

3. ESTUDOS GEOTÉCNICOS PARA PAVIMENTAÇÃO

3.1 ESTUDO DO SUBLEITO

3.1.1 OBJETIVOS

- (A) Reconhecimento dos solos do subleito
 - Perfis dos solos → Perfis (unidades) geotécnicos
 - Caracterização das camadas (densidade, resistência, compactação,...).
- (B) Estudo de ocorrências (Perfis e Caracterização)
 - Jazidas (solos, areias, cascalheiras, saibreiras).
 - Pedreiras

3.1.2 ESTUDO DO SUBLEITO

3.1.2.1 ESTUDO BÁSICO OU PRELIMINAR

- Finalidade: Identificação, delimitação e conhecimento das Unidades Geotécnicas de interesse (U.G.).

(A) Pesquisa e coleta de dados existentes

- Análise dos Elementos Disponíveis
 - Mapas Geológicos ou Pedológicos (cartas) 1:50.000
 - Fotos aéreas
 - Estudos e Projetos Anteriores
 - Publicações
- Mapeamento
 - Informações geotécnicas e geológicas são superpostas para configuração das U.G. em cartas planimétricas.

(B) Investigações complementares de campo

- Finalidades:
 - Confirmar informações anteriores
 - Ajustar o mapeamento
 - Elaborar planos de sondagem
- Recomendações
 - Presença de engenheiros e geólogos

- Observação de materiais nos taludes de corte e obras viárias próxima
- Sondagem de Reconhecimento
 - Processos adequados (trado, pá e picareta, percussão, rotativa)
 - Mínimo de 1 furo em cada formação geológica / pontos + altos/ ± 1.000 m / 1,5 m abaixo do greide.
- Classificação Expedita
 - tátil-visual
 - qualitativa
 - Textura (granulometria): grau de finura e uniformidade do solo (bloco de pedra, matacão, pedra, pedregulho, areia, silte, argila).
 - Resistência à seco (ao quebrar)
 - o Pouco resistentes – siltes
 - o Mais resistentes – argilas
 - Compacidade: concentração de grãos por unidade de volume
 - o Solos arenosos (compacto ou denso/fofo)
 - Consistência: grau de adesão entre as partículas do solo / resistência à deformação
 - o Solos argilosos (dura, rija, mole).
 - Cor: varia com a umidade e composição química
 - o solos residuais de basalto → marrom avermelhado
 - o solo laterítico de basalto → vermelho
 - o depósitos orgânicos → pretos
 - o material com mica → branco ou amarelado
- Identificação do Lençol Freático
- Observações
 - boa identificação de campo reduz o número de ensaios de laboratório
 - podem ser efetuados eventuais ensaios de caracterização quantitativa (Granulometria, LL, LP, CBR, Proctor)

(C) Apresentação dos resultados**- Boletins de Sondagem**

Estaca	Furo N°	Posição	Profundidade (m)	N ° amostra	Classificação.	Obs.

- Quadros Resumos de Ensaios (eventual)**- Textos Explicativos**

- Relatórios

- Memoriais

- Mapas plani-altimétricos

- delimitação das U.G. (preliminar);

- características gerais (interações com relevo, clima, vegetação, hidrologia, pedologia);

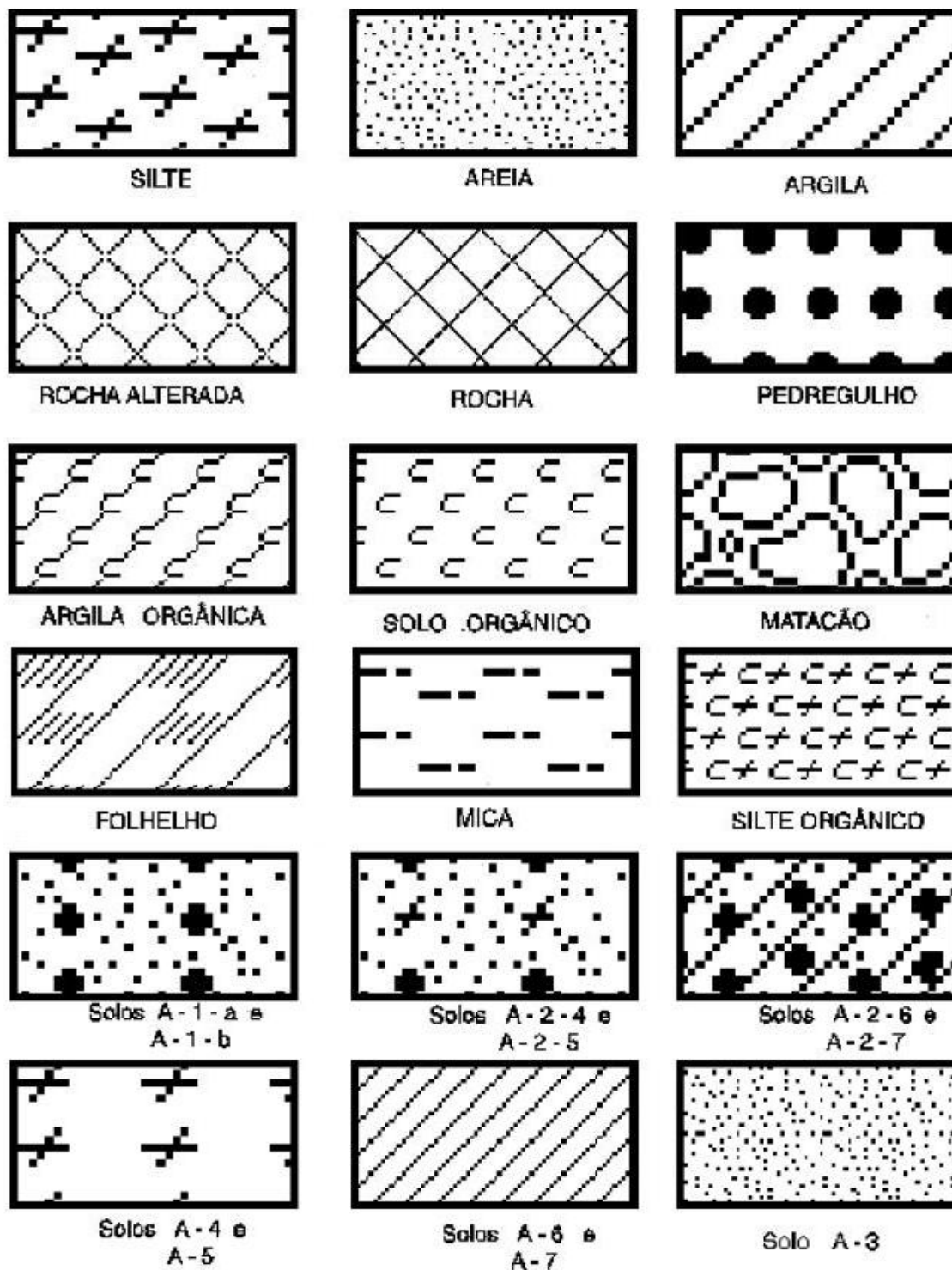
- ocorrências (jazidas, pedreiras, areias);

- áreas problema

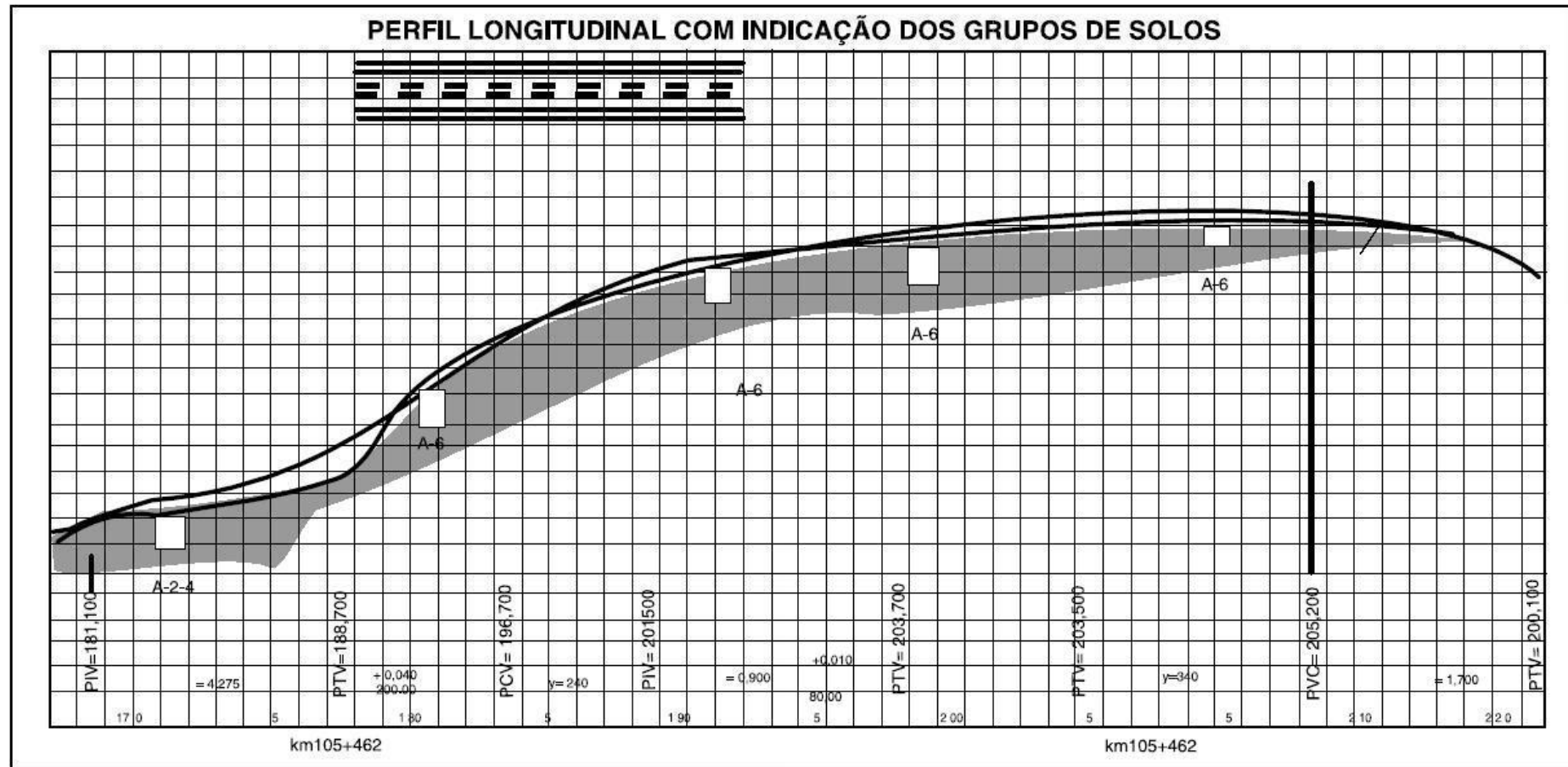
- Cortes Geotécnicos (Perfis)

