

UNIDADE 3 – GRANULOMETRIA DOS SOLOS

3.1 Introdução

Todos os solos, em sua fase sólida, contêm partículas de diferentes tamanhos em proporções as mais variadas. A determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência permitem obter a função distribuição de partículas do solo e que é denominada distribuição granulométrica.

A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, será obtida através do *processo de peneiramento* de uma amostra seca em estufa, enquanto que, para siltes e argilas se utiliza à *sedimentação* dos sólidos no meio líquido. Para solos, que tem partículas tanto na fração grossa (areia e pedregulho) quanto na fração fina (silte e argila) se torna necessária a análise granulométrica conjunta.

As partículas de um solo, grosso ou fino, não são esféricas, mas se usará sempre a expressão diâmetro equivalente da partícula ou apenas diâmetro equivalente, quando se faz referência ao seu tamanho. Para os materiais granulares ou fração grossa do solo, o diâmetro equivalente será igual ao diâmetro da menor esfera que circunscreve a partícula, enquanto que para a fração fina este diâmetro é o calculado através da lei de Stokes.

A colocação de pontos, representativos dos pares de valores *diâmetro equivalente - porcentagem de ocorrência*, em papel semilogaritmo permite traçar a curva de distribuição granulométrica, conforme mostrada na Figura 3.1, onde em abscissas estão representados os diâmetros equivalentes e em ordenadas as porcentagens acumuladas retidas, à esquerda e as porcentagens que passam, à direita.

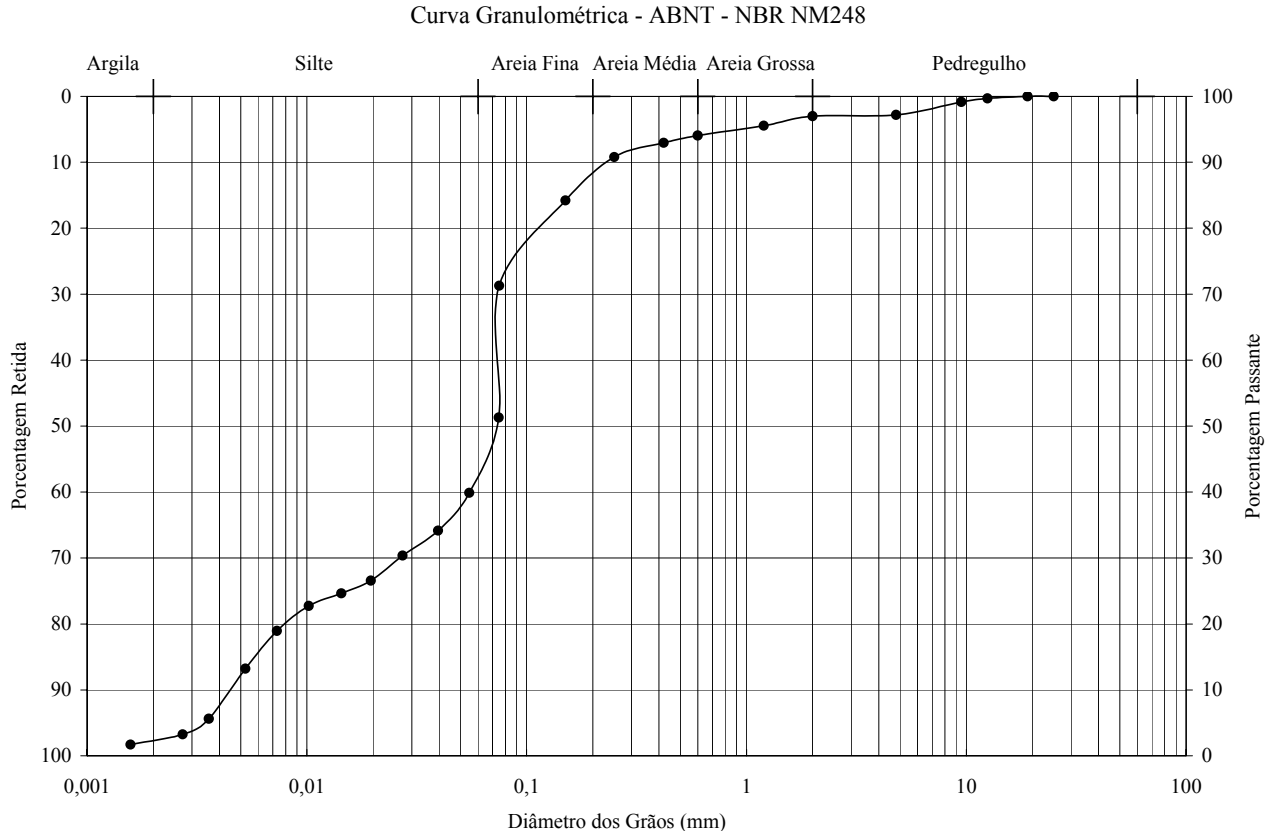


Figura 3.1 - Curva granulométrica por peneiramento e sedimentação de uma amostra de solo residual (Minas de calcáreo – Caçapava do Sul)

3.2 Classificação dos solos baseados em critérios granulométricos

Os solos recebem designações segundo as dimensões das partículas compreendidas entre determinados limites convencionais, conforme Tabela 3.1. Nesta tabela estão representadas as classificações adotadas pela A.S.T.M (American Society for Testing Materials), A.A.S.H.T.O. (American Association for State Highway and Transportation Officials), ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e M.I.T (Massachusetts Institute of Technology).

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/NBR 6502/95) – Terminologia - Rochas e Solos define como:

Bloco de rocha – Fragmentos de rocha transportados ou não, com diâmetro superior a 1,0 m.

Matacão – fragmento de rocha transportado ou não, comumente arredondado por intemperismo ou abrasão, com uma dimensão compreendida entre 200 mm e 1,0 m.

Pedregulho – solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 e 60,0 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalhos ou seixos. Divide-se quanto ao diâmetro em: *pedregulho fino* – (2 a 6 mm), *pedregulho médio* (6 a 20 mm) e *pedregulho grosso* (20 a 60 mm).

Areia – solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. As areias de acordo com o diâmetro classificam-se em: *areia fina* (0,06 mm a 0,2 mm), *areia média* (0,2 mm a 0,6 mm) e *areia grossa* (0,6 mm a 2,0 mm).

Silte – solo que apresenta baixo ou nenhuma plasticidade, baixa resistência quando seco ao ar. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração silte. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm.

Argila – solo de gradação fina constituída por partículas com dimensões menores que 0,002 mm. Apresentam características marcantes de plasticidade; quando suficientemente úmido, molda-se facilmente em diferentes formas, quando seco, apresenta coesão suficiente para construir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos. Caracteriza-se pela sua plasticidade, textura e consistência em seu estado e umidade naturais. Estas características serão vistas na Unidade 4 (plasticidade e consistência dos solos).

TAMANHO (mm)

The scale shows major ticks at 100, 10, 1,0, 0,1, 0,01, and 0,001 mm. Minor ticks are present between these major values.

