centroappunti.it
CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO

Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO: **2459A** ANNO: 2020

# A P P U N T I

STUDENTE: Chiforeanu Loredana

MATERIA: Construction of roads,railways and airports - Part 1 - theory slides - Prof. Santagata, Riviera

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 270



**POLITECNICO DI TORINO**
**Master Course**
**in Civil Engineering**
2017-18

**Costruction of Roads, Railways and Airports (01RVMMX)**

***GENERALITIES***
Technical Specifications
Quality control / Quality assurance

## General overview

### Phases of design and construction of transportation infrastructures

**Analysis of feasibility**
- Pre-feasibility study
- Feasibility study

**Design**
- Preliminary design
- Final design
- Executive design

**Construction**
- Award of contract
- Execution of works
- Measurements and accounting

**Final acceptance**

2



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 270



## Specifications

### Technical specifications

- Characterization and qualification of component materials → it's made by performing tests.
- Construction and placement of materials → production and placement of materials, which can be very detailed.
- Control during construction and on completed works (QC/QA) Quality control Quality Assurance

Reference to relevant standards.

5

## Specifications

### Technical specifications

- ➢ PRESCRIPTIVE
- ➢ PERFORMANCE-BASED

6



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 270



## Specifications

### Technical specifications

➢ PRESCRIPTIVE vs PERFORMANCE-BASED

Performance-based specifications have the **advantage/disadvantage** of reducing the work of the Engineer (no need of continuous testing) and in giving the Contractor freedom in defining the most profitable working strategies.

Performance evaluation eliminates the risk of litigations during construction due to the different interpretation of prescriptive Specifications.

**Best option: "hybrid" approach.**

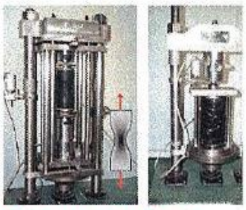
9

## Specifications

### Technical specifications

➢ PRESCRIPTIVE vs PERFORMANCE-BASED

Performance-based specifications require the use of parameters which derive from advanced investigation techniques (e.g. simulative full-scale testing, mechanistically-based laboratory tests).



**Mechanistically-based laboratory tests**

**Full-scale field testing (FWD, structural)**

**Full-scale field testing (SCRIM, functional)**

10



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 270



## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### Variability of characteristics of materials and works

Total variability is the sum of several components

- Sampling
- Experimental tests
- Materials
- Construction (production and placement)

Varianza $S^2 = \sigma^2 = (\text{std deviation})^2$

$Var(x+y) = Var(x) + Var(y) \rightarrow$

$$S^2_{QC/AC} = S^2_c + S^2_l + S^2_{m/c}$$

Variability = sampling + laboratory + material/construction

tests

13

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### Variability of characteristics of materials and works

CAMPIONATURA

Sampling → random variability linked to procedures for selection of samples

Experimental tests → random variability linked to laboratory procedures

⇩

- Can cause more than 50% of total variability
- It is fundamental that operators tightly respect procedures

Materials / Construction ⇒ Natural variability of the characteristics of materials and production/placement operations

14



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 270

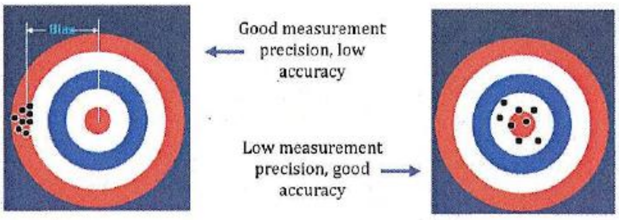
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 270



## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

**Terminology**

- **Precision** = low variability of measurements repeated in control conditions → but they can be far away from the true value
- **Accuracy** = conformity of result with respect to true value → you're close to the true value.




All tests have an accuracy and precision assessment, that have been confirmed by many repeated test.
Check for calibration and verification, also.

17

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

**Statistical parameters**

- **Average**
- **Median value**
- **Variation range**
- **Variance**

18



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 270

03/10/2017

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

**Coefficient of variation** [\] It's dimensionless: Serve per comparare cose diverse e per ogni cosa avrò il suo (CV); che posso comparare.

Defines the degree of variability of measurements

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100$$

**< 2% = very low variability**

**2 – 5% = low variability**

**5 – 10% = moderate variability**

**10 – 20% = high variability**

**> 20% = very high variability**

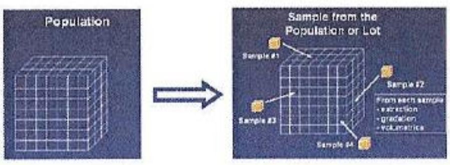
21

POPULATION ≡ LOT

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

**Sampling criteria**

Determination of a given characteristic referred to a quantity of product (lot) should be performed on a limited number of samples




↓ REPRESENTATIVE OF THE ENTIRE LOT

**SAMPLING PROGRAM**

- Test frequency
- Location of samples
- Size of samples

22



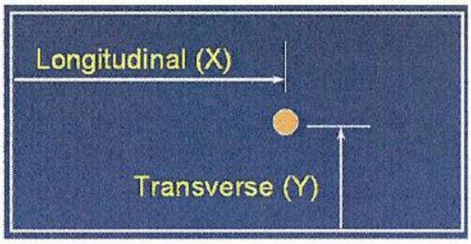
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 270



## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### Generation of random positions




A locl system of cartesian coordinates is define for each sub-lot

| Sub 1 | Sub 2 | Sub3 | Sub 4 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 74 | 60 | 01 | 27 | 43 | X |
| 29 | 21 | 78 | 01 | 43 | Y |
| 28 | 37 | 00 | 49 | 97 | |
| 73 | 08 | 87 | 32 | 97 | |
| 72 | 14 | 09 | 70 | 41 | |

A random sequence of numbers is generated

25

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### Generation of random positions

Generated numbers are multiplied by the transversal dimension of the sub-lot

Exeample ⟶ Rectangular shape 100 m x 12 m

**Sub-lot 1**

- Coordinate X = 0,74 x 100 = 74 m
- Coordinate Y = 0,29 x 12 = 3,5 m

**Sub-lot 2**

- Coordinate X = 0,60 x 100 = 60 m
- Coordinate Y = 0,21 x 12 = 2,5 m

... etc.

26



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 270

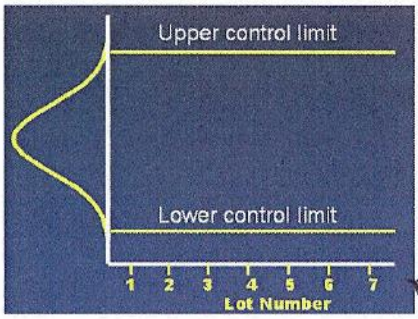
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 270



## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### CONTROL CHARTS – Usage criteria

It can be considered as a sequence of normal distribution curves (vertical axis) as a function of tested samples (lots)




It can be assumed that the process is "under control" when the values are contained within the upper and lower limits

⇩

**Average ± 3 σ**

← In the axis I can choose what to put (time, distan

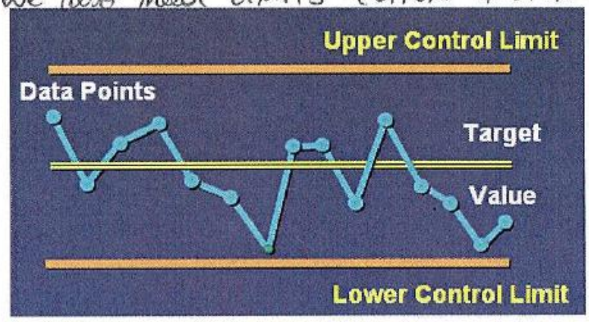
29

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### CONTROL CHARTS – Usage criteria

A fundament characteristic of this approach is the possibility of distinguishing random variability from systamic variability due to a specific cause

We also need LIMITS (UPPER AND/OR LOWER)




30



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 270



## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

**CONTROL CHARTS – Interpretation**

There is a problem (the system is not under control any more) when:

- $\overline{X}$ varies, R constant
- $\overline{X}$ constant, R varies
- $\overline{X}$ e R vary

33

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

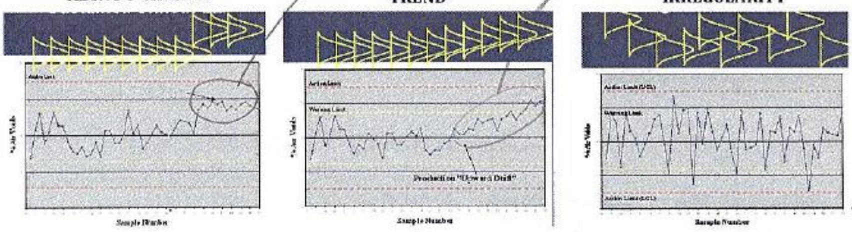
**CONTROL CHARTS – Interpretation**

Example: Variation of average

DEVIATION: due to a problem.

THE AVERAGE IS INCREASING: something is less and less efficient.

**ABRUPT CHANGE** | **TREND** | **IRREGULARITY**



Ex. Abrupt failure

Ex. Progressive wear

Ex. Continuous non necessary adjustments

34





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 270



## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### QUALITY INDEXES

$$Q(U) = \frac{USL - \overline{X}}{\sigma}$$

$$Q(L) = \frac{\overline{X} - LSL}{\sigma}$$

lower specification limit.

Parametrs $P_U$ or $P_L$

(AASHTO)

USA table

**VARIABILITY – UNKNOWN PROCEDURE**
**STANDARD-DEVIATION METHOD**

PWL

| Quality Index ($Q_U$ or $Q_L$) | Percent Within Limits for Selected Sample Sizes N = 3 | N = 4 | N = 5 | N = 6 | N = 7 | N = 8 | N = 9 | N = 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.50 | 100.00 | 100.00 | 96.20 | 95.19 | 94.72 | 94.44 | 94.26 | 94.13 |
| 1.55 | 100.00 | 100.00 | 97.13 | 96.00 | 95.48 | 95.17 | 94.97 | 94.82 |
| 1.60 | 100.00 | 100.00 | 97.97 | 96.75 | 96.17 | 95.84 | 95.62 | 95.46 |
| 1.65 | 100.00 | 100.00 | 98.72 | 97.42 | 96.81 | 96.45 | 96.22 | 96.05 |
| 1.70 | 100.00 | 100.00 | 99.34 | 98.02 | 97.38 | 97.01 | 96.76 | 96.59 |
| 1.75 | 100.00 | 100.00 | 99.81 | 98.55 | 97.89 | 97.51 | 97.25 | 97.07 |
| 1.80 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 98.99 | 98.35 | 97.96 | 97.70 | 97.51 |
| 1.85 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.36 | 98.74 | 98.35 | 98.09 | 97.91 |
| 1.90 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.65 | 99.07 | 98.69 | 98.44 | 98.25 |
| 1.95 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.85 | 99.35 | 98.99 | 98.74 | 98.56 |
| 2.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.97 | 99.57 | 99.24 | 99.00 | 98.83 |
| 2.05 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.74 | 99.45 | 99.23 | 99.06 |
| 2.10 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.86 | 99.61 | 99.41 | 99.26 |
| 2.15 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.94 | 99.74 | 99.57 | 99.42 |
| 2.20 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.99 | 99.84 | 99.69 | 99.56 |
| 2.25 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.91 | 99.79 | 99.68 |
| 2.30 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.96 | 99.86 | 99.77 |
| 2.35 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.98 | 99.92 | 99.84 |
| 2.40 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.95 | 99.89 |
| 2.45 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.98 | 99.93 |
| 2.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.99 | 99.96 |
| 2.55 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.98 |
| 2.60 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.99 |
| 2.65 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

Numbers in the body of this table are estimates of percent within limits (PWL) corresponding to specific values of Q, the QUALITY INDEX. For Q values less than zero, subtract the table value from 100.

