

# Àcerca da Compactação de Estradas

## ***Textos base:***

***H. Novais Ferreira - Seminário 249 - LNEC, 1981***

***SETRA - LCPC - Rec. Terr. Rout., Paris, 1976***

- **Aspectos da Teoria de Compactação**
- **Curvas de Compactação em Laboratório**
- **CBR**
- **Execução dos Trabalhos de Terraplenagens. EXECUÇÃO DE ATERROS E DE CAMADAS DE FORMA**
- **Equipamento de Compactação**
- **Controlo de Qualidade**

## Caracterização geral da problemática

São factores de caracterização da estrada:

- Inserção na paisagem.
- Coordenação do traçado em planta e perfil.
- Traçado longitudinal com declives não muito fortes e curvas com concordâncias apropriadas.
- Grandes raios de curvatura em planta...

Os aspectos a ter em conta nos trabalhos de terraplenagens:

- Estudos geológicos, geotécnicos e prospecção.
- Conhecimento dos solos: ensaio in situ e em laboratório.
- Balanço entre aterros e escavações.
- **Mecânica dos solos: estabilidade e deformação das obras (fundações, taludes, escavações e aterros).**
- Meteorologia e água nos solos.

## Os aspectos a ter em conta nos trabalhos de terraplenagens (cont.):

- Preparação dos terrenos: eliminação ed camadas vegetais, acessos e circulação.
- Execução: métodos de escavação, transporte e colocação; equipamento; sequência de operações; “defesa” da água.
- **Controlo de execução (prévio, durante e após execução):** escolha das propriedades, ensaios de controlo de terraplenagens; apreciação dos resultados.
- **Tratamento dos solos:** granulométricos, químicos e com aglomerados hidráulicos ou betuminosos.
- **Trabalhos especiais:** zonas **lodosas** ou de solos fracos; zonas de **solos expansivos**; zonas de solos de características **peculiares** ou de **execução difícil**: *aterros junto de obras de arte*; **drenagem**; **filtros**; uso de **telas**; acabamento de superfícies e preparação da **caixa**; revestimento de **taludes**.

## ***Sobre as classificações de solos***

*A aferição da aptidão de um solo como material geotécnico, exige o estabelecimento de classes. Assim apereceram:*

### **Classificação unificada de solos**

**ASTM D2487/85:** baseada na classificação de Casagrande para construção de aeroportos, sistematiza os solos como material de: **aterros de estradas, aeródromos e, particularmente barragens de terra.** Utiliza **dois factores principais: granulometria e limites de consistência.**

### **Classificação para fins rodoviários**

Inspirada na classificação da "American Assoc. of State Highway Officials" (**AASHO M145**): mais **especifica para estradas**, deve-se salientar que se **aplica só à fracção passada no peneiro de 75mm e**, por isso, deve-se **registar a eventual presença de material de dimensões superiores.**

## ***Notas preliminares sobre a compactação***

Em **obra** os processos mais usados são o **pisoamento e a vibração.** Em **laboratório** usa-se o **apiloamento.** Aqui, os ensaios procuram avaliar a influência dos dois factores primordiais: o **teor em água e a energia de compactação.**

## Métodos de ensaio

Dois moldes diferentes (o molde pequeno ou de "Proctor", com diâmetro interior de 101,6mm e altura de 116,43mm, e o molde largo ou "CBR" com diâmetro interior de 152,4mm e a mesma altura), conforme a dimensão máxima do solo, e duas energias de compactação ⇒ **oito tipos de ensaios**.

***Adaptação à obra:*** as duas energias de compactação (normal ou Proctor e AASHO modificada ou pesada) são usadas conforme as exigências do caderno de encargos da obra.

### Das curvas de compactação resultantes.

Novais-Ferreira (1981) prova que, num solo tipo, a baridade seca varia linearmente com o volume relativo da fase gasosa e o seu inverso com o índice de vazios do ar e com o teor em água.

**Para o volume relativo de ar nulo ⇒ a linha de saturação (ou "linha zero") através da equação:**

$$\frac{1}{\gamma_d} = \frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{\gamma_w}$$

As curvas de compactação estão sempre à esquerda desta linha.

## Curvas típicas

Estudos realizadas pelo Ohio State Highway Testing Laboratory (1949) sobre **10 149 amostras de solos diferentes permitiu obter 26 tipo médias (A a Z)** com baridades secas crescentes e teores em água óptimos decrescentes ⇒ Figura...

## Curvas típicas - tendências “normais”

Os solos apresentam, em geral, curvas de compactação semelhantes a uma das curvas tipo. No entanto, acontece frequentemente que solos com igual baridade seca máxima apresentam ramos ascendentes diferentes da correspondente curva tipo. Ter-se-ão então **três tipos de inclinações**:

- **curvas normais**: próximas das curvas tipo;
- **curvas achatadas**: menos sensíveis à variação do teor em água;
- **curvas agudas**: mais sensíveis aquela variação.

Pode ainda verificar-se que os máximos das curvas de compactação se encontram mais à esquerda ou à direita do máximo da curva tipo...

**Novais-Ferreira (1962) apresenta uma equação dos máximos das curvas médias de compactação (normal), que designou por linha média dos máximos ou linha "m":**

$$\frac{1}{\gamma_{dmax}} = \frac{1}{G \cdot w} + 1,20 \frac{w_{opt}}{\gamma_w}$$

Verificou que, nas coordenadas  $1/\gamma_d$  e  $w$ :

- os **ramos secos** são rectilíneos com um ponto comum de coordenadas:  $\gamma_d = 1,0g/cm^3$  ;  $w = 50\%$
- os **ramos húmidos** são rectilíneos com um ponto comum de coordenadas:  $1/\gamma = 1/G \cdot w$  ;  $w = 0$

sobrepostos a rectas de equação

$$1/\gamma_d = const + 1,05w/\gamma$$

O ponto de cruzamento dos ramos rectilíneos não coincide com o máximo da curva de compactação, estando as coordenadas deste relacionadas com as coordenadas daquele por:

$$\gamma_{dmax} = 1,011 \cdot \gamma_i - 0,036$$

$$w_{opt} = 0,96 \cdot w_i + 0,004$$

a curva de compactação tem as particularidades de:

- a abertura da curva aumentar com a finura do solo e com a diminuição do coeficiente de uniformidade:  
*nos solos arenosos e/ou com granulometria uniforme  $\gamma$  é mais sensível à variação do teor em água;*
- baridade seca máxima aumenta com o diâmetro máximo do solo e/ou com a boa graduação da granulometria: *granulometrias mais extensas;*
- o teor em água óptimo aumentar com a finura do solo.

**Em relação à linha " m ", atrás definida, as granulometrias mais uniformes situam-se à esquerda enquanto as mais extensas se situam à direita daquela** - sintomático de melhor

trabalhabilidade e capacidade de preenchimento dos vazios dos grossos, pelos grãos mais finos, dos solos de granulometria melhor graduada.

Os solos arenosos monogranulares não apresentam máximos definidos (as areias são geralmente tratadas a partir de índices de vazios críticos e a compactação em laboratório é feita com vibração).

**Efeito da energia de compactação:** o seu aumento leva a aumento de  $\gamma_{dmax}$ , diminuição de  $w_{opt}$  e a uma diminuição da abertura da curva (para grandes energias a sensibilidade ao teor em água é maior).

## **CBR (Índice de Resistência Californiano)**

Quociente da força necessária para fazer penetrar um cilindro, segundo determinadas condições, com uma dada secção, num terreno, pela força necessária para realizar igual penetração num material tipo (expresso em %)  $\Rightarrow$  **LNEC E198-1967**.

**Objectivo:** realizado "in situ" ou em laboratório, visa definir a **espessura do pavimento a usar sobre o terreno ensaiado**.

Em obra pode ser realizado sobre todos os tipos de solos, embora não seja comum para solos com diâmetro máximo maior que 25mm. Em laboratório só é usado para solos com menos de 20% do material retido no peneiro de malha de 19mm (3/4").

Realiza-se normalmente a penetração pela face superior, podendo-se efectuar pela face inferior para conhecer a relação entre esses valores e ficar com uma ideia da sensibilidade do solo à embebição.

Verifica-se uma razoável correlação entre o peso volúmico seco e o CBR quando varia a energia de compactação, a teor em água constante:

$$\log CBR = a + b\gamma_d (w=const)$$

**a e b:** parâmetros dependentes do solo, teor em água.

Obtem-se uma equação de correlação em que, num gráfico de  $CBR/\gamma_d$ , os pontos são envolvidos por rectas concorrentes num ponto de coordenadas:

$$\gamma_d = 2,3 \text{ g/cm}^3 \text{ e } CBR = 543\%$$



As curvas  $CBR = f(\gamma_d)$ , para cada energia de compactação, descrevem um arco no sentido dos ponteiros do relógio e encontram-se inscritas num ângulo formado por duas rectas que concorrem no ponto atrás definido. **Essas rectas são tanto mais próximas (menor ângulo) quanto menor for a diferença entre teores em água de compactação e mais grosseiro for o solo. Apresentam ainda tanto maior inclinação quanto mais grosseiro for o solo e maior for o teor em água de compactação.**

O máximo de CBR obtem-se em geral para:

$$w < w_{opt} \text{ e } \gamma_d < \gamma_{d \text{ máx}}$$

Uma comparação das curvas dos **solos arenosos com os argilosos** indica-nos que:

- nos solos arenosos a baridade é menos variável com a energia de compactação;
- também iguais variações de  $\gamma_d$  fazem variar mais o CBR; e
- iguais variações de  $w$  fazem variar mais a baridade e proporcionalmente mais o CBR.

### **NOTA :**

Em especificações normais de obra (ex:  $\gamma_d \geq 0,95 \gamma_{dmáx}$  e  $w_{opt} - 0,02 \leq w \leq w_{opt} + 0,02$ ) o valor do **CBR** de projecto é o ponto de menor valor deduzido da zona limitada pelas rectas correspondentes àquelas, traçadas nos gráficos de **CBR versus  $w_d$**  - ponto  $C_1$ .(Fig.⇒).

