



Corso Luigi Einaudi, 55/B - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1307

ANNO: 2014

# A P P U N T I

STUDENTE: Fiorello

MATERIA: Costruzione Strade Ferrovie Aeroporti,  
Prof.Santagata

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 STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**



**POLITECNICO DI TORINO**

**CORSO DI**

**COSTRUZIONE DI STRADE,  
FERROVIE E AEROPORTI**

**ING. CIVILE**

Docente relatore del corso:  
Prof. E. Santagata

a.a. 2013-2014

05/10/2013

## Orario

---

**LUNEDÌ**

Lezione - 11.30 + 13.00 Aula 2C

**MARTEDÌ**

Lezione - 10.00 + 13.00 Aula 7N

**MERCOLEDÌ**

Esercitazione - 14.30 + 16.00 Aula 15

**Periodo delle lezioni**

30 settembre 2013 - 18 gennaio 2014

(pausa Natalizia dal 23 dicembre 2013 al 6 gennaio 2014)

## Inquadramento generale

---

### Fasi connesse alla realizzazione dell'opera

#### Verifica della fattibilità

- Studio di PREFATTIBILITA'
- Studio di FATTIBILITA'

#### Progettazione

- Progetto PRELIMINARE
- Progetto DEFINITIVO
- Progetto ESECUTIVO

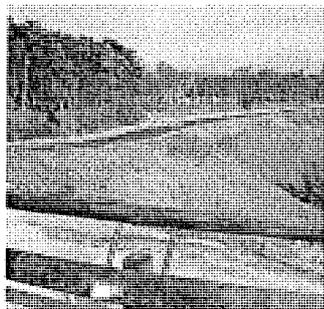
#### Costruzione

- Affidamento dei LAVORI (APPALTO)
- Esecuzione dei LAVORI
- Misura e contabilità dei LAVORI

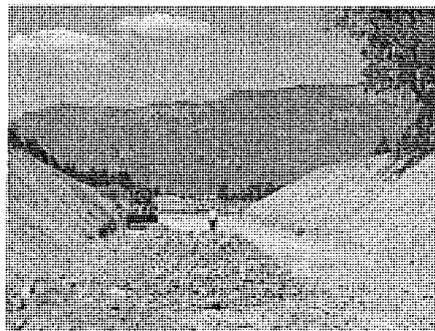
#### Collaudo finale

05/10/2013

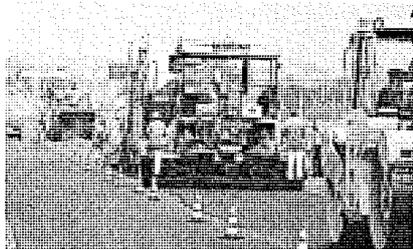
## Inquadramento generale



RILEVATO



TRINCEA



PAVIMENTAZIONE

... ALLA COSTRUZIONE

## Obiettivi del Corso

### LEZIONI TEORICHE

L'obiettivo delle lezioni è di fornire gli strumenti tecnico-scientifici inerenti alla costruzione, la manutenzione ed il controllo delle infrastrutture di trasporto (stradali, ferroviarie ed aeroportuali).

I contenuti scientifico-disciplinari del corso coinvolgono le problematiche relative ai materiali stradali con riferimento alla loro caratterizzazione ed alle modalità di messa in opera, alla stabilità del corpo stradale e delle sovrastrutture, agli impianti ed ai dispositivi complementari.

Particolare attenzione viene riservata alle tecnologie ed ai metodi di analisi più innovativi sotto il profilo metodologico e strumentale, nonché allo studio ed alla applicazione dei criteri fondamentali posti alla base dei capitolati tecnici.

05/10/2013

## Programma degli argomenti/2

---

### CORPO STRADALE E MOVIMENTO TERRA (Strade, Ferrovie ed Aeroporti)

- Richiami sulle terre
- Mezzi d'opera. Descrizione dei principi di funzionamento e della capacità operativa
- Principi della compattazione in situ per mezzo dei rulli costipanti
- Preparazione del piano di posa del rilevato e interventi per la difesa dalle acque di falda
- Tecniche per la stabilizzazione delle terre in situ
- Costruzione del rilevato. Allestimento dei campi prova
- Controlli in corso d'opera e sul manufatto finito
- Impiego dei geosintetici
- Opere di presidio idraulico (acque meteoriche)

## Programma degli argomenti/3

---

### SOVRASTRUTTURE STRADALI ED AEROPORTUALI

- Tipologie di sovrastrutture e ambiti di applicazione
- Aggregati lapidei: caratteristiche fisico-meccaniche e prove di qualificazione. Marcatura CE
- Leganti bituminosi: caratteristiche chimiche e reologiche. Sistema di classificazione tradizionale e SHRP. Bitumi modificati e caratterizzazione reologica avanzata (NCHRP - cenni)
- Emulsioni bituminose. Caratterizzazione e sistema di classificazione
- Misti granulari per strati di fondazione.
- Misti cementati per strati di fondazione.
- Miscele bituminose per pavimentazioni flessibili. Caratteristiche volumetriche e meccaniche Mix design (Marshall e Superpave)
- Conglomerati cementizi
- Miscele bituminose speciali
- Costruzione delle pavimentazioni flessibili. Mezzi d'opera. Preparazione della superficie di stesa, compattazione, controlli in corso d'opera e finali
- Costruzione delle pavimentazioni rigide. Mezzi d'opera. Preparazione della superficie di stesa, realizzazione dei giunti, controlli in corso d'opera e finali
- STRIP e RESA aeroportuali

05/10/2013

## Bibliografia di riferimento

---

- o Appunti dalle lezioni e dispense proiettate in aula
- o G. Tesoriere "Strade, Ferrovie ed Aeroporti - Vol. II" Ed. UTET
- o G. Ferrari - F. Giannini "Ingegneria Stradale - Vol. 2" Ed. ISEDI
- o National Center for Asphalt Technology "Hot Mix Asphalt - Materials, Mix Design and Construction" 2nd edition
- o CIRS (Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale ed Aeroportuale) "Norme Tecniche Prestazionali per Capitolati Speciali d'Appalto"  
Studio a carattere pre-normativo redatto per il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Commissione di studio per le norme relative ai materiali stradali e progettazione, costruzione e manutenzione strade del CNR, Roma
- o AIPCR "Linee guida per la redazione di un capitolato prestazionale per pavimentazioni stradali in calcestruzzo" Comitato tecnico D.2c

## Modalità d'esame

---

### Prova orale

con 2-3 domande su tutti gli argomenti trattati nel corso

E' obbligatorio consegnare con congruo anticipo (almeno 1 settimana prima della data di appello) l'elaborato finale relativo alle esercitazioni, pena l'esclusione dall'esame

Il voto finale tiene conto anche della valutazione attribuita all'elaborato finale

05/10/2013

## **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

---

### **Fasi connesse alla realizzazione dell'opera**

#### **Verifica della fattibilità**

- Studio di PREFATTIBILITA'
- Studio di FATTIBILITA'

#### **Progettazione**

- Progetto PRELIMINARE
- Progetto DEFINITIVO
- Progetto ESECUTIVO

#### **Costruzione**

- Affidamento dei LAVORI (APPALTO)
- Esecuzione dei LAVORI
- Misura e contabilità dei LAVORI

#### **Collaudo finale**

## **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

---

### **Progetto esecutivo**

- Relazione generale
- Relazioni specialistiche
- Elaborati grafici comprensivi delle strutture, degli impianti e di ripristino e miglioramento ambientale
- Calcoli esecutivi delle strutture e degli impianti
- Piani di manutenzione dell'opera
- Piani di sicurezza e coordinamento
- Computo metrico estimativo e quadro economico
- Cronoprogramma
- Elenco prezzi unitari ed eventuali analisi
- Capitolato Speciale d'Appalto



Lega il progetto dell'opera alla sua esecuzione

05/10/2013

## CAPITOLATO SPECIALE d'APPALTO (CSA)

### Norme tecniche di esecuzione

> PRESCRITTIVE

> PRESTAZIONALI

## CAPITOLATO SPECIALE d'APPALTO (CSA)

### Norme tecniche di esecuzione

> PRESCRITTIVE

Si fondano sulla conoscenza della buona riuscita di precedenti realizzazioni analoghe per tipologia e condizioni di esercizio. Esse sono riferite a tutte le fasi della realizzazione di una determinata opera e vanno dall'accettabilità dei materiali al confezionamento delle miscele, alle macchine di cantiere e, più in generale, alle modalità di esecuzione dei lavori.

In tal caso l'Impresa esecutrice viene guidata in maniera piuttosto rigida lungo tutto il percorso che porta dalla scelta dei materiali alla loro messa in opera.

Sono norme tecniche rigide, si eseguono delle verifiche sulle aspettative. Le prescrizioni derivano dall'esperienza passata, ci sono però dei fattori unici, tipici di ogni lavorazione.

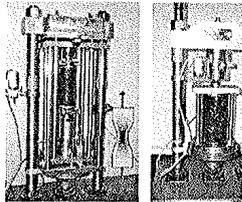
che possono provocare degli eventuali rischi. Le norme tecniche prescrittive sono efficaci per le lavorazioni di tipo tradizionale su cui ho una certa esperienza.

## CAPITOLATO SPECIALE d'APPALTO (CSA)

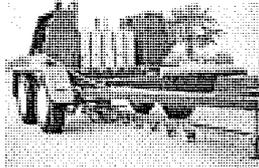
### Norme tecniche di esecuzione

#### > PRESCRITTIVE vs PRESTAZIONALI

L'utilizzo di un sistema di norme prestazionali richiede l'impiego di grandezze derivanti da tecniche di indagine avanzate, quali prove simulative in vera grandezza e/o prove di laboratorio di tipo razionale.



Caratterizzazione di laboratorio di tipo razionale



Prestazioni strutturali (FWD)

Prestazioni funzionali (SCRIM)



## CAPITOLATO SPECIALE d'APPALTO (CSA)

### ESEMPIO - Capacità portante della fondazione stradale

ANAS S.p.A.

I.T.C.05.16/ Rev.1/14.07.2006

CAPITOLATO SPECIALE D'APPALTO

Norme Tecniche

Pag. 662 di 938

l'indice di portanza CBR (CNR - UNI 10009) dopo quattro giorni di imbibizione in acqua (eseguito sul materiale passante al crivello 25) non minore di 50.

inoltre richiesto che tale condizione sia verificata per un intervallo di  $\pm 2\%$  rispetto all'umidità ottima di compattamento.

Il valore del modulo di deformazione (CNR 146 - 1992) nell'intervallo compreso fra 0,15 - 0,25 MPa non dovrà essere inferiore a 80 MPa.

In caso contrario l'impresa, a sua cura e spese dovrà adottare tutti i provvedimenti atti al raggiungimento del valore prescritto, non esclusa la rimozione ed il rifacimento dello strato.



Impostazione PRESCRITTIVA

05/10/2013

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

La fase costruttiva dell'opera deve mirare a realizzare un manufatto di elevata qualità

- Materiali
- Lavorazioni

### QUALITA' - Definizione (ISO 9000)

Capacità di un insieme di caratteristiche inerenti ad un prodotto, sistema o processo di ottemperare a dei prefissati requisiti nei riguardi di clienti o altre parti interessate

#### REQUISITI (*Specifications*)

↳ Risulta essenziale definire un insieme adeguato di specifiche tecniche e garantire che tali specifiche vengano rispettate durante la costruzione

- Quali requisiti richiedere? (**metodi di caratterizzazione**)
- Come richiedere dati requisiti? (**regime di qualificazione**)
- Come verificarne la rispondenza? (**criteri di accettazione**)

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Regime di qualificazione



Sistema e controllo di qualità  
(*Quality Assurance/Quality Control*)

**Quality Control (QC)** - Riguarda l'insieme di attività tecniche routinarie per misurare e verificare la qualità di un dato prodotto o lavorazione. Un sistema di QC deve consentire:

- Controlli regolari e attendibili per la verifica delle caratteristiche del prodotto/lavorazione
- Identificare l'insorgenza di eventuali problemi e le cause

**Quality Assurance (QA)** - Riguarda un sistema programmato di attività svolte da un soggetto terzo o personale non direttamente coinvolto nella produzione/lavorazione sottoposta al sistema stesso (**VERIFICA INDIPENDENTE**)

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Variabilità delle caratteristiche dei materiali/lavorazioni

La variabilità totale è la somma di più componenti

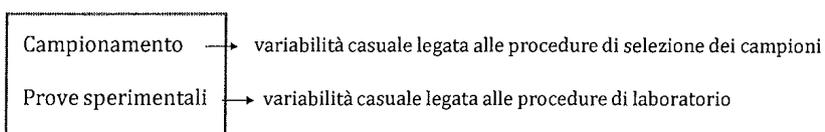
- Campionamento
- Prove sperimentali
- Materiale
- Costruzione (produzione e messa in opera)

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

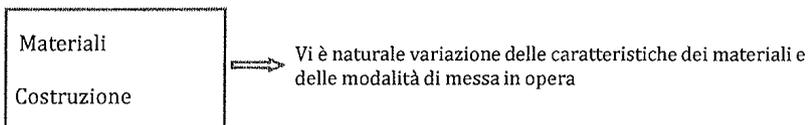
Variabilità = campionamento + laboratorio + materiale/costruzione

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Variabilità delle caratteristiche dei materiali/lavorazioni



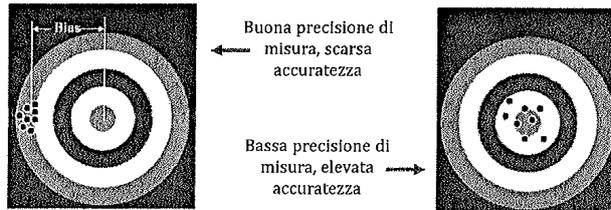
- Possono essere causa di più del 50% della variabilità totale
- Risulta fondamentale il rispetto rigoroso delle procedure da parte degli operatori



## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Terminologia

- **Precisione** = variabilità di misure ripetute in condizioni controllate
- **Accuratezza** = conformità del risultato rispetto al valore effettivo



## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Grandezze statistiche

- **Media**
- **Mediana**
- **Intervallo di variazione (range)**
- **Varianza**

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Coefficiente di variazione

Definisce il grado di variabilità delle misure

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

< 2% = variabilità molto bassa  
2 - 5% = variabilità bassa  
5 - 10% = variabilità moderata  
10 - 20% = variabilità alta  
> 20% = variabilità molto alta

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Criteri di campionamento

La determinazione di una data caratteristica relativa ad una predefinita quantità di prodotto (lotto), deve avvenire su un numero limitato di campioni



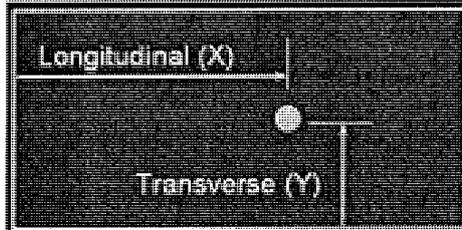
### PROGRAMMA DI CAMPIONAMENTO

- Frequenza delle prove
- Ubicazione dei campioni
- Dimensione dei campioni

05/10/2013

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Generazione di posizioni casuali



Per ogni sub-lotto si definisce un sistema locale di coordinate cartesiane



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	88	70	41	

Si genera una sequenza casuale di numeri

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### Generazione di posizioni casuali

I numeri generati vengono moltiplicati per le dimensioni trasversali del sub-lotto

Esempio → Forma rettangolare di dimensioni in pianta (100 x 12) m

#### Sub-lotto 1

- Coordinata X =  $0,74 \times 100 = 74$  m
- Coordinata Y =  $0,29 \times 12 = 3,5$  m

#### Sub-lotto 2

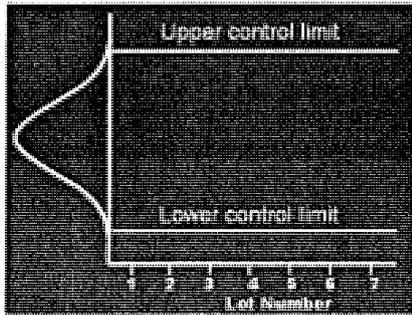
- Coordinata X =  $0,60 \times 100 = 60$  m
- Coordinata Y =  $0,21 \times 12 = 2,5$  m
- ... etc.