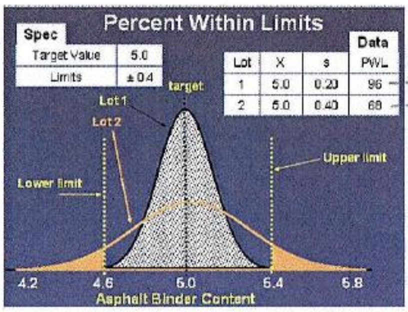
NOTE: More detailed tables ($\Delta Q = 0.01$) can be developed from more accurate values of PWL. 37

*AASHTO QC/QA Guide Spec. Page 21*

Ex: How variability affects the values because of the dispersion.

## Quality Control (QC) and Quality Assurance (QA)

### ACCEPTANCE – PWL

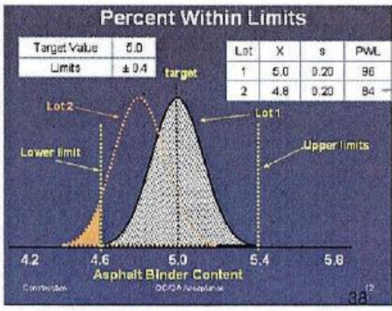



→ good
→ not good ⇒ lower quality

Same average, different degree of dispersion

$CV_1 = \frac{0,20}{5}$

$CV_2 = \frac{0,4}{5} = 8\%$




→ is a little bit out of limits

Same standard deviation, different average value





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 270

05/10/2017

**POLITECNICO DI TORINO**
**Master Course**
**in Civil Engineering**
2017-18

**Construction of Roads, Railways and Airports (01RVMMX)**

***EARTHWORKS – SOILS***
Classification, compaction, bearing capacity

EARTH WORKS
comprehend the work of filling and cutting the ground.

It's important the construction and the economics related to the movements a construction of soils.

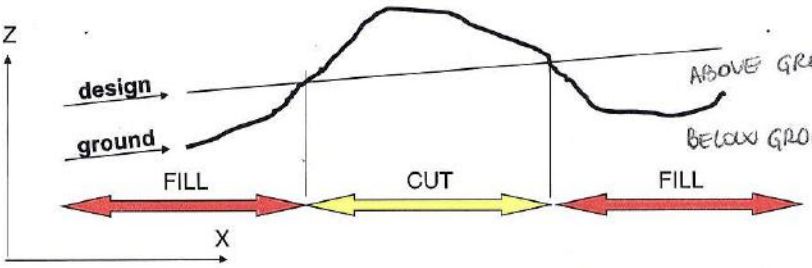
SOIL ← FULLY DRY / PARTIALLY SATURATED / FULLY SATURATED

## General concepts on earthworks

TRINCEA
MEZZACOSTA
RILEVATO

**Road prism** / SOLIDO STRADALE

Cross section delimited by road platform (including marginal elements), originary ground and lateral slopes.
Obtained by means of earthworks with the cutting of trenches (TRINCEE) and construction of embankments (RILEVATI).




ABOVE GROUND LEVEL
BELOW GROUND LEVEL

1



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 270

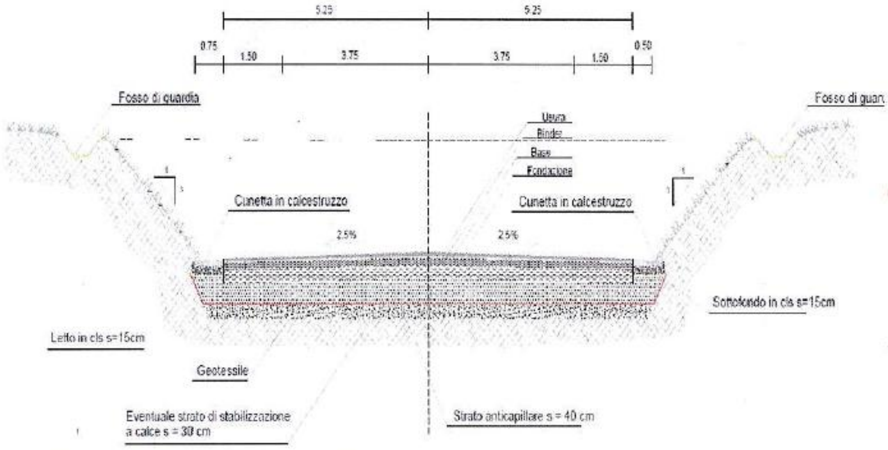
If I have this situation:  => I need to lower the level of water

05/10/2017

## General concepts on earthworks

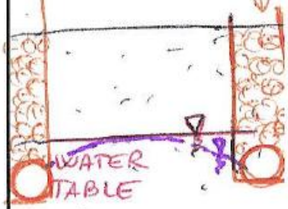
### Road prism

CUT SECTION




fossi/tri… con tub…

↑ DITCH WITH PIPE

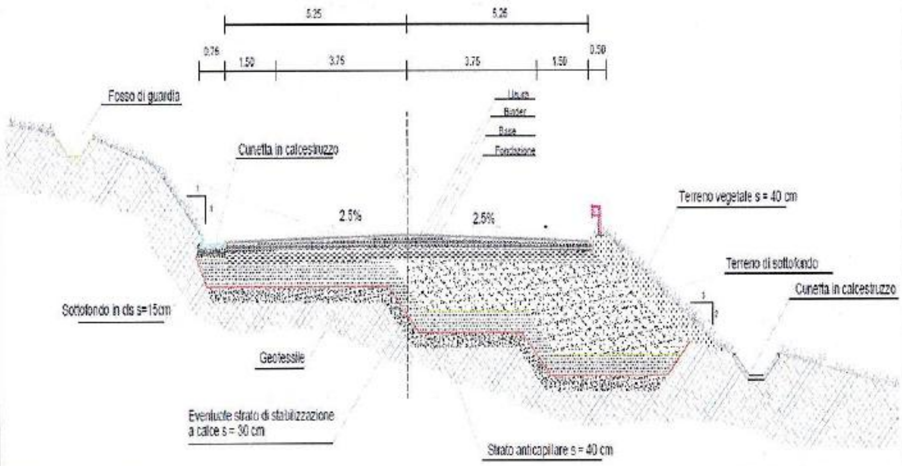



||
Livello piezometrico

## General concepts on earthworks

### Road prism

CUT AND FILL SECTION SEZ. A MEZZACOSTA




3



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 270



## SOIL

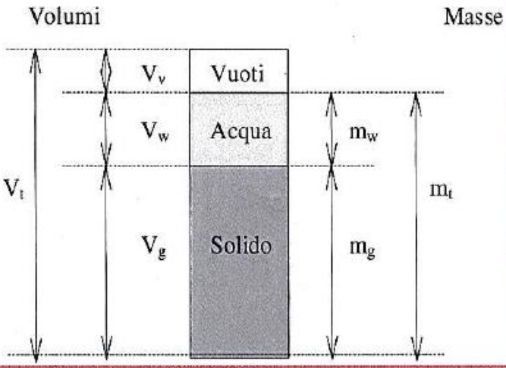
RICHIAMI

Soils are formed from several alteration processes:

- physical (decompression)
- chemical (action of $O_2$, $CO_2$, acids)
- organic (acids, bacteria)
- mechanical (erosion, impact)

Three-phase system

**SOLID + LIQUID + AIR**




PICNOMETER ⇒ measure volume of grains : the volume of grains is the volume of $H_2O$ displaced.

## SOIL

RICHIAMI

**Definitions**

it can change ↑ → STATE VARIABLE

- Water content

$$w[\%] = \frac{W_w}{W_g} \cdot 100 = \frac{W - W_g}{W_g} \cdot 100$$

w = weight

- Grain density DENSITÁ DEL GRANO

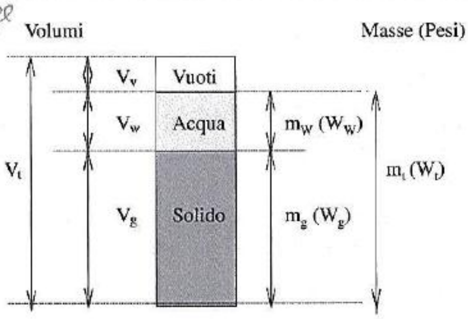
$$\gamma_g = \frac{W_g}{V_g}$$

- Apparent density

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_g \; (+ W_v)}{V_g + V_v + V_w}$$

- Dry density DENSITÁ SECCA

$$\gamma_s = \frac{W_g}{V} = \frac{W_g}{V_g + V_v + V_w}$$




- Void index ÍNDICE DEI VUOTI

$$e = \frac{V_v + V_w}{V_g}$$

- Porosity POROSITÁ

$$n = \frac{V_v + V_w}{V}$$





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 270

05/10/2017

## SOIL

RICHIAMI

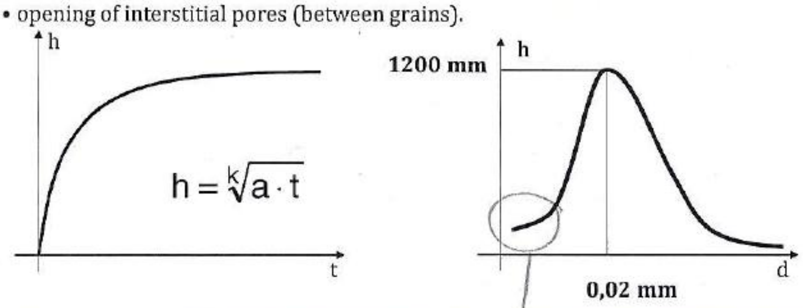
### Capillarity

In unsaturated soils capillarity tensions can occur and these may cause the upward motion of water.

The height by which free water can move upwards by capillarity (h) depends upon:

- time;
- opening of interstitial pores (between grains).

SILT → capillar reaction




in the compacted clay there is no capillarity.

## SOIL

RICHIAMI

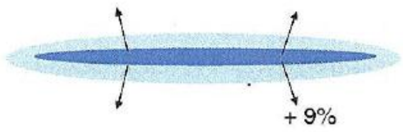
### Frost effects

***Effect of low temperatures (T<0°C) in the winter period*:**

- formation of ice lenses (volume increase); LENTI DI GHIACCIO
- expansion;
- spring thaw with vlume eduction and loss of bearig capacity.

***Conditions*:**

- soil size distribution;
- position of water table;
- climatic conditions (depth of frost penetration).