# EXECUÇÃO DOS TRABALHOS DE TERRALENAGENS

A colocação de solos em aterro envolve algumas destas questões:

## EXTRACÇÃO:

- em camadas;
- frontal;
- sob água, com lavagem.

## REGULAÇÃO DO TEOR EM ÁGUA:

- arejamento;
- depósito;
- humedificação.

***Indispensável conhecer a situação meteorológica!***

## TRATAMENTO DO SOLO:

- eliminação dos elementos com diâmetro > 50mm;
- mistura de ligantes;
- mistura de cal;
- mistura de aditivos químicos;
- colocação de solos diferentes em camadas alternadas.

## ESPESSURA DAS CAMADAS:

- finas (15 e 30 cm);
- espessas (até 50 cm).

# EXECUÇÃO DOS TRABALHOS DE TERRALENAGENS (CONT.)

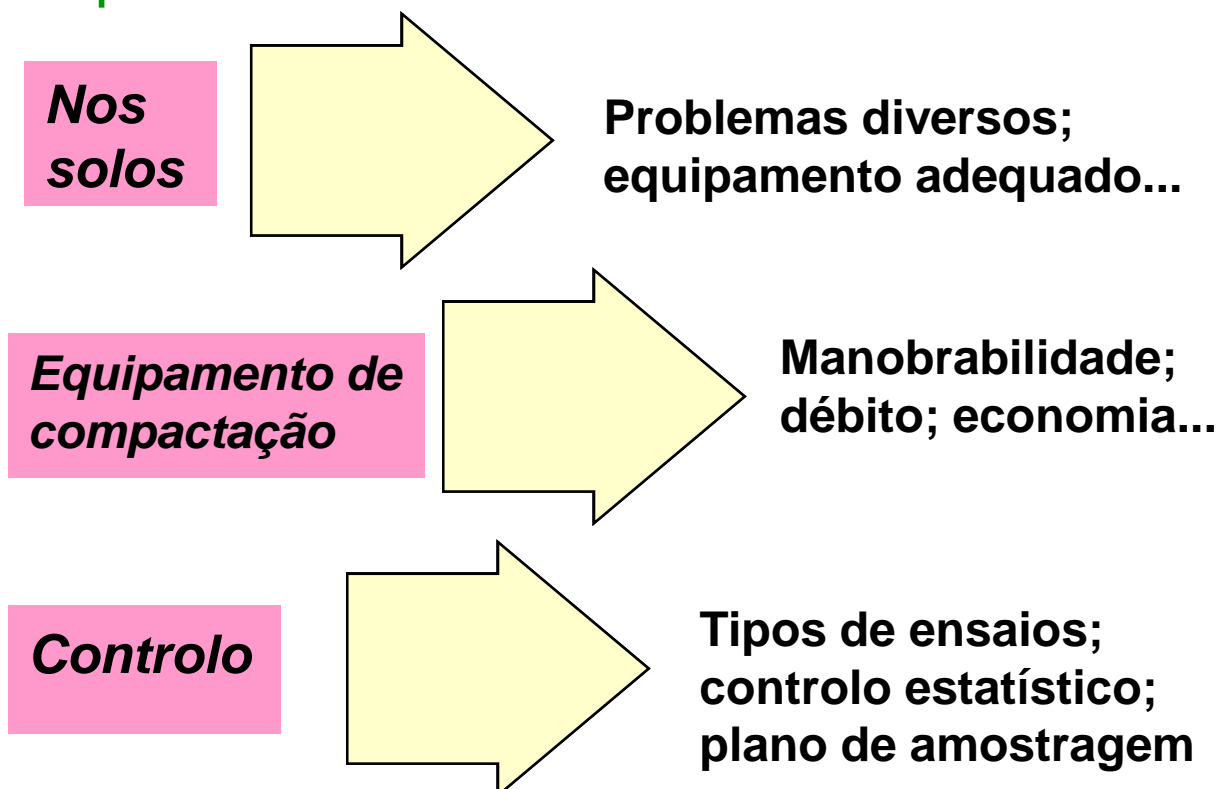
## COMPACTAÇÃO:

- intensa;
- média;
- fraca.

## PROBLEMAS RELACIONADOS COM A ALTURA DOS ATERROS:

- pequena (altura  $\leq 5$  m);
- média ( $5 \text{ m} \leq \text{altura} \leq 10 \text{ m}$ );
- grande (altura  $\geq 10$  m).

Da compactação salientam-se os seguintes aspectos:



# CLASSIFICAÇÕES

As mais conhecidas são:

- **Unificada** (ASTM D2487-85, 1989);
- **Rodoviária** (AASHO - LNEC E240-1970);
- **Outras:** a francesa é bastante completa (LCPC/SETRA, 1972);

Para efeitos do comportamento durante a compactação, os solos podem agrupar-se:

- *solos orgânicos e lodosos;*
- *argilas;*
- *siltos;*
- *crés, solos finos com baixa coesão;*
- *solos micáceos;*
- *solos evolutivos e friáveis;*
- *solos areno-siltosos;*
- *areias uniformes ou limpas;*
- *areias bem graduadas;*
- *cascalhos e burgaos plásticos;*
- *burgaos mal graduados;*
- *burgaos mal graduados.*

Com estes grupos apareceram desde logo (Arquié (1972) quadros de compactabilidade e equipamentos mais apropriados.

## Classificações para fins de compactação e controlo de aterros - o caso da SETRA

Estas classificações têm em consideração **fundamentalmente as características** comportamentais *in situ*. Assim, tendo em conta a importância a granulometria de base dos solos (*finos versus grossos*), considera questões tão importantes como a **mudança comportamental** durante a compactação (*solos evolutivos*). Todas as classificações consideram os factores:

***granulometria + plasticidade***

***Complementados como a melhor ou pior adaptabilidade ao fim a que se destina...***

***A SETRA (França) baseia a sua classificação em:***

### **GRANULOMETRIA:**

- valor da dimensão máxima (Dmax);
- percentagem dos elementos inferiores a 2mm (**p<sub>2</sub>**);
- percentagem de elementos inferiores a 80µm (**p<sub>0,8</sub>**);

### **PLASTICIDADE:**

- Índice de Plasticidade (IP);
- Equivalente de Areia (EA).

A classificação procura atender à execução e ao comportamento do solo em obra incluindo a sua sensibilidade à água.

**O valor D** condiciona a possibilidade de **tratamento** e de **regularização**... Até ao máximo de 50 mm é possível a mistura de solos para a execução de camadas de forma. O valor de 250mm é o limite aceitável para a obtenção dos nivelamentos da camada de forma.

**A sensibilidade à água** define-se pela % de elementos inferiores a 80  $\mu\text{m}$  - **p<sub>0,8</sub>** (silte e argila). Até 5% é insensível à água, sendo máximo entre 10 e 15%; este máximo quanto maior for o IP.

São considerados **solos evolutivos** aqueles que durante a execução dos trabalhos (**extracção, transporte, colocação em obra, compactação e regularização**) ou durante a vida da obra, **sofrem alterações** (geralmente granulométricas e, por isso, de consistência) **que podem afectar o seu comportamento mecânico** (deformacional e resistência).

A classificação destes solos é ainda muito qualitativa...

# SEIS GRANDES CLASSES

## **A - Solos finos**

**D < 50mm para  $p_{0,8} > 35\%$**

**A classe A subdivide-se em:**

- **A1 - IP < 10%**
- **A2 - 10% < IP < 20%**
- **A3 - 20% < IP < 50%**
- **A4 - 50% < IP**

*Estas subclasses (excepto A4) podem subdividir-se conforme o estado em que se encontram (teor em água elevado, h, médio, m, e fraco, s), com referência ao teor em água óptimo, ao IC ou ao CBR.*

## **B - solos angulosos e arenosos com finos**

**D < 50mm para  $5\% < p_{0,8} < 35\%$**

**A classe B subdivide-se em:**

- **B1 -  $p_2 < 30\%$  (ver classe D)**
- **B2 -  $p_2 < 30\%$**
- **B3 -  $30\% < p_2$  (ver classe D)**
- **B4 -  $30\% < p_2$**

*A subclasse B2 pode ainda subdividir-se em B2h, B2m, B2s como as classes. Para a B4 aparecem além de B4h, B4m e B4s, também B4i (imersa)*

**Solos da classe  $B_4h$  e  $B_4th$  (menos de 8% de finos; VBS cerca de 1g)**



**$B_4h$**

Extracção após rebaixamento do nível freático.



**$B_4th$**

Comportamento durante a colocação em obra



Brita aluvionar característica da classe D2, insensível à água.



## SEIS GRANDES CLASSES (cont.)

### *C - solos com finos e grossos*

$D > 50\text{mm}$  para  $5\% < p_{0,8}$

A classe C subdivide-se em:

- **C1** -  $10\% < p_{0,8} < 20\%$  (D qualquer)
- **C2** -  $10\% < p_{0,8}$   $D < 250\text{mm}$
- **C3** -  $10\% < p_{0,8}$   $250\text{mm} < D$

*Cada subclasse divide-se em h, m e s.*

### *D - solos e rochas insensíveis à água*

$p_{0,8} < 5\%$

A classe D subdivide-se em:

- **D1** -  $D < 50\text{ mm} - p_2 < 30\%$
- **D2** -  $D < 50\text{ mm} - 30\% < p_2$
- **D3** -  $50 < D < 250\text{ mm}$
- **D4** -  $250\text{ mm} < D$

***DADA A IMPORTÂNCIA QUE OS SOLOS EVOLUTIVOS TÊM E A SUA MENOR DIVULGAÇÃO, APRESENTA-SE A CLASSIFICAÇÃO QUASE NA SUA ÍNTEGRA.***

## SEIS GRANDES CLASSES (cont.)

### *E - solos evolutivos*

*Estes solos são apresentados com três subclasses.*

A classe **E1** inclui material de estrutura fina frágil, com pouca ou nenhuma argila-crê e materiais gresosos.