Le CARTE DI CONTROLLO sono strumenti statistici e servono per identificare problemi durante il processo di produzione.

### SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

#### CARTA DI CONTROLLO - Criteri di impiego

Può essere considerata come una sequenza di curve di distribuzione normali (asse delle ordinate) al variare dei campioni testati (lotti)



Si può assumere che il processo è "in controllo" quando i valori ricadono entro i limiti superiore e inferiore

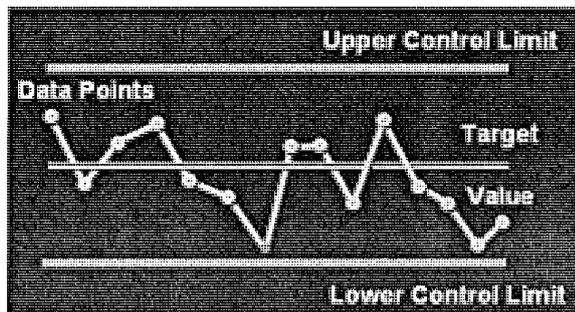


Media  $\pm 3 \sigma$

### SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

#### CARTA DI CONTROLLO - Criteri di impiego

Una caratteristica fondamentale di tale approccio è la possibilità di distinguere la variabilità di tipo casuale da quella sistematica dovuta ad una precisa causa



## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### CARTA DI CONTROLLO - Interpretazione

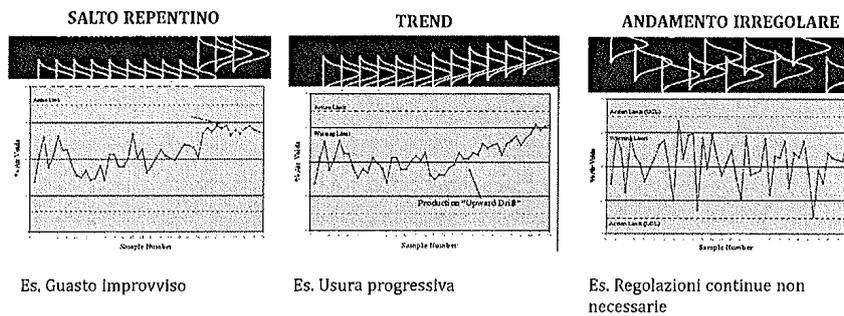
E' presente un problema (il sistema non è più in controllo) quando:

- $\bar{X}$  varia, R costante
- $\bar{X}$  costante, R varia
- $\bar{X}$  e R variano

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

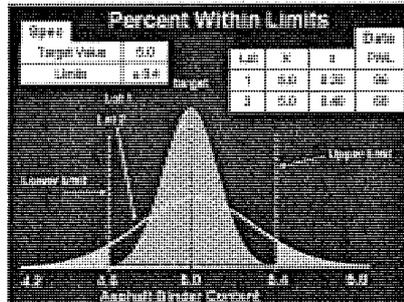
### CARTA DI CONTROLLO - Interpretazione

Es. Variazione della media

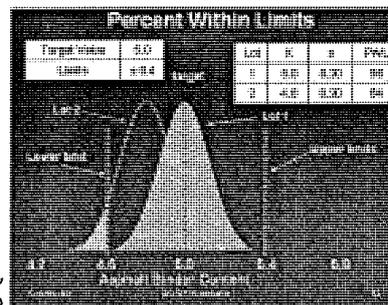


## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### ACCETTAZIONE - PWL



Stessa media, diverso grado di dispersione



Stessa deviazione standard, diverso valor medio

## SISTEMA E CONTROLLO DI QUALITA' (QA/QC)

### INDICI DI QUALITA'

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

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

#### VARIABILITY - UNKNOWN PROCEDURE STANDARD-DEVIATION METHOD

Quality Index (Q <sub>U</sub> or Q <sub>L</sub> )	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.

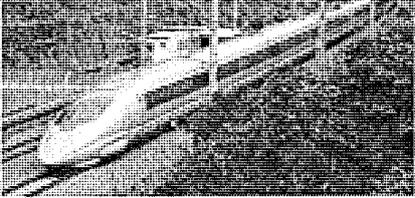
NOTE: More detailed tables (ΔQ = 0.01) can be developed from more accurate values of PWL.

Parametri P<sub>U</sub>/P<sub>L</sub> tabellati (AASHTO)

AASHTO QC/QA Guide Spec. Page 21

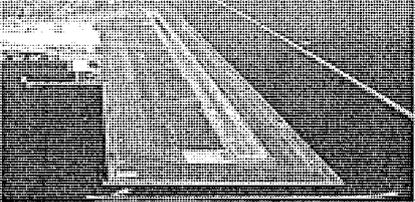


**POLITECNICO DI TORINO**  
**Corso di Laurea Magistrale**  
**in Ingegneria Civile**  
a.a. 2013-14



**Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti (03ALVMX)**

**CORPO STRADALE**  
Richiami e approfondimenti sulle terre  
(classificazione, costipamento, portanza)



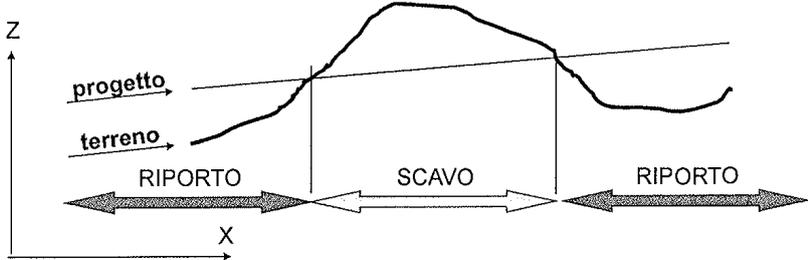
### GENERALITA'

---

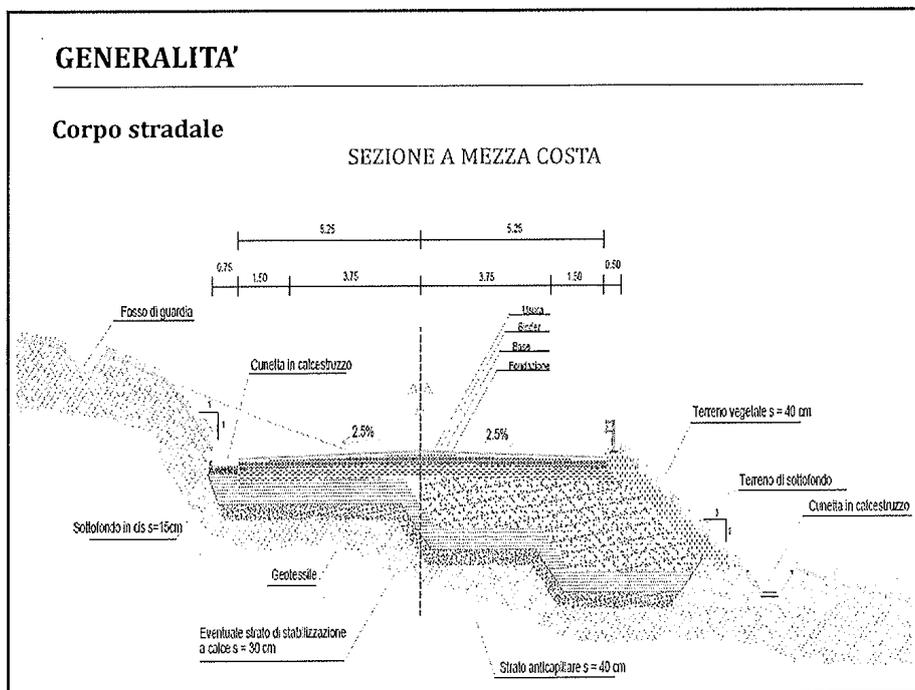
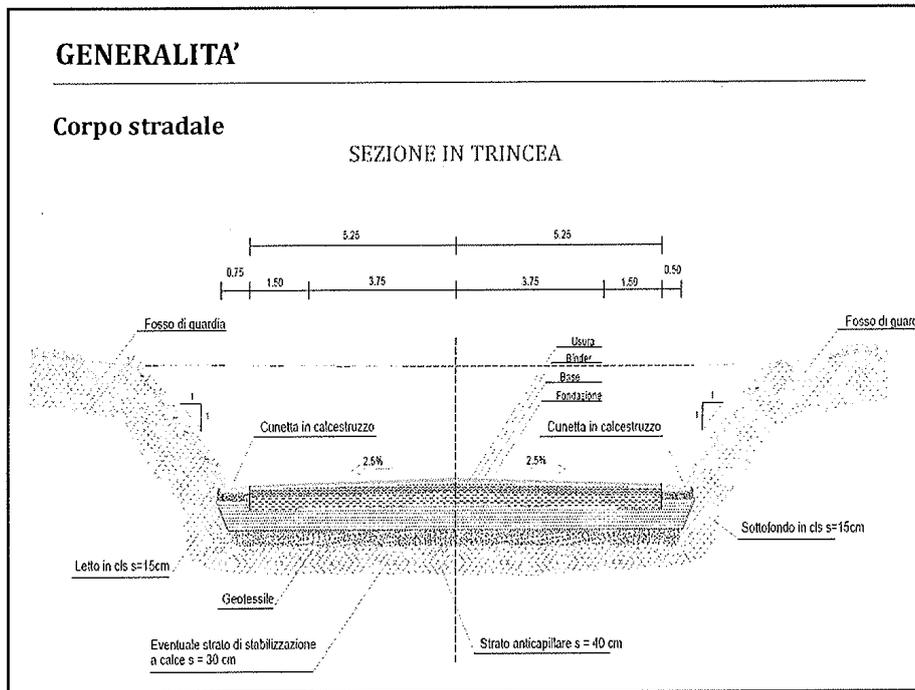
**Corpo stradale**

E' quel solido la cui sezione trasversale, ad una generica progressiva, è delimitata dalla piattaforma stradale inclusi gli elementi marginali, dal terreno originale e dalle scarpate laterali.

Il corpo stradale si realizza attraverso movimenti di materie con l'apertura di trincee e la costruzione di rilevati.



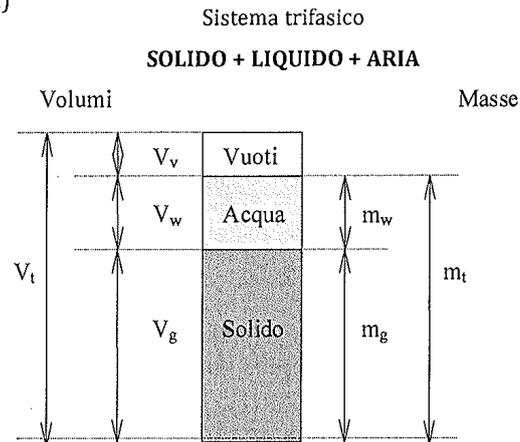
05/10/2013



## TERRE

Le terre sono il risultato di processi di alterazione:

- fisica (decompressione)
- chimica (azione di O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, acidi)
- organica (acidi, batteri)
- meccanica (erosione, urto)



## TERRE

### Definizioni

- Contenuto d'acqua

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

- Peso specifico dei granuli

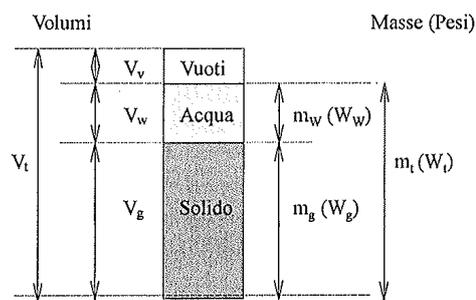
$$\gamma_s = \frac{W_g}{V_g}$$

- Peso specifico apparente

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_g}{V_g + V_v + V_w}$$

- Densità del secco

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



- Indice dei vuoti

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

- Porosità

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

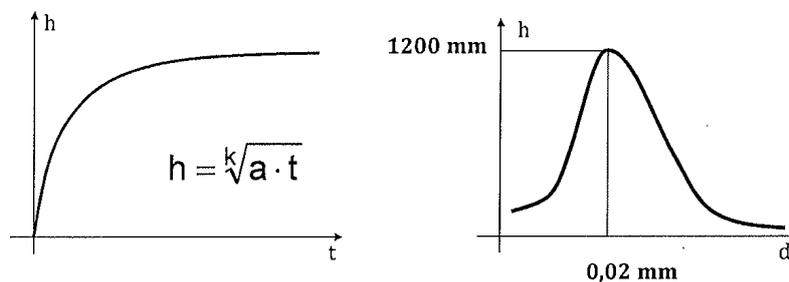
## TERRE

### Fenomeno della capillarità

Nei terreni non saturi, si possono destare tensioni di capillarità che provocano la risalita verso l'altro dell'acqua.

La risalita di acqua libera per capillarità (h) dipende da:

- tempo;
- apertura dei pori interstiziali tra grani.