ASTM		AREIA			SILTE	ARGILA	COLOIDE
		G	M	F			
60	4,75	2,0	0,425	0,075	0,005	0,001	0
	# 4	# 10	# 40	# 200			

AASHTO		AREIA		SILTE	ARGILA	COLOIDE
		G	F			
60	2,0	0,425	0,075	0,005	0,001	0

M. I. T.			AREIA			SILTE			COLOIDE	
G	M	F	G	M	F	G	M	F		
60	20	6	2,0	0,6	0,2	0,06			0,002	0

ABNT			AREIA			SILTE	ARGILA	
G	M	F	G	M	F			
60	20	6	2,0	0,6	0,2	0,06	0,002	0

Tabela 3.1 - Escalas granulométricas adotadas pela A.S.T.M., A.A.S.H.T.O., M.I.T. e ABNT.

3.3 Determinação granulométrica do solo

O ensaio de análise granulométrica do solo está normalizado pela ABNT/NBR 7181/82. A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, será obtida pelo processo de peneiramento de uma amostra de solo, enquanto que, para siltes e argilas se utiliza o processo de sedimentação. Para solos, que tem partículas tanto na fração grossa quanto na fração fina se torna necessário à análise granulométrica conjunta.

3.3.1 Processo de peneiramento

A separação dos sólidos, de um solo, em diversas frações é o objetivo do peneiramento. Este processo é adotado para partículas (sólidos) com diâmetros maiores que 0,075mm (#200). Para tal, utiliza-se uma série de peneiras de abertura de malhas conhecidas (Figura 3.2), determinando-se a percentagem em peso retida ou passante em cada peneira. Este processo divide-se em peneiramento grosso, partículas maiores que 2 mm (#10) e peneiramento fino, partículas menores que 2mm.

Para o peneiramento de um material granular, a amostra é, inicialmente, secada em estufa e seu peso determinado. Esta amostra será colocada na peneira de maior abertura da série previamente escolhida e levada a um vibrador de peneiras onde permanecerá pelo tempo necessário à separação das frações.

Quando o solo possui uma porcentagem grande de finos, porém não interessa a sua distribuição granulométrica, faz-se, primeiramente, uma lavagem do solo na peneira nº 200, seguido da secagem em estufa do material retido e posterior peneiramento. Este procedimento leva a resultados mais corretos do que fazer o peneiramento direto, da amostra seca.

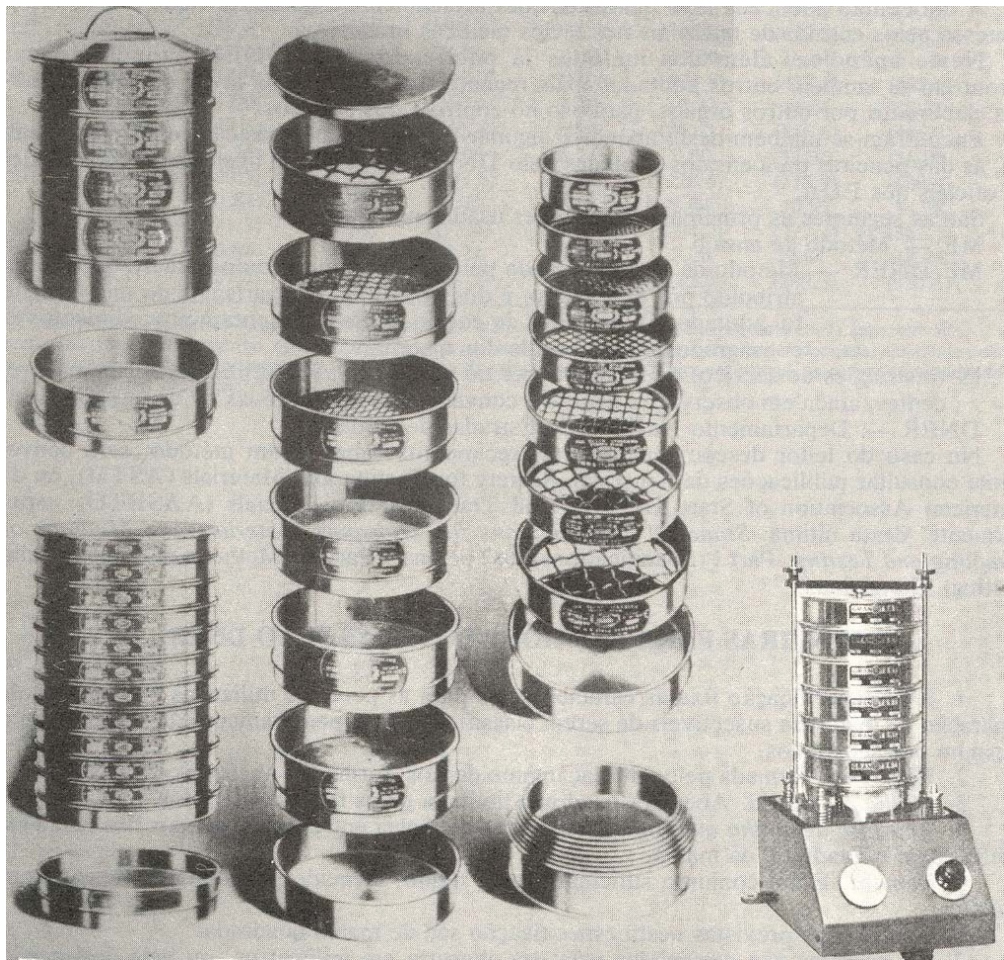


Figura 3.2 - Série de peneiras de abertura de malhas conhecidas (ABNT/NBR 5734/80).

Exemplo 1: A planilha abaixo apresenta o resultado do processo de peneiramento de um ensaio de granulometria de uma areia média do rio Verde – Santa Maria.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Ensaio Físicos de Agregados Miúdos

Interessado: Prontomix **Certificado N°:**
Amostra: Areia média do Rio Verde **Data:** 03/09/03

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - NBR 7217 - AREIA							
PENEIRAS		1ª DETERMINAÇÃO		2ª DETERMINAÇÃO		% Retida Média	% Retida Acumulada
n°	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
Diâmetro Máximo: 1,2				Módulo de Finura: 1,65			

MASSA ESPECÍFICA ABSOLUTA - ASTM - C 128					
A	Massa picnômetro vazio (g)				
B	Massa picnômetro + areia seca (g)				
C	Massa picnômetro + areia + água (g)				
D	Massa picnômetro + água (g)				
E	Massa areia seca (B - A) (g)				
F	(D - A) (g)				
G	(C - B) (g)				
H	(F - G) (g)				
MASSA ESPECÍFICA ABSOLUTA (E/H) (g/cm ³):					
MÉDIA:					