O crê é um material gresoso, pouco compacto, constituído por empilhamentos de partículas de calcite (porosidade elevada:  $n = 0,4$ ). A estrutura é muito frágil, mas detem sucção elevada (não drenável para  $pF < 3$ ). Os finos resultantes da evolução (de dimensões entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ ) não são plásticos, pelo que **a classificação de estado destes materiais incide sobre o peso volúmico, o teor em água e a friabilidade. Assim:**

- **Crê denso:**
  - **CRa** -  $\gamma_d > 17,0 \text{ kN/m}^3$
- **Crê pouco denso:**
  - **CRb** -  $\gamma_d < 17,0 \text{ kN/m}^3$  e  $w < 20\%$
  - **CRc** -  $\gamma_d < 17,0 \text{ kN/m}^3$  e  $w < 20\%$  e friabilidade fraca
  - **CRd** -  $\gamma_d < 17,0 \text{ kN/m}^3$  e  $w < 20\%$  e friabilidade forte



Para caracterizar o material rochoso é necessário poder prever a partir da rocha “*in situ*” o comportamento do material após desmonte.

## ATERROS EM CRÉ



Cré da classe  $R_{12m}$  (cré de densidade média e teor em água médio)

Cré da classe  $R_{13m}$  (cré de densidade e teor em água elevados)



Dois materiais com a mesma natureza geológica e comportamento em aterro muito diferente

## ROCHAS ARGILOSAS

Pouco friáveis e fortemente evolutivas (classe R<sub>31</sub>)



Imediatamente após extracção



O mesmo bloco após evolução por intempérias durante vários dias



Rocha siliciosa - conglomerado (classe R<sub>42</sub>)

## SEIS GRANDES CLASSES (cont.)

Nos solos evolutivos aparecem ainda as classes:

- **E2** materiais de estrutura grosseira frágil, com pouca ou nenhuma argila.
- **E3** materiais evolutivos argilosos, margas e xistos - estes classificam-se ainda em **A**, **B** e **C** consoante a evolução é menor ou maior.

***F - materiais putrescíveis, combustíveis ou poluentes (...)*** SOLOS ORGÂNICOS E SUB-PRODUTOS INDUSTRIAIS

São os materiais de rejeito que poderão ser empregues em aterros e camadas de base se não prejudicarem o ambiente.

A classificação é feita por em **9 famílias** (sub-classes **F<sub>1</sub>** a **F<sub>9</sub>**) cada qual caracterizada por **parâmetros dos quais depende a possibilidade de emprego.**



Rocha magmática dura (basalto) da classe  $R_{C1}$



### SUB-PRODUTO INDUSTRIAL

Da classe F5. Este material apresenta o aspecto de uma areia mas é ligeiramente solúvel.

# **SOBRE OS ESTADOS HÍDRICOS**

- **ESTADO MUITO HÚMIDO (th)**
  - É um estado de humidade muito elevado mas permite, em geral, a reutilização do solo
- **ESTADO HÚMIDO (h)**
  - É um estado de humidade elevada mas que permite a reutilização do solo desde que sejam tomadas disposições particulares (ventilação, tratamento, aterros de pouca altura, etc.) em condições técnico-económicas razoáveis
- **ESTADO DE HUMIDADE MÉDIA (m)**
  - É o estado de humidade óptimo (corresponde a condicionalismos mínimos para trabalho em obra)
- **ESTADO SECO (s)**
  - É um estado de humidade baixa mas permite a colocação do material em obra desde que se intervenha com rega, sobre-compactação, etc., consideradas técnico-económicas razoáveis
- **ESTADO MUITO SECO (ts)**
  - É um estado de teor em água muito baixo podendo-se reutilizar do solo, se regado, em condições técnico-científicas razoáveis



Extracção de solos das classes  $A_{2m}$  e  $A_{3m}$ .  
Condições meteorológicas “**evaporantes**”:  
(ideais).



O transporte das **areias finas** das classes  $B_1$  ou  $D_1$  é quase independente do seu teor em água mas são **muito sensíveis à erosão pluvial**.



# CONDIÇÕES DE COLOCAÇÃO DOS MATERIAIS EM ATERROS

## A SETRA apresenta QUADROS com as CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM ATERROS

Para cada classe ou sub-classe de materiais definidas na classificação são fornecidos quadros que indicam as condições de colocação em obra a respeitar em função da situação meteorológica existente no momento da colocação.

### EXEMPLO: A1 (Estado m)

SOLO	OBSERVAÇÕES GERAIS	SITUAÇÃO METEOROLÓGICA		CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO EM ATERROS	CÓDIGO						
					E	G	W	T	R	C	H
A <sub>1</sub> <sup>m</sup>	Solos facilmente empregues mas muito sensíveis às condições meteorológicas podendo apresentar excesso de teor em água, ou, pelo contrário conduzir a materiais secos difíceis de compactar	++	Chuva forte	Situação que não permite a colocação em obras com garantia de qualidade suficiente	NÃO						
		+	Chuva fraca	E - Extracção frontal C - Compactação média H - Aterro de altura média (< 10m)	2	0	0	0	0	2	2
		=	Nem chuva nem evaporação importante	C - Compactação média	0	0	0	0	0	2	0
		-	Evaporação importante	Solução 1: rega superficial W - Rega superficial para manter o estado C - Compactação média	0	0	3	0	0	2	0
				Solução 2: aplicação no estado natural C - Compactação intensa H - aterro de altura média (< 10m)	0	0	0	0	0	1	2
		Solução 3: extracção frontal E - Extracção frontal C - Compactação intensa	2	0	0	0	0	1	0		

## Notas sobre os quadros:

**3ª COLUNA:** Surgem os símbolos ++, +, =, -. Estes símbolos exprimem o sentido da tendência de variação do teor em água em função da situação meteorológica.

- ++** “**CHUVA FORTE**”: tendência do teor em água do material crescer fortemente e abruptamente.
- +** “**CHUVA FRACA**”: possibilidade do teor em água aumentar de forma lenta e previsível.
- =** “**NEM CHUVA NEM EVAPORAÇÃO IMPORTANTE**”: o teor em água mantém-se.
- “**EVAPORAÇÃO IMPORTANTE**”: diminuição do teor em água do material.

## **4ª COLUNA: Condições de utilização em aterro:**

Embora as condições possam ser distintas indicam-se, as indicadas situam-se aproximadamente a meio da gama de condições de aplicação possíveis (aprecem várias soluções, sem qualquer prioridade ou hierarquia).

**5ª COLUNA:** Símbolos das condições de utilização ⇒ permite **rápida decisão sobre as condições de aplicação.**

**E** - EXTRACÇÃO

**G** - ACÇÃO SOBRE A GRANULOMETRIA

**W** - ACÇÃO SOBRE O TEOR EM ÁGUA

**T** - TRATAMENTO

**R** - NIVELAMENTO, APLANAMENTO

**C** - COMPACTAÇÃO

**H** - ALTURA DO ATERRO

# E - EXTRACÇÃO

## FORMAS DE EXTRACÇÃO

- **em camadas** (espessuras  $\simeq$  0,1 a 0,3m)

Consegue-se uma **boa fragmentação** e uma **triagem** relativa **das diferentes camadas de material**. **Expõe ao máximo os solos aos agentes atmosféricos** (vantajosa ou contra-producente).



Extracção em camadas  
(moto-scraper)

- **extracção frontal**

Permite seleccionar o nível que apresenta melhor resistência para áreas de circulação, por ex..



Extracção frontal  
(pá escavadora)

## G - ACÇÃO SOBRE A GRANULOMETRIA

Com o objectivo de obter um  $D_{max}$  compatível com os compactadores utilizados e uma curva granulométrica “dispersa” para limitar a evolução a longo prazo.

Entre a extracção e a colocação final no aterro tem-se:

- **Eliminação dos elementos > 800mm**

Eliminando os blocos considera-se o desempenho dos compactadores mais possantes existentes.

- **Eliminação dos elementos > 250mm**

Esta a dimensão máxima dos blocos que permitem mistura com agentes de tratamento.

- **Fragmentação complementar após extracção**

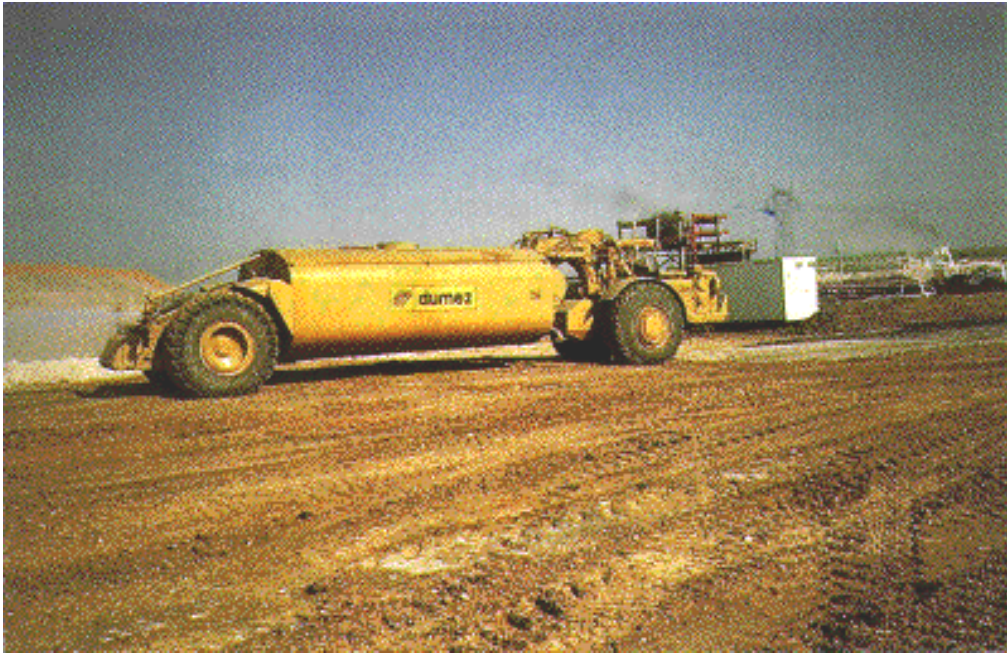
Aplicável aos materiais rochosos evolutivos

**Meios utilizados para agir sobre a granulometria:**

- **Explosivos;**
- **Trituração;**
- **Cilindros especiais (pás escarificadoras - carneiro);**
- **Lagartas com bases grossas;**
- **Fragmentação com martelos hidráulicos, etc..**

## W - ACÇÃO SOBRE O TEOR EM ÁGUA

- Ventilação sob condições meteorológicas favoráveis
- Humidificação (simples ou intensa: amassadura)



*Máquina de rega com 100cm<sup>3</sup> de capacidade*

## T - TRATAMENTO

**Mistura de aditivos: cal ou outros reagentes (cimentos, cinzas colantes, escórias, sub-produtos industriais...).**

**A utilização de cal** é eficiente e frequente em solos finos, medianamente ou muito argilosos - das **melhores soluções para solos sensíveis à água muito húmidos.**



A **dosagem** depende do **estado hídrico do material** na altura de colocação. Assim, em **condições evaporantes** o amassamento pode fazer-se com **grande economia** de grande parte ou mesmo da totalidade do produto de tratamento; há todo o **interesse em impor a ventilação em simultâneo com o tratamento**.