The crystals of ice tend to attract other water and increase its dimension
In spring ice melts [defrosting]. and the structure collapses.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 270

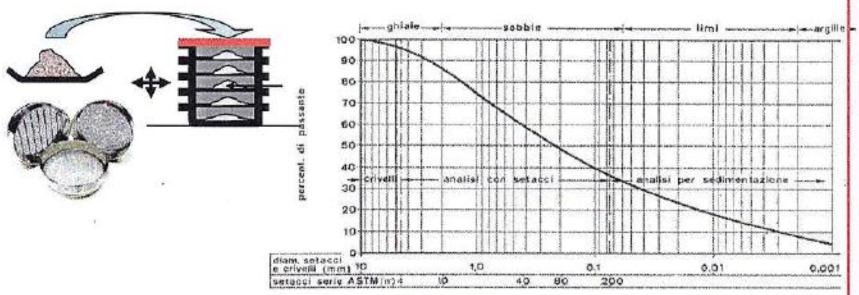
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 270



## TERRE

RICHIAMI

### Analys of particle size distribution

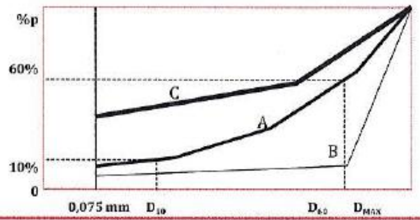



Uniformity coefficient:

$D_{60}/D_{10}$

↑ : Less uniform soil

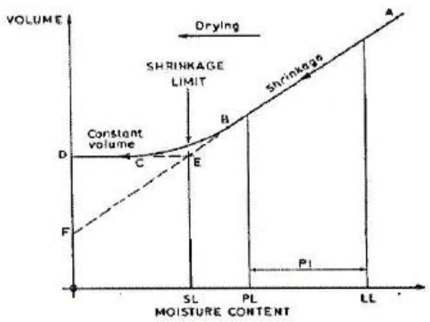
↓ : More uniform soil

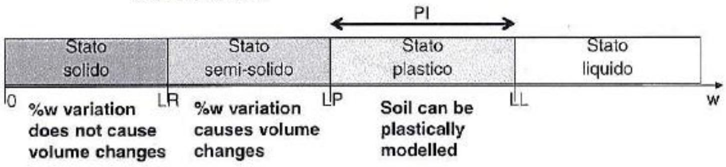



## TERRE

RICHIAMI

### Sensitivity to water (Atterberg Limits)








© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 270



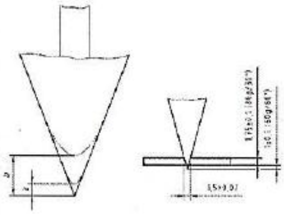
## SOIL

### Liquid limit – methods of measurement

UNI CEN ISO/TS 17892-12:2005

Tests carried out on material **passing at the 0,425 mm sieve**

*Cone penetrometer*



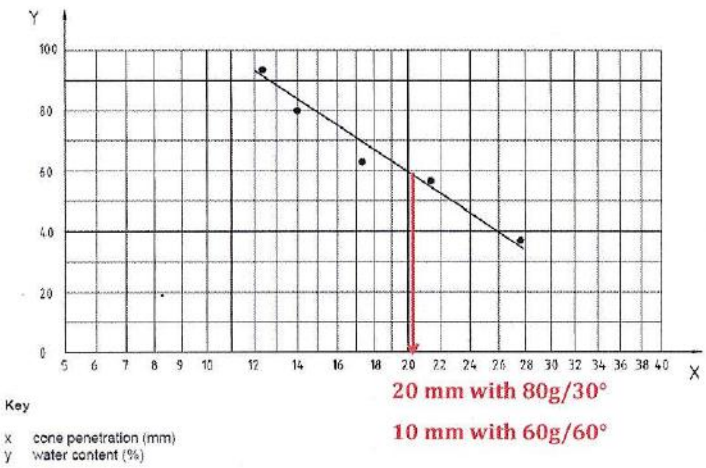
Two geometries:

- 60g/60°
- 80g/30°

NEW METHOD

## SOIL

### Liquid limit – methods of measurement




20 mm with 80g/30°

10 mm with 60g/60°





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 270



## TERRE

### Classificazione delle terre

È uno strumento di valutazione preventiva delle prestazioni delle terre basato sulle dimensioni e sulla sensibilità all'acqua.

**Requisiti:**
- significato preciso dei parametri considerati;
- facile e quasi immediata determinazione dei risultati;
- apparecchiature semplici ed utilizzabili anche in cantiere;
- parametri non dipendenti dallo stato del terreno (umido o asciutto), dalle condizioni di sollecitazione e dalle condizioni ambientali.

⇓

**CONSENTE DI DISCRIMINARE I TERRENI IDONEI ALL'USO PER LE COSTRUZIONI STRADALI DA QUELLI NON IDONEI**

## TERRE

### Classificazione delle terre

Le prove contemplate dal sistema di classificazione sono le seguenti:

1. **analisi granulometrica** ai vagli **n.**10 (2 mm), n.**40** (0,425 mm) e **n.**200 (0,063 mm);
2. **limite liquido** (LL);
3. **indice di plasticità** (IP);
4. **indice di gruppo** (indicatore sintetico) la cui formula è la seguente:

$$IG = (P_{75\mu m} - 35) \cdot [0{,}2 + 0{,}005 \cdot (LL - 40)] + 0{,}01 \cdot (P_{75\mu m} - 15) \cdot (IP - 10)$$



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 270



## TERRE

### Classificazione delle terre

PRIORITA' D'IMPIEGO (AGGIORNATA)

- **CORPO DEL RILEVATO**: gruppi A1, A3 (se necessario confinate), A2-4, A2-5, A4 (con indice di gruppo pari a 0), A2-6, A2-7 (parte bassa del rilevato, a distanza si almeno 2 m dal piano di posa della sovrastruttura e previa disposizione di uno strato anticapillare);
- **SOTTOFONDO**: gruppi A1, A2-4, A2-5, A3 (con coefficiente di uniformità maggiore di 7);
- **RILEVATI FERROVIARI E SUPERCOMPATTATI**: gruppi A1, A2-4, A2-5, A2-6, A2-7, A3 (in base alla granulometria), A4 per il rilevato, A1, A2-4 e A3 (in base alla granulometria)

## TERRE

### Classificazione delle terre

***Gruppo $A_1$*** - *Appartengono a questo gruppo i materiali rocciosi non evolutivi e le terre granulari, generalmente di più o meno grossa pezzatura, pressoché insensibili all'azione dell'acqua e del gelo, che sotto il profilo dei movimenti di terra possono dar luogo ad un ampio spettro di comportamenti, in relazione:*
*-al contenuto di fino (frazione minore di 0,075 mm);*
*-all'assortimento granulometrico;*
*-alla presenza di elementi di grossa pezzatura.*
*Nel prevederne l'impiego occorre considerare che le ghiaie e le sabbie alluvionali con poco fino (meno del 5%), permeabili e prive di coesione, dopo costipamento risultano tanto più soggette all'erosione dell'acqua meteorica quanto più l'assortimento granulometrico è mal graduato. Per evitare che possano prodursi danni, l'Impresa deve rigorosamente procedere al rivestimento con terra vegetale delle scarpate man mano che cresce l'altezza del rilevato; la semina per l'inerbimento, ugualmente, deve essere effettuata il più rapidamente possibile.*
*I detriti di falda, le rocce alterate, i depositi morenici ed anche le alluvioni eterogenee con un contenuto di fino compreso tra il 10 ed il 15% danno luogo a strati molto compatti e difficilmente erodibili; richiedono, tuttavia, un attento controllo dell'umidità di costipamento al fine di attingere valori elevati di portanza.*
*I materiali con elementi superiori a D=50mm e, in particolare, quelli provenienti da scavi in roccia (dura e tenace) richiedono cautele e particolari provvedimenti per quel che riguarda la stesa in strati di spessore regolare ed il costipamento.*
*I provvedimenti da adottarsi consistono nelle seguenti operazioni:*
*- scarto degli elementi di dimensioni maggiori di D=500 mm;*
*- correzione granulometrica (per frantumazione e/o aggiunta di pezzature in difetto).*
*Nella redazione del piano dei movimenti di terra, di norma si riservano le terre del sottogruppo A1-a, specialmente se di granulometria ben assortita, ai manufatti in terra che richiedono più elevate proprietà meccaniche e/o agli strati di sottofondo.*





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 270



# TERRE

## Classificazione delle terre

***Sottogruppi $A_{2\text{-}6}$ e $A_{2\text{-}7}$*** *Le ghiaie e le sabbie argillose di questi sottogruppi sono, di norma, convenientemente utilizzate per la formazione dei rilevati, specialmente quando presentino un indice di gruppo IG=0. Il loro comportamento, tuttavia, è molto influenzato dalla quantità e dalla natura della frazione argillosa presente. Portanza e caratteristiche meccaniche attingono valori intermedi tra quelle delle ghiaie e delle sabbie che costituiscono l'ossatura litica del materiale e quelle delle argille che costituiscono la frazione fine. Poste in opera, esse presentano da media a bassa permeabilità ed altezza di risalita capillare, ciò che determina elevato rischio di formazione di lenti di ghiaccio per azione del gelo. Per questo motivo, in presenza di falda superficiale e di prolungata durata di condizioni climatiche di bassa temperatura, il loro impiego deve essere evitato nella formazione di strati di sottofondo e limitato agli strati posti al di sotto di 2,00 m dal piano di posa della pavimentazione stradale, previa predisposizione, a quota inferiore, di uno strato anticapillare di spessore non inferiore a 30 cm.*

*L'energia e l'umidità di costipamento delle terre dei sottogruppi in esame debbono essere costantemente controllate; quando il contenuto d'acqua risulta prossimo o supera il limite di plasticità della frazione fine si rischia, infatti, di provocare instabilità e cadute di portanza per sovracostipamento del materiale. Se lo stato delle terre e le condizioni ambientali non obbligano alla sospensione dei lavori, è opportuno adottare basse energie di costipamento, operando su strati di modesto spessore.*

# TERRE

## Classificazione delle terre

***Gruppi $A_4$, $A_5$, $A_6$ e $A_7$*** *L'opportunità d'adoperare terre di questi gruppi deve essere valutata secondo le seguenti linee guida:*

*- disponibilità di terre sostitutive, anche in relazione alle distanze di trasporto ed alle esigenze di carattere ambientale;*

*- provvedimenti da adottare per la protezione da venute d'acqua (gravitazionali o di capillarità) nelle opere in terra con esse realizzate;*

*- tecniche di miglioramento, quale il trattamento a calce, finalizzate a ricondurre le proprietà fisico-chimiche e meccaniche entro limiti di garanzia delle prestazioni, nel volgere della vita economica dell'opera.*

*Per l'impiego dei materiali dei gruppi A4 ed A5 occorre considerare che:*

*- la consistenza di queste terre (-IP<10) cambia sensibilmente per modeste variazioni del contenuto d'acqua;*

*- anche per modesti incrementi d'umidità si passa rapidamente da comportamenti tipici di terreni asciutti, difficili da compattare, a quelli di terreni troppo umidi, per i quali risulta talvolta impossibile ottenere il grado di addensamento richiesto;*

*- in relazione all'assortimento granulometrico ed all'addensamento, la permeabilità ed il potere di risalita capillare possono variare entro limiti abbastanza ampi; ne risulta un forte potere di imbibizione (portate d'invasamento capillare) e, quindi, un'estrema sensibilità al rigonfiamento ed all'azione del gelo. I rilevati realizzati con questi terreni, pertanto, debbono essere protetti dalle acque interne ed esterne, mediante strati anticapillari, schermi drenanti, tempestivi rinfianchi laterali con inerbimento;*

*- la presenza di ciottoli ed elementi di più grossa pezzatura può impedire l'azione dei mezzi di miscelazione e, quindi, renderne impossibile la stabilizzazione a calce*

*Le difficoltà di compattazione delle argille dei gruppi A6 ed A7, le proprietà meccaniche generalmente modeste degli strati, come pure i provvedimenti di difesa dalle acque da mettere in atto limitano l'impiego di queste terre a rilevati di modesta importanza. Se non sono presenti elementi di grosse dimensioni, le terre dei gruppi A6 ed A7 si prestano bene alla stabilizzazione con calce.*



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 270



## SOILS

REVIEW

### Physical and mechanical properties

Soil behaviour depends upon:

- size distribution of particles;
- presence of water and sensitivity which particles have in interacting with it.

On representative soil sample the following aspects are evaluated:

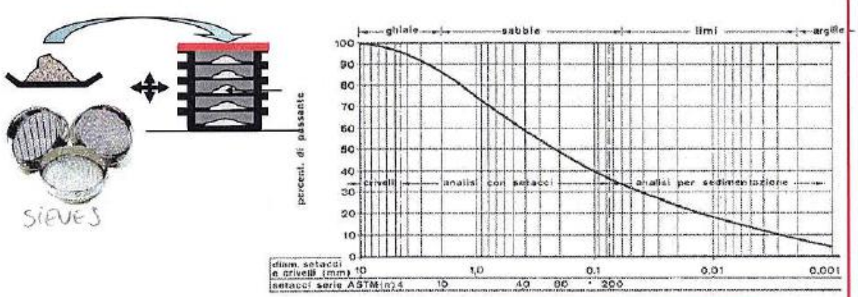
- percentage of size fractions,
- sensitivity to water (of finer fractions).