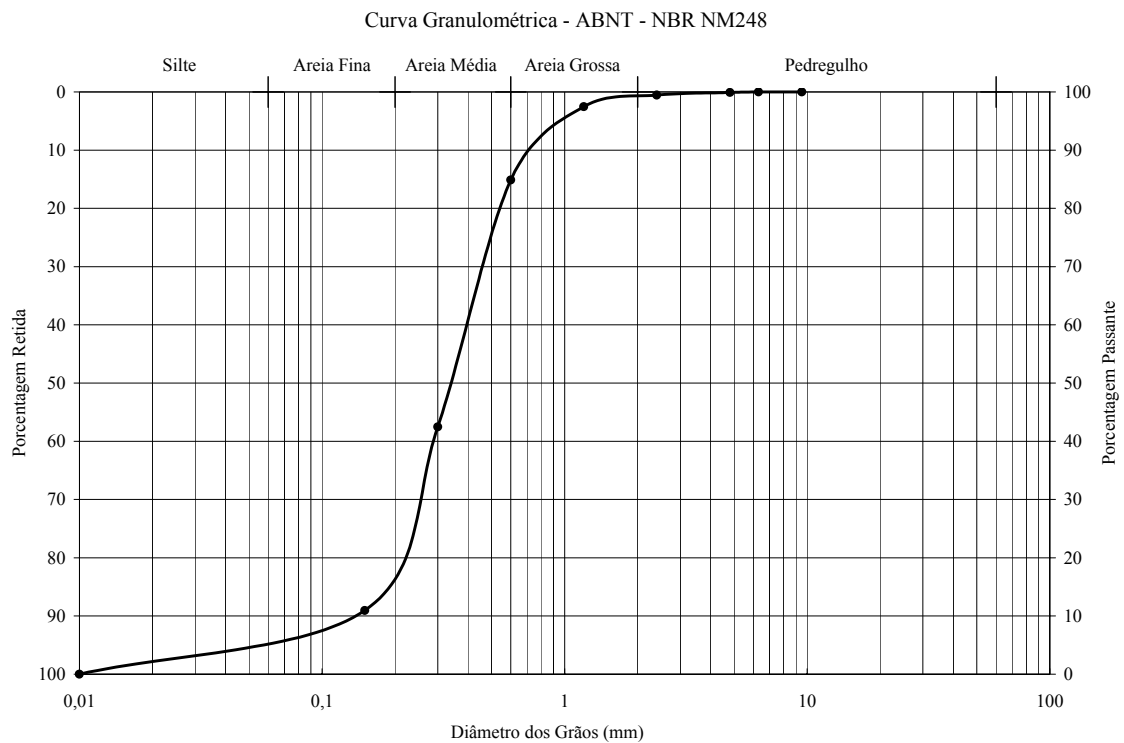
Massa Específica - Chapman		
Leitura Final - cm ³	Leitura Média	MEA (g/cm ³) 500/(L - 200)
390,50	390,75	2,62
391,00		

Massa Unitária Solta - NBR 7251		
Peso Bruto (kg)	Peso Médio - Kg	Massa Unit. Média Kg/cm ³
34,86	30,77	1,548
35,15		
Tara:	4,24	
Volume:	19,88	

Para o ensaio foram realizadas duas determinações. Uma com peso total de sólidos, $Ws_{1^a} = 1023,10g$ e outra com $Ws_{2^a} = 1080,00g$, usando-se a série de peneiras indicada na planilha. As aberturas dessa série de peneiras estão também apresentadas, onde:

- peso retido = peso de sólidos retido em cada peneira, Ws_i
- % retida = porcentagem retida em cada peneira em relação ao peso seco, $Pr_i = Ws_i/Ws$
- % retida média = média de porcentagens retidas das duas determinações, $Pr_m = (Pr_{i 1^a} + Pr_{i 2^a})/2$
- Ws retido acumulado = porcentagem acumulada retida, $\sum Pr_i$

A curva granulométrica obtida para essa amostra está apresentada, a seguir:



3.3.2 Processo de sedimentação

Para os solos finos, siltes e argilas, com partículas menores que 0,075mm (#200), o cálculo dos diâmetros equivalentes será feito a partir dos resultados obtidos durante a sedimentação de certa quantidade de sólidos em um meio líquido.

A base teórica para o cálculo do diâmetro equivalente vem da lei de Stokes, que afirma que a velocidade de queda de uma partícula esférica, de peso específico conhecido, em um meio líquido rapidamente atinge um valor constante que é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula. O estabelecimento da função, velocidade de queda - diâmetro de partícula, se faz a partir do equilíbrio das forças atuantes (força peso) e resistentes (resistência viscosa) sobre a esfera, resultando:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1800 \cdot \mu} \times D^2$$

onde:

v = velocidade de queda

γ_s = peso específico real dos grãos - g/cm^3

γ_w = peso específico do fluido - g/cm^3

μ = viscosidade da água - $\text{g} \cdot \text{s/cm}^2$

D = diâmetro equivalente (mm)

A equação anterior foi obtida para o caso de uma esfera de peso específico bem definido caindo em um meio líquido indefinido, e certamente estas não são as condições existentes no ensaio de sedimentação. As partículas não são esféricas e o número delas é grande, o peso específico dos sólidos não é único e o espaço utilizado é limitado, podendo ocorrer influência das paredes do recipiente, bem como de uma partícula sobre as outras. A fim de minimizar os erros devido às diferenças entre teoria e prática, alguns cuidados devem ser tomados durante o ensaio. Primeiro não se deve ter uma suspensão com uma concentração de sólidos, (peso de sólidos/volume da

suspensão) muito alta; segundo, para que não ocorra floculação e permita a descida individual das partículas, deve-se adicionar um defloculante à suspensão. Terceiro, a realização do ensaio fica restrito às partículas com diâmetro entre 0,2 e 0,0002mm, para se evitar o problema da turbulência gerada pela queda de partículas grandes e o movimento Browniano que afeta partículas muito pequenas.

A velocidade de queda de uma partícula, com diâmetro “D”, é obtida de forma indireta, como descrito a seguir. Na Figura 3.3, estão ilustrados dois instantes da suspensão, à esquerda para o tempo $t = 0$, quando uma partícula “B”, com diâmetro “D”, se situa no topo da suspensão e à direita depois de decorrido um tempo “t” e tendo a partícula percorrido uma distância “z” a uma velocidade uniforme “ $v = z/t$ ”. Partículas com diâmetros maiores ou menores do que “D” terão percorrido, nesse tempo “t”, distâncias maiores ou menores do que “z”, com velocidades diferentes, independentemente de suas posições iniciais. Pode-se assim afirmar que acima do ponto “B”, todas as partículas terão diâmetros menores do que “D”, que será calculado pela equação:

$$D = \sqrt{\frac{1800 \cdot \mu}{\gamma_s - \gamma_w}} \times \sqrt{\frac{z}{t}}$$

A suspensão, inicialmente homogênea, com o passar do tempo vai se tornando heterogênea, com densidades diferentes, devido à sedimentação das partículas. A medida da densidade da suspensão, em intervalos de tempo com a utilização de um densímetro permite determinar as distâncias “z”. Na Figura 3.4, está mostrado um corte longitudinal de um densímetro com a escala marcada em sua haste, a suspensão com o densímetro imerso e a posição de leitura e a curva de calibração do densímetro, com as leituras em abscissas e as distâncias “z”, entre o centro de volume do bulbo e cada uma das marcas na haste, em ordenadas.