**Não é essencial que a acção do tratamento seja definitiva desde que a sua colocação seja correcta. O risco da empolamentos deve ser sempre verificado.**



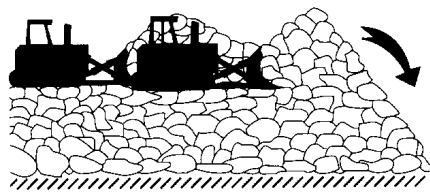
No tratamento com **cal viva** de solos **sensíveis à água e muito húmidos**, a amassadura executa-se geralmente com **arado**.

**Charruas com discos:**



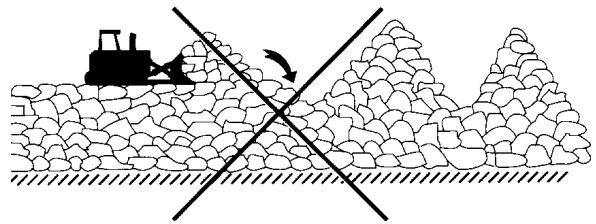
### Esquema de colocação:

Máquina pesada  
descarregando os materiais  
na camada em colocação



**BOM**

Máquina leve  
descarregando sobre a  
camada previamente  
colocada e compactada



**MAU**

Em **materiais rochosos** o nivelamento deve ser feito desagregando sistematicamente o material na parte superior da camada em colocação empurrando-o posteriormente com a ajuda de uma máquina forte.

## C - COMPACTAÇÃO

Três níveis de energia: - fraca;  
(indicações - média;  
qualitativas) - intensa.

dependente do par **material - compactador**

De um modo geral pode dizer-se que:

- a **compactação fraca** deve ser utilizada com **materiais húmidos** para evitar a colocação do material saturado;
- a **compactação intensa** aos materiais secos.

# H - ALTURA DOS ATERROS

É um factor determinante, como já se referiu (“classes” balizados por 5 e 10 m), sendo interessante referir que **uma condição imposta a aterros de grande e média altura deve ser interpretada como interdita à construção da parte inferior do aterro** (por ex. abaixo dos 5,0m superiores do aterro).



*Aterro de grande altura (as condições de colocação nos vários níveis serão diferentes)*

Há que ter cuidados pois pode não ser adequado construir grandes obras com partes constituídas por materiais com comportamentos mecânicos e hidráulicos muito diferentes.



## CONDIÇÕES QUE PODEM SER IMPOSTAS PARA UTILIZAR OS DIFERENTES MATERIAIS EM ATERRO

RUBRICA	CÓDIGO	CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO
<b>E</b> <b>EXTRACÇÃO</b>	0	➡ Não existem condições particulares a recomendar
	1	➡ Extracção em camadas (0,1 a 0,3)
	2	➡ Extracção frontal (para uma frente de corte > 1 a 2m)
<b>G</b> <b>ACÇÃO SOBRE A GRANULOMETRIA</b>	0	➡ Não existem condições particulares a recomendar
	1	➡ Eliminação dos elementos > 800mm
	2	➡ Eliminação dos elementos > 250mm para tratamento
	3	➡ Fragmentação complementar após extracção
<b>W</b> <b>ACÇÃO SOBRE O TEOR EM ÁGUA</b>	0	➡ Não existem condições particulares a recomendar
	1	➡ Redução do teor em água por ventilação
	2	➡ Secagem por colocação em depósito provisório
	3	➡ Rega para manter o estado
	4	➡ Humidificação para alterar o estado
<b>T</b> <b>TRATAMENTO</b>	0	➡ Não existem condições particulares a recomendar
	1	➡ Tratamento com reagentes ou aditivos adequados
	2	➡ Tratamento com cal viva
<b>R</b> <b>NIVELAMENTO</b>	0	➡ Não existem condições particulares a recomendar
	1	➡ Camadas finas (20 a 30cm)
	2	➡ Camadas médias (30 a 50cm)
<b>C</b> <b>COMPACTAÇÃO</b>	1	➡ Compactação intensa
	2	➡ Compactação média
	3	➡ Compactação fraca
<b>H</b> <b>ALTURA DO ATERRO</b>	0	➡ Não existem condições particulares a recomendar
	1	➡ Aterro baixo ( $\leq 5m$ )
	2	➡ Aterro de altura média ( $\leq 10m$ )

# CAMADA DE FORMA

SENDO INTERFACES DE **TRANSIÇÃO DOS MATERIAIS DE ATERRO PARA A ESTRUTURA (SENSÍVEL) DOS PAVIMENTOS**, TÊM AS SEGUINTE FUNÇÕES:

A CURTO PRAZO  
(sempre presentes)

Traficabilidade das propriedades  
Compactação da fundação  
Nivelamento da plataforma  
Protecção do aterro

A LONGO PRAZO

Homogeneização  
Manter boa capacidade de carga  
Optimização do custo camada/estrada  
Protecção térmica  
Drenagem

OS MATERIAIS PARA CAMADAS DE FORMA DEVEM:

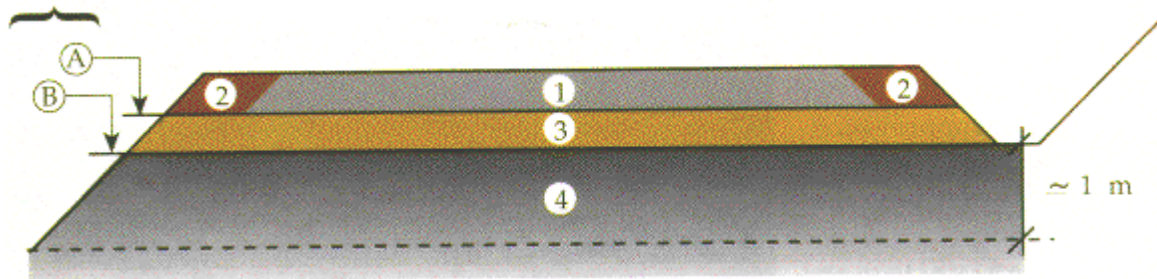
- ser insensíveis à água;
- não ultrapassar determinados diâmetros;
- ser resistentes à circulação de veículos;
- (relativamente resistentes à gelidificação)

## DESIGNAÇÕES:

A superfície superior desta estrutura é a **“PLATAFORMA DE SUPORTE DA ESTRADA” (PF)**.

A chama **parte superior do aterro ou PST** é a zona superior ( $\cong$  1m de espessura) das terras “in situ” (em escavação) ou dos materiais colocados (em aterro).

A plataforma da PST designa-se **nível do aterro (AR)**.



### Definição dos diferentes termos

- A Plataforma suporte da estrada (PF)
- B Nível do aterro (AR)
- 1 Estrada (camada de desgaste, base e fundação)
- 2 Bermas
- 3 Camada de forma
- 4 Parte superior do aterro (PST): com cerca de 1m de solo natural (secção em escavação) ou de material de empréstimo (secção em aterro) sob camada de forma

**AS CARACTERÍSTICAS DA CAMADA DE FORMA** dependem da **natureza dos solos, clima, ambiente, hidro-geológico, tráfego**, etc. Assim:

#### Pode não existir

se os materiais de aterro ou o solo “in situ” apresentam boas características.

#### Pode ser constituída por uma só camada

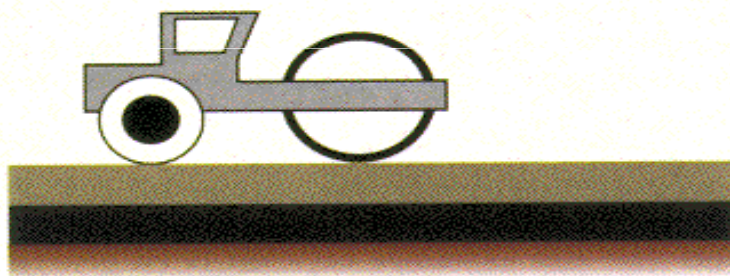
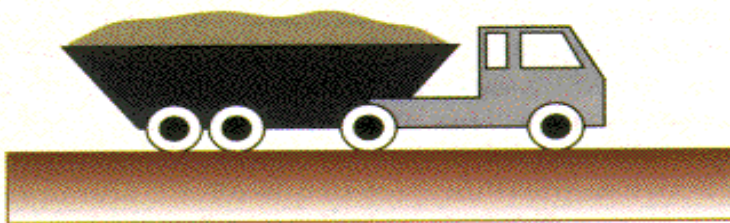
se existe um único tipo de material com as características exigidas.

#### Ou por camadas de diferentes materiais

tem que se recorrer a camadas distintas para garantir funções distintas, (*exemplo geotêxtil + materiais grosseiros + camada de finos de regularização + tout-venant*, etc.