## TERRE

### Problema del gelo

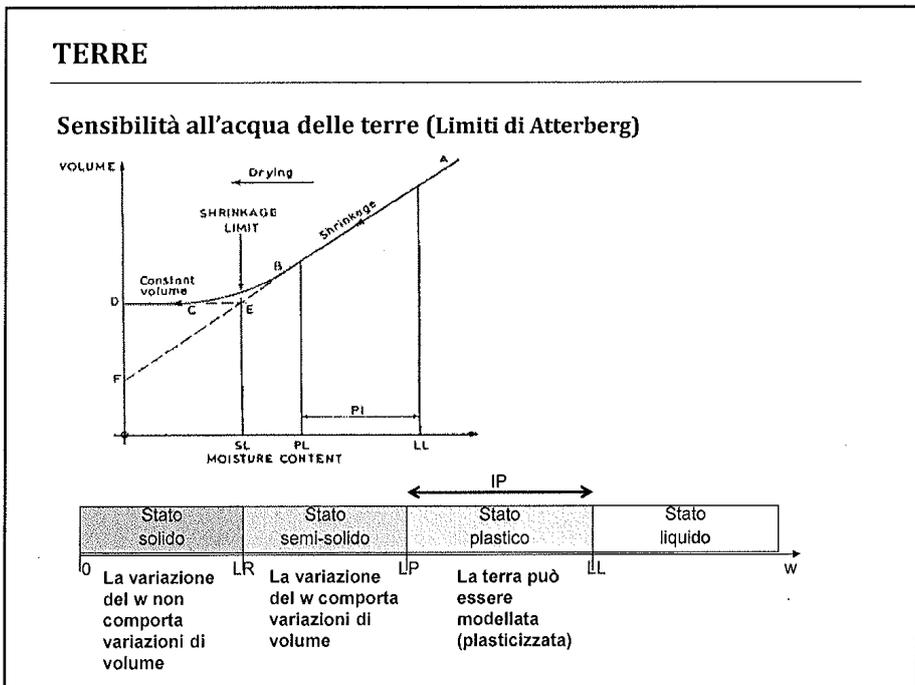
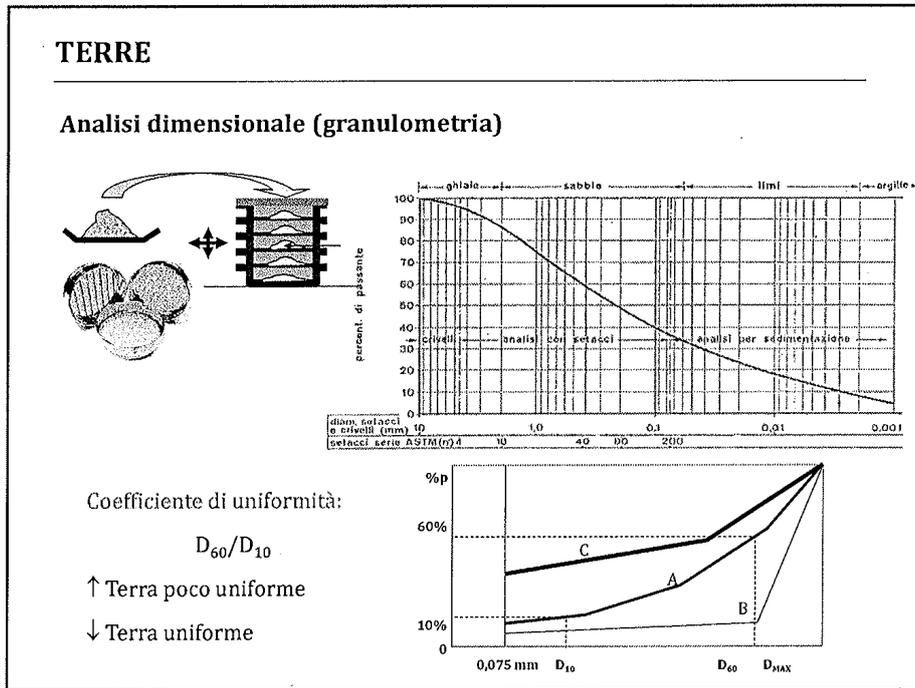
*Effetto delle basse temperature ( $T < 0^\circ\text{C}$ ) del periodo invernale:*

- formazione di lenti di ghiaccio;
- rigonfiamento;
- scioglimento primaverile con diminuzione di volume e perdita di capacità portante.

**Condizioni:**

- la granulometria del terreno;
- la posizione della falda;
- le condizioni climatiche (profondità di penetrazione).





05/10/2013

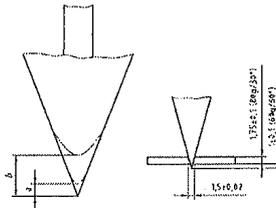
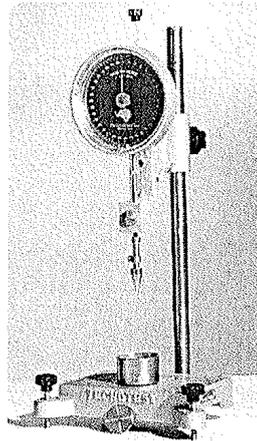
## TERRE

### Limite liquido - metodi di misura

UNI CEN ISO/TS 17892-12:2005

Materiale "secco e disgregato" passante al setaccio con apertura di maglia 0.425 mm

*Penetrometro a cono*



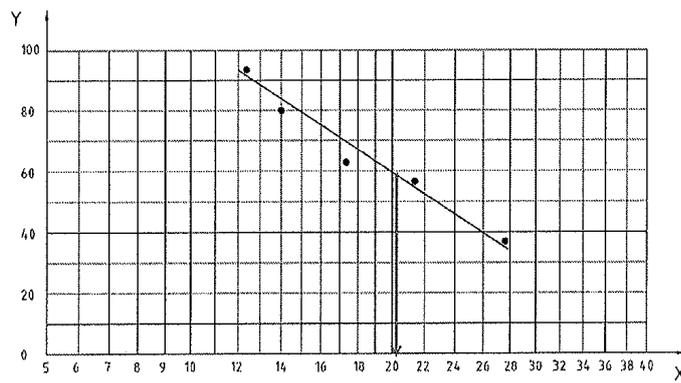
Due geometrie:

- 60g/60°
- 80g/30°

**NUOVO METODO**

## TERRE

### Limite liquido - metodi di misura



Key

x cone penetration (mm)  
y water content (%)

20 mm con 80g/30°

10 mm con 60g/60°

05/10/2013

## 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 (0,075 mm);
2. **limite liquido (LL)**;
3. **indice di plasticità (IP)**;
4. **indice di gruppo** (indicatore sintetico) la cui formula è la seguente:

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

05/10/2013

## TERRE

### Classificazione delle terre - sistema HRB (CNR - UNI 10006)

#### PRIORITA' D'IMPIEGO

- gruppi A1, A2-4, A2-5, A3;
- gruppi A2-6 ed A2-7.

Per le terre appartenenti ai gruppi A4, A5, A6 ed A7 si deve valutare se:

- adoperarle con le dovute cautele (protezioni da venute d'acqua);
- prevederne un trattamento (es. a calce),
- escluderne l'impiego.

## TERRE

### Classificazione delle terre - sistema HRB (CNR - UNI 10006)

**Gruppo A<sub>1</sub>** - 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) e 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.

05/10/2013

## TERRE

### Classificazione delle terre – sistema HRB (CNR – UNI 10006)

**Sottogruppi A<sub>2-6</sub> e A<sub>2-7</sub>** 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 – sistema HRB (CNR – UNI 10006)

**Gruppi A<sub>4</sub>, A<sub>5</sub>, A<sub>6</sub> e A<sub>7</sub>** 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 A<sub>4</sub> ed A<sub>5</sub> 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 A<sub>6</sub> ed A<sub>7</sub>, 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 A<sub>6</sub> ed A<sub>7</sub> si prestano bene alla stabilizzazione con calce.

## COSTIPAMENTO

### Studio Proctor di laboratorio

E' necessario, prima di dare inizio alla costruzione di un rilevato, effettuare uno studio preliminare circa le caratteristiche di compattabilità della terra oggetto di analisi, ciò al fine di:

- A. definire le condizioni ottimali di compattazione in cantiere
- B. stabilire dei criteri di controllo per verificare la correttezza delle procedure seguite

Ogni terreno ha una diversa attitudine a farsi compattare.

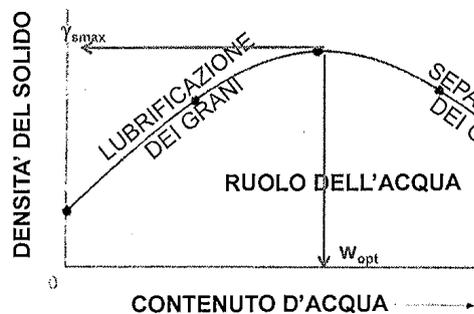
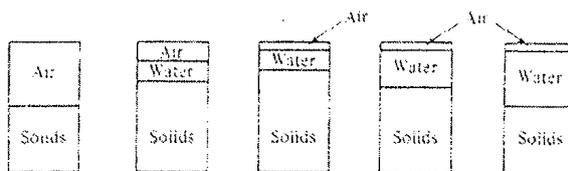
A → viene individuato l'umidità ottimale

B → vengono definite delle soglie di accettazione.

## COSTIPAMENTO

*Curva o campo che deriva dallo studio Proctor*

### Influenza del contenuto d'acqua



Per un dato terreno e una data energia di costipamento, è possibile definire una condizione ottimale corrispondente ad un contenuto d'acqua ottimo e a una densità del secco massima

05/10/2013

**COSTIPAMENTO** *così ricavo la curva limite di saturazione:*

**Influenza dell'energia di compattazione**

$$\frac{1}{\gamma_s} = \frac{V_g + V_w + V_v}{m_g}$$

$$\frac{1}{\gamma_s} = \frac{1}{\gamma_g} + \frac{w}{100 \cdot \gamma_w} + \frac{V_v}{V \cdot \gamma_s}$$

$$\frac{1}{\gamma_s} \left(1 - \frac{V_v}{V}\right)^* = \frac{1}{\gamma_g} + \frac{w}{100 \cdot \gamma_w}$$

$$\frac{1}{\gamma_s} = \frac{1}{\gamma_g} + \frac{w}{\gamma_w \cdot 100} + \frac{v}{\gamma_s \cdot 100}$$

$$\frac{1}{\gamma_s} = \frac{1}{\gamma_g} + \frac{w}{100 \cdot \gamma_w}$$

Per  $v = 0$ : individua la curva limite dell'energia

\*  $w/V$ : % di umidità.  
 $V_v/V = v\%$   
 $= v/100$

**COSTIPAMENTO**

**Influenza della natura del terreno**

**CURVA A**  
 Terre fini limose (tipo A<sub>4</sub> o A<sub>5</sub>) con  $w_{opt}$  abbastanza elevate ( $w_{opt} = 15-20\%$ ), a forma di campana più o meno appuntita

**CURVA B**  
 Sabbia ghiaiosa (A<sub>1b</sub>) generalmente più alta di A e di forma appiattita; l'umidità ottima è pari a circa  $w_{opt} = 8-12\%$ ; si osserva, inoltre, un campo piuttosto esteso di umidità all'interno del quale il  $\gamma_s$  si mantiene su valori poco discosti da  $\gamma_{smax}$

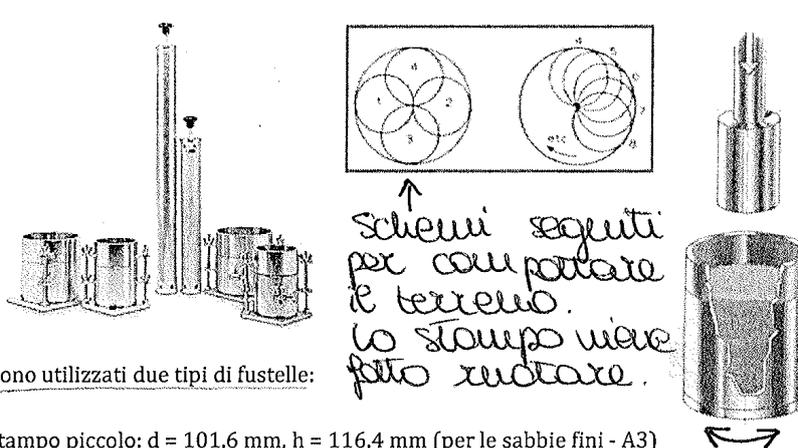
A parità di curve di energia, cambia il comportamento se cambia il tipo di terreno e quindi le caratteristiche

- (A): i contenuti di H<sub>2</sub>O ottimali sono alti. Piccole variaz. di H<sub>2</sub>O causano grandi variaz. della densità del secco e qst lo noto dalla curva e compenso.
- (B): ho bassi contenuti di H<sub>2</sub>O e curve più 21 appiattite. Il terreno è meno sensibile alle variaz. di H<sub>2</sub>O. Ho densità del secco + alte.

05/10/2013

**COSTIPAMENTO**  **PROVA PROCTOR**

**Prova Proctor - procedura sperimentale**



Sono utilizzati due tipi di fustelle:

stampo piccolo:  $d = 101,6 \text{ mm}$ ,  $h = 116,4 \text{ mm}$  (per le sabbie fini - A3)

stampo grande:  $d = 152,4 \text{ mm}$ ,  $h = 116,4 \text{ mm}$

*PESTELLO fisso*

*STAMPO girante*

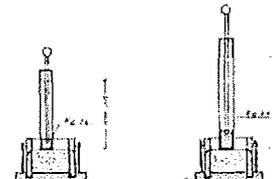
*Schemi seguenti per compattare il terreno. Lo stampo viene fatto ruotare.*

**COSTIPAMENTO**

**Prova Proctor - procedura sperimentale**

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

- Tipo A (AASHTO Standard - T 99)
- Tipo 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 <sup>2</sup> ]	(59)	(269)

*2 PROTOCOLLI di ADDENSAMENTO*

*TIPO A: si ricreano i tipici metodi di costipamento usando 3 strati.*

*TIPO B: si è creato un nuovo riferimento per valutare gli che ho in situ*

*altezza* ↓ ↓ *in colpi x strati*

*peso* →  $P_{\text{maglio}} \cdot h \cdot n_c \cdot n_s$  ← *in strati*

$E = \frac{P_{\text{maglio}} \cdot h \cdot n_c \cdot n_s}{V_{\text{fustella}}}$  **Energia di compattazione per unità di volume**

*↑ volume*

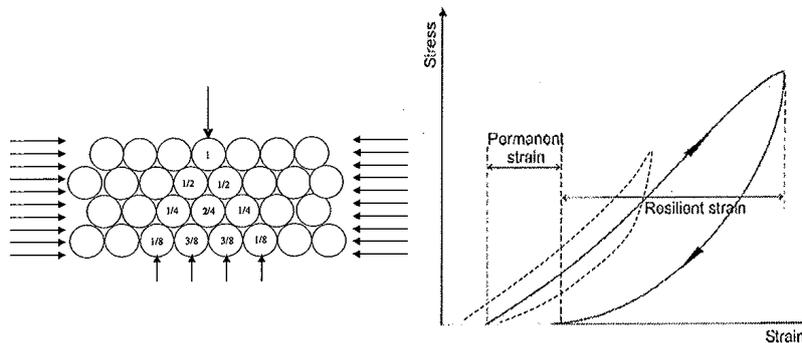
la maggior parte dei terreni possono essere considerati elastici in particolari casi di sollecitazione. Ma anche il modulo elastico dipende dallo stato di sollecitazione. Il confinamento influenza lo stato di tensione di quella porzione di terreno.