## SOILS

REVIEW

### Analysis of particle size distribution

cumulative percent curve



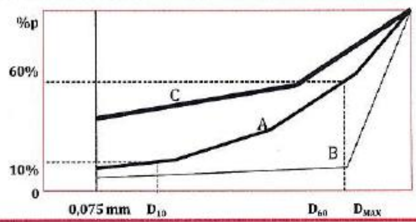

size of particles = open of sieves

Uniformity coefficient:

$D_{60}/D_{10}$

↑ : Less uniform soil

↓ : More uniform soil




Uniform soil: problem in compacting the soil





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 270



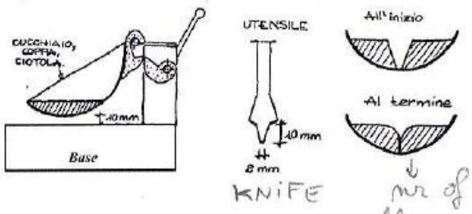
## SOILS → it's sensitive to the experience of the operator

### Liquid limit – methods of measurement

Tests carried out on material **passing at the 0,425 mm sieve**. includes also FINE SAND

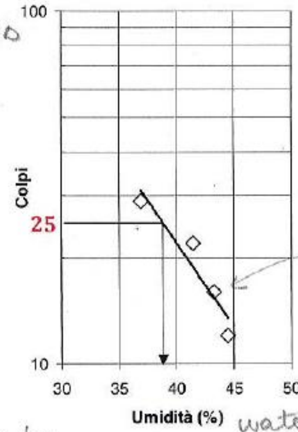
**LL – Liquid limit** (Casagande apparatus)

SEMI-LOGARITMIC PLOT




KNIFE

nr of blows necessary to close the cut.




water content

4 TESTS

**OLD METHOD**

∃ differente between OLD and NEW.

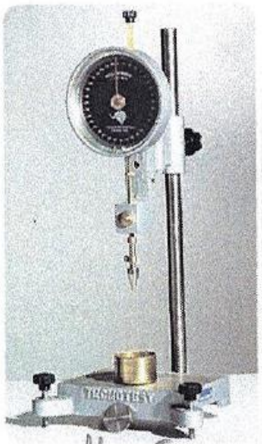
## SOILS

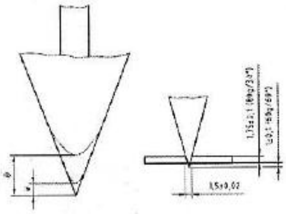
### Liquid limit – methods of measurement

UNI CEN ISO/TS 17892-12:2005

Tests carried out on material **passing at the 0,425 mm sieve**

*Cone penetrometer*





Two geometries:

- 60g/60°
- 80g/30° → corresponds to the application of a load of 80g.

**NEW METHOD**

Final penetration after 5 s.





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 270



The difference between OLD and NEW is in preparation of cylinders.

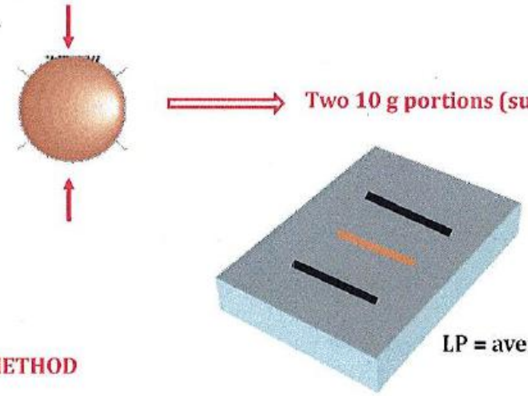
## SOILS

### Plastic limt – methods of measurement

UNI CEN ISO/TS 17892-12:2005

20 g of moist soil

BALL



Two 10 g portions (sub-samples)

2/4 of ball is made in cylinders.

LP = average of two repetitions

NEW METHOD

## SOILS

### Classification of soils

It is a tool for the preliminary evaluation of soil performance based on particle size and sensitivity to water.

**Requisites:**

- clear meaning of considered parameters;
- easy and quick determination of results;
- simple equipment which can be used in field laboratories;
- parameters which do not depend on soil state (wet or dry), on stress conditions and environmental conditions. MEASUREMENTS HAS TO BE INTRINSIC

⇩

**ALLOWS THE DISTINCTION BETWEEN SOILS WHICH CAN BE USED FOR EARTHWORKS AND THOSE WHICH MAY NOT**



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 270



## SOILS

### Classification of soils – HRB system (UNI 11531-1:2014)

**PRIORITY OF USE (general)**

- Groups A1, A2-4, A2-5, A3;
- Groups A2-6 and A2-7.

For soils belonging to groups A4, A5, A6 and A7 it should be considered whether:

- to use the with proper attention (protection from water);
- to proceed with treatment/improvement (e.g. lime stabilization),
- to exclude their use and proceed with disposal. — EXAMPLE GIVEN

## SOILS

### Classification of soils – HRB system (UNI 11531-1:2014)

**PRIORITY OF USE (specific)**

- **EMBANKMENT:** Groups A1, A3 (confined, if necessary), A2-4, A2-5, A4 (with group index equal to 0), A2-6, A2-7 (lower part of embankment, at least at 2 m from pavement support level, with anti-capillary layer);
- **SUBGRADE**: Groups A1, A2-4, A2-5, A3 (with uniformity coefficient greater than 7); → if it increases is good.
  PREMIUM QUALITY SOILS
- **RAILWAY EMBANKMENTS**: Groups A1, A2-4, A2-5, A2-6, A2-7, A3 (depending upon particle size distribution), A4 for embankment → EXTRA – CHECK OF SAND,
- **RAILWAY SUBGRADE**: Groups A1, A2-4 e A3 (depending upon particle size distribution)





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 270



## SOIL COMPACTION

### Goals of compaction

- reduce further settlements during service life of infrastructure as a result of static loads (permanent) and of dynamic loads (transient);
- improve mechanical properties of soils (mainly friction angle φ), to satisfy construction requirements (sufficient stiffness of each layer, necessary for compaction of layers above) and to ensure stability of construction work in service;
- reduce the influence of water (lower porosity leads to lower permeability and increased resistance to erosion).

SLOPES NOT TO FAIL (collassare),

USE ROLLERS

## SOIL COMPACTION

INCREASE DENSITY

### Description of phenomenon

Porosity reduction generated by compaction is due to:

- expulsion of air contained in soil volume,
- migration of water (minimal contribution since compaction is a quick phenomenon unlike consolidation: water contet does not change dramatically) → BUT YOU CAN'T DRY THE SOIL WITH COMPACTION
- compression of air which cannot be expelled (especially for clayey soils)

FACTORS WHICH INFLUENCE COMPACTION:

1. Soil type ($A_i$)
2. Water content (w)
3. Compaction energy (E)
4. Compaction mode
5. Layer thickness and stiffness of support → energy is differently distributed





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 270



## SOIL COMPACTION

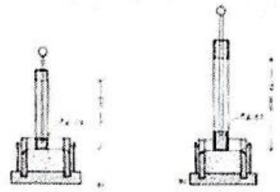
At least 5 test at ≠ water content.

### Proctor test – experimental procedure

**UNI EN 13286-2 (2005)**

development of new rollers

- Type A (AASHTO Standard – T 99)
- Type B (AASHTO Modificata – T 180)



| | Standard | Modificato |
|---|---|---|
| numero di strati | 3 | 5 |
| massa del pestello | 2,495 kg | 4,535 kg |
| altezza di caduta | 30,5 cm | 45,7 cm |
| numero di colpi | 25 - 56 | 25 - 56 |
| energia per unità di volume [N/cm$^2$] | 59 | 269 |

$$E = \frac{P_{maglio} \cdot h \cdot n_{c/s} \cdot n_s}{V_{fustella}}$$

**Compaction energy per unit volume**

## SOIL COMPACTION

### Proctor test – experimental procedure

Amount of soil for 5 determinations:
- 15 kg for small mould
- 36 kg for large mould

Procedure:
- drying at 50°C and disgregation;
- sieving at sieve 25 mm (if the retained is higher than 35 % of total mass the test cannot be performed);
- choice of small/large mould (small is the passing at 25 mm is entirely passing at 5 mm - n.4 ASTM);
- formation of single specimens (variable water contents).



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 270

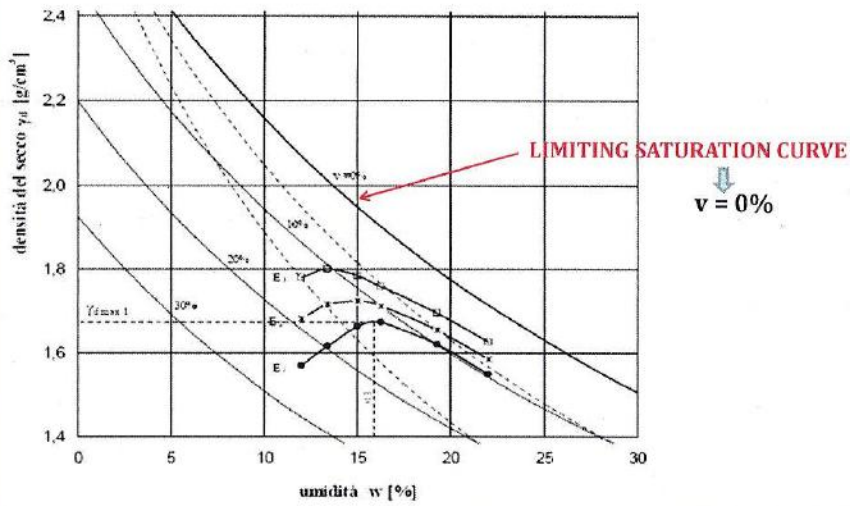
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 270



## SOIL COMPACTION

REVIEW

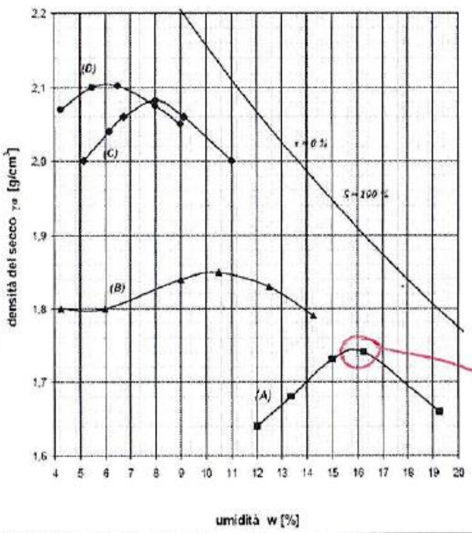
### Influence of compaction energy




Different curves that refer to ≠ types of soil

## SOIL COMPACTION

### Influence of soil type - Examples




**CURVE A**
Fine-grained silty soil ($A_4$ or $A_5$) with quite high $w_{opt}$ ($w_{opt}$ = 15÷20%), with a significant curvature of bell-shaped curve

**CURVE B**
Gravel sand ($A1_b$) generally higher than A and quite flat; optimum water content is approximately $w_{opt}$ = 8÷12%; $\gamma_s$ is close to $\gamma_{smax}$ in a wide range of water contents

→ in general higher density
→ flatter curve ⇒ if we deviate from the optim water value, it's ok, n big problems.

→ BIG CURVATURE → soils critical to compact because $\gamma_d$ changes quickly.



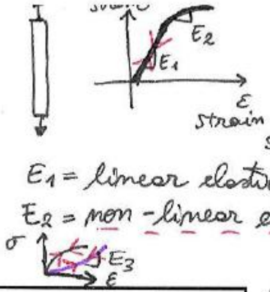


© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 270

Variation stress depends on the velocity of a vehicle, distance from the vehicle, .....

ex




$E_2 < E_1$

10/10/2017

stress ↑ ⇒ stiffness ↓ or ↑ (E)

$E_1$ = linear elasticity

$E_2$ = non-linear elasticity

Stiffness is important, It's not the same in every point.