## FUNÇÃO A CURTO PRAZO

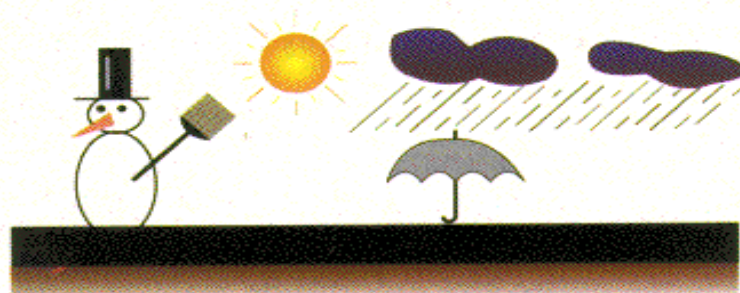
*Assegurar a  
circulação  
nas melhores  
condições  
dos veículos  
de obra.*



PST  
em materiais  
grosseiros



PST  
em solos  
brandos



**Traficabilidade**  
durante quase todo o  
tempo das máquinas  
de transporte de  
materiais para a  
camada de fundação.

Permitir a  
**compactação** eficaz  
da camada de  
fundação.

Cumprir exigências de  
**nivelamento** da  
plataforma de suporte  
da estrada.

**Protecção** do nível do  
aterro (AR) em  
relação ao clima  
durante o período de  
espera para  
realização da estrada.

## **FUNÇÃO A LONGO PRAZO**

- 1 Homogeneização das camadas de suporte.**
- 2 Manutenção no tempo de capacidade de suporte mínima.**
- 3 Optimização do custo** do conjunto camada de forma/estrutura da estrada.
- 4 Protecção à acção do gelo.**
- 5 Contribuição para a drenagem** da estrada.

Muitas vezes, a espessura da camada de forma é fixada com o objectivo de permitir a execução da obra de estrada quando as condições meteorológicas são difíceis, assegurando apenas funções de curto prazo.

Como para o caso dos aterros **as técnicas de preparação e protecção dos materiais para aplicação em camadas de base** estão descritas e codificadas em quadros e incluem:

**G - Acção sobre a granulometria**

**W - Acção sobre o teor em água**

**T - Tratamento**

**S - Protecção superficial**

# G - ACÇÃO SOBRE A GRANULOMETRIA

- 1- **Eliminação da fracção fina sensível à água  $0/d$**  (usualmente cerca de 10mm, ou, excepcionalmente 20mm) **por peneiração no estado natural ou com lavagem.**

Obtém-se um material mais insensível à água. Pode ser conveniente colocar areia à superfície podendo, mesmo constituir uma fina camada de regularização.

- 2- **Eliminação da fracção grossa limitativa da compactabilidade do solo** (por trituração, fragmentação ou separação - peneiração)  
Considera-se como dimensão máxima:

- \* **50mm** para os materiais a serem misturados com produtos de tratamento
- \* **100mm** nos outros casos

Carregamento do peneiro



Separação dos grossos por balanço do peneiro.

## W - ACÇÃO SOBRE O TEOR EM ÁGUA

Sendo esta acção usada em materiais que necessitam de tratamento com cal ou outros ligantes hidráulicos, **só é eficiente se o teor em água for próximo do teor em água óptimo definido pelo ensaio Proctor normal para a mistura material-ligante. Só assim é possível obter o comportamento mecânico exigido.**

As **acções** são:

- 1- **Manter o teor em água** durante a compactação.
- 2- **Humidificação do material** para o levar ao estado hídrico seco a médio.

## T - TRATAMENTO

Mistura do material com diferentes produtos como:

- **cal** (eventualmente brita de cal);
- **ligantes hidráulicos** (cimento, cinzas volantes, escórias, etc.);
- ou **correctores granulométricos**.

***As características dos correctores devem ser validadas através de estudos geotécnicos.***

Por exemplo, técnicas como o espalhamento do corrector e posterior mistura com charruas de discos ou segundo o método de “depósito-passagem” podem ser suficientes.

O tratamento de solos para aplicar em camadas de base é atraente.

Deve, porém, ser realizada em modalidades mais rigorosas do que as aceitáveis no tratamento de materiais para aterro.



Espalhador



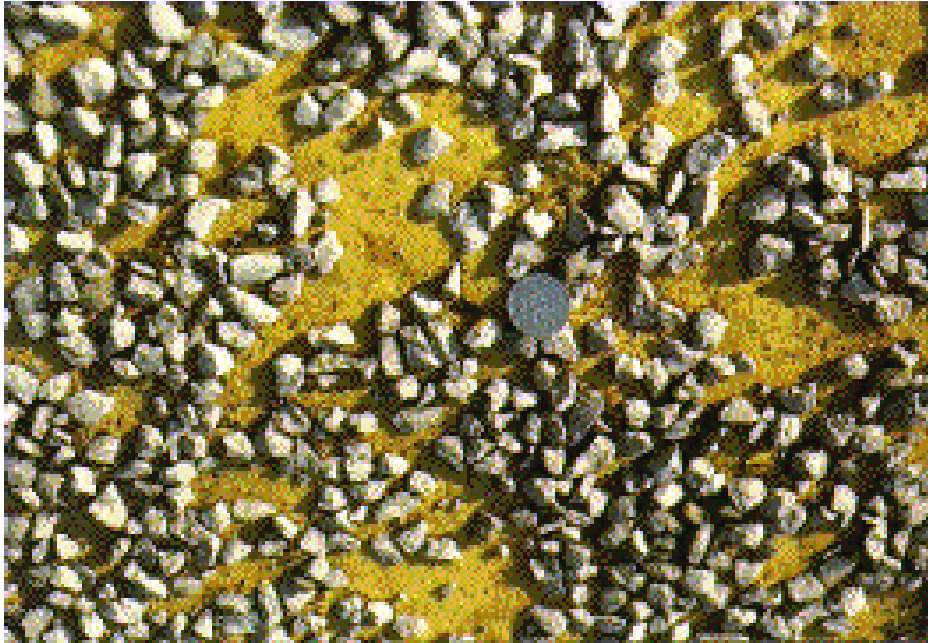


Misturador de eixo horizontal garantindo uma espessura da camada de solo tratado constante (até 0,35m com veios de finura de trituração notáveis)



A necessidade de regularizar exclusivamente por aplainamento as plataformas de camadas de base constituídas por materiais tratados garante as exigências de nivelamento.

## PROTECÇÃO SUPERFICIAL DAS PLATAFORMAS DAS CAMADAS DE BASE EM SOLOS FINOS TRATADOS ATRAVÉS DE UMA CAMADA DE MISTURA CRAVADA



Depois do espalhamento da gravilha de cravação



Espalhamento da emulsão

## Diferentes casos de PST

### 7 classes:

Por exemplo o **PST nº 0** é uma situação imprópria para execução de uma plataforma.


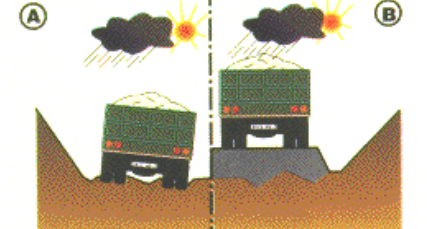
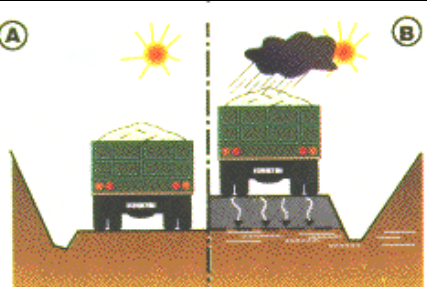
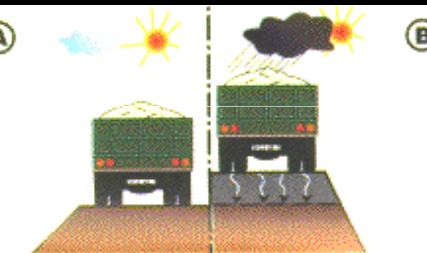
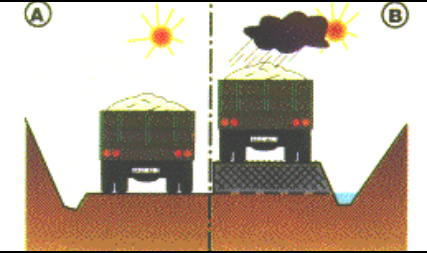
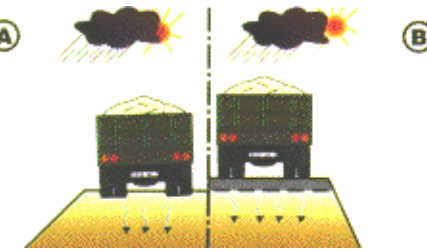
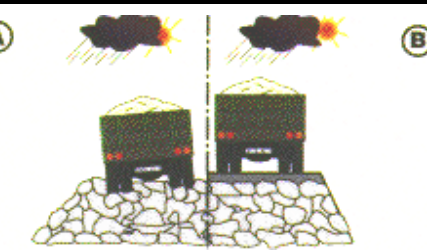
**As classes de capacidade de carga** para a plataforma do aterro introduzidas para **cada PST estão associadas às características dos solos a longo prazo**, quer dizer representativas das condições desfavoráveis do ponto de vista hídrico que a plataforma pode conhecer durante o período de serviço da estrada (gelo-degelo é tratado à parte).