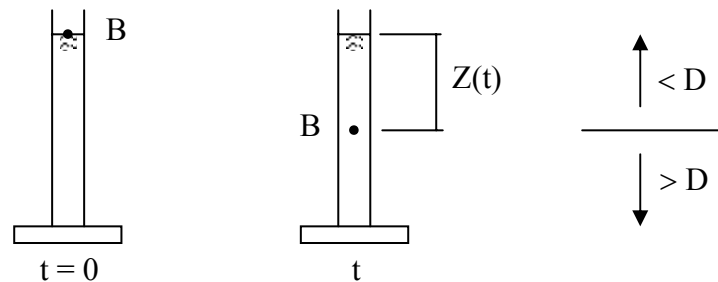


Figura 3.3 - Esquema de ensaio.

Da equação anterior tem-se duas grandezas, viscosidade e peso específico do fluido, variáveis com a temperatura, será necessário manter-se esta constante durante o ensaio ou efetuar as correções devidas.

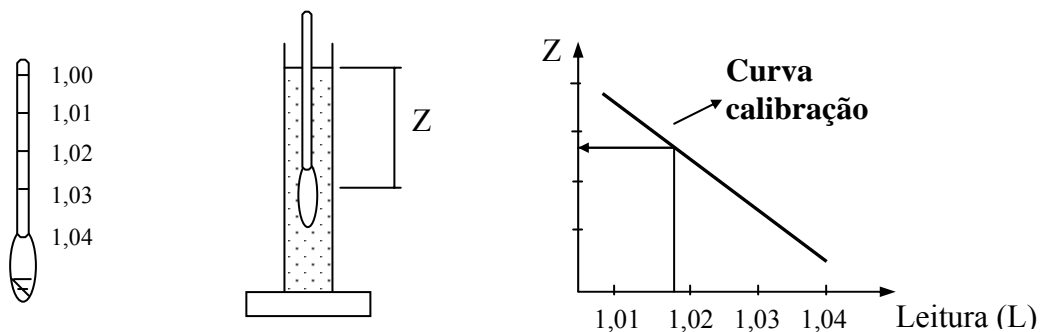


Figura 3.4 - Determinação da distância “z”.

A equação que permite calcular a porcentagem de partículas com diâmetros menores do que o diâmetro “D”, calculado pela equação anterior, será obtida a seguir. Na Figura 3.5 estão indicadas

duas situações de ensaio, onde em sua parte superior os valores mostrados refletem a situação inicial ($t = 0$), quando imposta à condição homogeneidade de concentração de sólidos na suspensão e, portanto, o peso específico em qualquer ponto será o mesmo e igual a:

$$\gamma = \gamma_w + \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \times \frac{W_s}{V}$$

onde W_s é o peso dos sólidos utilizado no ensaio e V é o volume da suspensão.

Com o passar do tempo, as partículas vão se sedimentando, as maiores mais rapidamente e com isto, alterando o peso específico da suspensão ao longo da proveta. Assim, uma partícula “B” de diâmetro “D”, que no instante $t = 0$ se encontrava no topo da suspensão, como mostrado na figura 3.5, após um tempo “t” percorreu uma distância “z”, e acima desta posição nenhuma partícula terá diâmetro maior ou igual a “D”. Enquanto abaixo existirão partículas com diâmetros menores do que “D”. Para se determinar o peso de sólidos que tem diâmetros menores do que “D” imaginemos a situação mostrada na parte inferior da Figura 3.5, que é uma suspensão preparada com estas partículas com peso “ W_{sn} ” e que terá um peso específico igual a:

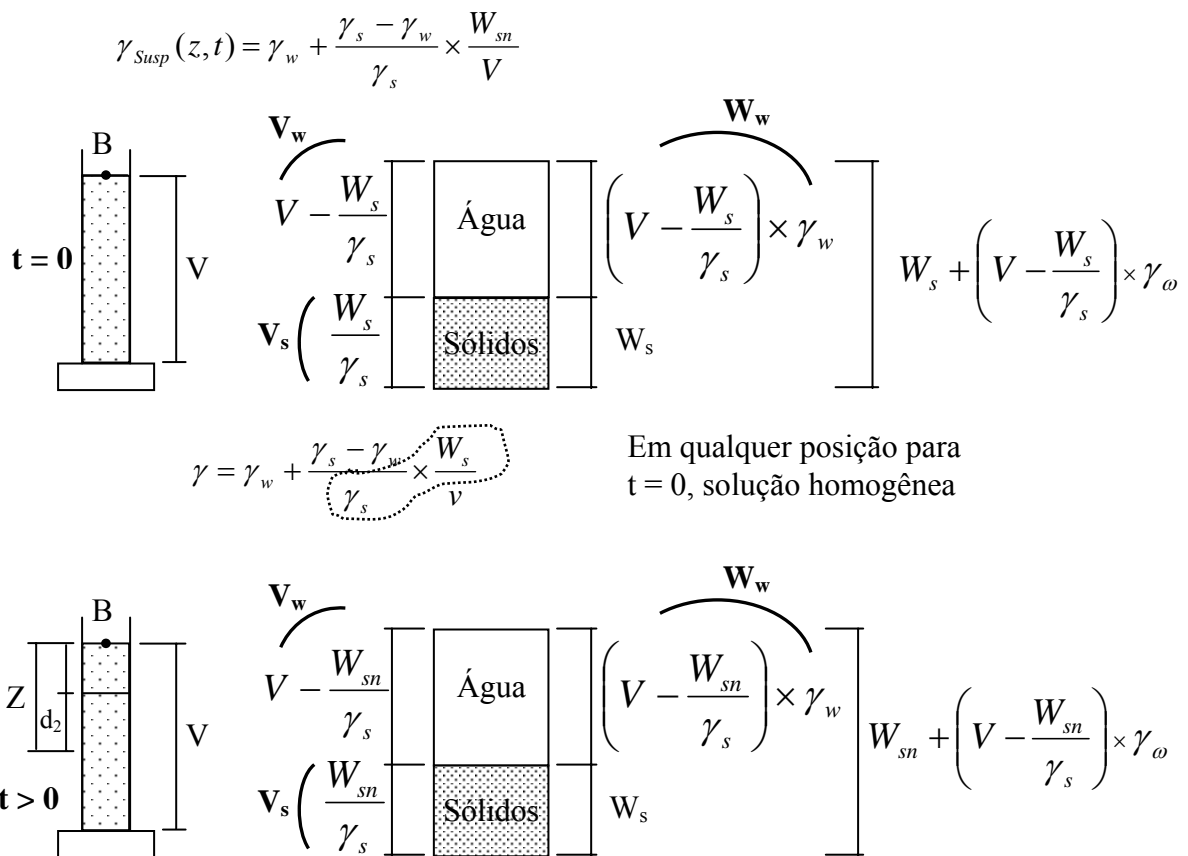


Figura 3.5 – Fases da sedimentação

A porcentagem de partículas com diâmetros menores do que “D” é igual a:

$$\% < D_Z^t = \frac{W_{sn}(z, t)}{W_s}, \quad \text{e portanto} \quad \% < D_Z^t = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \times \frac{v}{W_s} \times (\gamma_L - \gamma_w) \times N$$

onde γ_{susp} (γ_L) será obtido, em cada instante, com o uso de um densímetro e N é a porcentagem de partículas que passam na peneira nº 10. Calculados os pares de valores D , ($\% < D$) tem-se a condição de traçar a curva do solo.