QUADRO RESUMO DE ENSAIOS

[illegible]

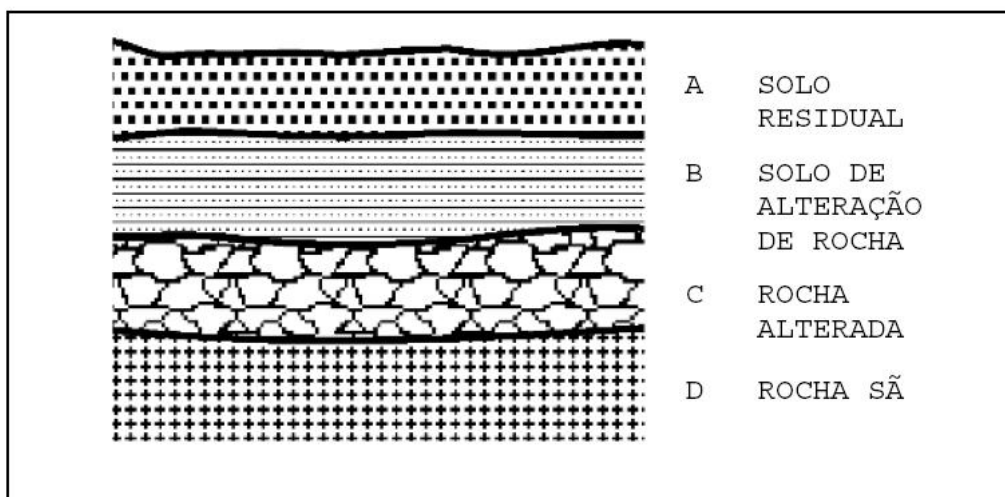


CONVENÇÃO PARA REPRESENTAÇÃO DOS MATERIAIS



- Origem dos solos

• Solos Residuais

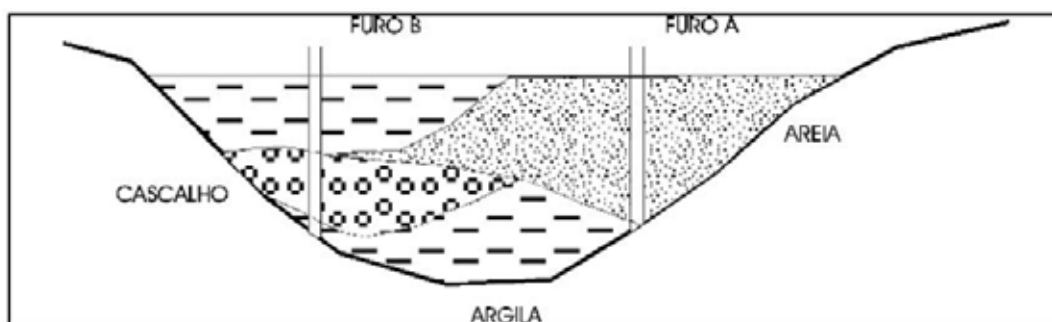


Perfil Resultante da Decomposição das Rochas

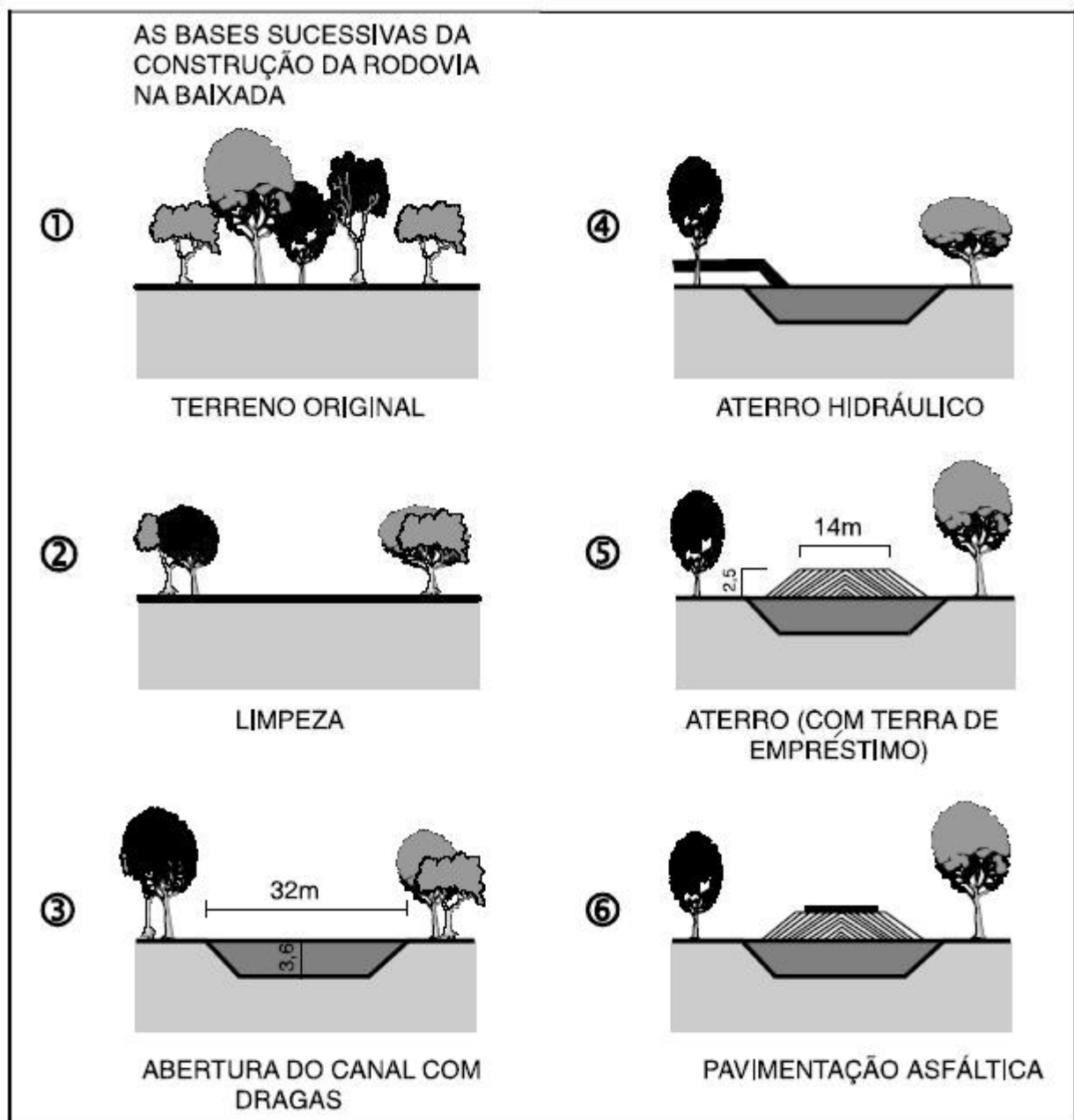
DECOMPOSIÇÃO DE ROCHAS			
Tipo de Rocha	Composição Mineral	Tipo de Solo	Composição
basalto	plagioclásio piroxênios	argiloso (pouca areia)	argila
quartzito	quartzo	arenoso	quartzo
filitos	micas (sericita)	argiloso	argila
granito	quartzo feldspato mica	areno-argiloso (micáceo)	quartzo e argila (micáceo)
calcário	calcita		argila