**A escolha entre as classes  $A_{r_i}$  propostas deve ser feita de acordo com as indicações fornecidas na coluna de comentários.**



Caso típico de um PST nº 0 impróprio para execução de uma camada de base

## ALGUNS CASOS POSSÍVEIS DE PST

CASO DE PST	ESQUEMA	DESCRIÇÃO	CLASSE DE NIV.
PST Nº0		<b>SOLOS</b> A, B <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> , B <sub>5</sub> , B <sub>C</sub> , C <sub>1</sub> no estado hídrico (H) <b>CONTEXTO</b> Zonas turfosas, pantanosas ou inundáveis. PST com capacidade de carga praticamente nula na altura de execução da estrada e durante a vida da obra.	AR0
PST Nº1		<b>SOLOS</b> A, B <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> , B <sub>5</sub> , B <sub>C</sub> , C <sub>1</sub> , R <sub>12</sub> , R <sub>13</sub> , R <sub>34</sub> e certos C <sub>2</sub> , R <sub>43</sub> e R <sub>C3</sub> no estado hídrico (H) <b>CONTEXTO</b> PST em materiais sensíveis com má capacidade de carga durante a execução da camada de base A e sem possibilidade de melhorar a longo prazo B.	AR1
PST Nº2		<b>SOLOS</b> A, B <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> , B <sub>5</sub> , B <sub>C</sub> , C <sub>1</sub> , R <sub>12</sub> , R <sub>13</sub> , R <sub>14</sub> e alguns C <sub>2</sub> , R <sub>43</sub> e R <sub>63</sub> no estado hídrico (m) <b>CONTEXTO</b> PST em materiais sensíveis à água de boa capacidade de carga no momento da execução da camada de base A. Esta capacidade de carga pode diminuir a longo prazo por infiltração de águas pluviais e de subida do N.F.	AR2
PST Nº3		<b>SOLOS</b> Os mesmos materiais do que no caso de PST2 <b>CONTEXTO</b> PST em materiais sensíveis à água com boa capacidade de carga na altura da execução da camada de base A podendo esta reduzir-se a curto prazo por infiltração de águas pluviais B.	AR1 AR2
PST Nº4		<b>SOLOS</b> Os mesmo que para PST1 com a reserva de poderem ser sujeitos a tratamento <b>CONTEXTO</b> PST em materiais sensíveis à água, melhorados com cal ou ligantes hidráulicos segundo uma técnica de "aterro" e numa espessura de 0,30 a 0,50m. A acção do tratamento é durável.	AR2
PST Nº5		<b>SOLOS</b> B <sub>1</sub> e D <sub>1</sub> e certos materiais rochosos da classe R <sub>43</sub> <b>CONTEXTO</b> Materiais arenosos finos insensíveis à água, fora do N.F., pondo problemas de regularização e/ou traficabilidade.	AR2 AR3
PST Nº6		<b>SOLOS</b> D <sub>3</sub> , R <sub>11</sub> , R <sub>21</sub> , R <sub>22</sub> , R <sub>32</sub> , R <sub>33</sub> , R <sub>41</sub> , R <sub>42</sub> , R <sub>62</sub> e certos C <sub>21</sub> , R <sub>23</sub> , R <sub>43</sub> e R <sub>63</sub> <b>CONTEXTO</b> PST em britas ou rochas insensíveis à água mas colocando problemas de regularização e/ou traficabilidade.	AR3 AR4

A - Comportamento do PST durante a execução da camada de base

B - Situação durante a fase de construção da estrada.

No caso, por exemplo, de haver necessidade de drenagem da plataforma (caso do PST nº 3 para um nível AR2 a longo prazo) há grandes vantagens em utilizar anticontaminantes (geotêxteis separadores e drenantes).



***A colocação de um geotêxtil numa camada de base em materiais granulares e um solo sensível à água permite salvaguardar as características do material granular e reduzir a espessura da camada de base.***

# COMPACTADORES

O documento da SETRA classifica os compactadores como::

## CILINDROS DE PNEUS

Subdivisão feita em função da carga por roda:

- P1 - 25 a 40 kN;
- P2 - 40 a 60 kN;
- P1 - > 60 kN.

## CILINDROS VIBRADORES

Subdivisão feita em função da carga por unidade de largura do cilindro:

- V1 - 15 a 25 kgf/cm;
- V2 - 25 a 35 kgf/cm;
- V3 - 35 a 45 kgf/cm;
- V4 - > 45 kgf/cm.

## CILINDROS DE PÉS COMPACTADORES (pés de carneiro)

Subdivisão feita em função da carga estática média por unidade de largura do tambor que contém os pés:

- PD1 - 30 a 60 kgf/cm;
- PD2 - > 60 kgf/cm.

## **Os cilindros vibradores são ainda classificados:**

- unitários rebocados;
- unitários automóveis;
- tandems;
- duplex.

A relação

$$M_0 w^2 / (M_1 / L)$$

- **M0 - massa vibrante**
- **w - frequência nominal**
- **M1 - carga estática**
- **L - unidade de largura do cilindro**

assume valores diferentes consoante a morfologia do cilindro (ver Figura anexa):

- **unitários se rebocados até 3,5 ton;**
- **automóveis entre cerca de 3,5 e 6 ton;**
- **tandem entre 6 e 10,1 ton;**
- **duplex, acima de 10,1 ton.**

Classificados os equipamentos, definem-se os parâmetros:

**Q -volume diminuído do solo compactado;**

**S -superfície compactada;**

**e -assentamento total do solo;**

**ε - assentamento total do solo após uma passagem do cilindro;**

**n -número de passagens do compactador.**

A relação  $Q/S=\varepsilon$  define o **volume reduzido** do solo pela acção de uma passagem do cilindro.

O **assentamento total** deve ser  $e = n \varepsilon$ .

No documento da SETRA indicam-se os **valores de  $\varepsilon$  para cada classe de cilindro**.

### *Algumas particularidades sobre a compactabilidade de certos solos*

◆ **Solos vivos**: são **solos orgânicos** que, por conterem micro-organismos, absorvem água quando vivos, **expandindo** os solos, e que morrendo, criam-se grandes vazios que levam a **colapsos significativos**. São identificados através de ensaios de compactação com processos de secagem distintos. Se não se podem evitar estabilizam-se, por ex. adicionando 10% de areia.

◆ **Solos brandos (moles)**: por terem insuficiente capacidade de suporte pode ser necessário ou **aplicar camadas sucessivas de solos mais adequados para criar degradação de cargas** ou., mesmo, criar caixas (às vezes até à retirada total do solo mole).



## ***Tipos de problemas em solos moles***

Em zonas lodosas aparecem dois tipos a que estão associadas algumas soluções:

***ESTABILIDADE DE TALUDES*** (métodos de estabilização a discutir noutro local)

***ASSENTAMENTOS EXCESSIVOS*** (drenagem - consolidação; elementos estruturais para uniformização das cargas; aterros com uso de solos leves - ex: vulcânicos, etc.).

◆ **Solos expansivos (argilosos)**: não devem ser usados a menos de um metro da superfície (se a drenagem for assegurada), nem a menos de metro e meio se o solo for submerso.

A compactação do lado seco conduz a camadas mais resistentes e mais permeáveis (a estrutura criada é mais floculada). Uma maior energia de compactação (sempre limitada à própria capacidade de suporte das camadas) conduz a solos de estrutura mais dispersa.

◆ **Siltes**: Sendo solos de baixa permeabilidade também não apresentam coesão, pelo que são muito sensíveis, ou seja, podem ser estabilizados para, sob cargas dinâmicas e em presença de água perderem facilmente a estrutura.

## ◆ Siltes (cont.), loesses ou muceques:

Estes solos têm em comum a estrutura instável (colapsíveis) mas não apresentam grandes problemas de compactação. Podem ser utilizadas grandes espessuras mas como a sua resistência é muito dependente do índice de vazios, é necessário compactá-los bem em profundidade.

Técnicas secundárias como vibroflutuação, vibrocompactação, uso de explosivos, etc., são frequentemente usadas nestes horizontes.

◆ Solos grosseiros: Estes solos, os de granulometria estreita particularmente, devem ser estabilizados com finos (ou mesmo com ligantes) pelo menos à superfície pois são facilmente descompactáveis sob acções de tracção (ver considerações acima sobre camadas de forma).

## Aterros juntos das obras de arte

### Dificuldade de compactação

Espaço reduzido, exigindo equipamento especial (menor dimensão e maior frequência).

### Grau de compactação $\Leftrightarrow$ acções

Baixo grau  $\Rightarrow$  assentamentos excessivos

Elevado grau  $\Rightarrow$  impulsos excessivos sobre as estruturas (K0 elevado)

## *Estimativa expedita do peso volúmico através do nº de passagens do cilindro compactador*

O valor de  $\gamma_d$  pode ser estimado (de forma expedita e aproximada) pela expressão (Khay, 1980):

$$\gamma_d = A + B \log n$$

sendo A e B dependentes do equipamento, do solo e das condições de compactação (espessura da camada e profundidade) - a determinar empiricamente (aterros experimentais).

## **EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO CONDIÇÕES DE EXECUÇÃO**

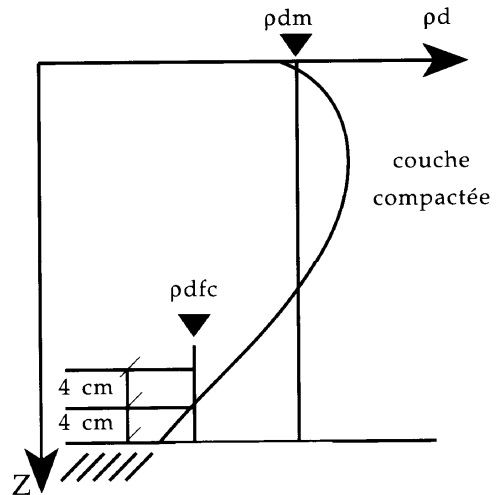


**SETRA / LCPC**

Segundo o documento da SETRA são dois os indicadores para assegurar a compactação correcta:

$\rho_{dm}$  - massa volúmica seca média

$\rho_{dfc}$  - massa volúmica seca no fundo da camada (valor médio nos 8cm inferiores da camada compactada).



As indicações dos quadros de compactação constantes desse documento foram estabelecidas para cumprir:

- compacidade para camadas de base:

$$\rho_{dm} \geq 98.5\% \rho_d \text{ OPN}$$

$$\rho_{dfc} \geq 96\% \rho_d \text{ OPN}$$

- compacidade para aterros:

$$\rho_{dm} \geq 95\% \rho_d \text{ OPN}$$

$$\rho_{dfc} \geq 92\% \rho_d \text{ OPN}$$

## EM RELAÇÃO AOS MATERIAIS

São divididos em *famílias*, *classes* e *sub-classes* de estado convergentes com a classificação dada.