Exemplo 2: a planilha abaixo mostra os resultados do ensaio de granulometria do solo residual das Minas de calcário - Caçapava do Sul, cuja distribuição das frações foi apresentada como exemplo na Figura 3.1.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Análise Granulométrica de Solos - NBR 7181/82

Certificado nº:

Interessado: Cerâmica Desconsi

Amostra: 1A7 - Minas de calcário - Caçapava do Sul

Data: 10 de Setembro de 2001

Teor de Umidade (w)		
Ps+cáp.+água (g):	62,14	80,95
Ps + cápsula (g):	61,82	80,52
Cápsula (g):	10,83	10,57
w (%):	0,63	0,61
w média (%):	0,621	

Sedimentação								
Peso Esp.sólidos (g/cm ³): 2,785			Peso úmido (g): 80,00			Peso seco (g): 79,51		
Tempo Decorrido	Temperatura T (°C)	Viscosidade m (g.s/cm ²)	Densidade L	Correção Ld	Altura Queda h (cm)	Diâmetro D (mm)	(%) Amost. Total < Diâm.	
30	seg	14,0	1,1946E-05	1,0320	1,00505	13,88	0,0747	51,30
1	min	14,0	1,1946E-05	1,0260	1,00505	14,99	0,0549	39,88
2	min	14,0	1,1946E-05	1,0230	1,00505	15,55	0,0395	34,17
4	min	14,0	1,1946E-05	1,0210	1,00505	14,82	0,0273	30,36
8	min	14,0	1,1946E-05	1,0190	1,00505	15,19	0,0195	26,55
15	min	14,0	1,1946E-05	1,0180	1,00505	15,37	0,0143	24,65
30	min	14,0	1,1946E-05	1,0170	1,00505	15,56	0,0102	22,75
60	min	14,0	1,1946E-05	1,0150	1,00505	15,93	0,0073	18,94
120	min	14,0	1,1946E-05	1,0120	1,00505	16,48	0,0053	13,23
270	min	14,0	1,1946E-05	1,0080	1,00505	17,22	0,0036	5,61
450	min	16,0	1,1342E-05	1,0065	1,00479	17,50	0,0027	3,26
1440	min	13,5	1,2105E-05	1,0060	1,00511	17,59	0,0016	1,69

Peneiramento					
Ph #10 (g): 80,00		Ph #4 (g): 1500,00			
Ps #10 (g): 79,51		Ps #4 (g): 1490,74			
Peneiras		Mat. Retido (g)	Material que passa (g)		(%) Passante
Nº	mm		Parcial	Total	
1"	25			1490,74	100,00
3/4"	19			1490,74	100,00
1/2"	12,5	4,73		1486,01	99,68
3/8"	9,5	8,24		1477,78	99,13
4	4,8	28,90		1448,87	97,19
10	2,00	2,73		1446,14	97,01
16	1,20	1,19	78,32		95,56
30	0,60	1,22	77,10		94,07
40	0,42	0,92	76,18		92,95
60	0,25	1,75	74,43		90,81
100	0,15	5,40	69,03		84,22
200	0,075	10,60	58,43		71,29

Diâm. (mm)	% < Diâm.
0,002	2
0,06	42
0,20	88
0,60	94
2,00	97

Porcentagens	
Argila:	2
Silte:	40
Areia Fina:	46
Areia Média:	6
Areia Grossa:	3
Pedregulho:	3

3.4 Cálculos do ensaio de granulometria

A seguir apresentamos o exemplo do cálculo de um par de valores da curva de distribuição granulométrica.

Determinação da amostra total seca:

- amostra total úmida (W) = 1500g
- umidade higroscópica (w) = 0,621% (visto na Unidade 2)
- peso total da amostra seca (Ws) = $1500/(1+0,621/100) = 1490,74\text{g}$

Peneiramento: só se obteve material retido a partir da peneira de 12,5 mm, logo, as porcentagens acumuladas de material passando nas peneiras de abertura maior que ela são iguais a 100%.

- peso de material retido na peneira de 12,5 mm (# 1/2") = 4,73g
- peso do material retido na peneira de 9,5 mm (# 3/8") = 8,24g
- peso do material retido na peneira de 4,8 mm (# 4) = 28,90g
- peso do material retido na peneira de 2,0 mm (# 10) = 2,73g
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 12,5mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = (1490,74 - 4,73)/1490,74 = 1486,01/1490,74 = 0,9968 = 99,68\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 9,5mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [1490,74 - (4,73 + 8,24)]/1490,74 = 0,9913 = 99,13\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 4,8mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [1490,74 - (4,73 + 8,24 + 28,90)]/1490,74 = 0,9719 = 97,19\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 2,0mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [1490,74 - (4,73 + 8,24 + 28,90 + 2,73)]/1490,74 = 0,9701 = 97,01\%$

Sedimentação:

- peso úmido usado na sedimentação = 80g
- teor de umidade = 0,621%
- peso seco usado na sedimentação = $[80/(1+0,621/100)] = 79,51\text{g}$

Cálculo da porcentagem total acumulada passando entre as peneiras de 1,2mm (#16) e 0,0747mm (%<D):

- porcentagem total acumulada passando na peneira de 1,20mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [79,51 - 1,19]/79,51 \times 97,01 = 78,32/79,51 \times 97,01\% = 95,56\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 0,60mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [79,51 - (1,19 + 1,22)]/79,51 \times 97,01 = 77,10/79,51 \times 97,01\% = 94,07\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 0,42mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [79,51 - (1,19 + 1,22 + 0,92)]/79,51 \times 97,01 = 76,18/79,51 \times 97,01\% = 92,95\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 0,25mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [79,51 - (1,19 + 1,22 + 0,92 + 1,75)]/79,51 = 74,43/79,51 \times 97,01\% = 90,81\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 0,15mm:
 $W_{S_{\text{acum. pas.}}} = [79,51 - (1,19+1,22+0,92+1,75+5,4)]/79,51 = 69,03/79,51 \times 97,01\% = 84,22\%$
- porcentagem total acumulada passando na peneira de 0,075mm:
 $W_{S_{a.p.}} = [79,51 - (1,19+1,22+0,92+1,75+5,4+10,6)]/79,51 = 58,43/79,51 \times 97,01\% = 71,29\%$

Determinação da viscosidade:

- temperatura do ensaio = 14°C
 - viscosidade (μ) do meio dispersor (água) p/ 14°C = $11,98 \times 10^{-6} \text{ g.s/cm}^2$ (Tabela 2 - NBR 7181)
- ou determinada pela equação $\mu = \frac{0,0000181}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2}$, onde T = temperatura em °C

$$\mu = \frac{0,0000181}{1 + 0,0337 \cdot (14) + 0,000221 \cdot (14)^2} = 11,946 \times 10^{-6} \text{ g.s/cm}^2$$

- peso específico do meio dispersor (água) p /14°C, $\gamma_w = 0,9993 \text{ g./cm}^3 = 1,0 \text{ g./cm}^3$ (Anexo – Tabela – NBR 6458 – Adota-se $\gamma_w = 1,0 \text{ g./cm}^3$, para efeito de cálculo)
- peso específico real dos grãos (γ_s) = 2,785 g/cm³ (Ensaio de peso específico - NBR 6508).