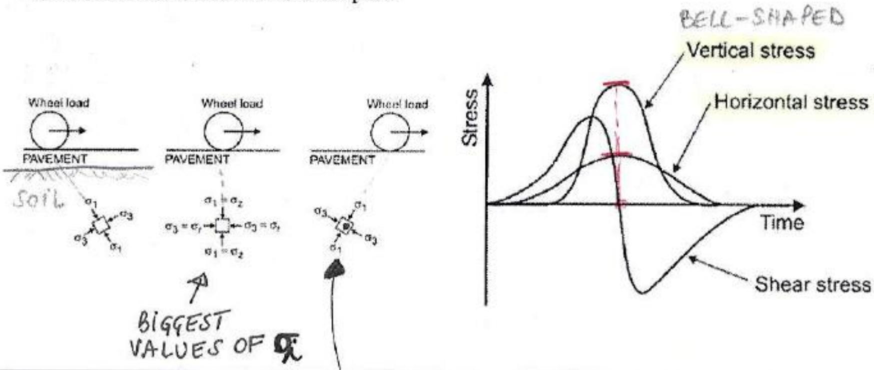
Deformation (strain) of soils

## SOIL MECHANICS

### Mechanical behaviour of soils

As a result of moving traffic the following occurs:

- rotation of principal planes (on which principal stresses arise)
- variation of stresses as a function of time
- dependency of elastic response from the state of stress
- variation of stresses with traffic speed



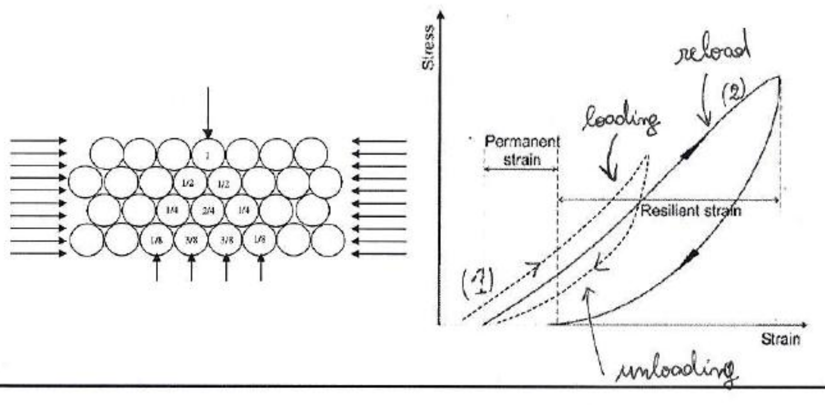

(II) Variation of stresses as a function of time. ⊕ Rotation of stresses ↓ (PRINCIPAL) principal stress is POINTING AT THE VEHICLE

Cube that represents a point, at a generic deep, on which we have normal and tangential stresses.

## SOIL MECHANICS

### Mechanical behaviour of soils

- not perfectly elastic
- strain response depends upon lateral confinement
- stiffness depends upon stress state (non-linearity) and stress history




The response can change in time. The stress history affects the future behaviour of the material.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 270

CBR was born to define a value for a thickness of a pavement. Then its result is used also for other purposes.

It's a shear and stiffness test, that shows the general behaviour of the material. 10/10/2017

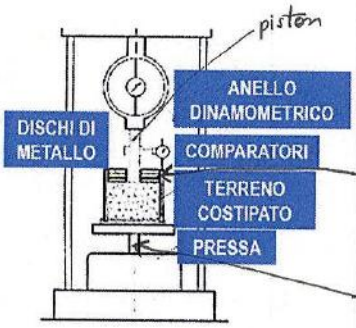
## CBR Method (*California Bearing Ratio*)

SOPPORTARE

Describes the aptitude of the material to bear stress.

TEST

1. Position mould in loading frame
2. Apply surcharge
3. Apply load with a <u>speed of displacement</u> (given) equal to 1,27 mm/min
4. Reading of applied pressure corresponding to displacements of : 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 7 e 9 mm



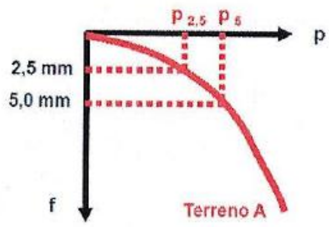

DYNAMOMETRIC RING

ring with a hole.

moves upwards with a given speed

$$CBR = \max \begin{pmatrix} 100 \dfrac{p_{2,5mm}}{p_{RIF-2,5mm}(70 kg/cm^2)} & [1] \\ 100 \dfrac{p_{5mm}}{p_{RIF-5mm}(105 kg/cm^2)} & [1] \end{pmatrix}$$

⇩ EMPIRICAL APPROACH




Pressure applied increases as the penetration in the sample increases.

→ Focus on the value of pressure corresponding to the given penetrations of 2,5 and 5 mm

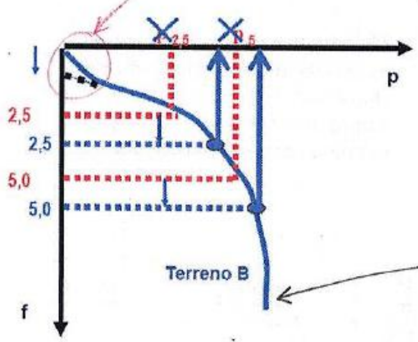
We obtain 2 values and take the maximum ← compare the result with the reference value of $P_{2,5} = 70 \frac{kg}{cm^2}$ and $P_5 = 105 \frac{kg}{cm^2}$

## CBR Method (*California Bearing Ratio*)

NEED TO CORRECT THE CURVE:
- shift the R.S.
- recalculate the pressures.

CORRECTED CBR INDEX

Obtained by shifting the origin of pressure-displcament plot

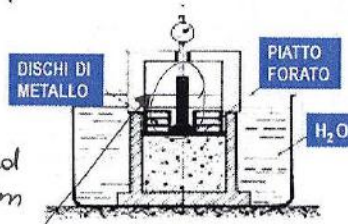



change of curvature

CBR INDEX AFTER SATURATION

Obtained by carrying out the test <u>after 4 days</u> of immersion in water

This is generally what is done because we need to check in the worse condition




During immersion the soils can expand → we can measure the expansion putting an instrument.

∃ reference values also in technical specifications.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 270

10/10/2017

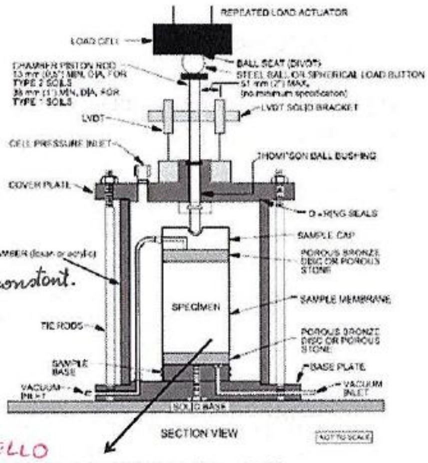
## RESILIENT MODULUS

**Repeated loading triaxial tests (AASHTO T294)** H = 2Ø

The test simulated the stress-strain state which results from vehicles

⇩

**RATIONAL APPROACH**



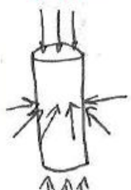
Two confinement conditions
- *Costant Cell Pressure* (CCP) → confining pressure constant. ⊕ deviator stress that pulse/cycle
- *Variable Cell Pressure* (VCP) → pulse/cycle the confining and deviator; cycle ↓ it's time depending

SNELLO

SLENDER SPECIMEN (H = 2D) Ø = 200mm

DEVIATORIC STRE[SS] that DEVIATES FRO[M] the isometric stres[s]

↓↓↓ loading ⇓ it cau[ses] SHEAR EFFECT

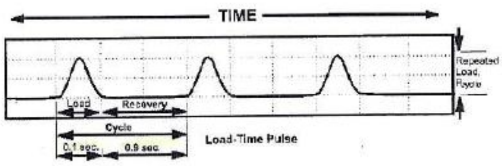


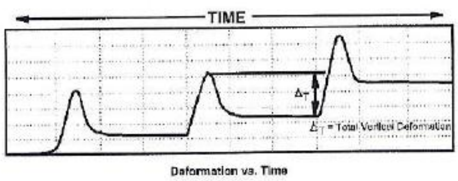
↑↑↑ ISOMETRIC STRESS and DEFORMATION

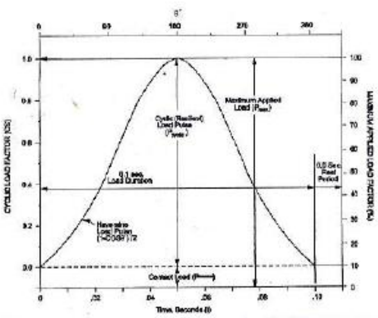
## RESILIENT MODULUS

**Repeated loading triaxial tests (AASHTO T294)**

1) Apply pulses



RESILIENT ≈ ELASTIC

5



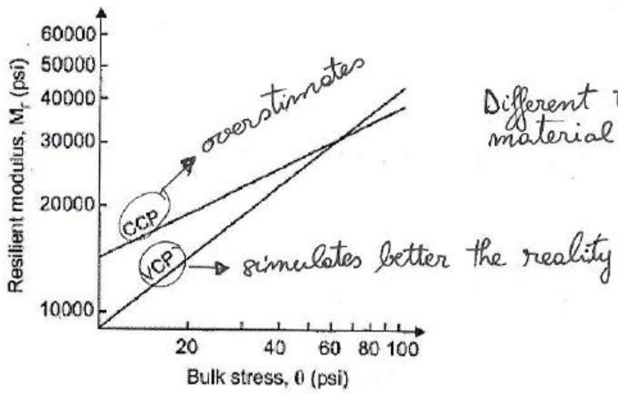
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 270



## RESILIENT MODULUS

**Repeated loading triaxial tests (AASHTO T294)**




Different tests (CCP and VCP) on the same material lead to different results.

## RESILIENT MODULUS

**Repeated loading triaxial tests (AASHTO T294)**

**PERMANENT DEFORMATION**

Evaluation of behaviour with respect to rutting ⟶ $\varepsilon_p = \varepsilon_a A \cdot N^{-B}$

⇩ ORMAIAMENTO

SOTTOFONDO



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 270



## RESILIENT MODULUS

### Models

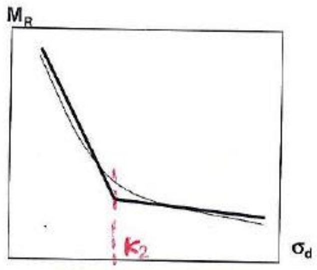
**Fine cohesive materials**

*Thompson – Elliott*

$$M_R = k_1 + k_3 (k_2 - \sigma_d) \quad \text{con } \sigma_d < k_2$$
$$= k_1 + k_4 (k_2 - \sigma_d) \quad \text{con } \sigma_d > k_2$$

Materials are very shear sensitive

↓ ∃ 2 linear approximated relationships




*"Stress – softening"*

(guarda argille di Lancellotta)

the

## COMPRESSIBILITY

**Edometric tests**

- Totally saturated conditions
- Partially saturated conditions

↓

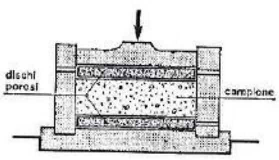
1. Axial lod applied to specimen; — CEDIMENTO DI ASSESTAMENTO
2. Settlement; → measure settlements that occure in time.
3. Measurement of displacements.