## Tipos principais de EQUIPAMENTOS

Já antes definidos, a SETRA divide-os em:

- Compactadores de pneus:  $P_i$
- Compactadores vibrantes com cilindros lisos:  $V_i$
- Compactadores vibrantes com pés de carneiro:  $V_{pi}$
- Compactadores estáticos com pés de carneiro:  $S_{pi}$
- Placas vibrantes:  $P_{qi}$



*Compactador de pneus: P3 (carga por roda > 60 kN)*

A relação de eficiência entre os pneus vazios e cheios é da ordem de 1:2. *Melhor eficácia com a carga máxima por roda compatível com a “traficabilidade”.*



**Compactador vibrante monocilíndrico liso (Vm4)**

Os compactadores vibrantes **funcionam à frequência máxima** prescritas pelo fabricante. Para as classes V3, V4 e V5 **pode-se empregar diferentes velocidades**. É vantajoso circular na máxima velocidade, **só é autorizada se se dispuser de contador de velocidade e registador de controlo**.



*Compactador vibrante tandem-transversal (classe  $V_{t5}$ ), boas flexibilidade e mobilização das massas de compactação.*

## **Seleção do equipamento - avaliação de rendimentos**

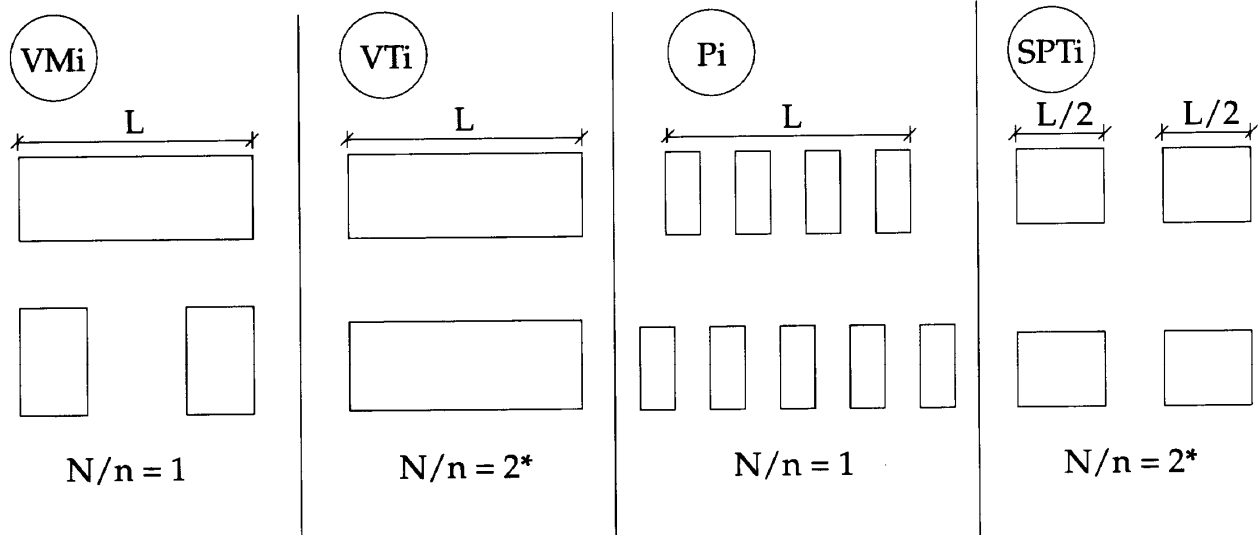
O **débito de um compactador** corresponde ao

**“número de metros cúbicos de um solo que foi compactado até ao valor do peso volúmico especificado (ver acima), segundo as especificações ideais no prazo de uma hora”.**

A expressão que o define:

$$Débito = \frac{V \cdot h \cdot l}{N}$$

sendo  **$V$**  a **velocidade**,  **$h$**  a **profundidade**,  **$L$**  a **largura da faixa compactada** e  **$N$**  o **número de aplicações de carga**, sendo o número de passagens ( **$n$** ) metade deste valor.



### NOTA PARA OS CÁLCULOS DE CILINDROS:

$n$  - número de passagens

$N$  - número de aplicação da carga,  $n$  para compactadores de pneus e monocilíndricos

$N = 2n$  para tandens longitudinais

$Q/S$  exprime-se em  $m^3/m^2$ , onde

$Q$  - volume de solo compactado no tempo dado (por ex: 1 dia, 1 hora, etc.)

$S$  - superfície varrida pelo compactador no mesmo tempo.

## Energia de compactação

Para fixar a energia de compactação em obra

*tem-se que considerar a energia consumida e a fornecida ao solo (esta em toneladas de peso do cilindro pela distância percorrida).*

Estas noções são precárias e discutíveis para compactadores diferentes, pelo que devem ser regidas por ábacos ou tabelas específicas (ver SETRA/LCPC).

É interessante notar que a velocidade (limitada aos valores especificados) é só determinante em termos de rendimento temporal. O número de passagens é o único factor de compactabilidade por equipamento.

Em geral é preferível compactar com camadas de pequenas espessuras com cilindros não muito pesados ou com grande energia de compactação.

Cilindros mistos podem, pela sua maior flexibilidade podem resolver muitas das questões associadas à grande dispersão de solos e equipamentos.

Compac  
tador  
misto -  
classe  
 $V_3-P_1$   
(Cilindro  
vibrante  
e um  
trem de  
pneus -  
soma de  
equipa-  
mentos)



Compactador  
vibrante com  
pés de  
carneiro  
(classe VP1).



## Cilindro estático de pés de carneiro (SP1)



## Placas vibrantes (PQi)

Classificadas de acordo com a **pressão estática na base**,  $M_g/S$ , expressa em kPa ( $M_g$  é o peso da placa).

**PQ3:**  $M_g/S$  entre 10 e 15 kPa

**PQ4:**  $M_g/S$  superior a 15 kPa

Se houver **alargadores**  $S$  varia e é conveniente **ter em conta alterações** na classificação por esse motivo.

## TABELAS DE COMPACTAÇÃO (SETRA)

- o compactador é o correspondente ao limite inferior da classe de eficácia considerada.
- Um caso não indicado significa que o compactador considerado não consegue atingir os objectivos para camadas com espessura superior a 0,20m.
- Em compactadores vibrantes é adoptado para a espessura de camadas o valor por defeito de 0,30m.
- A ausência total de indicações, corresponde à inadequação de compactador para o solo em causa.

A<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>A<sub>1</sub> (\*)

Compacteur		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
Modalités																					
Energie de compactage faible	Q/S	0.080	0.120	0.180	0.055	0.085	0.125		0.165		0.205		0.055	0.085	0.165	0.205	0.265	0.070	0.100		0.065
	e	0.30	0.45	0.60	0.25	0.35	0.30	0.50	0.35	0.65	0.40	0.80	0.25	0.30	0.30	0.35	0.40	0.25	0.40		0.20
			(1)	(1)					(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	0	(1)
	V	5.0	5.0	5.0	2.0	2.5	4.0	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	2.0	3.0	4.0	5.0	5.0	8.0	8.0		1.0
	Code 3	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	2	2	4	4	
	Q/L	400	600	900	110	215	500	315	825	415	1025	515	110	255	660	1025	1325	560	800		65
Energie de compactage moyenne	Q/S	0.045	0.065	0.095		0.040	0.065		0.085		0.100			0.040	0.085	0.100	0.130	0.040	0.070		
	e	0.25	0.35	0.45		0.25	0.30	0.40	0.30	0.50	0.30	0.60		0.25	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30		
					0								0	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	0	0
	V	5.0	5.0	5.0		2.0	2.5	2.0	3.5	2.0	4.0	2.0		2.0	2.5	3.5	4.0	8.0	8.0		
	Code 2	N	6	6	5		7	5	7	4	6	3	6		7	4	3	3	5	5	
	Q/L	225	325	475		80	165	130	300	170	400	200		80	215	350	520	320	560		
Energie de compactage intense	Q/S		0.035	0.050		0.025	0.040		0.050		0.065			0.025	0.050	0.065	0.085		0.035		
	e		0.20	0.30		0.20		0.30	0.30	0.40	0.30	0.45		0.20	0.30	0.30	0.30		0.25		
		0			0								0						0	0	0
	V		5.0	5.0		2.0		2.0	2.5	2.0	3.0	2.0		2.0	2.0	2.5	3.0		8.0		
	Code 1	N		6	6		8		8	6	8	5	7		8	6	5	4		8	
	Q/L		175	250		50		80	125	100	195	130		50	100	165	255		280		

Q/S  
e  
V  
N  
Q/L  
0

(m)  
(m)  
(km/h)  
-  
(m<sup>3</sup>/h.m)

compacteur ne convenant pas

(\*) Impose que Dmax < 2/3 de l'épaisseur de la couche compactée.

(1) S'assurer de la traficabilité du compacteur.

(2) Prévoir une opération annexe pour effacer les empreintes lorsqu'il y a risque de pluie en fin de journée (rabotage des centimètres supérieurs, ou emploi d'un autre type de compacteur si celui-ci apporte l'effet souhaité).

## PARÂMETROS DE SELECÇÃO

### Q/S

**Q** é o ritmo de produção do aterro (dados de obra),  
**S** traduz o **ritmo de utilização de um compactador**.

Sendo Q a *espessura de um dado material* que pode atingir a compacidade desejada, pode ser designado por **“espessura unitária de compactação”**.

O **número teórico médio de passagens** que se deve aplicar a uma camada de material com uma dada espessura é determinado a partir da **relação entre a espessura da camada e o valor do Q/S** para as classes do compactador e do material considerados.

**Q/S diminui com a intensidade de compactação.**

Nos quadros da SETRA o valor de Q/S corresponde a um valor máximo

**⇒ Q/S REAL  $\leq$  Q/S indicado nos quadros ( $\simeq$ )**

Nos **casos de compactação intensa não há inconveniente em que seja inferior**. As insuficiências de compactação são mais frequentes nestes casos.