Cálculo do diâmetro dos grãos para a leitura correspondente ao tempo de 30s:

- leitura do densímetro no ensaio = 1,0320 o que corresponde a um valor de altura de queda (z) de 13,88cm (Gráfico de calibração do densímetro). Para esse densímetro a curva de calibração fornece as seguintes equações para o cálculo da altura de queda (z):

- Para as três primeiras leituras: $z = h = 204,8 - 185 L$

- Para as demais leituras: $z = h = 203,7 - 185 L$, onde L = leitura realizada no densímetro

$$z = 204,8 - 185 \cdot 1,0320 = 13,88 \text{ cm}$$

- diâmetro equivalente dos grãos (D) para a primeira leitura

$$D = \sqrt{\frac{1800 \cdot \mu}{\gamma_s - \gamma_w}} \times \sqrt{\frac{z}{t}} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{1800 \cdot 11,946 \times 10^{-6}}{2,785 - 1,0}} \times \sqrt{\frac{13,88}{30}} = 0,0747 \text{ mm}$$

Cálculo da porcentagem de material com diâmetro menor que 0,0747mm (%<D):

- peso específico real dos grãos (γ_s) = 2,785 g/cm³

- peso do material usado na sedimentação (Ws) = 79,51g

- correção da leitura do densímetro em função da temperatura (T=14°C), Ld = 1,00505 (retirado da curva de calibração do densímetro utilizado). Para esse densímetro dado pela equação:

$$Ld = -0,000004558347T^2 + 0,00000490095T + 1,00587579773$$

$$Ld = -0,000004558347 \cdot (14)^2 + 0,00000490095 \cdot (14) + 1,00587579773 = 1,00505$$

- leitura no densímetro no ensaio (γ_{susp}), $L = \gamma_L = 1,0320$

- porcentagem em relação à amostra total seca, passando na peneira de 2,0mm (#10) = 97,01%

Portanto, a porcentagem do material, referida à amostra total seca com diâmetro menor que 0,0747mm (%<D)

$$\% < D_z^t = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \times \frac{v}{W_s} \times (\gamma_L - \gamma_w) \times N, \text{ onde } (\gamma_L = L \text{ e } \gamma_w = Ld)$$

$$\% < D_z^t = \frac{2,785}{2,785 - 1,0} \times \frac{1000}{79,51} \times (1,0320 - 1,00505) \times 97,01 \Rightarrow (\% < D) = 51,30\%$$

As coordenadas de um ponto da curva granulométrica são:

$$D = 0,0074\text{mm e } (\% < D = 0,074) = 51,30 \%$$

Para os tempos subseqüentes, procede-se da mesma forma, determinando para cada leitura do densímetro a altura de queda.

Utiliza-se o material passante na peneira de 2,0 mm (# 10) do ensaio de sedimentação para o peneiramento fino.

3.5 Propriedades que auxiliam na identificação dos solos

Os solos são identificados por sua textura, composição granulométrica, plasticidade, consistência ou compacidade, citando-se outras propriedades que auxiliam sua identificação, como estrutura, forma dos grãos, cor, cheiro, friabilidade, presença de outros materiais.

3.5.1 Textura

Quanto à textura (distribuição granulométrica) os solos são classificados em grossos e finos. Os solos grossos são aqueles nos quais mais do que 50% dos grãos são visíveis a olho nu; são as areias e os pedregulhos. Os solos finos são aqueles nos quais mais do que 50 % das partículas são de tal dimensão, que não são visíveis a olho nu; são as argilas e os siltes.

A experiência indica que a textura, ou seja, a distribuição granulométrica é muito importante nos solos grossos (granulares). Nestes solos a distribuição granulométrica pode revelar o comportamento referente às propriedades físicas do material.

Para solos com grãos menores que a abertura da peneira de nº 200 (0,075mm), a granulometria é de pouca importância para a solução dos problemas de engenharia geotécnica.

Em função da distribuição granulométrica os solos podem ser bem ou mal graduados. Os solos que tem seus grãos variando, preponderantemente, dentro de pequenos intervalos, são, portanto, solos mal graduados. Os solos que tem várias frações de diâmetro diferentes misturadas; são, portanto, solos bem graduados.

Três parâmetros são utilizados para dar uma informação sobre a curva granulométrica:

- *Diâmetro efetivo (D_{10}):* É o ponto característico da curva granulométrica para medir a finura do solo, que corresponde ao ponto de 10%, tal que 10% das partículas do solo possuem diâmetro inferiores a ele.

- *Coefficiente de uniformidade (C_u):* Dá uma idéia da distribuição do tamanho das partículas do solo; valores próximos de um indicam curva granulométrica quase vertical, com os diâmetros variando em um intervalo pequeno, enquanto que, para valores maiores a curva granulométrica irá se abatendo e aumentando o intervalo de variação dos diâmetros. Da mesma forma que foi definido D_{10} , define-se D_{30} e D_{60} .

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

A representação da curva granulométrica em papel semilogaritmo apresenta vantagens, pois os solos com C_u , aproximadamente iguais, serão representados por curvas paralelas. Os solos que apresentam $C_u < 5$ são denominados uniformes; e com $C_u > 15$ desuniformes. Para valores de C_u entre 5 e 15 são denominados de medianamente uniformes.

- *Coefficiente de curvatura (C_c):* Dá uma medida da forma e da simetria da curva granulométrica e é igual a:

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

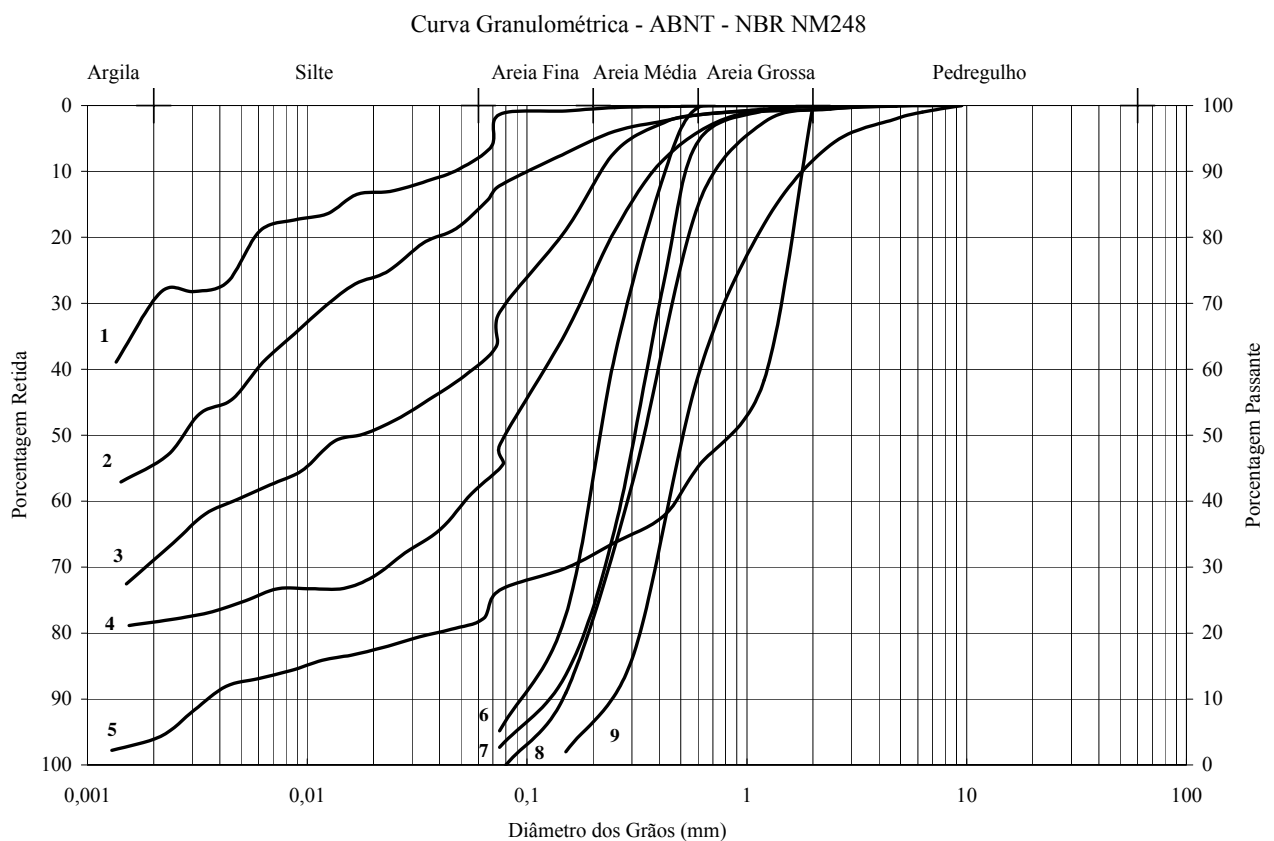
Para um solo bem graduado, o valor do coeficiente de curvatura, deverá estar entre 1 e 3. Portanto, a distribuição do tamanho de partículas é proporcional, de forma que os espaços deixados pelas partículas maiores sejam ocupados pelas menores. Para solos granulares há maior interesse no conhecimento do tamanho das partículas, visto que, algumas de suas propriedades estão relacionadas com os mesmos, o que não ocorre com os solos finos.

Logo, segundo a forma da curva podemos distinguir os diferentes tipos de granulometria conforme pode ser observado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Diferentes tipos de granulometria

Exemplo 3: Na figura abaixo, estão mostradas curvas granulométricas de solos e materiais granulares, de alguns locais do município de Santa Maria e Região.



- (1) argila siltosa de alta plasticidade, leito do Arroio Cadena - Vila Oliveira - Santa Maria.
- (2) argila siltosa de alta plasticidade, Distrito de Pains – Santa Maria.
- (3) argila siltosa medianamente plástica, várzea do Rio Vacacaí-Mirim – Santa Maria.
- (4) argila siltosa com areia, Aterro Sanitário – Restinga Seca.
- (5) solo residual “Chumbinho” – Restinga seca.
- (6) areia fina a média, margem do Arroio Cadena – Vila Lídia – Santa Maria.
- (7) areia média, margem do Arroio Cadena – Vila Oliveira – Santa Maria.
- (8) areia média a grossa, Rio Verde – Santa Maria.
- (9) areia grossa, Rio Verde – Santa Maria.

As curvas granulométricas do exemplo anterior apresentam valores para os diâmetros específicos e coeficientes mostrados na tabela

Curva nº	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu	Cc
5	0,0035	0,17	1,30	371,43	6,35
6	0,094	0,17	0,24	2,55	1,28
7	0,13	0,23	0,40	3,08	1,02
8	0,15	0,24	0,35	2,33	1,10
9	0,25	0,38	0,61	2,45	0,95

De acordo com os valores indicados, a curva 5 é de solo desuniforme; enquanto que as demais curvas são de solos uniformes. Os solos das curvas 5 e 6 são bem graduados, os demais são mal graduados.

3.5.2 Compacidade

Compacidade é a característica da maior ou menor densidade (compactação) dos solos granulares (não coesivos). Os solos não coesivos são as areias e pedregulhos, e quantitativamente a **compacidade ou densidade relativa** é determinada pelo grau de compacidade através da expressão:

$$GC = \frac{e_{\text{máx}} - e_{\text{nat}}}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}}$$

Determina-se o índice de vazios máximo vertendo-se simplesmente o material seco em um recipiente de volume conhecido e pesando-se (ABNT/NBR 12004/90)

$$e_{\text{máx}} = V_v/V_s = (V - V_s)/V_s \quad \Rightarrow \quad e_{\text{máx}} = (V - W_s/\gamma_s) / (W_s/\gamma_s)$$

onde:

V = volume do recipiente

W_s = peso do solo seco

γ_s = peso específico real dos grãos

Obtém-se o índice de vazios mínimo, compactando-se o material por vibração ou por socamento dentro de um recipiente de volume V (ABNT/NBR 12051/91).

$$e_{\text{mín}} = (V - W_{sc}/\gamma_s) / (W_{sc}/\gamma_s),$$

onde:

W_{sc} = peso do solo compactado

Em função do grau de compacidade classificam-se as areias em:

<i>Fofa (solta)</i>	0 < GC < 1/3
<i>Medianamente compacta</i>	1/3 < GC < 2/3
<i>Compacta</i>	2/3 < GC < 1

Qualitativamente correlaciona-se a compactidade de areias e siltes arenosos com a resistência a penetração obtida no ensaio de penetração estática (SPT). Segundo ABNT/NBR 7250/82, temos:

Designação	Índice de resistência à penetração – N (SPT)
Fofo	≤ 4
Pouco compacto	5 a 8
Medianamente compacto	9 a 18
Compacto	18 a 40
Muito compacto	> 40

3.5.3 Forma dos grãos

Quanto à forma, as partículas dos materiais granulares, pedregulhos e areias, se aproximam de uma esfera. A caracterização do seu tamanho através de uma medida linear é, suficientemente, correta. Existem tabelas que distribuem as partículas esferoidais em classes, de acordo com a forma de sua superfície: angular, subangular, subarredondado, arredondado e bem arredondado.

A forma mais comum, das partículas dos argilo-minerais formadores dos solos argilosos é a laminar onde predominam duas dimensões, largura e comprimento, sobre a espessura. A Figura 3.6 apresenta as classes de arredondamento, e a Figura 3.7 apresenta partículas de argila.