Pressure increase: $p_0 \rightarrow p_0 + \Delta p$

↓

$e_0 \rightarrow e$

ex for embankments




$$a_v = \frac{e_0 - e}{\Delta p}$$

**COMPRESSIBILITY COEFFICIENT**





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 270

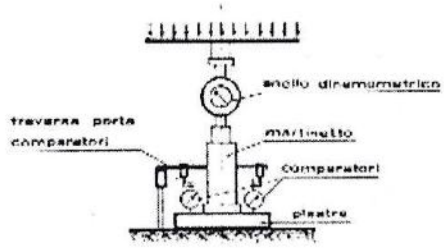
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 270



## BERING CAPACITY

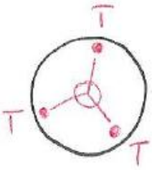
### Plate loading test

PROVA DI CARICO SU PIASTRA




**EQUIPMENT**

- Circular metal plate — placed on top of the surface
- Hydraulic actuator → ⊕ CONTRAST = back part of a heavy truck.
- Transducers (usually 3) — TRASDUTTORE ↓ fixed to an underformable support far away from the plate ⇒ so they are suspended.




## BEARING CAPACITY

### Plate loading test

**TEST**

1. Levelling of surface and plate positioning
2. Set up of actuator and counterweight (e.g. rear axle of heavy vehicle)
3. Set-up of transducers arranged at 120° with arms fixed to supporting beam (supports resting at at least 1 m from plate)
4. Imposition of given load/pressure values and reading of corresponding displacements (stabilization of readings: diffrence smaller than 0.02 mm after 1 minute)

DIN German ≠ Italian

→ For each pressure steps I have to take a reading, that must be stable in time. If it is < 0,02 mm after 1 min ⇒ go on. If it's > 0,02 mm after 1 min ⇒ wait another 1 min

LOAD → ISTANTANEOUS SETTLEMENT ⊕ TIME-DIPENDENT SETTLEMENT.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 270



## BEARING CAPACITY

REVIEW

Behaviour of soil under loading can be described by referring to two main models

BOUSSINESQ

→ Soil is considered as a elastic, homogeneous and isotropic half-space

$$p = \frac{E}{1-\nu^2}\frac{2\delta}{\pi \cdot r}$$

WINKLER

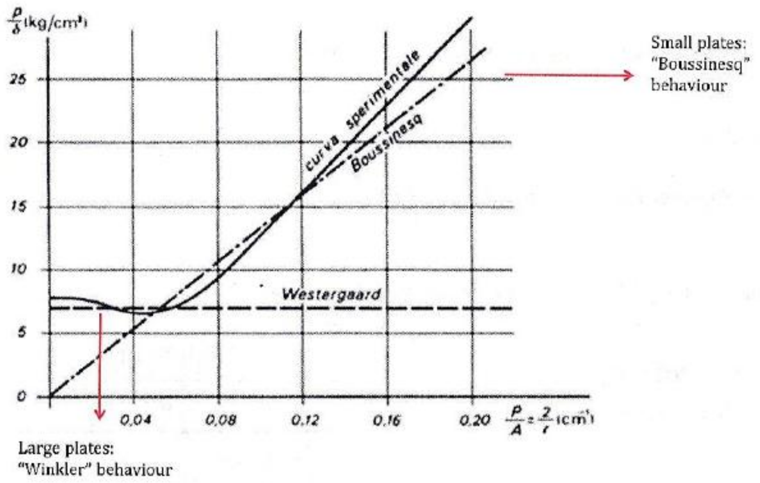
→ Soil is considered as a bed of independent elastic springs

$$p = k \cdot \delta$$

## BEARING CAPACITY

REVIEW

**Model compared to experimental evidence**








© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 270



## BEARING CAPACITY

**Standard CNR n. 146/1992**

$$M_d = \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \cdot D$$

**Test with plate D = 30 cm**

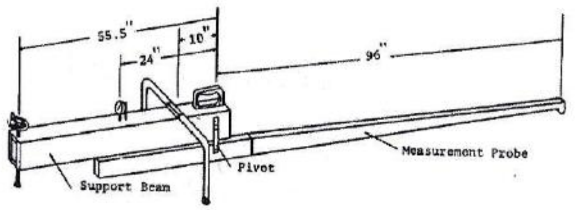
**Deformation modulus**

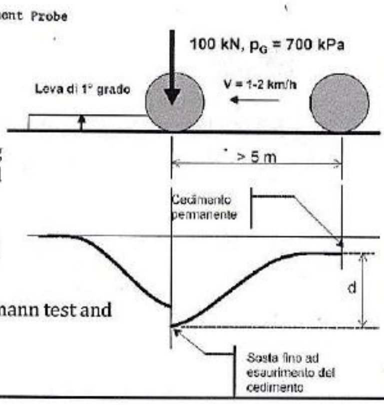
⇨ **Control**

**(applicable to all parts of earthworks)**

## BEARING CAPACITY

**Benkelmann beam (CNR n. 141/1992)**




Measurements are performed by considering the displacement of a point under to the action of a moving vehicle of known characteristics (which gets closer and then leaves).

**Total displacment = d (recovered) + p (permanent)**

$$M_d = \frac{84}{d}$$

Empirical correlation between Benkelmann test and plate loading test



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 270



## BEARING CAPACITY

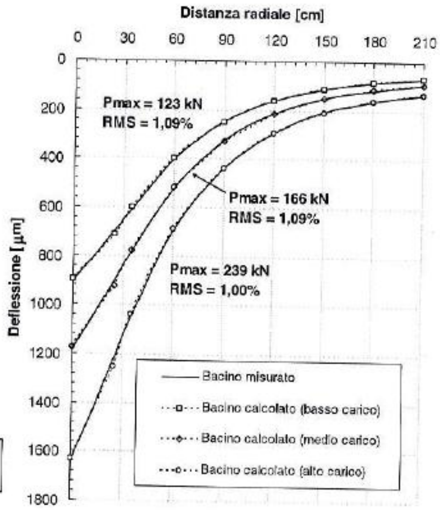
### Falling Weight Deflectometer (FWD)

Mechanical characteristics of subgrade (Es) or pavement (Ei) are derived from the deflection basin provided that the cress-section is known (**Back-calculation procedure**)

Comparison between measured and calculated basin:

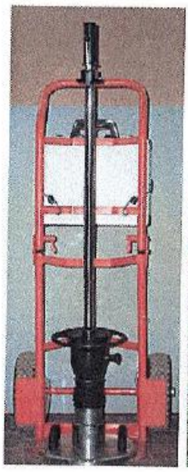
$$RMS(\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{9}\left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}}\right)^2}$$

TREATED IN DETAIL IN THE PART ON PAVEMENTS (STRUCTURAL EVALUATION)




## BEARING CAPACITY

### Light Weight Drop Tester (LWDT)



Very useful equipment, easy to handle an to use, for the quick control ofearthworks (embankments, subgrades, foundations)

$$E_{s,din} = \frac{22,5}{d}$$

↓

From Boussinesq



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 270



**POLITECNICO DI TORINO**
**Master Course**
**in Civil Engineering**
2017-18

**Construction of Roads, Railways and Airports (01RVMMX)**

***EARTHWORKS***
Construction of the road prism

## Construction of the road prism

Carried out by means of earthworks.

The following activities are usually performed:

- CLEARING AND GRUBBING activities clearing construction site.
- REMOVAL OF TOPSOIL → separated, could be useful for slopes
- EXCAVATIONS (opening of roadway, preparation of foundations for embankments and other elements) ↘ for cut sections, not only also refill w/ some...
- EMBANKMENT CONSTRUCTION – SUBGRADE
- FILL → trenches, ≠ types





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 270

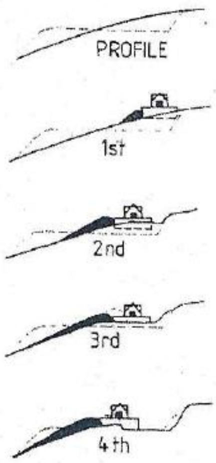


## Construction of the road prism

**EXCAVATION**

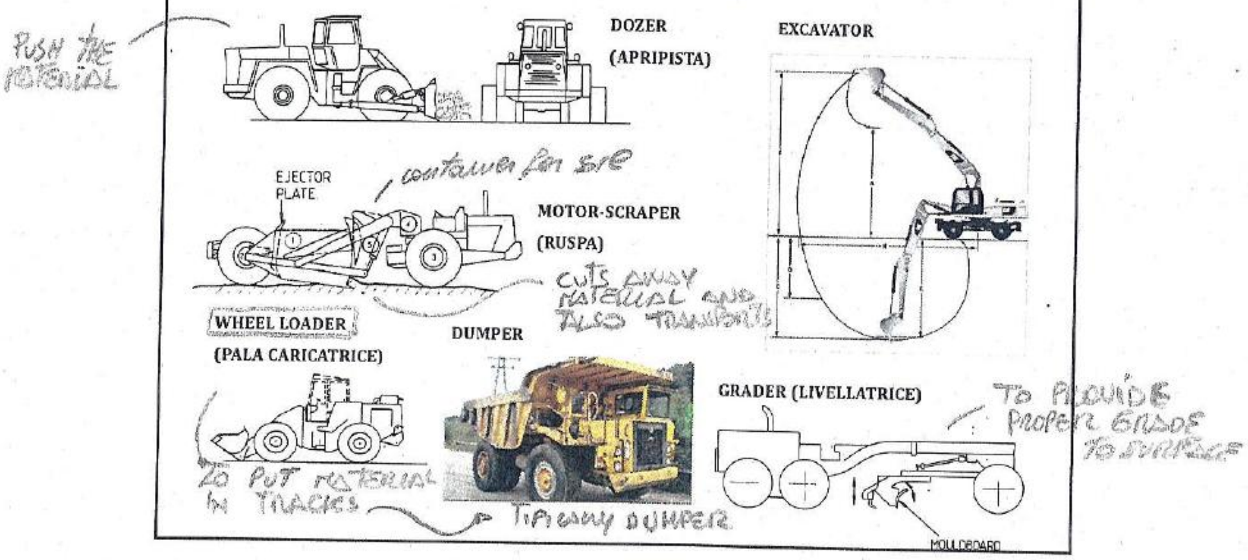
- opening of roadway;
- formation of pavement section in cut sections;
- remediation of embankment foundation, including formation of transverse steps (if transverse slope > 15%);

start to excavate in cut section to reuse soil




## Construction of the road prism

**EQUIPMENT (EXCAVATION, LAODING, TRANSPORT)**








© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 270



## Construction of the road prism

**EMBANKMENT FOUNDATION** – ***Compressible soils***

If predicted settlements of the embakment foundation are greater than **15 cm**, the Contractor will prepare a detailed workplan for their measurement and monitoring in time.
Embankment constructionn will be scheduled in order to have a residual settlement (still to occur) at the end construction less than of **10%** of totale estimated settlement and in any case lower than **5 cm**.