05/10/2013

## MECCANICA DELLE TERRE

### Comportamento meccanico delle terre

- non è perfettamente elastico
- la risposta deformativa dipende dal confinamento laterale
- la rigidezza dipende dallo stato di sollecitazione (non-linearità) e dalla storia dei carichi



## MECCANICA DELLE TERRE

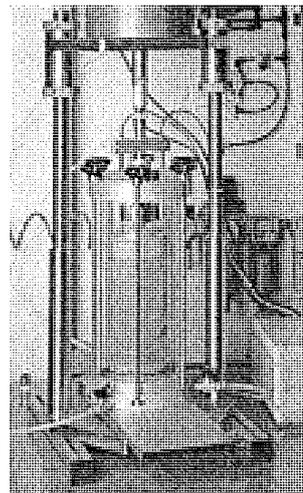
### Caratterizzazione sperimentale (laboratorio)

• **metodi empirici** - si basano sul confronto tra campioni di prova e campioni di riferimento di caratteristiche note

↳ PARAMETRI CONVENZIONALI

• **metodi razionali** - misurano la rigidezza, la resistenza o la compressibilità dei materiali in condizioni controllate

↳ GRANDEZZE FONDAMENTALI



L'indice CBR di dati informazioni globali sul comportamento meccanico del terreno perché quando il pistone penetra nel terreno in realtà genera anche delle sep. di scorrimento e di rottura.

05/10/2013

### METODO CBR (California Bearing Ratio)

**INDICE CBR CORRETTO**  
Si ottiene traslando l'origine pressioni - cedimenti

L'eventuale inversione iniziale di concavità può essere dovuta a fenomeni di assestamento. → lo zero dell'asse p dovrebbe essere spostato a destra

**INDICE CBR A SATURAZIONE**  
Si ottiene eseguendo la prova dopo 4 giorni di immersione in acqua

Dopo conoscere le condizioni in cui viene eseguita la prova, le compresse x essere portate nelle condizioni peggiori possibili posso inserirle in acqua x 4 giorni saturando. vengono calcolati i valori di espansione

del terreno quindi viene calcolato l'indice CBR saturo. L'altro tipo di indice è il CBR immediato.

### METODO CBR (California Bearing Ratio)

**PROVA CBR - PROVA PROCTOR**

In genere il valore massimo del CBR si ottiene per valori leggermente inferiori alla densità massima raggiunta in corrispondenza dell'ottimo Proctor

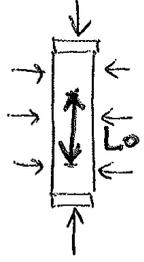
L'indice CBR viene assunto come parametro per valutare la portanza di un terreno

L'ottimo di compattoimento meccanico spesso non coincide con l'ottimo addensamento. Con l'ottimo addensamento ho delle sovrappressioni interne che, quando viene applicato una pressione di taglio come nello

prova CBR, causa un addensamento della resistenza e della rigidità perché si creano delle superficie di taglio → meglio avere un po' meno acqua nel terreno.

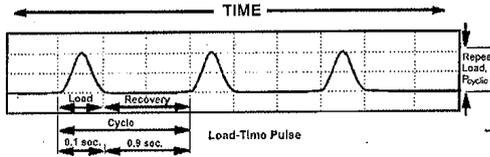
le compresse si deprimono assai più e rapidamente ma la deformazione radiale non viene calcolata. Si misura solo la deformazione verticale. Il campione cilindrico non si deprime in modo omogeneo soprattutto vicino alle estremità → darei fare un'analisi puntuale → però in realtà considero una lunghezza  $L_0$  detta BASE DI MISURA che sarà centrata rispetto al cilindro

05/10/2013

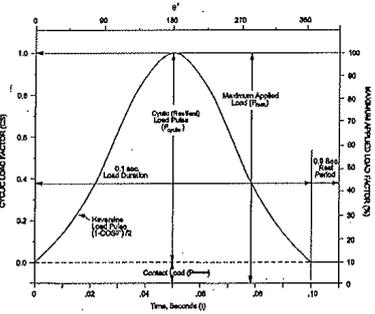
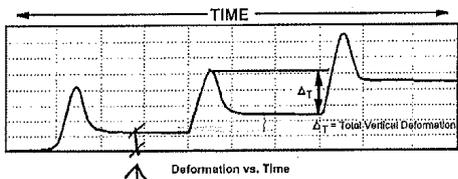


**MODULO RESILIENTE**

Prove in cella triassiale a carico ripetuto (AASHTO T294) SOLLECITAZIONI VERTICALI CHE SONO TEMPO DIPENDENTI.



← ogni secondo ho un piccolo impulso di carico verticale.



Sono tutte le deformaz.  $\leftarrow$  xivamente che vanno nel tempo a diminuire.

deformazione permanente dopo il 1° ciclo di carico

**MODULO RESILIENTE**

Prove in cella triassiale a carico ripetuto (AASHTO T294)

**MODULO RESILIENTE**

Descrive il comportamento resiliente dei materiali granulari.

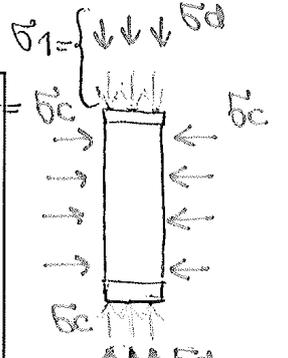
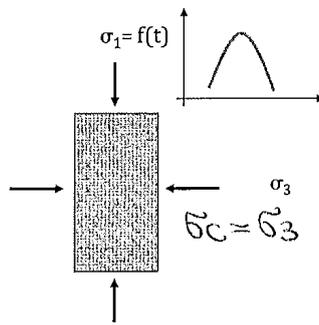
Può essere utilizzato nella progettazione delle pavimentazioni flessibili

È espresso dal rapporto tra la tensione deviatorica e la deformazione elastica verticale

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{1,r}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{1,r}}$$

$$\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_3$$

$$\rightarrow \sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$



$\sigma_c$ : pressione di confinamento (cost) → applico il carico verticale  $\sigma_d$ : pressione deviatorica che genera lo sollecitaz. che danno lo scorrimenti

↑ DEFORMAZIONI ASSIAI REVERSIBILI

da quello uniforme che fa nascere scorrimenti interni del materiale.

### MODULO RESILIENTE

Prove in cella triassiale a carico ripetuto (AASHTO T294)

#### DEFORMAZIONI PERMANENTI

Valutazione del comportamento nei riguardi dell'ormaiamento (*rutting*)

SOTTOFONDO

$$\epsilon_p = \epsilon_a \cdot N^{-B}$$

↑ NR' cicli

deformazione permanente

A e B dipendono dal tipo di terreno analizzato.

deformaz. ASSIALE REVERSIBILE in condiz. di regime

### MODULO RESILIENTE

Prove in cella triassiale a carico ripetuto (AASHTO T294)

Il modulo resiliente dei materiali non legati dipende da:

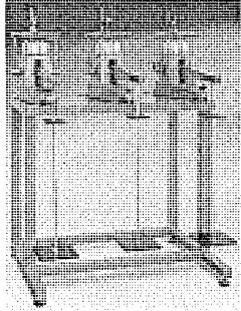
- Densità del secco
- Grado di umidità ← e' acqua determina la rigidità.
- Granulometria
- Angolarità dell'aggregato
- Percentuale di materiale fine ← lo suo presenza incide sulle caratteristiche meccaniche del terreno.
- Livello della tensione applicata
- Modalità di compattazione

Importante riprodurre in laboratorio condizioni rappresentative di quelle in vera grandezza

PROVA EDMETRICA: viene applicato un carico assiale e si osservano i cedimenti nel tempo. Si usano degli step di incrementi di tensione che causano la riduzione dell'indice dei vuoti. 05/10/2013

## COMPRESSIBILITA'

### Prove edometriche



- Condizioni totalmente sature
- Condizioni parzialmente sature

1. Carico assiale applicato al provino;
2. Assestamento;
3. Misurazione dei cedimenti.

Incremento di pressione:  $p_0 \rightarrow p_0 + \Delta p$

$e_0 \rightarrow e$

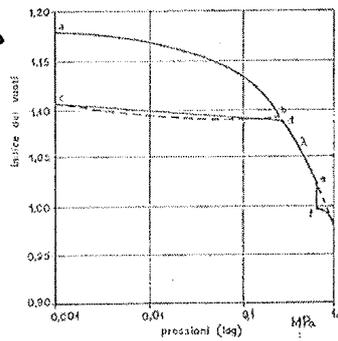
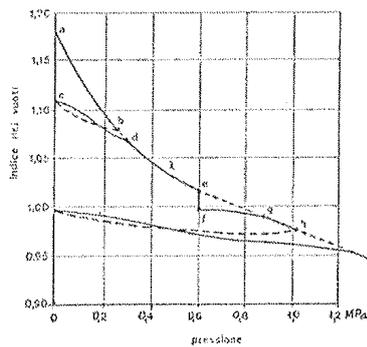
$$a_v = \frac{e_0 - e}{\Delta p}$$

**COEFFICIENTE DI COMPRESSIBILITÀ**

## COMPRESSIBILITA'

### Prove edometriche

questo curva ho fatto diversi in base al tipo di terreno.



**CURVE CARATTERISTICHE DI COMPRESSIBILITÀ**

## 1 PROVA DI CARICO SU PIASTRA

### PORTANZA

#### Prova di carico su piastra

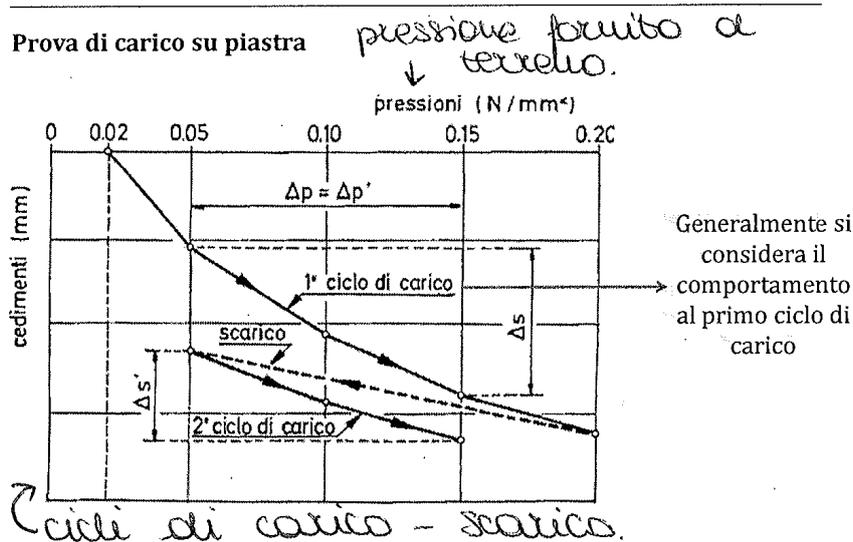
##### ESECUZIONE DELLA PROVA

1. Regularizzazione del piano e posa della piastra
2. Montaggio del martinetto e messo a contrasto con la parte posteriore di un autocarro
3. Montaggio dei comparatori disposti a 120° uno rispetto all'altro con i bracci fissati alla trave di sostegno (i cui appoggi devono distare più di 1 m dalla piastra)
4. Si impongono degli incrementi di carico noti e si leggono i cedimenti corrispondenti (la misura si considera assestata quando due letture consecutive eseguite a distanza di 1 minuto forniscono una differenza inferiore a 0,02 mm)

ie cedimento del terreno non sono solo istantanei, ci sono delle deformaz. di tipo visco-plastico, che si verificano nel tempo.

### PORTANZA

#### Prova di carico su piastra



Eseguiamo delle prove su piastre con piastre un po' più piccole → ↑ il rapporto che ho in asse.

05/10/2013

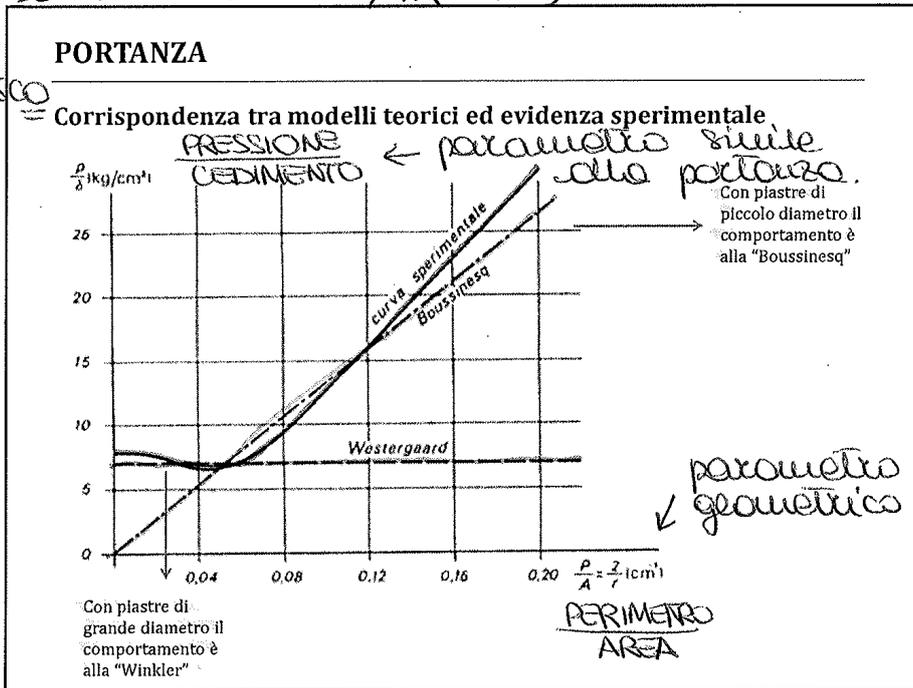
Il rapporto P/δ segue la curva sperimentale.

Nella prima parte prende il tipo di Winkler e il terreno è "sciolto". Nella seconda parte invece prende il modello di Boussinesq, la pendenza della retta verde è data da:  $E/\pi(1-\nu^2)$  → contiene tutti i

parametri che influiscono sulla portanza.

Plastre piccolo → Boussinesq

Plastre grande → Winkler.



**PORTANZA** PROVE SU PIASTRA

**Prova di carico su piastra (sottofondo e/o fondazione)**

Pavimentazione flessibile

È caratterizzata da una ridotta capacità di distribuzione dei carichi



Campo di Boussinesq

Per caratterizzare il terreno si utilizzano piastre di piccolo diametro (generalmente D = 30 cm)



Valutazione del modulo elastico da confrontare con quello assunto in progetto

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



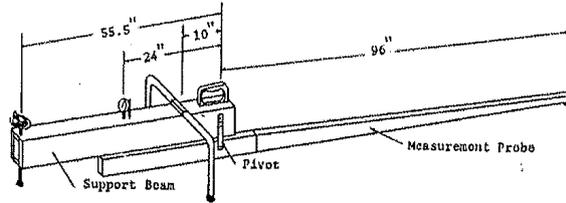
La trave Benkelmann è dotata di uno scudo rispetto ad un punto fisso. La trave misura i cedimenti in un pto. Un mezzo pesante si avvicina lentamente allo scudo (il carico ha peso e pressione delle ruote moti). Avvicinandosi il carico, aumenta il cedimento che sarà max quando il carico sarà più vicino allo scudo. Quando il carico resta fermo,

05/10/2013

il cedi-mento ↑. Quando il carico si allontana il cedimento viene in parte restituito ed in parte è permanente.