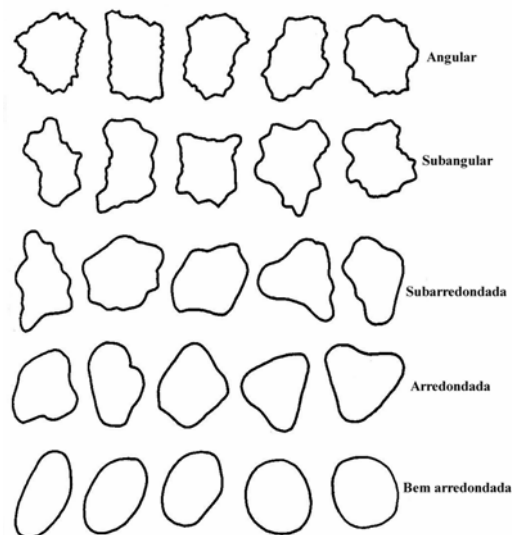


Figura 3.7 – Grau de arredondamento das partículas

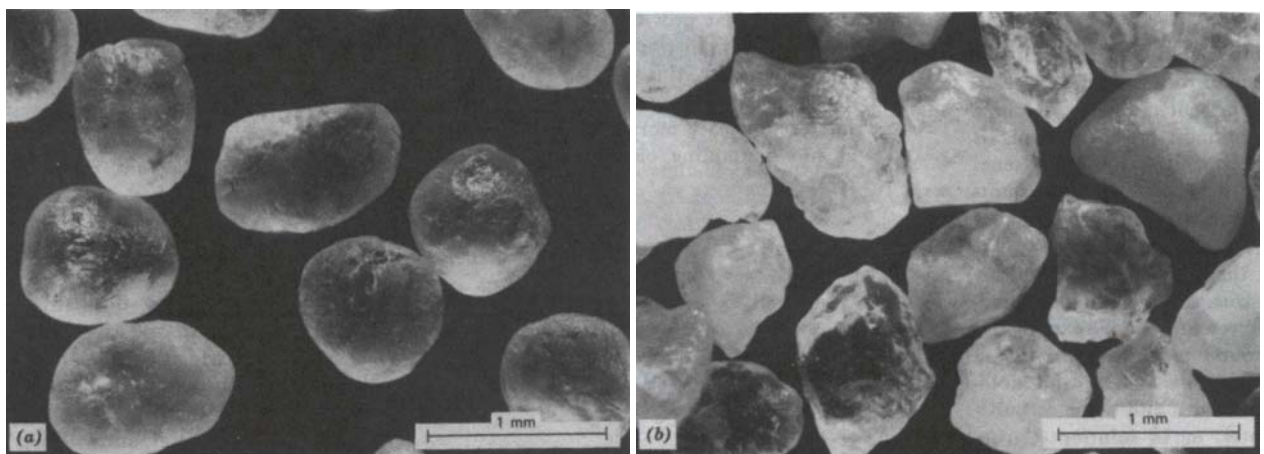


Figura 3.7 – Grãos de areia (a) bem arredondada, (b) subangular.

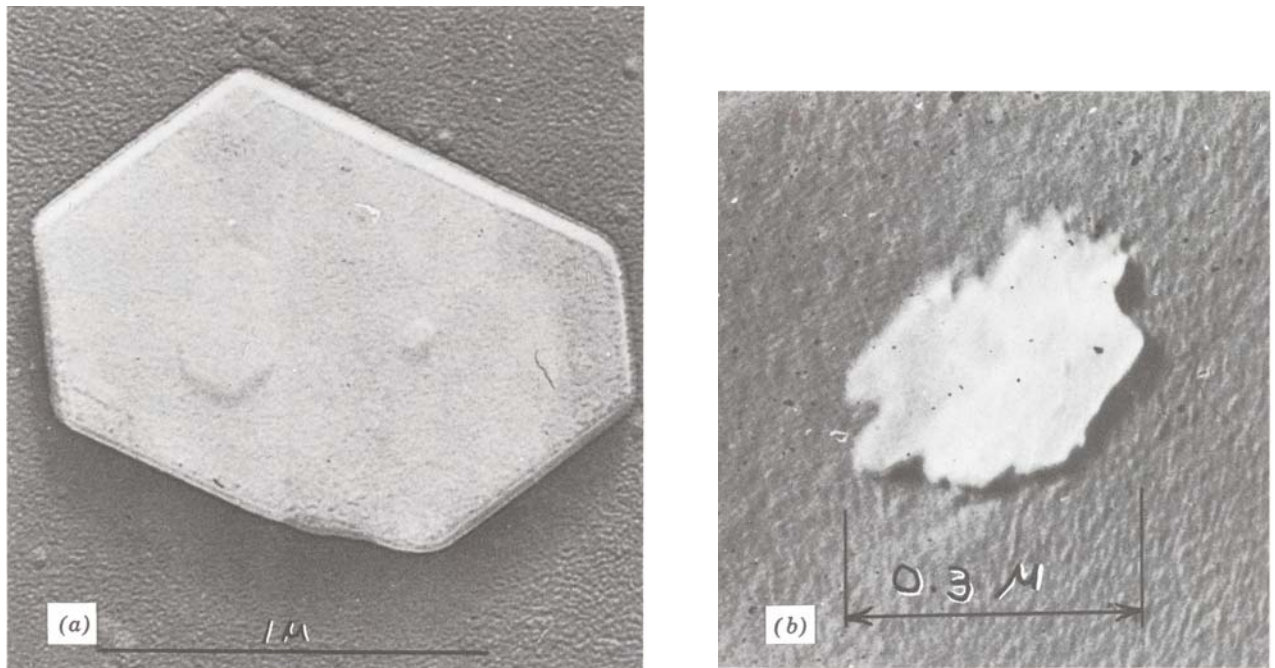


Figura 3.8 – Partículas de argila (a) caulinita (b) ilita

3.6 Uso da granulometria

Nos solos com grãos maiores do que a peneira de nº 200 (areias e pedregulhos) a granulometria tem vários usos importantes. Por exemplo, os solos bem graduados, ou seja, com uma ampla gama de tamanho de partículas, apresentam melhor comportamento em termos de resistência e compressibilidade que os solos com granulometria uniforme (todas as partículas têm o mesmo tamanho).

Outra finalidade da curva granulométrica é na estimativa do coeficiente de permeabilidade (Unidade 6) de solos de granulação grossa, especialmente no dimensionamento de filtros. O material fino atua como ligante dos solos. O conhecimento da curva granulométrica permite a escolha do material para utilização em bases de rodovias e aeroportos. Porém existem várias razões tanto práticas como teórica pelas quais, a curva granulométrica de solos finos é mais discutível que as correspondentes a solos granulares. Os tratamentos químicos e mecânicos que os solos naturais recebem antes de realizar uma análise granulométrica resultam em tamanhos efetivos que podem ser muito diferentes dos existentes no solo natural.

Para execução de concreto de cimento, agregados bem graduados requerem menos cimento para encher os vazios e, havendo menos água por unidade de volume de concreto, ele será mais denso, menos permeável e apresentará maior resistência à alteração do que se fosse executado com agregado uniforme. Para o caso de concreto asfáltico usando agregado bem graduado a quantidade de asfalto a ser empregado é menor.