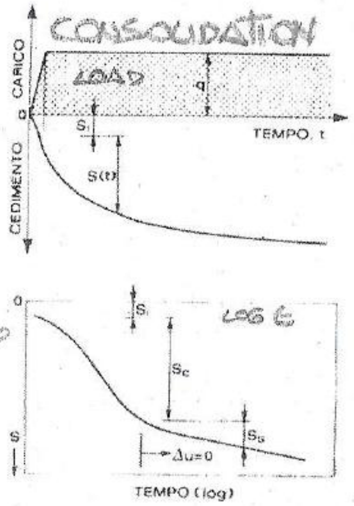
***(CIRS Technical Specifications)***

SETTLEMENT OCCURRING IN TIME. → LITTLE PART SMALLEST POSSIBLE

## Construction of the road prism

Terzaghi theory

**EMBANKMENT FOUNDATION** – ***Settlements***




$$S = S_i + S_c(t) + S_s(t)$$

- Immediate settlement $S_i$ – due to load application (undrained conditions)
- Consolidation settlement $S_c(t)$ – due to the progressive load transfer to soil particles
- Secondary setlement $S_s(t)$ – due to viscous strains ($\Delta u = 0$)

***In the case of coarse-grained soils no consolidation: initial and secondary.***

No settlement embankment → xk already compacted a [illegible] material → won't be changing in shape

calculate settlement foundation → IMMEDIATE SETTL. $S_i$
CONSOLIDATION S. $S_c$ → load from water to soil
SECONDARY $S_s$ → VISCOUS STRAINS





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 270



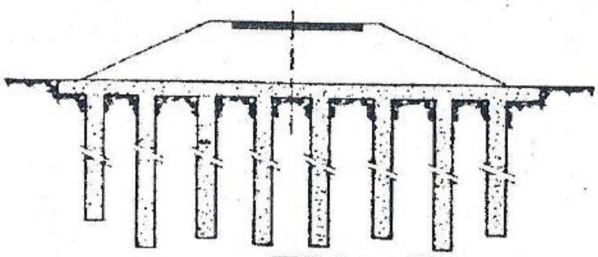
## Construction of the road prism

**COMPRESSIBLE SOILS** – *Vertical drains*

COLUMN ATTRACTS WATER

COLUMNS FILLED WITH SAND ↓ DRAINAGE FREE

Often combined with preloading



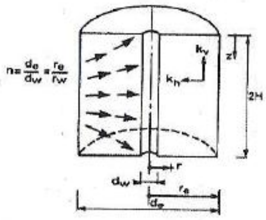
**Function of drains**

⇓

Modify drainage path (radial) and reduce consolidation time

CHOOSE APPROPRIATE DIAMETER AND LENGHT

RADIO FLOW OF THE WATER




**TYPES**

- **Sand drains (natural)**
- **Precast drains**

DIAMETER → affects on function of system

## Construction of the road prism

**COMPRESSIBLE SOILS** – *Sand drains (natural)*

Vertical drilling followed by filling with selected sand

***Particle size distribution (ASTM)***

| Sieve opening [mm] | Passing [%] |
|---|---|
| 4.75 (4 ASTM) | 85 ÷ 100 |
| 1.18 (16 ASTM) | 40 ÷ 85 |
| 0.300 (50 ASTM) | 5 ÷ 30 |
| 0.150 (100 ASTM) | 2 ÷ 10 |
| 0.075 (200 ASTM) | 0 ÷ 3 |

FOR ANTICAPILLARY LAYER AND HIGH DRAINAGE LEVEL

0 ÷ 3: LOW, SO NO CAPILLARITY





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 270

One can inject air, water, concrete.
Diameters go from 0.4 m = 40 cm to 2.5 m.
Usually use in industrial ports, airports because it's expensive.

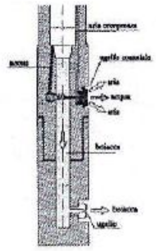


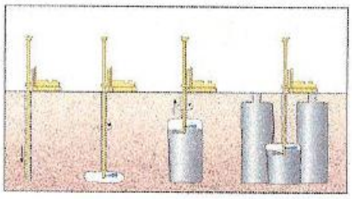
## Construction of the road prism

### COMPRESSIBLE SOILS – *Column treatment*

| Sistema | Fluido | Pressione (MPa) | Velocità getto (m/s) | D (m) |
|---|---|---|---|---|
| Monofluido | Boiacca di cemento | 20 ÷ 40 | 100 ÷ 250 | 0.40 ÷ 0.60 |
| Bifluido (jumbo special pile) | Boiacca di cemento<br>Aria | 25 ÷ 40<br>0.7 ÷ 1 | 100 ÷ 200<br>> 330 | 0.80 ÷ 1.60 |
| Trifluido (Kajima) | Boiacca di cemento<br>Aria<br>Acqua | 2 ÷ 6<br>0.7 ÷ 1.7<br>40 ÷ 60 | 50 ÷ 80<br>> 330<br>350 ÷ 500 | 0.80 ÷ 2.50 |

JET-GROUTING



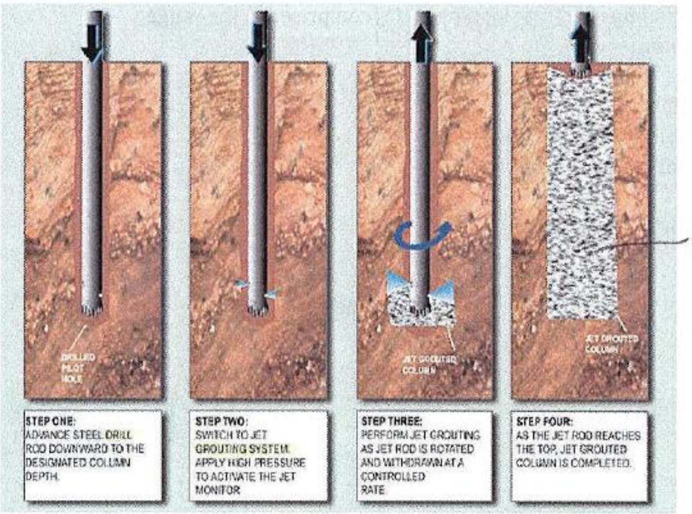


## Construction of the road prism

### COMPRESSIBLE SOILS – *Column treatment*

JET-GROUTING

Drilling operation








© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 270

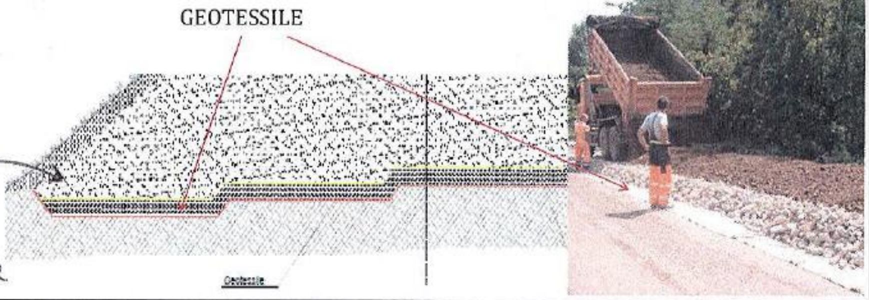
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 270



## Construction of the road prism

**EMBANKMENT FOUNDATION** – ***Anti-capillary layers***

Composed of natural material, thickness usually of the order of 30-50 cm, constituted by granular soil (gravel), with particles sizes comprised between 2 and 50 mm, with a percent passing 2 mm sieve not greater than 15% and percent passing 0,075 mm sieve non greater than al 3%. } CLEAN GRAVEL
Absence of unstable components (soluble, degradable, sensitive to freeze/thaw) and organic residues; the use of crushed or recycled materials is admitted.



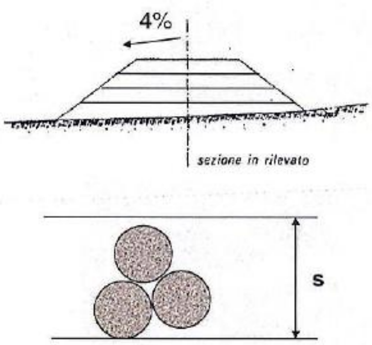

GRANULAR MATERIAL →
↓
- must be very durable
- expensive
- must have low fine fraction.

## Construction of the road prism

**EMBANKMENTS**

**Construction operations:**

- thickness of layers depends upon characteristcs of materials and available equipment;
- thickness of layers not smaller that twice the maximum particle size of employed soil (**s > 2 Dmax**); in any case, Dmax < 300 mm (coarser particles should be discarded)
- inclined working planes for water runoff TRANSVERSE SLOPE
- construction of a layer depends on prelimenary verification of underlying layers (**bearing capacity, in situ density**)
  ↳ DO TESTS IN SITU




coarse material can't be placed in thin layers. Particles not bigger than Ø = 300 mm





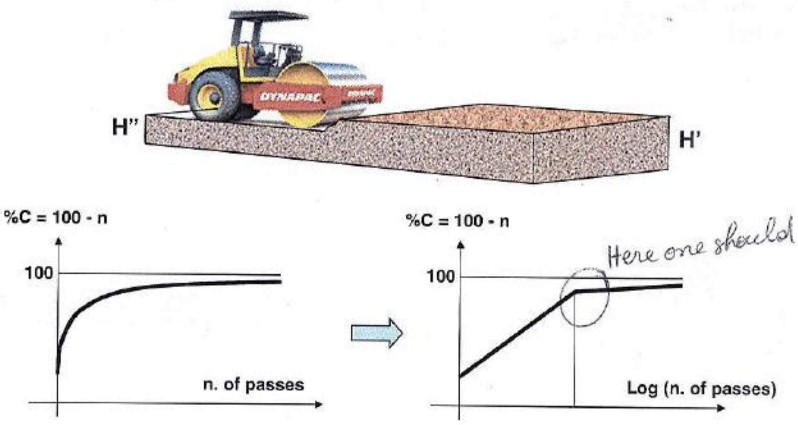
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 270



## Construction of the road prism

### GENERAL PRINCIPLES OF IN SITU COMPACTION




%C = percent compaction
n = porosity

Here one should have a good compaction

## Construction of the road prism

### GENERAL PRINCIPLES OF IN SITU COMPACTION

OVERCOMING INT. FRICTION ←

***Static compaction***
Based on the action of dead weight of equipment which translates into vertical stresses. Internal friction is overcome and soil volume is reduced.

Limited effect in depth (effects typically extend down to 20 cm). in general
Smooth static compaction is useful for finishing operations after oscillatory/vibratory compaction (limits the risks of suface disgregation).



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 270

17/10/2017

## Construction of the road prism

**DYNAMIC COMPACTION**

It follows: ACCELERATION OF DRUM?

The DIRECTION of the force changes in time following the law

$$a_T = \frac{M_e \cdot \omega^2}{m_T} \longrightarrow \textit{Drum acceleration}$$

($M_e \cdot \omega^2 = F_c$ that we know now.)

$$a_{T,V} = \frac{M_e \cdot \omega^2}{m_T}\cos(\omega t) \longrightarrow \textit{Vertical component of acceleration}$$

INTEGRATE twice

$$v_{T,V} = \int_0^t \frac{M_e \cdot \omega^2}{m_T}\cos(\omega t)dt = \frac{M_e}{m_T}\omega \cdot sen(\omega t)$$

$$s_{T,V} = \int_0^t \frac{M_e \cdot \omega}{m_T}sen(\omega t)dt = -\frac{M_e}{m_T}\cos(\omega t)$$

$$A_T = \left|\max s_{T,V}\right| = \frac{M_e}{m_T} = \frac{F_c}{m_T \cdot \omega^2}$$

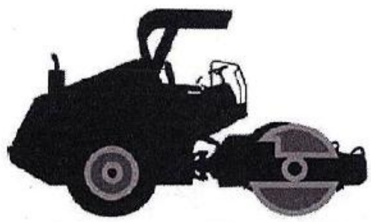
***Maximum theoretical oscillation amplitude of a «suspended» drum*** IDEAL

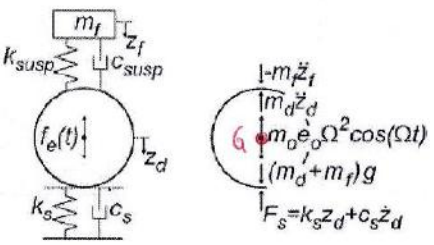
ROLLER: $m_T$ = mass of drum; $Me, r$ } amplitude of vibration (oscillation) → in horizontal and vertical direction.

