,19	42,42	57,54
100	0,15	340,90	33,32	321,00	29,72	31,52	89,06
Fundo	0,01	109,20	10,67	121,00	11,20	10,94	100,00
TOTAL		1023,10	100,00	1080,00	100,00	100,00	164,91

Curva Granulométrica - ABNT - NBR NM248



Com granulométrica e determine seus parâmetros:

- Coefficiente de não uniformidade;
- Coefficiente de curvatura;
- Diâmetro máximo;
- Diâmetro efetivo;
- Módulo de Finura;

$$Cnu = \frac{d_{60}}{d_{ef}}$$

$$Cc = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \times d_{10}}$$

- $Cnu < 5$ muito uniforme
- $5 < Cnu < 15$ uniformidade média
- $Cnu > 15$ não uniforme

$1 < CC < 3$ solo bem graduado
 $CC < 1$ ou $CC > 3$ solo mal graduado