• Solos Transportados

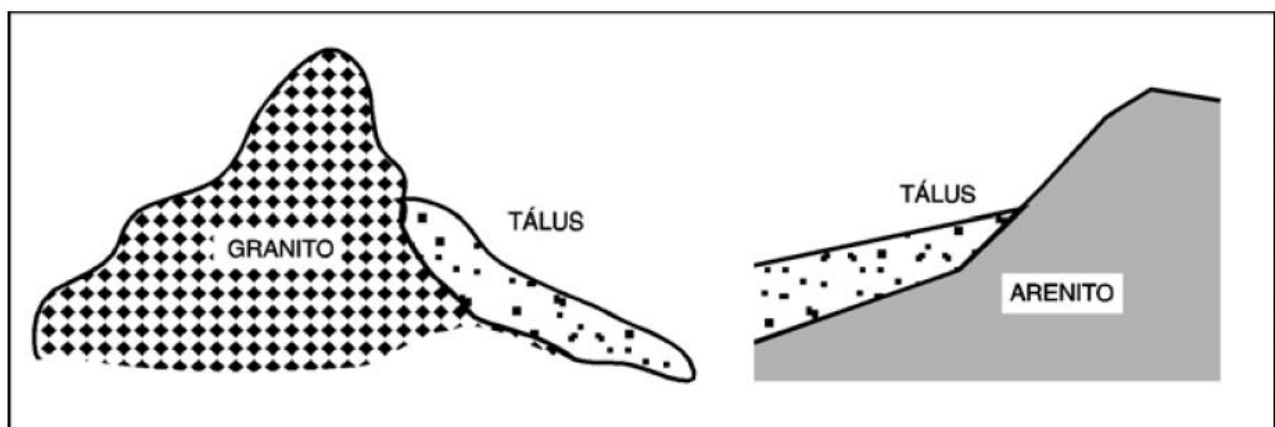
- Solos de Aluvião
- Solos Orgânicos
- Solos Coluviais
- Solos Eólicos



Local de Solos Transportados



Exemplo de Processo Construtivo de Rodovia em Região de Solos Orgânicos



Depósitos de Tálus

3.1.2.2 ESTUDO DEFINITIVO OU PRINCIPAL

3.1.2.2.1 Sondagens

(A) Espaçamento

- Espaçamento mínimo de 100 m
- Mínimo de 3 furos por corte, inclui o PP (ponto de passagem)
- Profundidade de 1,5 m abaixo do greide
- Insuficiência de informações - sondagens complementares ou intermediárias

1º Caso - $L \leq 200$ m

DESENHO

2º Caso - $L > 200$ m

DESENHO

(B) Tipos de Sondagem

X = profundidade da sondagem

- $X \leq 4$ m → trado natural ou pá e picareta
- $4 \text{ m} < X \leq 8 \text{ m}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Primeiros (X-4)} \rightarrow \text{pá e picareta} \\ \text{Últimos 4 m} \rightarrow \text{trado manual} \end{array} \right.$
- $X > 8 \text{ m}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Primeiros 8 m} \rightarrow \text{pá e picareta} \\ \text{Restante} \rightarrow \text{percussão ou rotativa} \end{array} \right.$

3.1.2.2.2 Ensaios

(A) Granulometria

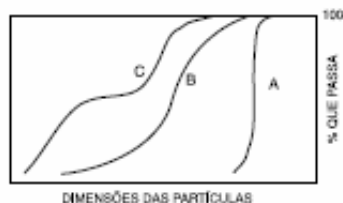
- Consiste na distribuição em peso das diversas dimensões das partículas constituintes do solo (peso dos grãos retidos em cada peneira)
- Análise Granulométrica
 - Peneiramento – fração grossa ($\varnothing > \# \text{ n}^\circ 200$)
 - Sedimentação – fração fina (lei de Stockes)
- Gráfico: Mono-log ($\varnothing$ grãos x % em peso)

- Curvas Granulométricas

I – Uniforme

II – Bem Graduada (contínua)

III – Descontínua

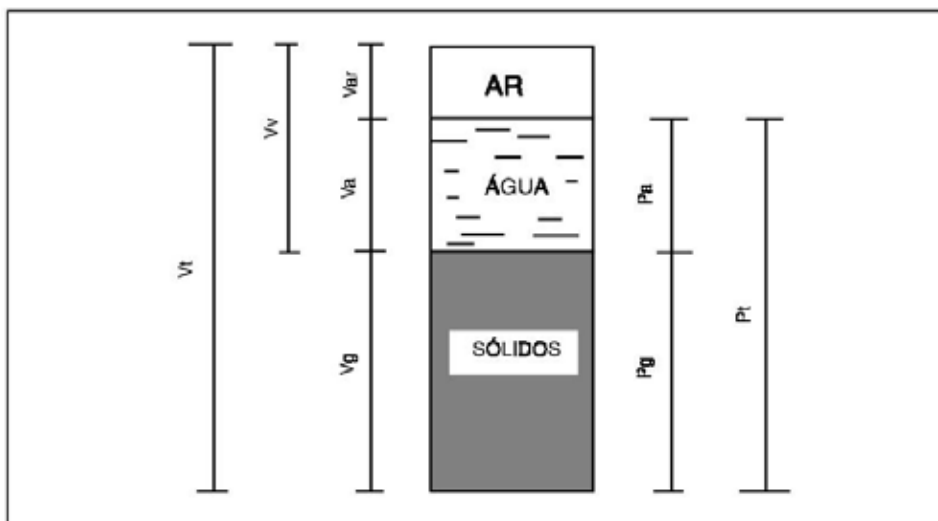


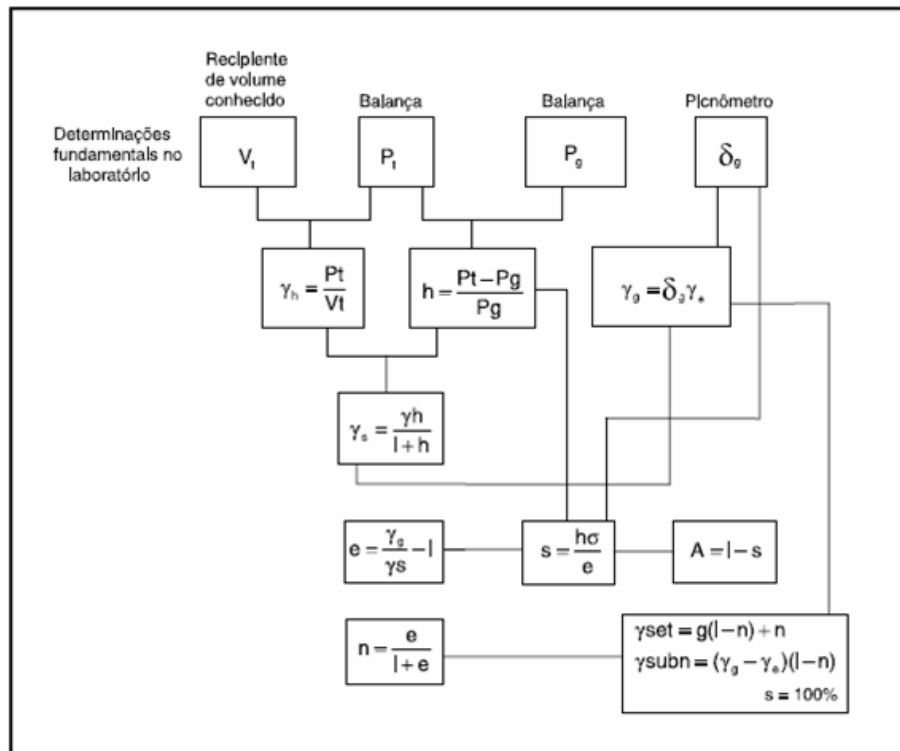
- Importância

- Classificação
- Drenagem (cond. filtro)
- Comportamento (estabilidade, resistência)
- Determinação faixas granulométricas (especificação)

(B) Índices Físicos

- Massa específica aparente úmida
- Massa específica aparente seca
- Massa específica real dos grãos dos solo
- Teor de umidade
- Índice de vazios
- Porosidade

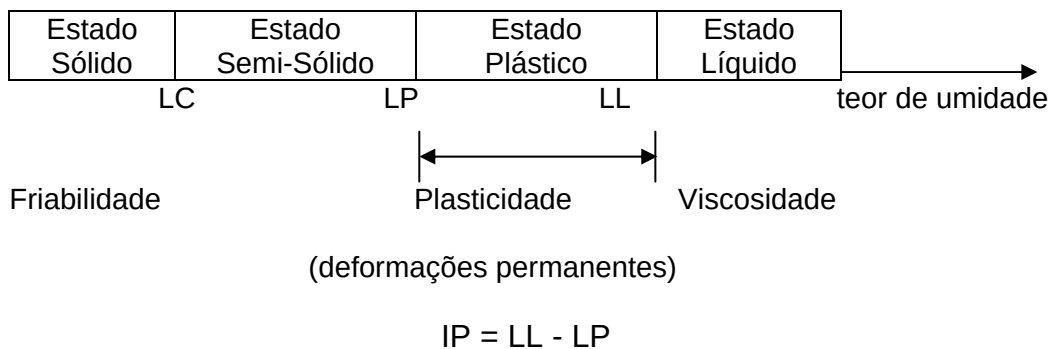




Correlações entre os Diversos Índices Físicos

(C) Limites de Consistência (Atterberg)

- permite avaliar a plasticidade dos solos finos - propriedade dos solos coesivos de poderem sofrer grandes deformações sem ruptura ou fissuramento.
- Capacidade de se moldar sem variação de volume em função da variedade da umidade
- Limites de Consistência (estado do solo em água)



(D) Massa Específica Aparente e Teor de Umidade

$$\gamma_A = \frac{M_T}{V} = \frac{P_T}{V}$$

- in situ (condição úmida)

Método Frasco de Areia

Cilindros cravados

$$h = \frac{M_{\text{água}}}{M_s} \cdot 100$$

- in situ

Frigideira

Speedy

Laboratório (estufa)

(E) Compactação

- Operação mecânica cujo objetivo principal é aumentar a densidade (massa específica aparente) pela aplicação de pressão, Impacto ou vibração. (Reduzir VV).