**PORTANZA**

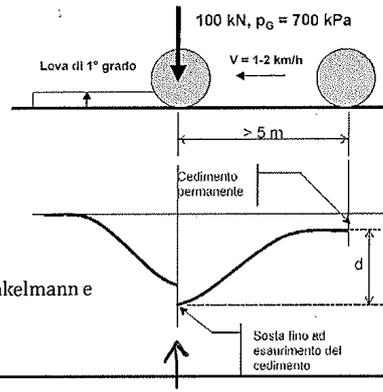
**Trave Benkelmann (CNR n. 141/1992)**



La misura viene eseguita misurando il cedimento subito in un generico punto provocato dal progressivo avvicinamento e successivo allontanamento di un mezzo di caratteristiche note.

Cedimento totale = d (restituito) + p (permanente)

$$M_d = \frac{84}{d} \quad \text{Correlazione empirica tra prova di Benkelmann e carico con piastra}$$



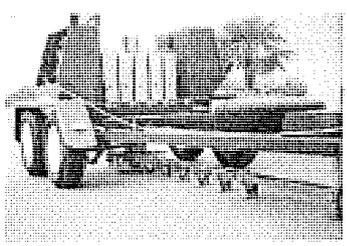
Sup. da indagare di cui vogliamo conoscere la portanza. In questo c'è la posizione del veicolo rispetto allo scudo.

Cedimento

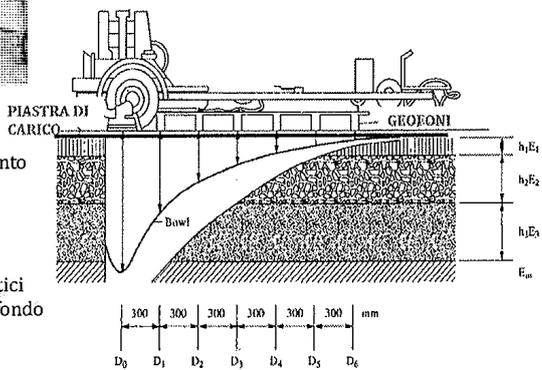
La piastra viene posta sopra la sep. e caricata con carichi impulsivi (mosso che cade dall'alto). Si ha un rimbalzo dove è caricata la piastra. I GEOFONI

**PORTANZA PROVE DI PORTANZA DI TIPO RAZIONALE.**

**Deflettometro a massa battente FWD (Falling Weight Deflectometer)**



Strumentazione utilizzata sia sulle pavimentazioni finite che su sottofondi e rilevati



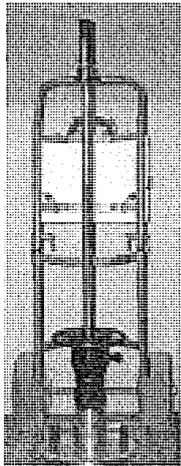
- Tecnica di misura ad alto rendimento
- Simula l'effetto dinamico dei carichi veicolari e/o aeroportuali
- Consente di ricavare i moduli elastici della pavimentazione e/o del sottofondo

BACINO DI DEFLESSIONE, DEFLESSIONE IN UN PUNTO.

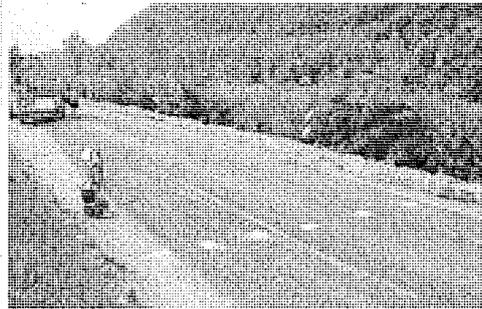
è accelerazione del palo verticale → si ottiene il bacino di depressione sotto carico. veniva eseguita sulla superficie finita della pavimentazione, ora invece si può eseguire su tutti i tipi di pavimentazione.

## PORTANZA

### Light Weight Drop Tester (LWDT)



Strumentazione molto utile, per la sua leggerezza e facilità d'uso, per il controllo speditivo di lavori in terra (rilevati, sottofondi, fondazioni stradali)



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

↓  
Dalle formule di Boussinesq

È uno strumento portatile che ha montato su di se la molla battente bloccata da un grancio.  
Nota il carico e letto lo spostamento, posso usare le formule di Boussinesq per ricavare il parametro della portanza → E modulo elastico.  
Qst sistema serve per eseguire le prove di portanza direttamente sui materiali non legati.

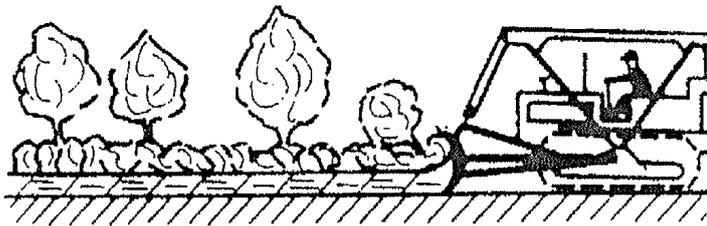
## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

---

### SMACCHIAMENTO GENERALE

Operazione preliminare consistente nel taglio degli alberi, degli arbusti e dei cespugli, nonché all'estirpazione delle ceppaie e delle radici.

I prodotti dello smacchiamento sono generalmente lasciati a disposizione dell'Impresa che ha l'obbligo e la responsabilità del loro trasporto, a qualsiasi distanza, in siti appositamente attrezzati per l'incenerimento ovvero in discariche abilitate alla loro ricezione



## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

---

### SCOTICAMENTO / COS'È LO SCOTICAMENTO

Consiste nell'asportazione della coltre di terreno vegetale ricadente nell'area di impronta del solido stradale per lo spessore previsto in progetto.

Nei tratti di trincea l'asportazione della terra vegetale deve essere totale, allo scopo di evitare ogni contaminazione del materiale successivamente estratto, se questo deve essere utilizzato per la formazione dei rilevati.

La terra vegetale che non venga utilizzata immediatamente deve essere trasportata in idonei luoghi di deposito provvisorio, in vista della sua riutilizzazione per il rivestimento delle scarpate, per la formazione di arginelli e per altre opere di sistemazione a verde (spartitraffico centrale e laterale, isole divisionali, ricoprimento superficiale di cave e discariche, ecc.)



## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

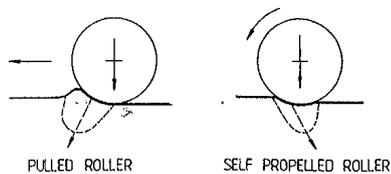
---

### PIANO D'APPOGGIO DEI RILEVATI

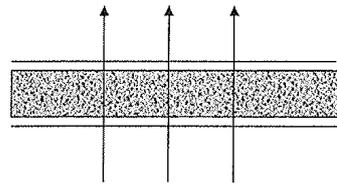
#### Funzioni/requisiti

- regolarità costruttiva
- resistenza alle pressioni geostatiche del rilevato;
- protezione del rilevato dall'inquinamento di materiale inquinante (risalita capillare)

#### Costipamento



#### Materiali anticapillari



## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

---

### PIANO D'APPOGGIO DEI RILEVATI

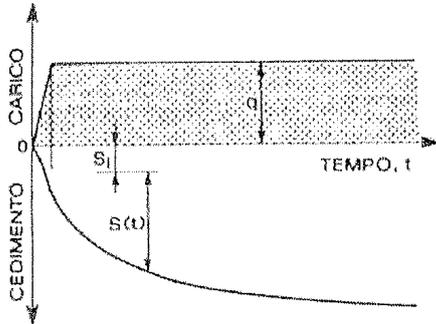
Immediatamente prima della costruzione del rilevato, l'Impresa deve procedere alla rimozione ed all'asportazione della terra vegetale, facendo in modo che il piano di imposta risulti quanto più **regolare possibile**, privo di avvallamenti e, in ogni caso, tale da evitare il ristagno di acque piovane. Durante i lavori di scoticamento si deve evitare che i mezzi possano rimaneggiare i terreni di impianto.

Ogni qualvolta i rilevati debbano poggiare su **declivi con pendenza superiore al 15% circa**, (...), si deve procedere alla **sistemazione a gradoni** del piano di posa dei rilevati con superfici di appoggio eventualmente in leggera pendenza.

**(Capitolato CIRS)**

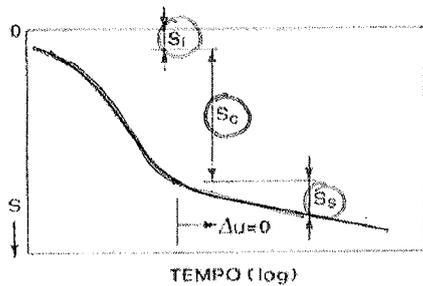
## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE **CEDIMENTI**

### PIANO D'APPOGGIO DEI RILEVATI - *Cedimenti*



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

- Cedimento immediato  $S_i$  - conseguente all'applicazione dei carichi (condizioni non drenate)
- Cedimento di consolidazione  $S_c(t)$  - progressivo trasferimento del carico dall'acqua interstiziale allo scheletro solido
- Cedimento secondario  $S_s(t)$  - dovuto a deformazioni viscosi ( $\Delta u=0$ )



*Per i terreni a grana grossa non si distingue tra cedimento immediato e di consolidazione ma si parla di cedimento iniziale e cedimento secondario.*

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### TERRENI CEDEVOLI - *Tecniche di miglioramento*

In presenza di terreni che possono dar luogo a cedimenti eccessivi e differiti nel tempo, si possono adottare dei sistemi con la funzione di accelerare il fenomeno della consolidazione → *i cedimenti che di solito avvengono nel tempo, vengono accelerati ed anticipati.*

TERRENI CEDEVOLI  $\implies$  TECNICHE DI MIGLIORAMENTO

- |                              |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| • Limi compressibili         | • Precarico                   |
| • Argille tenere inorganiche | • Dreni verticali             |
| • (Materiali organici)       | • Trattamenti colonnari       |
|                              | • Consolidazione con il vuoto |

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### TERRENI CEDEVOLI - Dreni in sabbia

Si realizzano mediante una perforazione di tipo verticale che viene successivamente riempita da sabbia aventi caratteristiche drenanti.

#### Granulometria

Apertura setaccio [mm]	Passante [%]
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

es. di interstizi di accettazione.  
 ↳ la sabbia deve avere una specifico granulometria.

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### TERRENI CEDEVOLI - Dreni prefabbricati

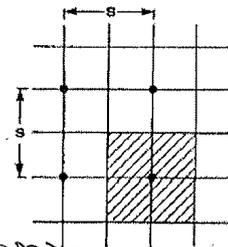
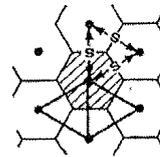
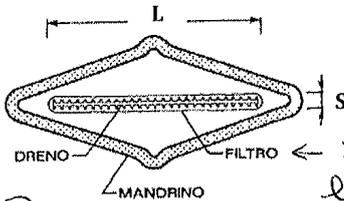
→ vengono realizzati in tempi brevi.

Sono caratterizzati da

- minor costo
- maggior rapidità di installazione

Maglia triangolare (quinconce)

Maglia quadrata



→ deve x far passare l'acqua e non imporre con le particelle di terreno.

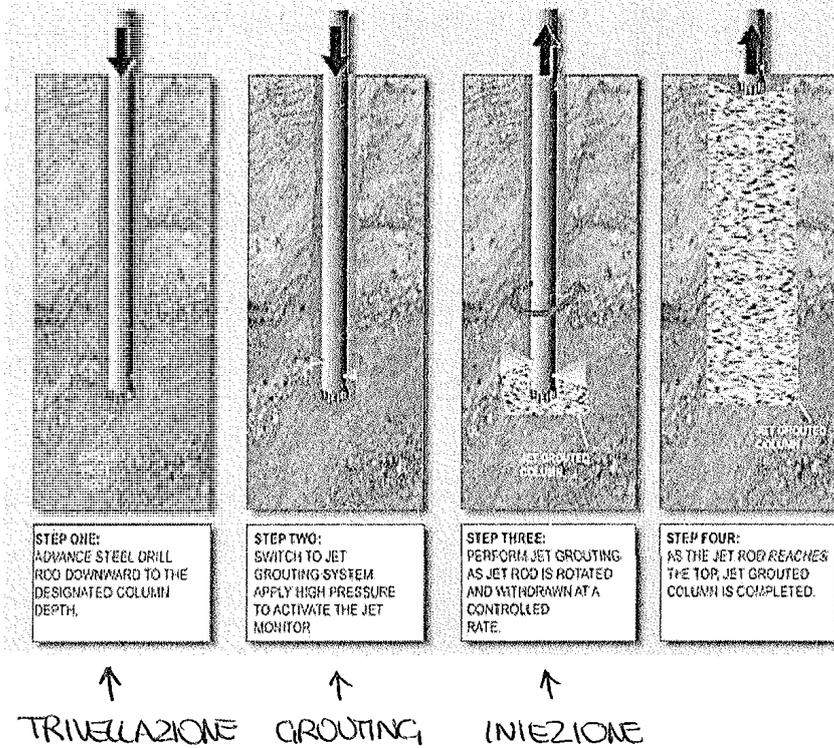
≠ tipi di dreni con coeff. di permeabilità molto diversi. Dreni come le permeabili lito modifica il regime di consolidazione sotto il carico.

Dreno	Dimensioni		Materiali		k [m/s]	d <sub>w</sub> [mm]
	L [mm]	S [mm]	Anima	Filtro		
Kjellman	100	3.5	Cartone	Cartone	1·10 <sup>-7</sup>	66
Mebra	95	3.2	Polietilene	Carta trattata	6·10 <sup>-9</sup>	63
Geodrain	95	4.0	Polietilene	Carta trattata	6·10 <sup>-9</sup>	63
Colbond	300	4.0	Poliestere non tessuto	Poliestere non tessuto	3·10 <sup>-4</sup>	194
All drain	100	7.0	Plastica	Cellulosa	3·10 <sup>-6</sup>	68
Castle Drain Boards	94	2.6	Poliolfine	Tessuto non tessuto	2·10 <sup>-4</sup>	62

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### TERRENI CEDEVOLI - Trattamenti colonnari

### JET-GROUTING

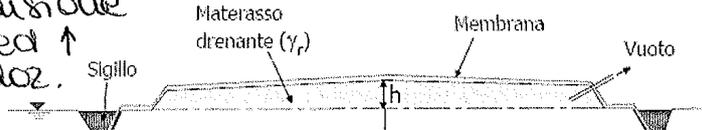
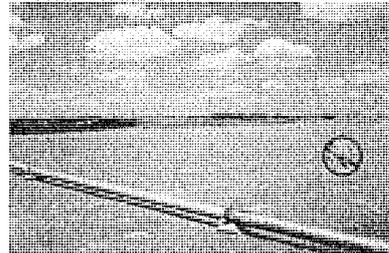
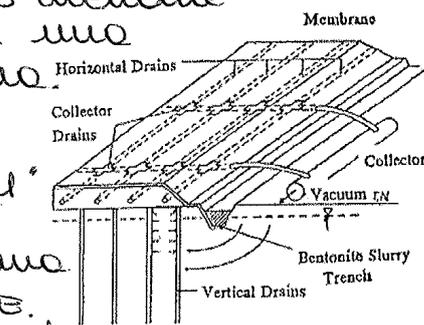


Sopra il terreno si mette un materasso drenante chiuso in una membrana. Applico il vuoto → cambia "u" perché induco una DEPRESSIONE. ↳ ↑ la tensione efficace ed ↑ la consolidazione.