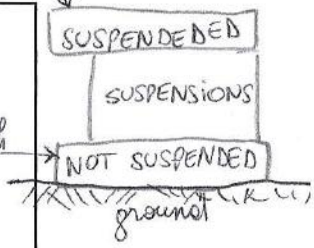
## Construction of the road prism

**DYNAMIC COMPACTION**

**Drum-soil interaction model**






SPRINGS
DASHPOTS ammortizzatore



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 270



## Construction of the road prism

**DYNAMIC COMPACTION**

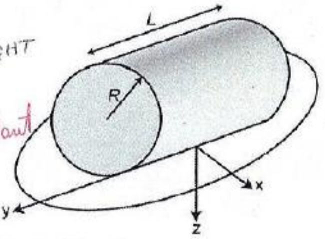
**Lundberg model**

*Rigid body on elastic homogeneous and isotropic support*

DISPLACEMENT LOADING LENGHT

$$z_d = \frac{2 \cdot (1-\upsilon^2)}{\pi \cdot E} \frac{F_s}{L} \left(1{,}8864 + \ln \frac{L}{b}\right)$$

constant




$$b = \sqrt{\frac{16 \cdot R \cdot (1-\upsilon^2)}{\pi \cdot E \cdot L} \cdot F_s}$$

*Contact width of body (drum)*

Parameter used for the control of compaction characteristics

$z_d \propto F_s$ and at a given geometry is controlled by $E_d$

## Construction of the road prism

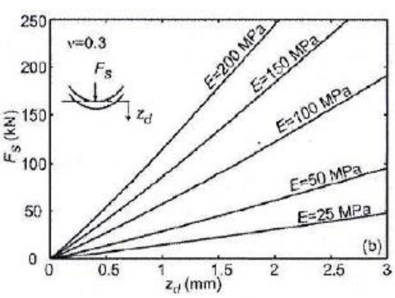
**INTELLIGENT COMPACTION** ≅ CCC continuous Compaction Control.

Several compactors have a measurement system which allows real-time monitoring of mechancial properties of soil and the consequent modification of the compaction procedure in order to obtain required final results ***(Intelligent Soil Compaction)***

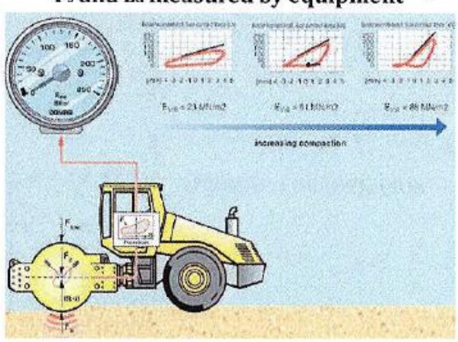
have a mapping of the area

→ measures the E

CHART




**$F_s$ and $z_d$ measured by equipment**




**Estimate of E ($E_{VIB}$)**



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 270

17/10/2017

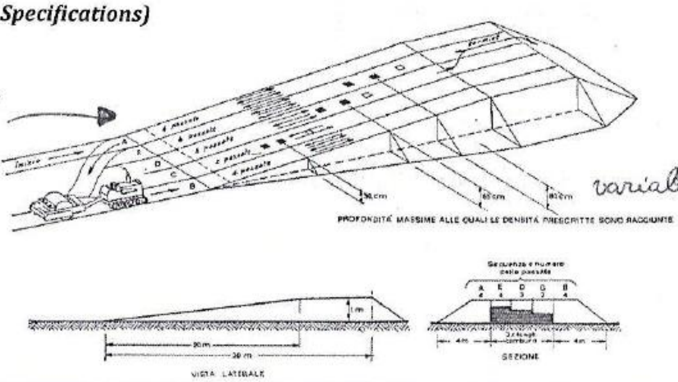
## Construction of the road prism

**SITE TRIALS**

Necessary for all major construction works.
The purpose is to define and validate the routine working technique in terms of employed equipment and layer thicknesses.
End results have to be checked in terms of dry density and bearing capacity.

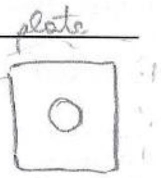
***(CIRS Technical Specifications)***

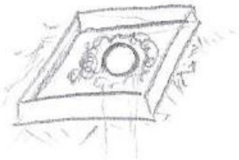
Have at least 1 parameter changing → to see what happen




## Construction of the road prism

**MEASUREMENT OF IN SITU DENSITY – *Sand cone method***



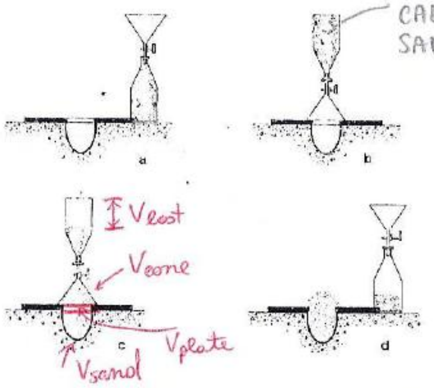



**Volume of void** $V = \frac{m_1 - m_2}{\gamma_{S,mucchio}} - V_{Cono} - V_{piastra}$

**Dry density** $\gamma_s = \frac{\frac{m_3}{1+\frac{w}{100}}}{V}$

In cui:

- $m_1$ = mass of the full container
- $m_2$ = mass of the empty container
- $m_3$ = mass of extracted sample




$V_{lost} = V_{cone} + V_{plate} + V_{sand}$ (known)

PROCTOR → DRY DENSITY → calculated after ...ing some ...e of particles

to compare DRY DENSITIES we have to take out some particles from SAND CONE METHOD.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 270

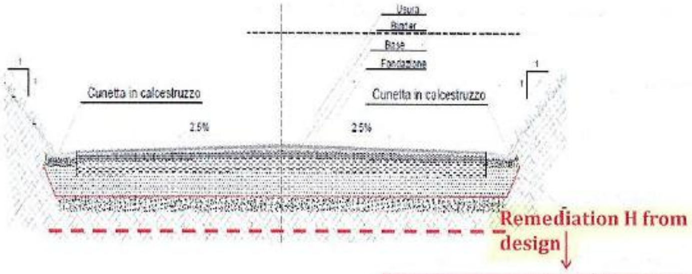
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 270



## Construction of the road prism

**SUBGRADE**

Soil volume in which the effects of traffic loading are non-negligible; it is the zone of transition between embankment/ground and pavement.




- **Substitution of in situ material**
- **Stabilization of in situ material**

## Construction of the road prism → Closer to the loads:

- low fine conten
- non plastic
- A1-a, A1-b should be used
- A2 ÷ A5 must be stabilized

**SUBGRADE – *Employed soils***

Evenness of pavement laying surface leads to exclusion of particles greater than D=100 mm;
Use of granular soils, well-distributed, preferably composed of crushed particles, with low fine content (percent passing the 0,075 mm sieve lower than 12%) and not plastic (PI<6).
Materials belonging to groups A1-a are of premium quality.
Alternative materials:
- Soils of groups A1-b;
- Soils of groups A2-4 ed A2-5, with percent passing the 0.075 mm sieve greater than 12%, preliminarily subjected to stabilization with cement or cement-lime;
- Soils of groups A2-6 ed A2-7 with a percentage of fines greater than 5% preliminarily subjected to stabilization with lime or cement-lime;
- Silts of groups A4 ed A5 if subjected to cement-lime stabilization, and clays of groups A6 ed A7, with limited plasticity (PI < 25%), if subjected to lime stabilization.





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 270

24/10/2017

**POLITECNICO DI TORINO**
**Master Course**
**in Civil Engineering**
2017-18

**Construction of Roads, Railways and Airports (01RVMMX)**

***EARTHWORKS***
Equipment

## EARTHWORKS

### DEFINITIONS

L'attività di movimento terra (MT), di norma, si esplica attraverso l'impianto di aree di cantiere, finalizzate alla realizzazione di opere civili (dalla costruzione di edifici fino alle grandi infrastrutture)

Risulta, quindi, di fondamentale importanza, per la riuscita di un lavoro, predisporre ed attivare un CANTIERE MECCANIZZATO per la lavorazione delle terre che sia funzionalmente rispondente alle esigenze tecnico-economiche del lavoro da eseguire.

La CANTIERIZZAZIONE DELL'OPERA è un PROGETTO che ha come risultato:

- **scelta dei singoli mezzi meccanici** occorrenti per ogni lavorazione, determinandone le relative caratteristiche: tipo, potenza, quantità o numero; → EACH UNIT / MACHINE
- **determinazione del ciclo di lavoro** delle singole macchine e del ciclo delle lavorazioni effettuate da più macchine fra loro interdipendenti; → CONSIDER THE INTERACTIONS BETWEEN MACHINES
- **predisposizione di diagrammi di lavorazione** da cui derivare lo schema dell'organizzazione generale del cantiere. → DIAGRAMS



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 270

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 270



## EARTHWORKS

### TRANSFORMATION COEFFICIENTS

In order to identify the equipment to employ for earthworks, it is necessary to know the ratio between the various volumes, defined by means of **transformation coefficients.**

$\gamma_b$, $\gamma_s$ and $\gamma_c$ : densities corresponding to bank, loose and compacted conditions

The following relationships hold (for a given, constant mass **P** of soil):

SWELL FACTOR → $f_r$ (from bank to loose) [%] : "RIGONFIAMENTO"

$$f_r = \left(\frac{V_s - V_b}{V_b}\right) \cdot 100 \quad = \left(\frac{V_s}{V_b} - 1\right) \quad = \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_s} - 1\right) \cdot 100$$

LOADING FACTOR → $f_c$ (from loose to bank) :

$$f_C = \frac{V_B}{V_S} = \frac{\gamma_s}{\gamma_b}$$

moreover: $f_r = \left(\frac{1}{f_C} - 1\right) \cdot 100$

## EARTHWORKS

### TRANSFORMATION COEFFICIENTS/1

| WEIGHT* OF MATERIALS | LOOSE kg/m³ | LOOSE lb/yd³ | BANK kg/m³ | BANK lb/yd³ | LOAD FACTORS |
|---|---|---|---|---|---|
| Basalt | 1960 | 3300 | 2970 | 5000 | 0.67 |
| Bauxite, Kaolin | 1420 | 2400 | 1900 | 3200 | 0.75 |
| Caliche | 1250 | 2100 | 2260 | 3800 | 0.55 |
| Carnotite, uranium ore | 1630 | 2750 | 2200 | 3700 | 0.74 |
| Cinders | 560 | 950 | 860 | 1450 | 0.66 |
| Clay — Natural bed | 1660 | 2800 | 2020 | 3400 | 0.82 |
| Dry | 1480 | 2500 | 1840 | 3100 | 0.81 |
| Wet | 1660 | 2800 | 2080 | 3500 | 0.80 |
| Clay & gravel — Dry | 1420 | 2400 | 1660 | 2800 | 0.85 |
| Wet | 1540 | 2600 | 1840 | 3100 | 0.85 |
| Coal — Anthracite, Raw | 1190 | 2000 | 1600 | 2700 | 0.74 |
| Washed | 1100 | 1850 | | | 0.74 |
| Ash, Bituminous Coal | 530-650 | 900-1100 | 590-890 | 1000-1500 | 0.93 |
| Bituminous, Raw | 950 | 1600 | 1280 | 2150 | 0.74 |
| Washed | 830 | 1400 | | | 0.74 |
| Decomposed rock — | | | | | |
| 75% Rock, 25% Earth | 1960 | 3300 | 2790 | 4700 | 0.70 |
| 50% Rock, 50% Earth | 1720 | 2900 | 2290 | 3850 | 0.75 |
| 25% Rock, 75% Earth | 1570 | 2650 | 1960 | 3300 | 0.80 |
| Earth — Dry packed | 1510 | 2550 | 1900 | 3200 | 0.80 |
| Wet excavated | 1600 | 2700 | 2020 | 3400 | 0.79 |
| Loam | 1250 | 2100 | 1540 | 2600 | 0.81 |
| Granite — Broken | 1660 | 2800 | 2730 | 4600 | 0.61 |
| Gravel — Pitrun | 1930 | 3250 | 2170 | 3650 | 0.89 |
| Dry | 1510 | 2550 | 1690 | 2850 | 0.89 |
| Dry 6-50 mm (1/4"-2") | 1690 | 2850 | 1900 | 3200 | 0.89 |
| Wet 6-50 mm (1/4"-2") | 2020 | 3400 | 2260 | 3800 | 0.89 |
| Gypsum — Broken | 1810 | 3050 | 3170 | 5350 | 0.57 |
| Crushed | 1600 | 2700 | 2790 | 4700 | 0.57 |
| Hematite, iron ore, high grade | 1810-2450 | 4000-5400 | 2120-2900 | 4700-5400 | 0.85 |





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 270