- Mecanismo

- Aumentar aproximação das partículas → diminuir VV (Var)
- Aumentar densidade = P / V → melhorar prop. mecânicas (resistência)
- Reduzir suscetibilidade à umidade → aumentar a estabilidade

- Estabilidade - permanência de um certo nível de resistência independente das variações climáticas, de tal modo que a estrutura não sofra danos ou rupturas significativas.

- Estudos de Proctor (1933)

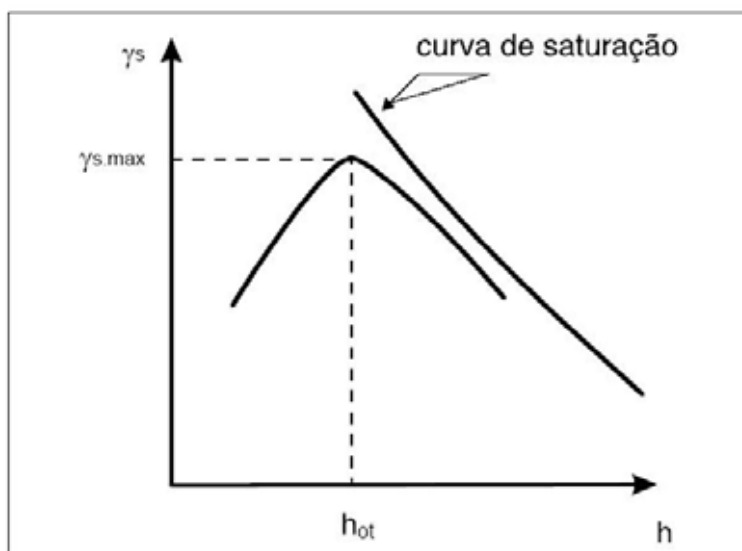


Gráfico de Compactação

Energia	Peso do Soquete (kg)	Altura de Queda (cm)	Nº de camadas	Nº de golpes	Volume do Cilindro (cm ³)
Normal	2,5	30,5	3	25	1000
Normal	4,5	45,0	5	12	2000
Intermediária	4,5	45,0	5	256	2000
Modificada	4,5	45,0	5	55	2000

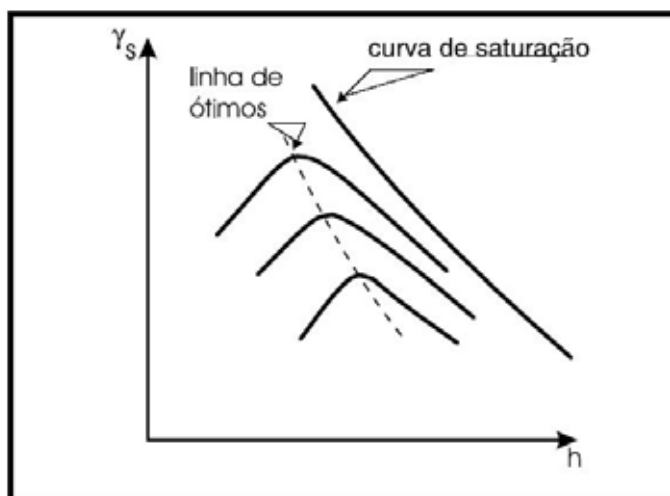
- Fatores Predominantes (GRÁFICOS)

- Teor de umidade
- Tipo de solo
- Energia de Compactação

$$E = \frac{P \times H_q \times N_c \times N_q}{N_t}$$

Normal → $E = 6 \text{ kg.cm/cm}^3$

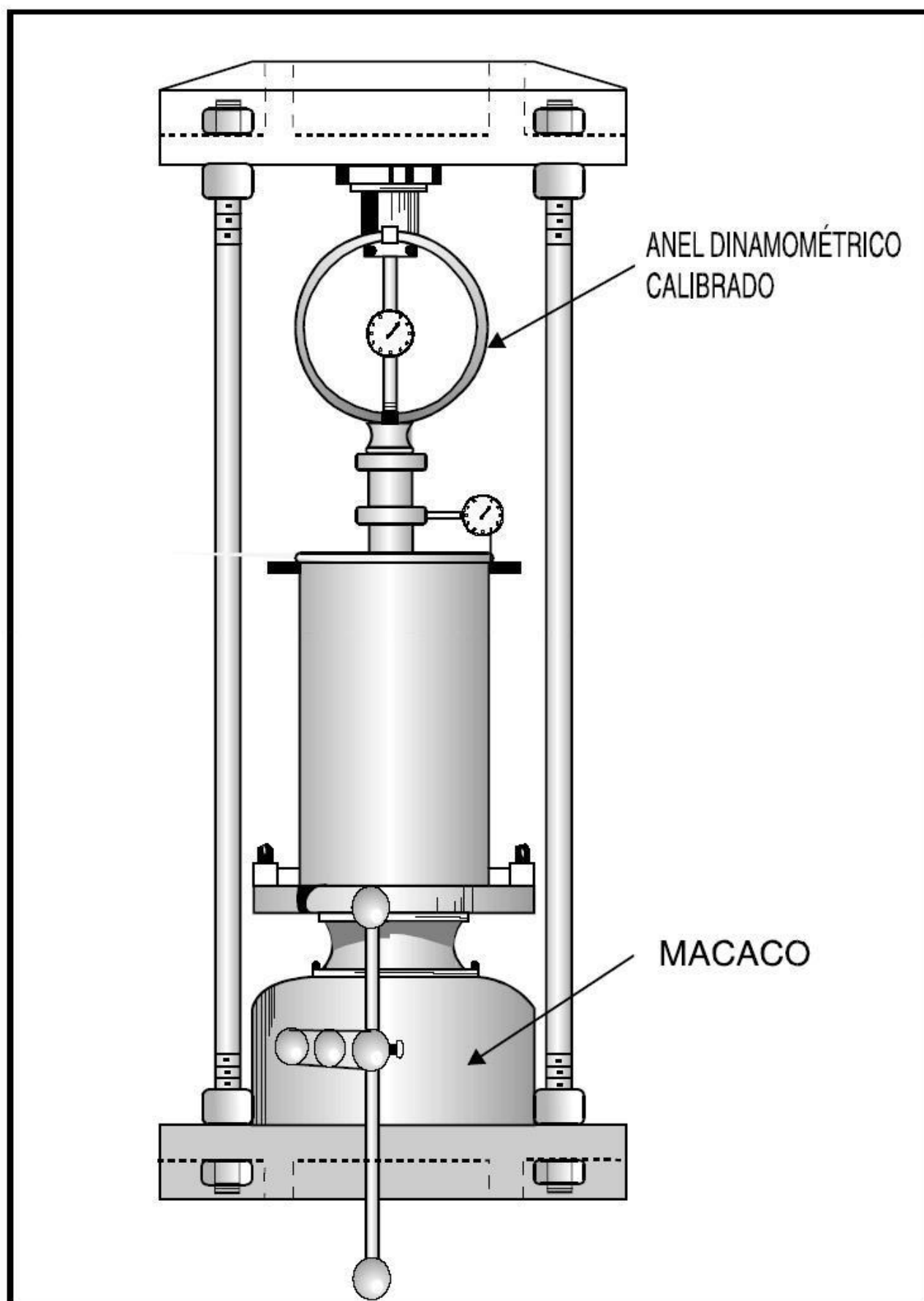
Modificado → $E = 25 \text{ kg.cm/cm}^3$