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### TERRENI CEDEVOLI - Consolidazione con il vuoto

Il terreno viene ricoperto da una membrana a tenuta d'aria al di sotto di cui viene creato il vuoto



TENSIONI TOTALI ↓

1° STEP: SENZA VUOTO

$$\sigma_v = \gamma \cdot z + \gamma_r \cdot h$$

$$u = \gamma_w \cdot z \leftarrow \text{PRESSIONE INTERSTIZIALE}$$

$$\sigma'_v = \gamma \cdot z + \gamma_r \cdot h - \gamma_w \cdot z = \gamma' \cdot z + \gamma_r \cdot h$$

↑ TENSIONI EFFICACI

2° STEP

CON VUOTO

$$\sigma_v = \gamma \cdot z + \gamma_r \cdot h$$

$$u = \gamma_w \cdot z - P_a$$

$$\sigma'_v = \gamma \cdot z + \gamma_r \cdot h - (\gamma_w \cdot z - P_a) = \gamma' \cdot z + \gamma_r \cdot h + P_a$$

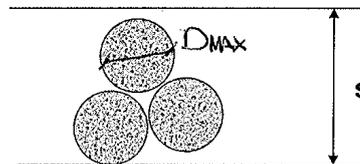
## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### RILEVATI IN TERRA NATURALE

#### Modalità di realizzazione:

- a strati di spessore funzione delle caratteristiche dei materiali e delle macchine a disposizione;
- spessori non inferiori a due volte la dimensione massima della terra impiegata ( $s > 2 D_{max}$ ); in ogni caso  $D_{max} < 300$  mm (scarto degli elementi più grossi)
- secondo piani inclinati per il rapido allontanamento delle acque di pioggia
- stesa dello strato previa verifica delle caratteristiche dello strato precedente (portanza, densità in situ)

lo spessore varia in base alle caratteristiche del materiale e ai mezzi d'opera che usano, le sollecitazioni non si devono trasmettere al singolo elemento di terreno, per questo si preferisce dei limiti minimi sugli spessori degli strati



## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### RILEVATI IN TERRA NATURALE - *Compattazione in situ*

Nel rispetto delle previsioni di progetto e delle disposizioni che possono essere date in corso d'opera dalla Direzione Lavori, circa la massima utilizzazione delle risorse naturali impegnate dall'intervento, l'Impresa è tenuta a fornire e, quindi, ad impiegare mezzi di costipamento adeguati alla natura dei materiali da mettere in opera e, in ogni caso, tali da permettere di ottenere i requisiti di densità e di portanza richiesti per gli strati finiti.

Per il migliore rendimento energetico dei mezzi di costipamento è opportuno sceglierne la tipologia più idonea ed operare con umidità prossima a quella ottimale determinata in laboratorio mediante la prova AASHO (*Proctor*)

*(Capitolato CIRS)*

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### PRINCIPI GENERALI DELLA COMPATTAZIONE

#### Compattazione statica

Il costipamento realizzato dai compressori statici si basa sull'azione del peso con il quale viene esercitata una pressione prevalentemente verticale sullo strato da costipare. In tale modo viene superato l'attrito interno nel terreno e si riduce il volume dei vuoti nel materiale.

L'effetto di queste macchine in profondità è relativamente ridotto e valutabile generalmente nella misura massima di 20 cm. Per il costipamento del terreno, i compressori statici a rullo liscio sono poco efficaci a causa del ridotto effetto in profondità ma sono utilizzati come ultima passata per fronteggiare il rischio di dissodazione e di disgregazione a cui sono soggetti i terreni trattati con i vibrocompressori.

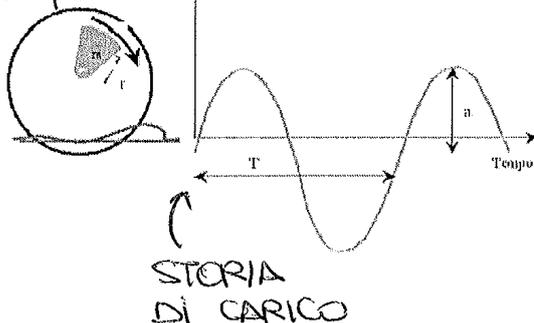
## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### PRINCIPI GENERALI DELLA COMPATTAZIONE

#### Compattazione dinamica

Il costipamento dinamico si basa sulla sollecitazione del terreno mediante vibrazione (che si aggiunge a quella legata al peso proprio) in modo tale che la distribuzione granulometrica possa assumere una forma più compatta. Nel costipamento mediante vibrazione, il materiale da consolidare viene fatto oscillare, applicandogli una serie di forze in rapida successione. Le forze dinamiche movimentano i singoli grani in un modo che in breve tempo viene modificato il loro attrito rendendo possibile una distribuzione granulometrica più compatta.

La vibroz.  
↑ il carico  
A anche il  
terreno  
meno  
messo in  
vibroz in  
modo da  
indebolire  
le interoz  
tra le  
particelle  
che ne impedi  
scopo la  
compattaz.

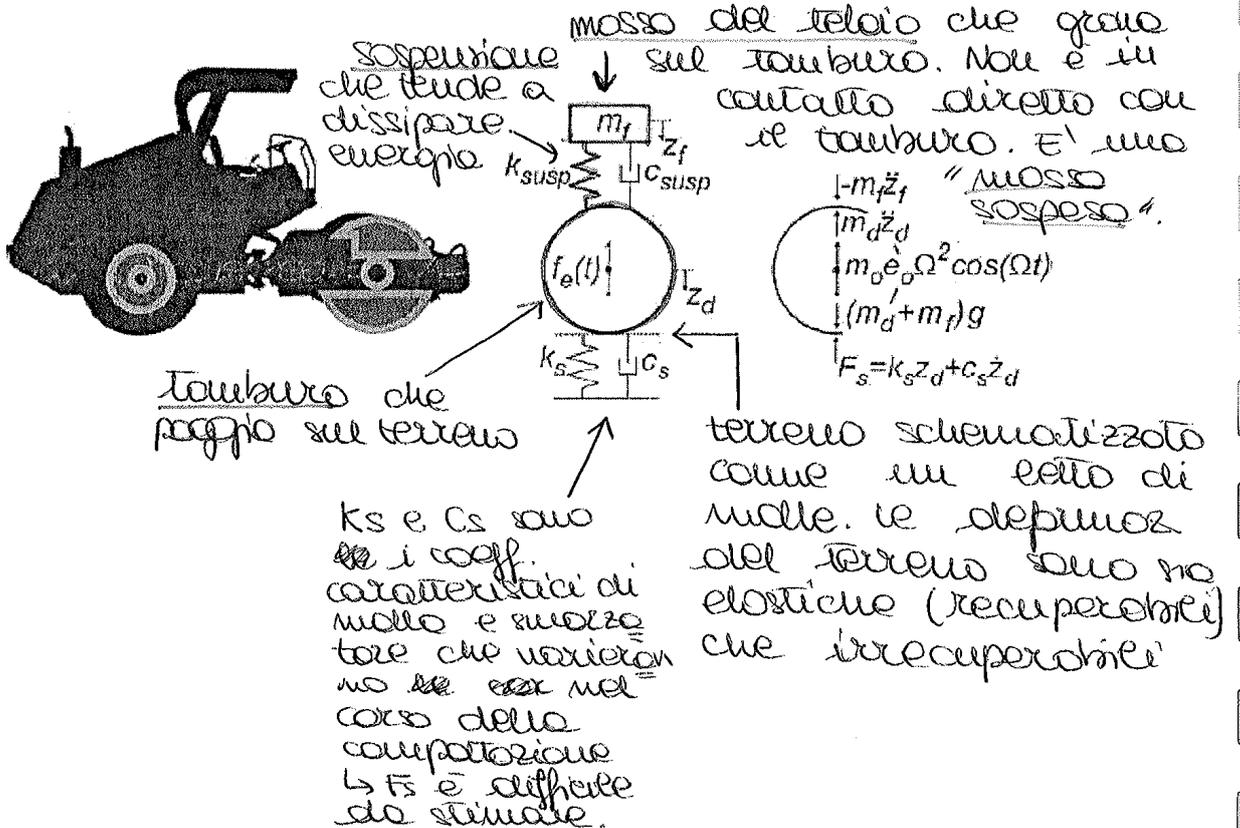


*La vibrazione viene indotta da una massa eccentrica che viene fatta ruotare intorno al perno centrale del rullo.*

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### COMPATTAZIONE DINAMICA

#### Modello di interazione dinamica rullo-terreno

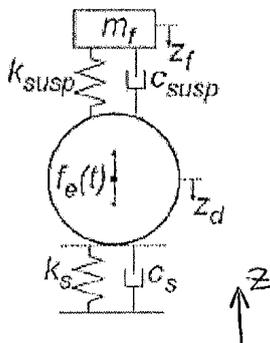


## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

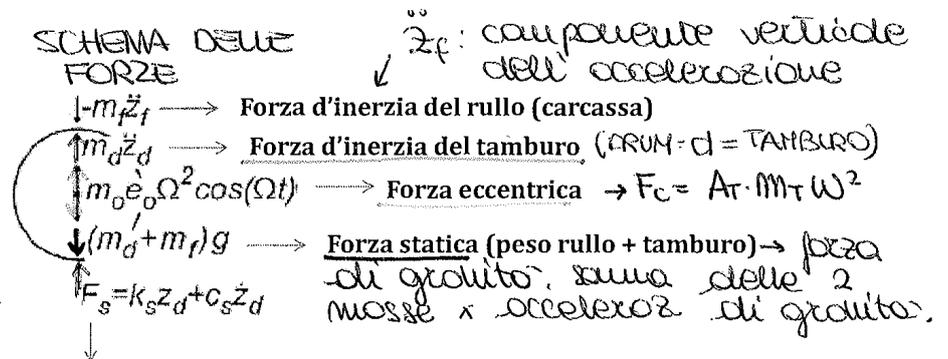
### COMPATTAZIONE DINAMICA

#### Modello di interazione dinamica rullo-terreno

SCHEMA DELLA MACCHINA



SCHEMA DELLE FORZE



Reazione del terreno (s: sul "terreno")

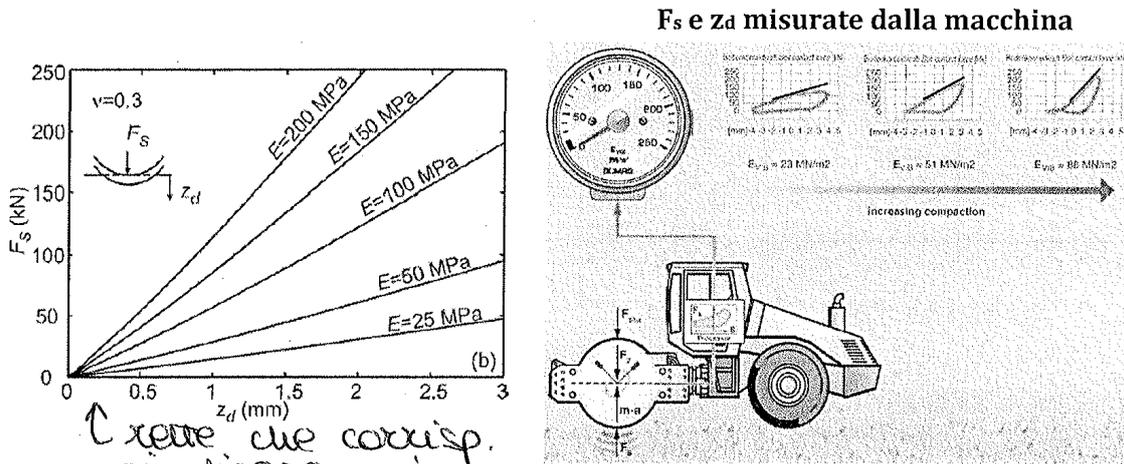
$k_s$  e  $c_s$  sono le 2 cost. caratteristiche della molle e dello smorzatore che abbiamo associato al comportamento del terreno.

↳ Attraverso metodi numerici arriviamo alla soluzione delle eq. delle forze (eq. differenziali).

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### COMPATTAZIONE INTELLIGENTE

Molti compattatori dispongono di sistemi di misura in grado di monitorare in tempo reale le caratteristiche meccaniche del terreno e adeguare la procedura di compattazione al fine di raggiungere gli standard finali (*Intelligent Soil Compaction*)



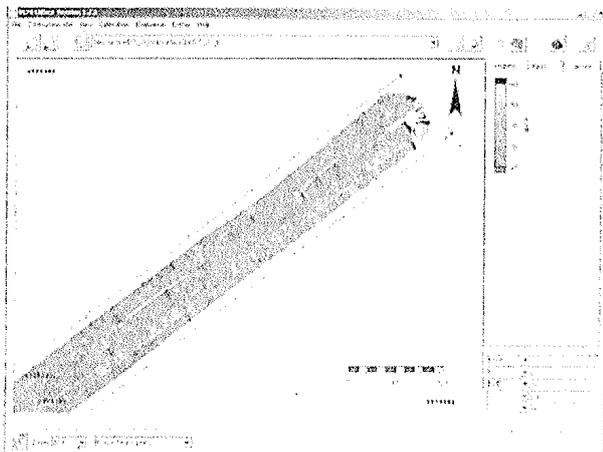
↑ rete che corrisp. di diagrammi precedenti visti primo (rete di tangenza).

Si ricava E ( $E_{VIB}$ )

IP posso prima dello compattaz. intelligente e la CCC (controllo continuo della compattazione).

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### COMPATTAZIONE INTELLIGENTE



③ Rimuoviamo una porzione di terreno circolato di ottenere un cavo regolare o piatto circolare. Regno sul terreno un piatto piatto e ci appoggiamo un boccione contenente sabbia calibrata ed un imbuto. Aperto il rubinetto (c) la sabbia va nel cavo, una volta occupato il cavo, il foro della piastra è il

### COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

#### MISURA DELLA DENSITA' IN SITU - Metodo del cono di sabbia

come chiude il rubinetto (d). Lascio il cuneo di sabbia e la differenza della massa rimasta, noto il vol. del cavo e della piastra, ricavato il volume del cavo,

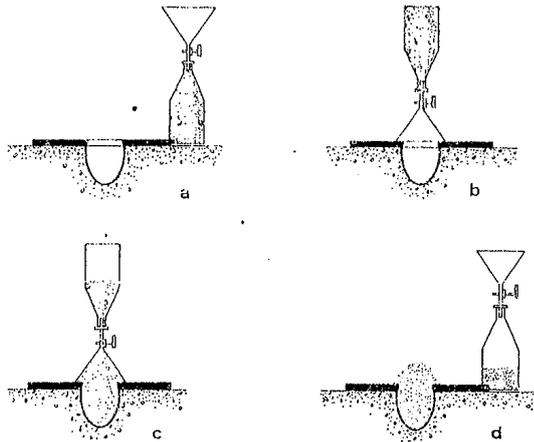
Volume del cavo  $V = \frac{m_1 - m_2}{\gamma_{s, mucchio}} - V_{\text{cono}} - V_{\text{piastra}}$

Densità del secco  $\gamma_s = \frac{m_3}{V \left(1 + \frac{w}{100}\right)}$

In cui:  $\uparrow$  volume del cavo.