### Espessura compactada

O **valor indicado para a espessura da camada compactada é um valor máximo**.

### Velocidade de translacção

Os valores das velocidades indicadas são **máximos (+10%)**.

# CONDIÇÕES PARA ASSEGURAR UMA BOA COMPACTAÇÃO

## Estaleiro

Garantir:

- a homogeneidade do material provisionado;
- boa distribuição da compactação;
- aguardar algum tempo em solos tratados.
- condutores de veículos de bem formados e indicações precisas e adaptadas aos objectivos;
- boa caracterização e aplicação dos parâmetros de funcionamento mais eficiente dos compactadores:
  - $f$ , para os compactadores vibrantes  $V_{ime}$ ;
  - pressão dos pneus, para os compactadores de pneus  $V_{i\text{ lastro}}$  (carga efectiva por rodado).

Uso estrito das fichas *técnicas ou certificados de aptidão técnica*.

Realizar ensaios de verificação das condições nas seguintes situações excepcionais:

- solos secos;
- materiais muito difíceis de compactar (muito grossos, granulometria descontínua, etc.);
- tratamentos singulares;
- solos evolutivos com comportamento mal definido;
- sub-produtos industriais;
- maquinaria conhecida insuficientemente, etc.

# CONTROLO DE QUALIDADE

Para avaliar a segurança de uma determinada obra de vias de comunicação, deve-se conhecer as variações associadas com:

- **projecto;**
- **execução;**
- **solicitações durante a vida da obra (comportamento em serviço).**

As variações associadas com o projecto de pavimentos resultam normalmente de:

- **desajustamento do método usado;**
- **inexactidão dos parâmetros de cálculo;**
- **inconveniente definição das zonas de cálculo consideradas uniformes.**

As variações associadas à execução resultam de variabilidades:

- **inerente a natureza os materiais;**
- **do equipamento de execução;**
- **dos operadores dos equipamentos de execução;**
- **de execução relativamente ao projecto.**

**As variações associadas com a vida da obra são mais difíceis de sintetizar pois dependem de factores muito diversos (economia, progresso, etc.).**

O grau de confiança vai diminuindo desde o projecto até ao comportamento em serviço.

*O comportamento em serviço só é totalmente conhecido quando a vida da obra terminou; a previsão tem a falibilidade de todas as perspectivas.*

## **Controlo de qualidade da obra realizada**

### **Durante a execução**

- verificação dos **materiais**, pelo controlo de propriedades apropriadas;
- controlo da **aplicação** ou colocação em obra dos materiais. (...empregado...)

### **Após a execução**

- controlo de propriedades especificadas (acaba por ser um **contra-controlo (fiscalização)**).

### ◆ **Problemas associados aos materiais**

- escolha das **propriedades a avaliar**; necessárias e suficientes na definição do comportamento;
- **métodos de avaliação das propriedades**; devem ser baratos, fáceis, rápidos e precisos;
- **métodos de apreciação dos resultados**; envolve tratamento da informação recolhida e sua apreciação em face da experiência e conhecimentos anteriores.

# Métodos de avaliação

## *Directos*

determinam em obra os valores dos parâmetros de cálculo

## *Indirectos*

determinam valores (derivados) de propriedades correlacionadas com os parâmetros de cálculo

Os métodos **directos** são normalmente **mais precisos, mas mais lentos e caros**, e aplicam-se principalmente no controlo após execução

Os métodos **indirectos** tem especial interesse para **aplicação do controlo durante a execução**, permitindo que o trabalho se realize em boas condições sem rejeições e com **permanente correcção de deficiências**

⇒ **Exigem o estabelecimento de correlações convenientes entre a propriedade medida e a propriedade avaliada !**

## Funções analíticas de correlação

É prática determinar valores característicos de propriedades a partir do traçado experimental de curvas constitutivas.

*Exemplos: a determinação da peso volúmico máxima e do teor em água óptimo no ensaio de compactação. Ou a determinação do valor de CBR, de deformabilidades ou resistências a partir dos ensaios edométricos ou triaxiais.*

## Notas sobre “estimativa de segurança”

O traçado experimental de curvas é afectado pela dispersão dos resultados dos ensaios pelo que

⇒ se exige um número de determinações tanto maior quanto maior for a dispersão, e menos se conhecer da orientação geral da curva.

O número de determinações necessário para o estabelecimento estatisticamente fundamentado de uma curva é sempre grande, pouco viável em estudos correntes de mecânica dos solos. A adopção de curvas aproximadas poderá ser suficiente desde que se conheça o tipo de função que liga duas variáveis (resultante de uma teoria ou de experiência acumulada-formulação empírica). É possível modelá-la através, por ex. de correlações de primeiro, segundo ou grau superior (lineares/hiperbólicas) entre as variáveis.

Nos solos, a dispersão dos ensaios é grande e o número de determinações em regra bastante pequeno. Mesmo o estabelecimento de conjuntos de classes, não substitui a necessidade do conhecimento prévio das

### dispersões dos resultados de controlo :

Fruto  
de

**ensaio:** equipamento, procedimento...

**operador:** formação, homogeneidade...

**solo:** representatividade da amostra,  
homegeneidade...



## Leve abordagem estatística

Fazendo a avaliação de uma propriedade X através da medição de outra propriedade Y com ela correlacionada, deve-se considerar a **dispersão da correlação**  $Y = Y(X)$  - (a).

Na avaliação da qualidade de execução é ainda importante o factor **dispersão de execução** - (b).

Considerando os desvios padrão da dispersão (a) e da (b) - definidos por  $\sigma_a$  e  $\sigma_b$  - o desvio padrão exclusivo da dispersão de execução será dado por:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_b^2 - \sigma_a^2}$$

Na prática, contudo (por ex., no controlo de pesos volúmicos, só se considera o desvio global (**não se distinguem**), dado que a execução deve ser tal que garanta o peso volúmico especificado.

O **coeficiente de variação, CV** (variabilidade-heterogeneidade), de solos que podem constituir-se como uma mesma camada **crece geralmente (mas nem sempre) com a área prospectada (SP)**. Uma expressão proposta Reynolds (1974):

$$\log CV = 0,670 + 0,114 \log SP$$

(para SP entre  $1\text{m}^2$  e  $6 \times 10^6 \text{m}^2$ )

## Noção de camada homogénea

*Segundo Recordan e Despond (1977) :*

*"uma camada é dita homogénea se a dispersão dos valores de cada um dos parâmetros não diminui quando se consideram nessa camada volumes sucessivamente reduzidos".*

*Uma camada de solo real pode, assim, considerar-se homogénea se, para um parâmetro X, a sua dispersão é independente do volume ou área prospectados.*

**NOTA 1<sup>a</sup>:** *uma camada homogénea pode ser constituída por um solo grandemente heterogéneo ou seja, para a propriedade X a média e o seu coeficiente de variação podem ser independentes da área prospectada na camada considerada (homogeneidade da camada) mas o valor de CV muito elevado (heterogeneidade intrínseca).*

**NOTA 2<sup>a</sup>:** *nos solos tem que se ter em conta que existem dois tipos de variabilidade: casual (estatística) e causal (ou paramétrica).*

Os solos apresentam naturalmente variação de propriedades ao longo de um perfil, em planta ou em profundidade. A execução também conduz a tendências: equipamentos diferentes, zonas de acesso distintas, contacto com outros materiais, agentes atmosféricos...

**Zonas distintas  $\Leftrightarrow$  estatística independente !**

A **apreciação estatística** dos resultados pode fazer-se desconhecendo o tipo de curva de frequência da população estudada. No entanto, é **mais económico e correcto - quando possível - trabalhar com base em população estatisticamente conhecida**. Assim, é vantajoso saber-se que:

- os resultados em obra dos **pesos volúmicos secos e dos teores em água obedecem a**

**curva de frequência normal**

- os do **CBR a**

**curva de frequência lognormal**

**O tratamento estatístico dos resultados envolve:**

- estudo de correlações;
- traçado de curvas de **frequência, avaliação dos parâmetros estatísticos correntes** (média, desvio padrão, coeficiente de variação) e valores a que correspondem **quantis apropriados** (frequência de 2,5%, 5%, 10%, por exemplo);
- traçado de cartas de controlo;
- avaliação do **número mínimo de ensaios para que as probabilidades de acertar uma compactação deficiente (risco do comprador) ou de rejeitar uma compactação boa (risco do vendedor) sejam as pré-estabelecidas.**

Em estradas há grande variação de solos mas o volume de cada tipo de solo pode ser pequeno. Uma apreciação estatística razoável implica um mínimo de ensaios que nem sempre se justifica em face do volume de solo. Efectuado  $n$  ensaios convém avaliar o intervalo no qual se encontram os valores reais do parâmetro medido com uma probabilidade pré-estabelecida.

**Na prática a diversidade de solos aconselha o uso de valores relativos: ex. GRAU DE COMPACTAÇÃO:**

$$G(\%) = 100 \frac{\text{Peso volúmiso seco}_{\text{medido em obra}}}{\text{Peso volúmiso seco máximo}_{\text{ensaio Proctor}}}$$

**Parâmetro que também satisfaz a distribuição normal.**

No que se refere ao teor em água parece ter mais significado **traçar curvas de  $\Delta w = w - w_0$**  sendo

**$w$  - teor em água medida em obra;**

**$w_0$  - teor em água óptimo (proctor ou pesada).**

**$\Delta w$  que obedece à lei normal.**

***Não há elementos que permitam tratar resultados de ensaios de CBR de modo relativo (grau...) - cada solo ou zona de uma camada tratado em separado!***

Utilizando os valores relativos  $\gamma_r$  e  $\Delta w$  podem reunir-se grandes grupos semelhantes (argilosos, limosos, arenosos) aplicados em obra do mesmo modo. O traçado de curvas de frequência acumuladas com escalas das probabilidades proporcionais aos valores dados pela curva de Gauss (gráficos de Henry) conduz a troços de rectas.