Curvas de Compactação para diferentes Energias de Compactação

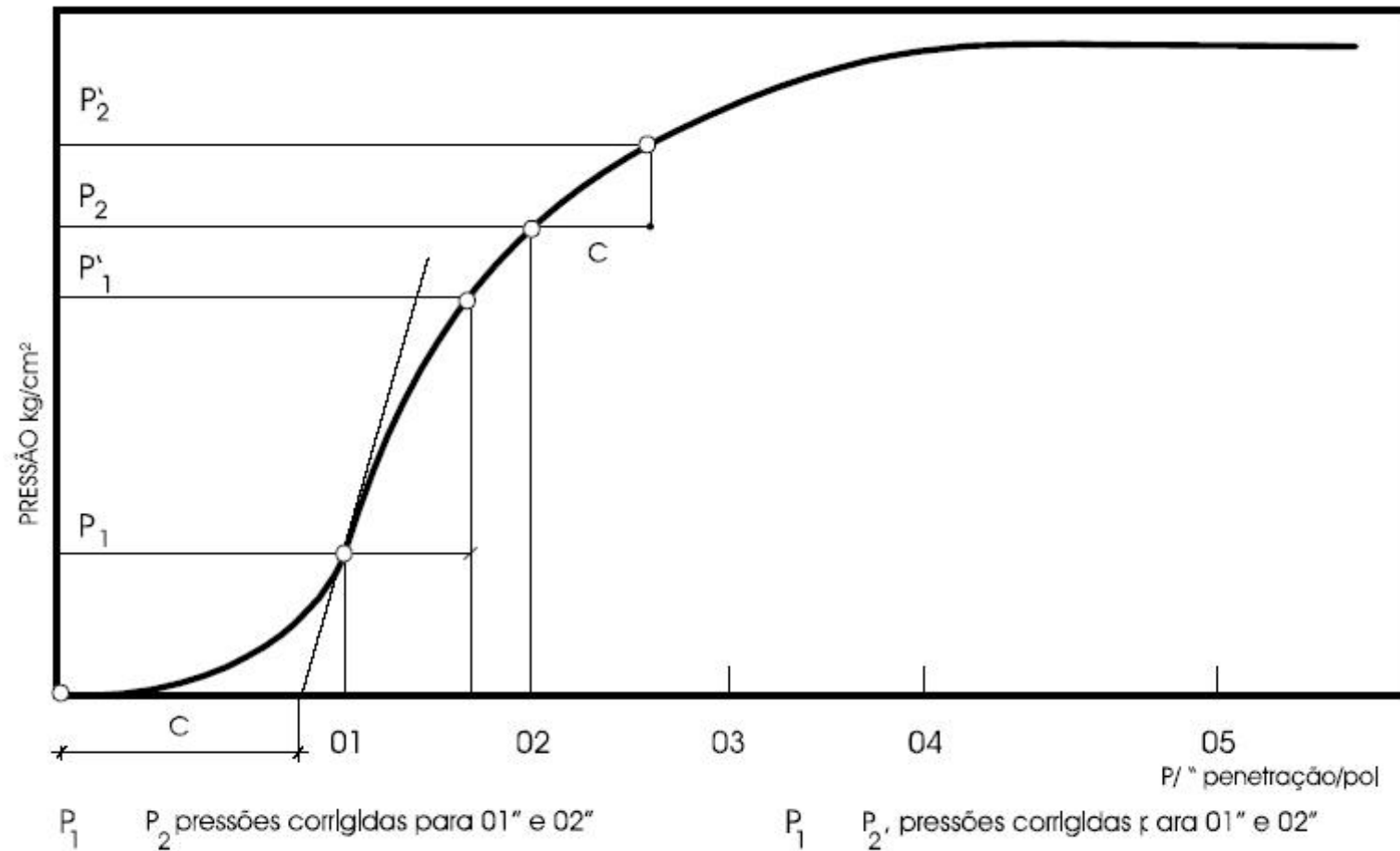
(F) Resistência

- CBR (California Bearing Rate) → ISC
- O.J. Porter (1939) → USACE (1943) → Hveen (1950)
- Etapas:
 - Corpos de prova do Ensaio de Proctor ($\gamma_{S \text{ máx}} \times h_{ot}$)
 - Imersão por 4 dias e posterior leitura de expansão
 - Ensaio de Penetração (Prensa / pistão metálico – 0,05 pol/mm)
 - $A = 3 \text{ "} = 19,37 \text{ cm}^2$; $\varnothing = 6 \text{ "}$; $h = 7 \text{ "}$
 - Sobrecarga = 10 lbs
 - Curva pressão x deformação
 - 0,025"; 0,05"; 0,1"; 0,2"; ...



Prensa para índice de Suporte Califórnia

ENSAIO DE CBR



Curva pressão – penetração

$$\text{Penetração } 0,1'' (2,54 \text{ mm}) \rightarrow \text{CBR}_1 = \frac{F_1}{70,31.A} \quad \text{ou} \quad \text{CBR}_1 = \frac{p_1}{70,31} \cdot 100$$

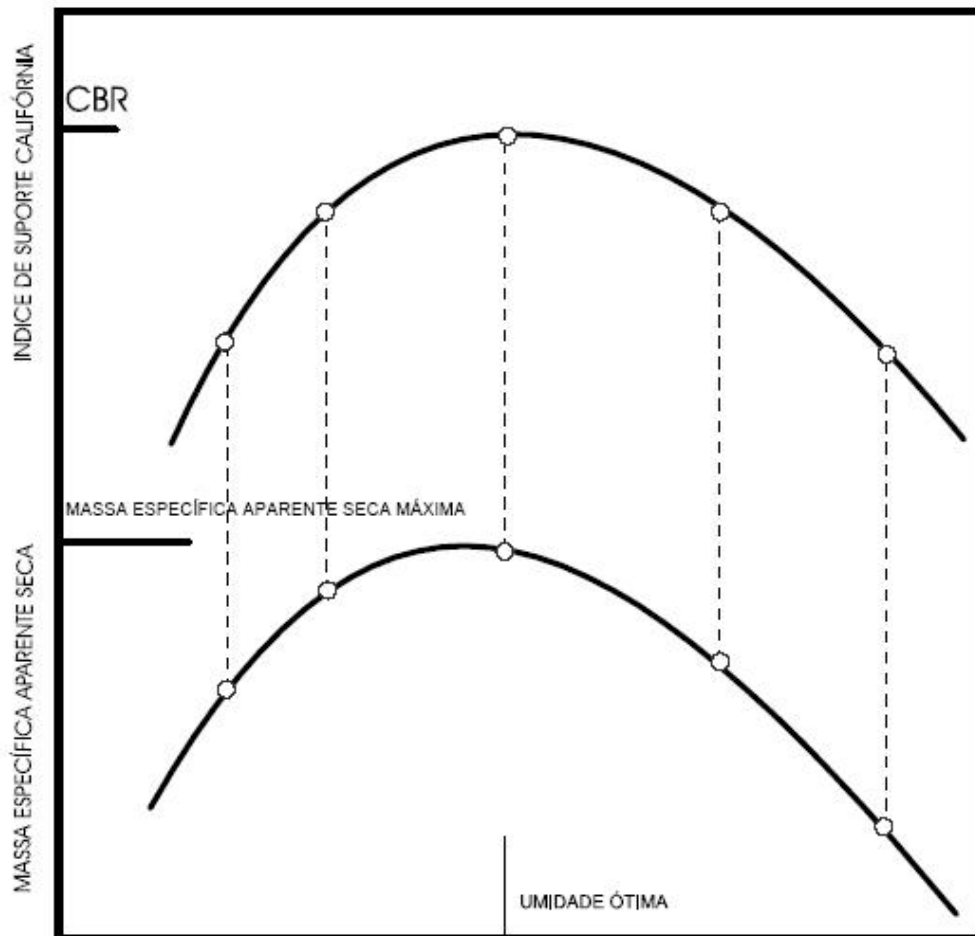
$$\text{Onde } F_1 = 1362 \text{ kg; } 1000 \text{ psi} = 70,31 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Penetração } 0,2'' (5,08 \text{ mm}) \rightarrow \text{CBR}_2 = \frac{F_2}{105.A} \quad \text{ou} \quad \text{CBR}_2 = \frac{p_2}{105,46} \cdot 100$$

$$\text{Onde } F_1 = 2043 \text{ kg; } 1500 \text{ psi} = 105,46 \text{ kg/cm}^2$$

$\text{CBR}_1 > \text{CBR}_2 \rightarrow \text{CBR}$

$\text{CBR}_1 < \text{CBR}_2 \rightarrow \text{repete, se persistir } \text{CBR}_2$



Curvas massa específica – umidade e CBR – umidade

- Observações:

- Avalia indiretamente a ruptura por cisalhamento sob carga estática
- Valor comparativo
 - o $\text{CBR} = 100\%$ (Valor de referência)
 - o $\text{CBR} > 80$ (base)
 - o $\text{CBR} > 20$ (sub-base)
 - o $\text{CBR} > 10$ (reforço)
 - o $\text{CBR} > 5$ (subleito)
- Condição de saturação $\rightarrow$ exagerada

(G) Resiliência dos Solos

Resiliência ou deformação resiliente (ε_r) é a deformação elástica ou recuperável de solos e estrutura de pavimentos sob a ação de cargas repetitivas.

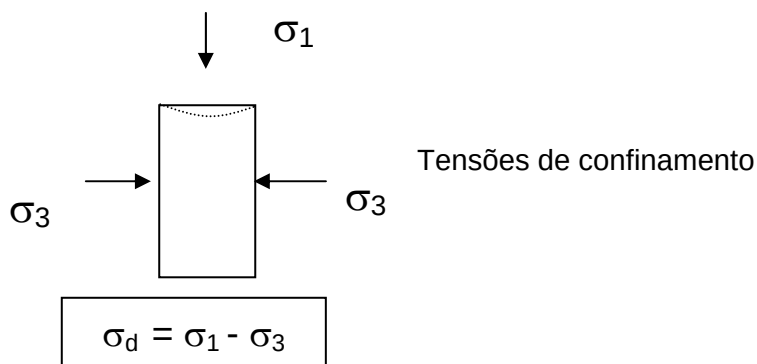
$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