- $m_1$  = massa del boccione pieno
- $m_2$  = massa del boccione svuotato
- $m_3$  = massa del campione estratto

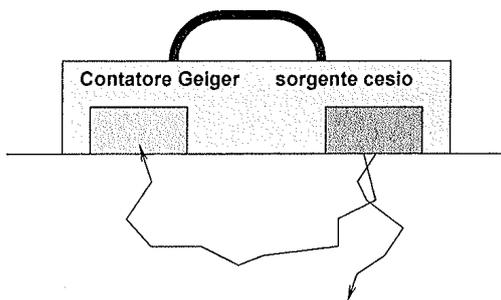
$\uparrow$  massa del secco, sabbia essicata e poi ripesata.



### COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

#### MISURA DELLA DENSITA' IN SITU - Metodo con apparecchio a raggi gamma

##### GAMMADENSIMETRO



Assorbimento proporzionale a  $\gamma_s$

Poco utilizzato in Italia per problematiche ambientali/sicurezza (sorgente radioattiva)

Si misura l'assorbimento delle radiazioni da parte del terreno.

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

### SOTTOFONDI - *Materiali di impiego*

La regolarità richiesta per il piano di posa della pavimentazione porta ad escludere materiali con elementi maggiori di  $D=100$  mm;

Occorre utilizzare terre granulari, con assortimento granulometrico ben graduato (curve compatte), costituite preferibilmente da elementi a spigoli vivi, dotate di poco fino (passante allo 0,075 mm minore del 12%) e non plastiche ( $IP < 6$ ).

Materiali appartenenti al gruppo A1-a della classificazione CNR-UNI 10006, si prestano bene a costituire ottimi strati di sottofondo.

Nel rispetto delle dimensioni massime sopra specificate, possono essere impiegate:

- terre dei gruppi A1-b, A2-4 ed A2-5, con passante allo 0.075 mm maggiore del 12%, previa stabilizzazione a cemento od a calce-cemento;

- terre dei gruppi A2-6 ed A2-7 con una percentuale di fino maggiore al 5% previa stabilizzazione mista (a calce e cemento) od a sola calce.

- limi dei gruppi A4 ed A5 previa stabilizzazione a calce e cemento, nonché le argille dei gruppi A6 ed A7, dotate di plasticità non eccessivamente elevata ( $IP < 25\%$ ), previa stabilizzazione con sola calce.

## COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE

RILEVATI E SOTTOFONDI - *Requisiti*

DENSITA' IN SITU *con base e  
come e  
come  
(visto primo)*

Sottofondo\*  $\rightarrow \gamma_{s, situ} \geq 95\%$  AASHTO Mod.

Rilevato  $\rightarrow \gamma_{s, situ} \geq 92\%$  AASHTO Mod.

*devono essere definiti  
in base alle caratteristiche  
dell'opera, (es. progettazione  
della base) con  
passaggio su base percuti).*

*sono dei valori  
indicativi*

### PORTANZA

Sottofondo\*  $\rightarrow M_d \geq 50$  N/mm<sup>2</sup>

Rilevato  $\rightarrow M_d \geq 30$  N/mm<sup>2</sup>

Da valutarsi in un intervallo

$W_{opt} - 2\% < W < W_{opt} + 2\%$

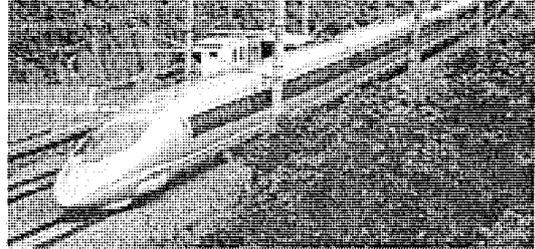
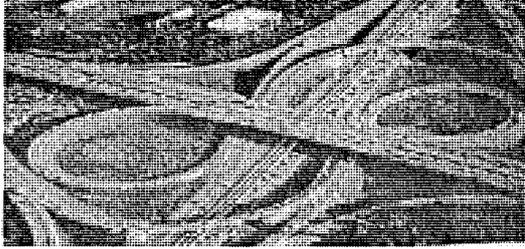
\* Tali valori sono da intendersi come minimi indicativi e possono essere variati in relazione alle ipotesi assunte nel calcolo della pavimentazione

*In caso contrario:*

- Correlazione da campo prove
- Ricondurre il materiale a  $W_{opt}$  per uno spessore di 15 cm



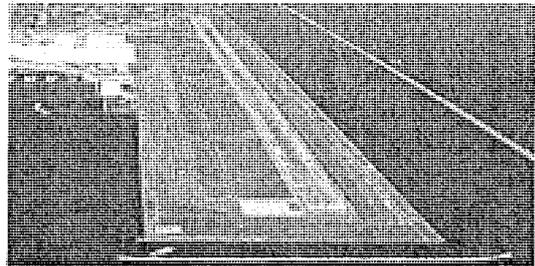
**POLITECNICO DI TORINO**  
**Corso di Laurea Magistrale**  
**in Ingegneria Civile**  
a.a. 2013-14



**Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti (03ALVMX)**

**CORPO STRADALE**

Macchine movimento terra



## MOVIMENTO TERRA

---

### DEFINIZIONI

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;
- **determinazione del ciclo di lavoro** delle singole macchine e del ciclo delle lavorazioni effettuate da più macchine fra loro interdipendenti;
- **predisposizione di diagrammi di lavorazione** da cui derivare lo schema dell'organizzazione generale del cantiere.

## MOVIMENTO TERRA

### LAVORAZIONI IN CANTIERE E MACCHINE OPERATRICI

Rottura del terreno	Scarificatori Avari da scasso Erpici	Trainati o portati Ad uno o più vomeri A dischi o a punte
Costipamento	Rulli a punte Carrelli gommati Rulli a rete Rulli vibranti Plastre vibranti Plastre battenti Rulli fissi	Trainati o semoventi  Semoventi
Umificazione	Cisterne Irrigatori	Trainate o semoventi Condotte ad ala mobile
Miglioramenti e stabilizzazioni	Polverizzatori Miscelatori Dosatori Stabilizzatori	A lavorazioni separate A lavorazioni composte

## MOVIMENTO TERRA

Il volume delle terre da lavorare viene valutato generalmente, nei Capitolati d'Appalto, in uno dei seguenti modi:

- ↳ 1) volume ( $m^3$ ) di materiale misurato nella sua posizione originale, cioè in banco o in situ ( $V_b$ );
- ↳ 2) volume ( $m^3$ ) di materiale dopo che ha subito un qualsiasi processo dalla sua posizione originale, cioè materiale sciolto ( $V_s$ );
- ↳ 3) volume ( $m^3$ ) di materiale, misurato sul manufatto di terra dopo che sono ultimate le lavorazioni di costipamento, sino al raggiungimento della densità richiesta, cioè volume costipato ( $V_c$ ).

In generale

il materiale da trasportare presenta un volume superiore a quello scavato:

$$> V_s > V_b$$

per effetto del costipamento meccanico i terreni raggiungono un peso di volume superiore a quello che avevano allo stato sciolto ma che può essere superiore o inferiore allo stato originale in banco

$$> V_s > V_b \geq / \leq V_c$$

## MOVIMENTO TERRA

### COEFFICIENTI DI TRASFORMAZIONE/2

Limestone — Broken .....	1540	2600	2610	4400	0.59
Crushed .....	1540	2600	—	—	—
Magnetite, iron ore .....	2790	4700	3260	5500	0.85
Pyrite, iron ore .....	2580	4350	3030	5100	0.85
Sand — Dry, loose .....	1490	2400	1600	2700	0.89
Damp .....	1690	2850	1900	3200	0.89
Wet .....	1940	3100	2080	3500	0.89
Sand & clay — Loose .....	1600	2700	2020	3400	0.79
Compacted .....	2400	4050	—	—	—
Sand & gravel — Dry .....	1730	2900	1930	3250	0.89
Wet .....	2030	3400	2230	3750	0.91
Sandstone .....	1510	2550	2520	4250	0.60
Slate .....	1250	2100	1660	2800	0.75
Slag — Broken .....	1750	2950	2940	4950	0.60
Snow — Dry .....	130	220	—	—	—
Wet .....	520	860	—	—	—
Stone — Crushed .....	1600	2700	2670	4500	0.60
Taconite .....	1630-1900	3600-4200	2350-2700	5200-6100	0.58
Top Soil .....	950	1600	1370	2300	0.70
Traprock — Broken .....	1750	2950	2610	4400	0.67
Wood Chips** .....	—	—	—	—	—

## MOVIMENTO TERRA

### COEFFICIENTI DI TRASFORMAZIONE/3

#### SWELL — VOIDS — LOAD FACTORS

SWELL (%)	VOIDS (%)	LOAD FACTOR
5	4.8	0.962
10	9.1	0.909
15	13.0	0.870
20	16.7	0.833
25	20.0	0.800
30	23.1	0.769
35	25.9	0.741
40	28.6	0.714
45	31.0	0.690
50	33.3	0.667
55	35.5	0.646
60	37.5	0.625
65	39.4	0.606
70	41.2	0.588
75	42.9	0.571
80	44.4	0.556
85	45.9	0.541
90	47.4	0.526
95	48.7	0.513
100	50.0	0.500

$$V_s = V_b / f_c$$

$$V_b = V_s / (1 + f_r/100)$$

## MOVIMENTO TERRA

---

### RENDIMENTO DI UNA MACCHINA

#### Rendimento orario $\eta_h$

E' il rapporto tra il tempo (espresso in minuti primi) in cui una macchina effettivamente produce e l'ora stessa, cioè 60'.

Il tempo effettivo in cui la macchina produce è in ogni caso  $< 60'$  perché vi sono sempre delle perdite di tempo dovute a messe a punto, regolazioni dei diversi meccanismi della macchina, sostituzioni di breve durata di parti di ricambio, necessità del manovratore etc.

In generale si assume il valore  $\eta_h = 50/60 = 0.83$ , considerando una perdita di tempo oraria fissa di 10'.

N.B.: Quando si considera un complesso di macchine lavoranti in dipendenza l'una dall'altra  $\eta_h$  va applicato a tutto il complesso.

## MOVIMENTO TERRA

---

### RENDIMENTO DI UNA MACCHINA

#### Rendimento climatico $\eta_{cl}$

Indica l'incidenza delle condizioni locali (posizione geografica ed altimetrica), delle condizioni temporali (stagione, ora) e della non perfetta idoneità di una macchina per un determinato lavoro in un cantiere in cui un più idoneo mezzo non sia disponibile, sulla produzione della macchina stessa.

Sono riportati i valori orientativi per il rendimento climatico.

pessimo	cattivo	mediocre	buono	ottimo
$< 0,75$	0,75	0,85	0,95	1

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA (MMT)

Le MMT possono essere impiegate per diversi tipi di lavorazione e possono essere distinte in base al tipo di operazione:

### ➤ LAVORAZIONE

1. Preparazione del terreno (Rimozione ostacoli, asportazione strato sup.)
2. Scavi (Zone di trincea, cunette, fossi di guardia)
3. Formazione (Riparti di strati)
4. Regolazione sottofondi e scarpate
5. Rimozione detriti
6. Trasporto

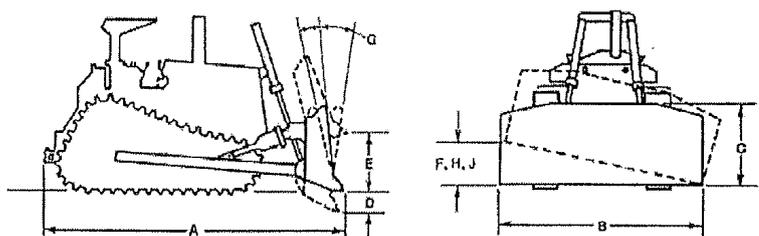
### ➤ OPERAZIONE

- a) macchine per lo scavo (sbancamento) e spostamento
- b) macchine per lo scavo e carico
- c) macchine per la rottura
- d) macchine per il trasporto
- e) macchine per il costipamento

**N.B.**  
Una determinata lavorazione può richiedere l'impiego di più macchine, così come una determinata macchina può essere impiegata per diversi tipi di lavorazione

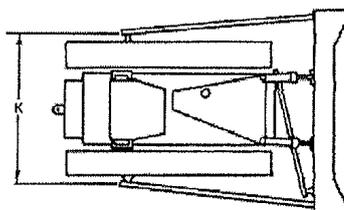
## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

**DOZER (APRIPISTA) - Lavorazione/operazione: 1,2,3/a**



#### KEY

- A Length (Blade Straight)
- Blade:
- B Width (including standard end bits)
- C Height
- D Maximum Digging Depth
- E Ground Clearance @ Full Lift
- F Maximum Tilt (Manual)
- G Maximum Pitch Adjustment
- H Maximum Hydraulic Tilt
- J Hydraulic Tilt (manual brace centered)
- K Push Arm Trunnion Width (to Ball Centers)



L'apripista non è altro che un trattore cingolato o gommato dotato di una lama anteriore (*blade*) fissata ad un telaio ad U mediante uno speciale attacco al centro ed mediante bracci telescopici ai lati

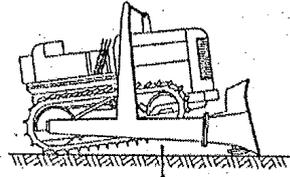
## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### DOZER (APRIPISTA)

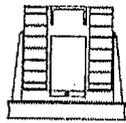
La classificazione che di norma si adotta per questo tipo di macchine dipende dalla inclinazione che può assumere la lama.

Si distinguono tre tipi principali :

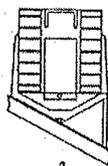
- a) apripista a lama dritta (**bulldozer**) - max distanza lavoro 150 m
- b) apripista a lama orientabile (**angledozer**) - max 25°-30° asse verticale
- c) apripista a lama inclinabile (**tiltdozer**) - max 15° asse longitudinale



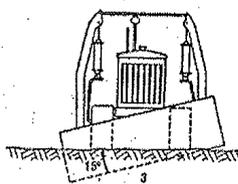
Bulldozer.