M_R = Módulo Resiliente

σ_d = tensão de desvio aplicada repetidamente

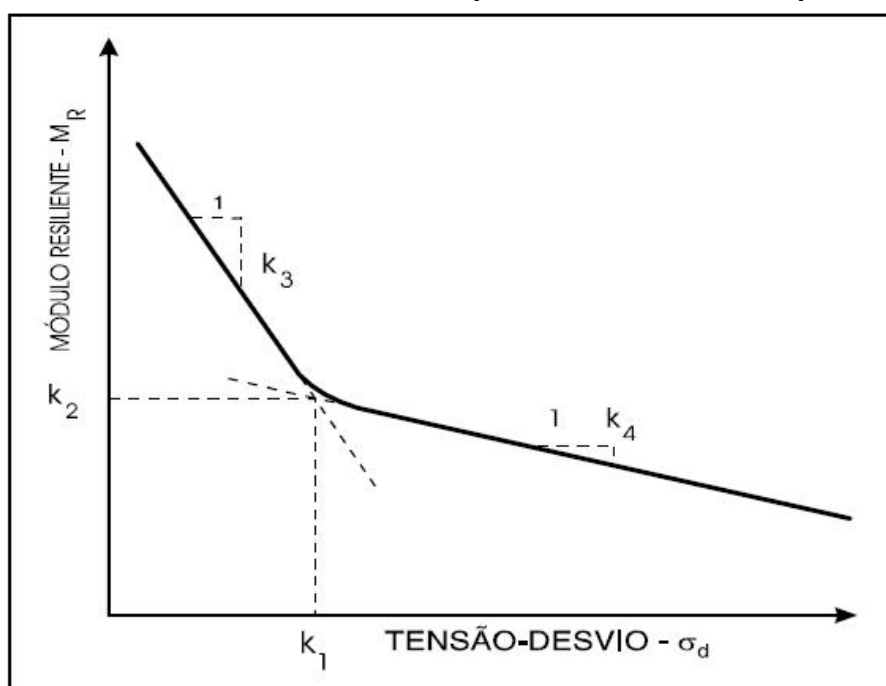
ε_r = deformação específica axial

- Obtido em ensaio triaxial dinâmico → simula condições de trabalho

Tensões verticais repetidas

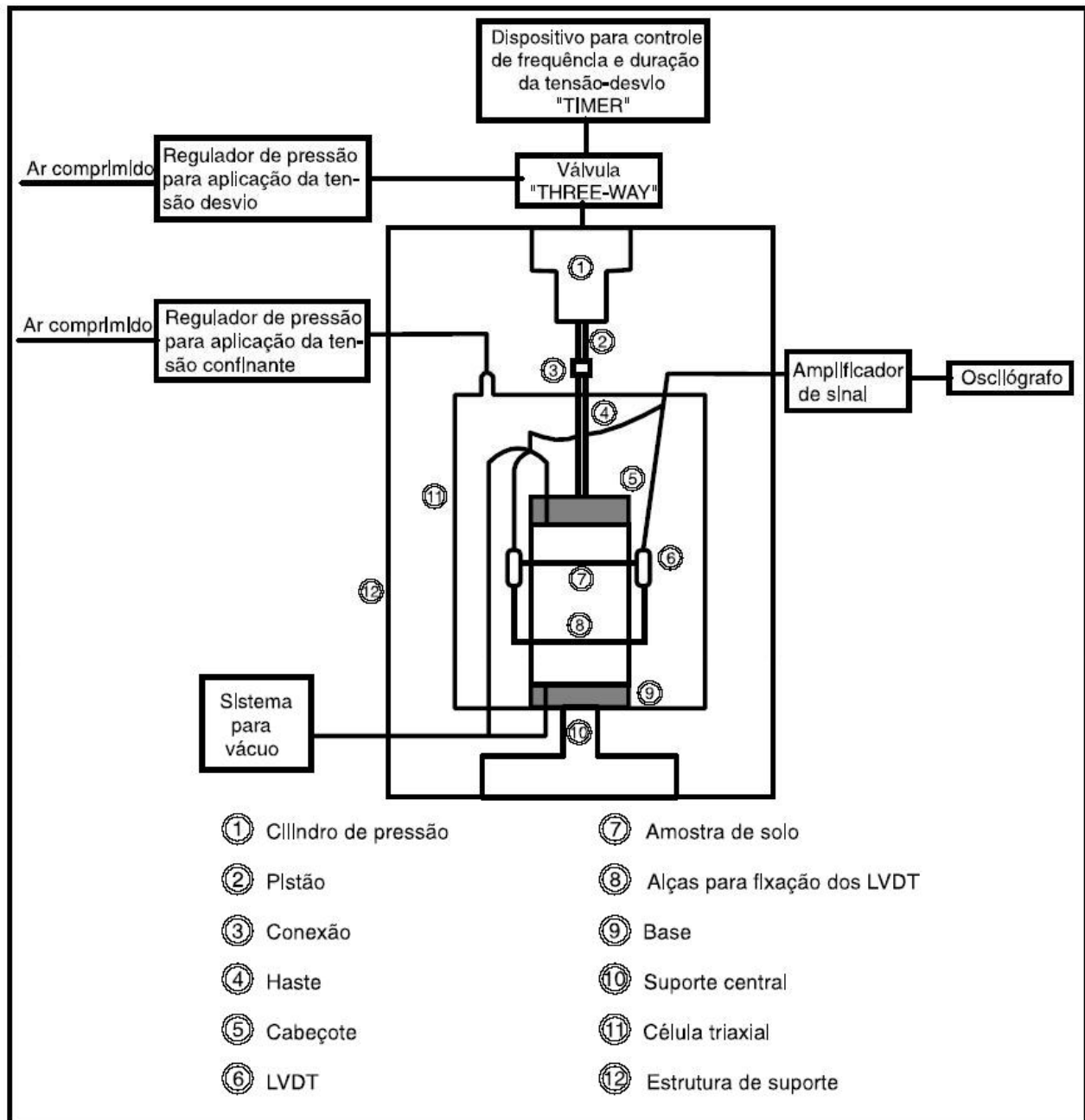
$\varepsilon_r = f(\sigma_d) \rightarrow$ comportamento não linear

$\varepsilon_r = f(\text{n}^\circ \text{ repetições, tipo de solo, duração e frequência do carregamento, estado de tensões, nível de carregamento}).$

MÓDULO RESILIENTE = f (ESTADO DE TENSÕES)

- **Ensaio Triaxial Dinâmico.**

- Preparação de corpos-de-prova ($\varnothing = 5 \text{ cm}$ e $h=10 \text{ cm}$)
 - Instalação do C.P. na câmara triaxial
 - Aplicação de pressão confinante (σ_3)
- Sequência de carregamentos verticais dinâmicos (σ_d)
 - Medições de deformação (LVDT)



(H) Classificação de solos

- **Classificação Tradicional (HRB / AASHO)**

- Solos Granulares ($p_{200} < 35\%$)
 - A -1 – Pedregulho
 - A -3 – Areia fina
 - A -2 – Areia siltosa / argilosa
- Solos Coesivos ($p_{200} > 35\%$)
 - A-4 e A-5 – Solos siltosos
 - A-6 e A-7 – Solos argilosos

CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N.º 200							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS Mais de 35% passando na peneira N.º 200			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
N.º 10.....	50 máx.										
N.º 40.....	30 máx.	30 máx.	51 min.								
N.º 200.....	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira N.º 40:											
Limite de Liquidez.....				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade.....	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo.....	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Quadro 8

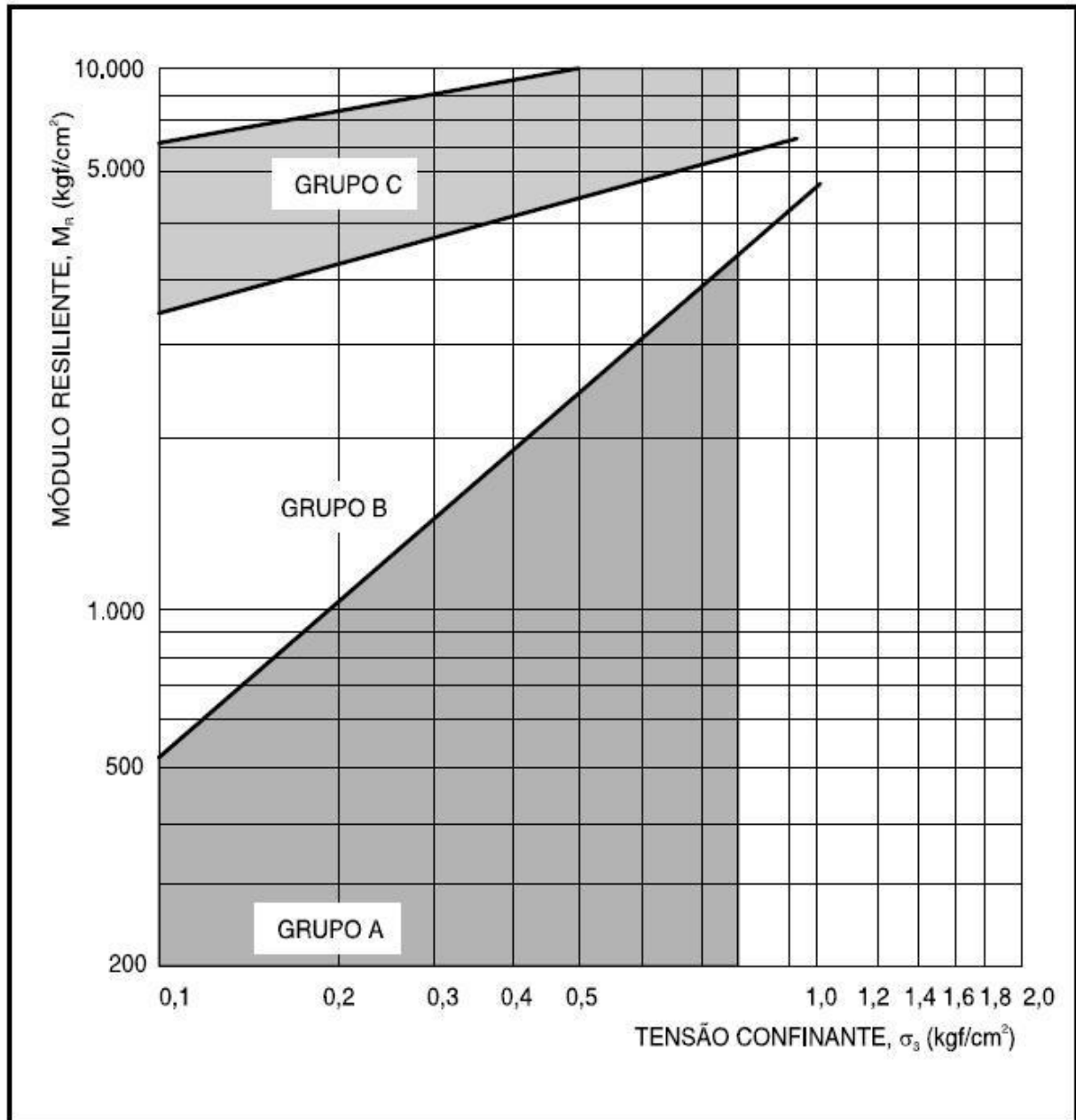
* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

• **Classificação Resiliente - Grupos**

- Solos Granulares ($\rho_{200} < 35\%$)

A (resiliência elevada), **B** (res. Média), **C** (res. Baixa)

$$\uparrow M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \uparrow \text{ (relação linear)}$$



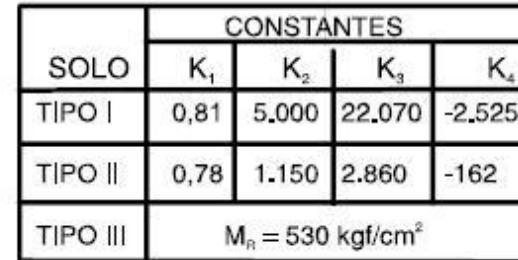
Classificação Resiliente de Solos Granulares

- Solos Coesivos ($\rho_{200} > 35\%$)

I (comportamento bom), II (comp.regular), III (comp. ruim)

$$\uparrow MR = f(1/\sigma_d) \downarrow \text{ (relação bilinear)}$$

$$M_R = k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_a') \quad M_R = k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1)$$



Classificação dos Solos Finos (Método Indireto)			
CBR	S%		
	≤ 35	35 - 65	≥ 65
≤ 5	III	III	III
6 - 9	II	II	III
≥ 10	I	II	III

Solo Tipo I: $M_R = 4874 \sigma_d^{-1,129}$

Solo Tipo II: $M_R = 1286 \sigma_d^{-0,5478}$

Solo Tipo III: $M_R = 530 \text{ Kg/cm}^2$

- **Classificação MCT**

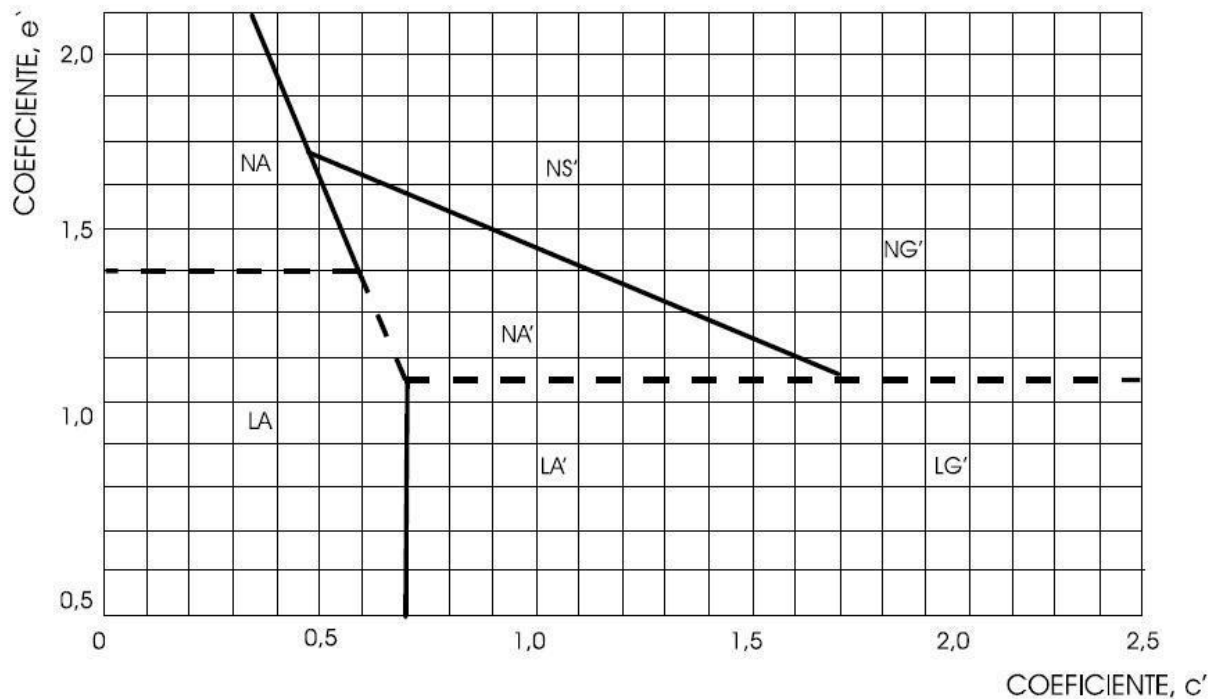
- Solos Tropicais (Lateríticos e Saprolíticos)
 - Área Tropical - ¼ superfície dos continentes
 - Solos lateríticos - 21% (ferralsols)
- Solo Saprolítico
 - Solo no sentido geotécnico
 - Estrutura residual herdada da rocha matriz
- Solo Laterítico
 - Horizonte A e B / bem drenados
 - Argila-minerais Ca, Fe, Al
 - Estáveis de estrutura porosa
 - Distr. granulométrica descontínua (falta areia) → excelente comportamento

- **Metodologia MCT**

- Miniatura Compactada Tropical / Nogami e. Villabor
- Parâmetros e propriedades geotécnicas próprio clima tropical
- Corpos de prova de dimensões reduzidas ($\varnothing = 5 \text{ cm}$; $h = 5 \text{ cm}$)

- **Método MCV(Moisture Condition Value) → família de curvas**

- Mini MCV = $10 \log. N$
- Curvas de Compactação
- Perda de por imersão (P_i)
- Parâmetros classificatórios: c' , d' , P_1 e e'



N - Solos de comportamento não laterítico

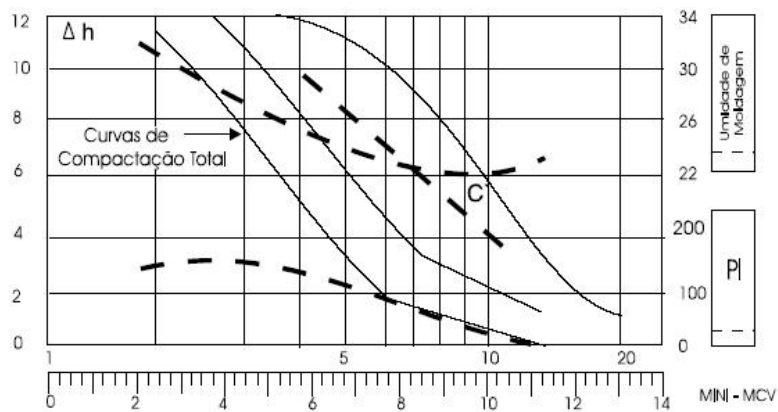
L - Solos de comportamento laterítico

A - arelas

A' - arenosos

S' - silty

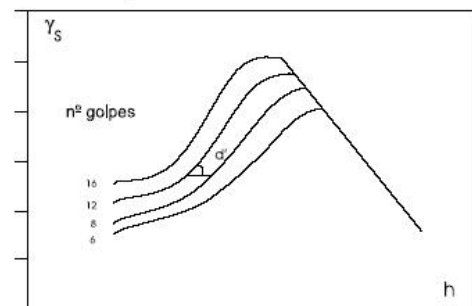
G' - argilosos



— $\Delta H \times n^\circ$ de golpes

- . - Umididade de moldagem $\times$ MINI - MCV

..... PI $\times$ MINI - MCV



$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{20}{d^4} + \frac{PI}{100}}$$

Ábaco para classificação MCT

- Classif. HRB / AASHO → Subestima lateríticos

Superestima saprolíticos

- Discrepâncias nas propriedades hidráulicas e mecânicas não considerando aspectos geológicos e pedológicos
- Necessidade de conhecimento dos solos tropicais como material de construção

- Classificação separa solos de comp. laterítico e saprolítico = $f(c', e')$

N = não lateríticos

L = lateríticos

A = areias

A' = arenosos

S = siltosos

G = argilosos

CLASSIFICAÇÃO MCT

CLASSES				N - SOLOS DE COMPORTAMENTO “NÃO LATERÍTICO”				L - SOLOS DE COMPORTAMENTO “LATERÍTICO”			
GRUPOS				NA AREIAS	NA' ARENOSOS	NS' SILTOSOS	NG' ARGILOSOS	LA AREIAS	LA' ARENOSOS	LG' ARGILOSOS	
GRANULOMETRIA TÍPICA (MINERAIS) (1)				areias, areias siltosas, siltes (q)	areias siltosas, areias argilosas	silte (k, m), siltes arenoso e argilosos	argilas, argilas arenosas, argilas siltosas	areias com pouca argila	areias argilosas, argilas arenosas	argilas, argilas arenosas	
CAPACIDADE DE	MINI CBR sem imersão (%)	muito alto > 30		alto a médio	alto	médio a alto	alto	alto	alto a muito alto	alto	
		alto 12-30									
		médio 4-12									
		baixo < 4									
SUPORTE (2)	Perda de Suporte por imersão (%)	alta > 70		média a baixa	baixa	alta	alta	baixa	baixa	baixa	
		média 40-70									
		baixa < 40									
EXPANSÃO	(%)	alta > 3		baixa	baixa	alta	alta a média	baixa	baixa	baixa	
		média 0,5-3									
CONTRAÇÃO	(%)	média 0,5-3		baixa a média	baixa a média	média	alta a média	baixa	baixa a média	média a alta	
		baixa < 0,5									
PERMEABILIDADE log (k(cm/s))	(2)	alta > (-3)		média a alta	baixa	média a baixa	baixa a média	média a baixa	baixa	baixa	
		média (-3) a (-6)									
		baixa < (-6)									
PLASTICIDADE	(%)	IP	LL	baixa a NP	média a NP	média a alta	alta	NP a baixa	baixa a média	média a alta	
		> 30	> 70								
		média	7-30								30-70
		baixa	< 7								< 30
PROPRIEDADES TÍPICAS DOS GRUPOS DOS SOLOS: (1) q = quartzo, m = micas, k = caulinita; (2) Corpos-de-prova compactados na unidade ótima da energia “normal”, com sobrecarga padrão quando pertinente, sem fração retida na peneira de 2mm de abertura.											

(I) ANÁLISE DAS CLASSIFICAÇÕES

- CBR x Classificação TRB
- Classificação Resiliente x MCT
- Relação Módulo – CBR x Classificação MCT
- CBR x % de argila

Valores prováveis de CBR para os grupos de Classificação TRB

Solos	CBR
A-1-a	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 80
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 80
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	menos de 2 a 10
A-6 e A-7	menos de 2 a 15

Interrelação entre a Classificação MCT e Resiliente

MCT	Resiliente	Predominância	Comportamento
NA	III	III	grau de resiliência alto
LA	III	III	grau de resiliência alto
NA'	II - III	II	grau de resiliência médio e alto
NS'	II - III	II	grau de resiliência médio a alto
NG'	II - I	II	grau de resiliência médio a baixo
LA'	II - I	II - I	grau de resiliência médio a baixo
LG'	I - II	I	grau de resiliência baixo

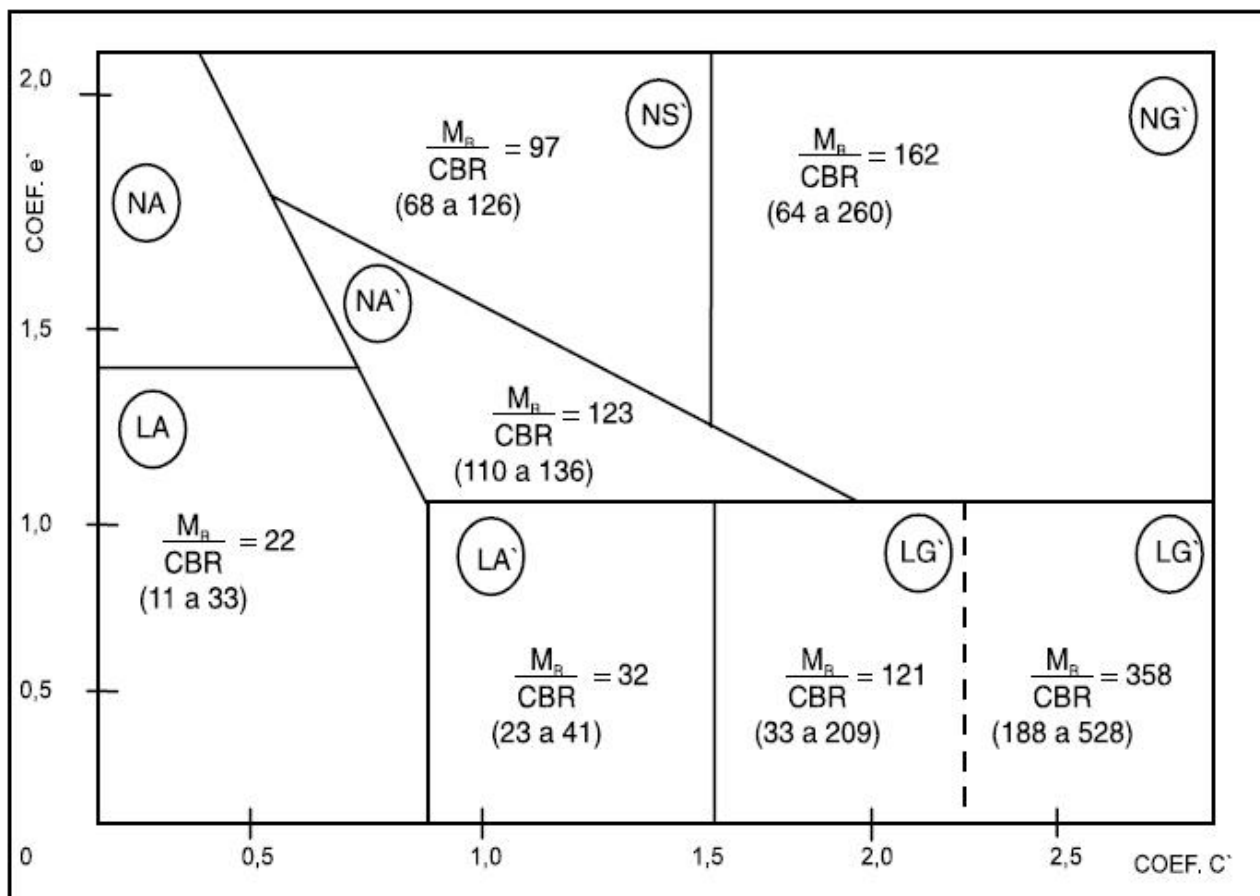
- Dificuldades em se associar as classificações, especialmente para solos finos (A-6 e A-7).
- Solos granulares
 - Resistência a penetração elevada (atrato) – CBR
 - Deformação elástica elevada
- Solos coesivos
 - Resistência a penetração baixa
 - Deformação elástica baixa (coesão) – MR

- Relação MR / CBR

- Indica mais adequadamente a natureza dos solos do que MR e CBR isoladamente.

Relação Módulo - CBR		
Grupo	CBR/ (%argila)	M _R /CBR
G	Maior que 0,474	40
I	Entre 0,202 e 0,474	120
C	Menor que 0,202	440
SAF*	-	700

* Solo arenoso fino



Variação da Relação Módulo - CBR com Classificação MCT

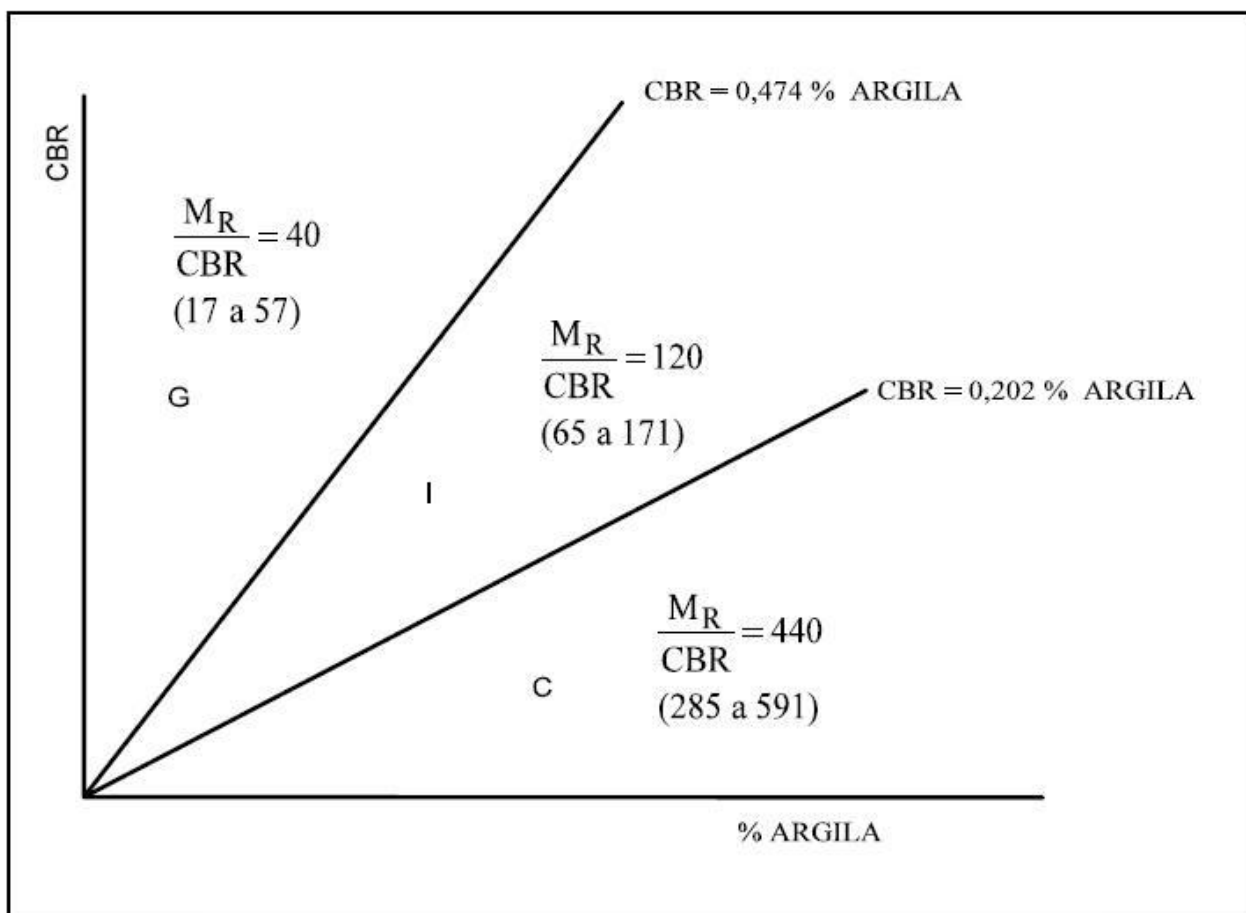


Gráfico CBR versus Porcentagem de Argila