1



2



3

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### DOZER (APRIPISTA)

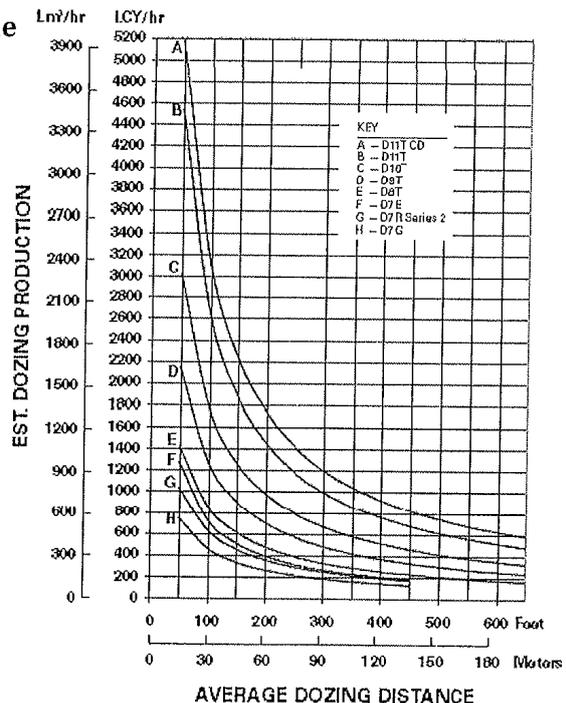
Produzione oraria - curve di produzione

Curve di Produzione  
(da Handbook - esempio CATERPILLAR)

$$\text{Production (Lm}^3\text{/hr)} = \text{Maximum production (LCY/hr)} \times \text{Correction factors}$$

The bulldozer production curves give maximum uncorrected production for universal, semi-universal, and straight blades and are based on the following conditions:

1. 100% efficiency (60 minute hour — level cycle).
2. Power shift machines with 0.05 min. fixed times.
3. Machine cuts for 15 m (50 feet), then drifts blade load to dump over a high wall. (Dump time — 0 sec.)
4. Soil density of 1370 kg/Lm<sup>3</sup> (2300 lb/LCY).
5. Coefficient of traction:
  - a. Track machines — 0.5 or better
  - b. Wheel machines — 0.4 or better
6. Hydraulic controlled blades used.
7. Dig 1F\*\*  
Carry 2F\*\*  
Return 2R\*\*



## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### DOZER (APRIPISTA)

#### Produzione oraria - metodo analitico

CARICO LAMA effettivo ( $Q_e$ )

←  $Q$  TEORICA

$Q_e = Q \times \text{fill factor (m}^3\text{)}$

↑ EFFETTIVA ↓

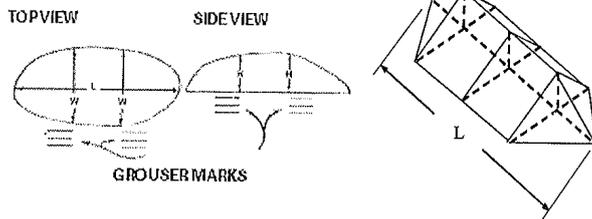
GRANULARE OMOGENEO ASCIUTTO	0.8 ÷ 0.9
TERRE - CIOTTOLI - HUMUS VEGETALE	0.9 ÷ 1
GRANULARE MISTO BAGNATO	1.0 ÷ 1.1
ARGILLA SATURA COMPATTA	1.1 ÷ 1.2

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### DOZER (APRIPISTA)

#### Produzione oraria - metodo analitico

CARICO LAMA ( $Q$ ) - metodo da campo (misure dirette)



*si può usare solo quando realizzo il taglio e non in fase di progetto.*

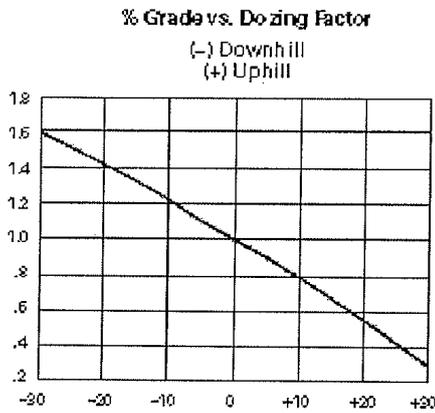
$$Q = 0.0138 \times (HWL) \quad \text{ove H,W,L espressi in piedi}$$

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### DOZER (APRIPISTA)

#### Produzione oraria - metodo analitico

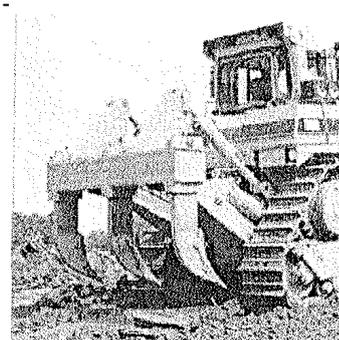
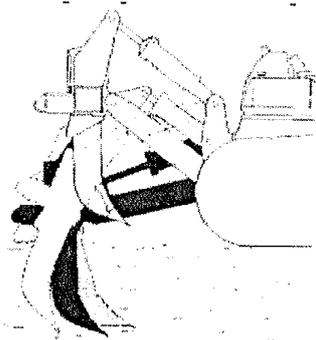
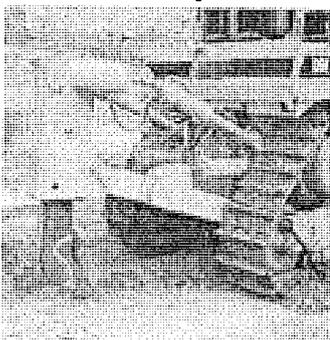
#### FATTORE DI CORREZIONE - PENDENZA DEL TRATTO



se lavoriamo in piano il fattore  $e = 1$   
↑ produzione se lavoro in discesa.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### SCARIFICATORE o RIPPER

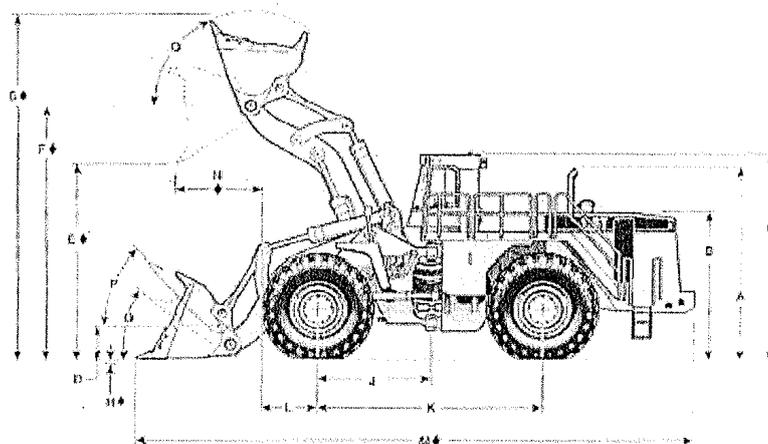


Dispositivo con cui può essere equipaggiato il Dozer, avente la funzione di scarificare il terreno per agevolare le successive operazioni di sbancamento

Il dozer ha una forza di spinto che  $\equiv$  con ~~sen~~ max sforzo di taglio. Per aumentare la forza di taglio posso inserire il ripper (scarificatore) che prima invade il terreno e facilita il lavoro al dozer.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

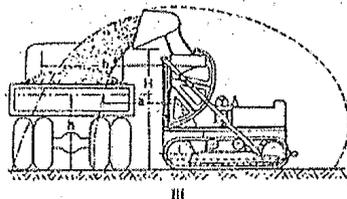
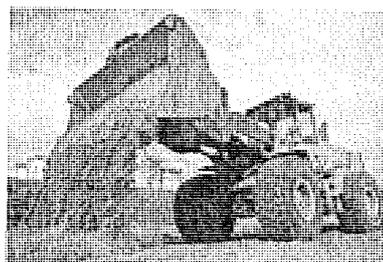
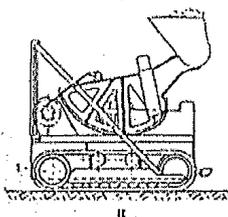
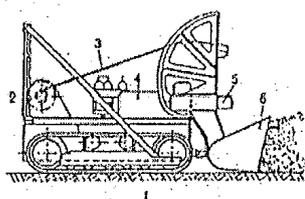
### PALA CARICATRICE - Lavorazione/operazione: 1,2,5/b



Le pale caricatori sono particolari tipi di trattori montati su cingoli o su pneumatici. Hanno anteriormente un telaio elevatore al quale è incernierata una benna con lama tagliente, che per mezzo di bielle, può essere sollevata ed abbassata, effettuando così il carico e lo scarico del materiale e spesso anche lo scavo del terreno da asportate e trasportare altrove

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### PALA CARICATRICE



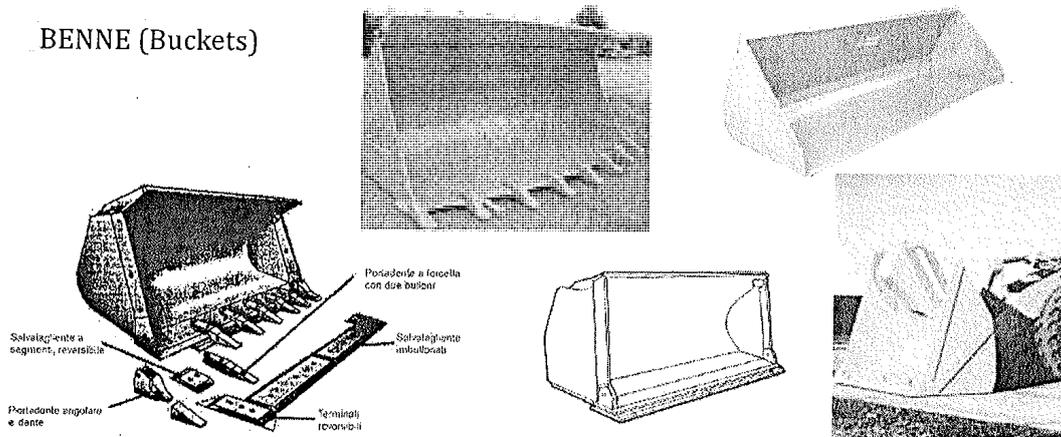
Distinguiamo in:

- **Pale a carico e scarico frontale**, il cui telaio che regge la pala può compiere rotazioni fino a 90°
- **Pale a carico anteriore e scarico posteriore**, dotate di telaio in grado di ruotare a 180° indicate per operare in spazi ristretti, per esempio in galleria.
- **Pale a scarico laterale**, dotate di un meccanismo che permette di rovesciare lateralmente la pala per scaricare il materiale

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### PALA CARICATRICE

#### BENNE (Buckets)



Essendo le pale cariatrici adatte a diversi impieghi, esistono numerosi tipi di benna

- benna per impieghi generali
- benna per materiali sciolti
- benna per lo scavo in banco
- benna da roccia
- benna a scarico laterale, particolarmente indicata per caricare in spazi ristretti
- benna per movimentazione rifiuti

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### PALA CARICATRICE

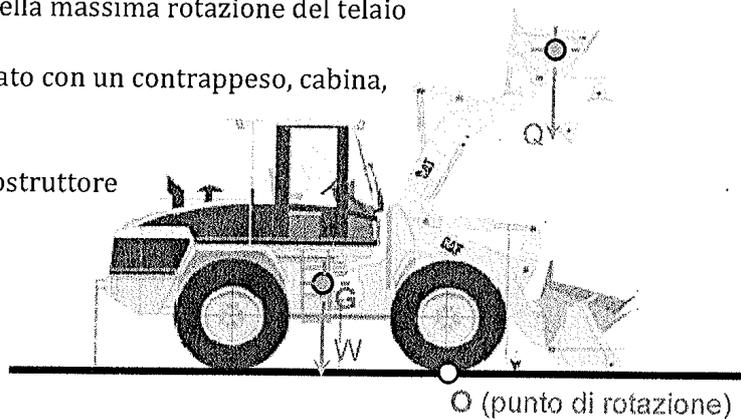
#### CARICO STATICO DI RIBALTAMENTO (*TIPPING LOAD*)

Viene determinato:

- su superficie dura
- in piano
- benna nella massima estensione
- carico massimo
- sia con il telaio dritto sia nella massima rotazione del telaio

Il T.L. può essere incrementato con un contrappeso, cabina, scarificatori, ecc..

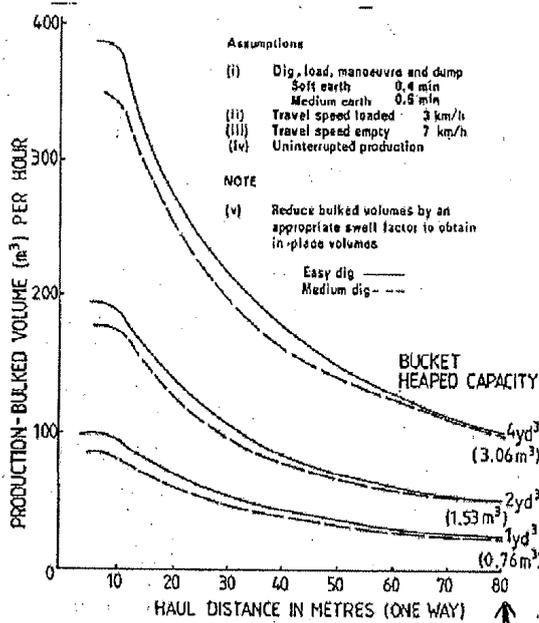
Il T.L. viene dichiarato dal costruttore



## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### PALA CARICATRICE

#### Produzione oraria - Nomogrammi/Curve di produzione



I valori di produzione vanno opportunamente corretti in relazione alle reali condizioni di lavoro (se diversi da quelli riportati nel grafico):

- Efficienza
- Rigonfiamento
- Tempi di carico, scarico, manovra e trasporto

*Le 3 coppie di curve dipendono solo dalla capacità nominale della benna.*

*oltre gli 80 m si sconsiglia di usare la pala*

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### PALA CARICATRICE

#### Produzione oraria - Metodo analitico *metodo + corollario*

$$P_o = \frac{1}{t_c} \cdot \bar{Q} \cdot \eta$$

TEMPO CICLO (a "V")

Q è la capacità effettiva della benna (previa verifica carico ribaltamento T.L.)

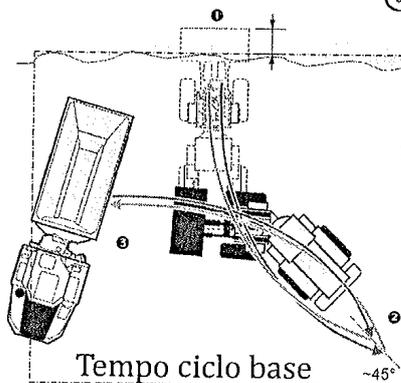
- ① CARICO
- ② RUOTO → SCARICO
- ③ RITORNO

$$t_c = t_{cb} + t_f + t_t$$

$t_{cb}$  = tempo ciclo base (tempo di carico, tempo di scarico e tempo per 4 spostamenti nello spazio minimo)

$t_f$  = fattori di correzione del tempo ciclo base

$t_t$  = tempo aggiuntivo per spostamenti di carico e scarico al di fuori dello spazio minimo

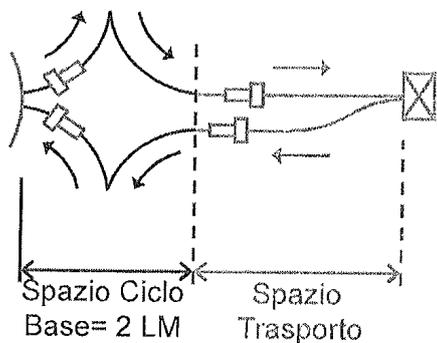


## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### PALA CARICATRICE

Produzione oraria - Metodo analitico

TEMPO AGGIUNTIVO AL CICLO BASE

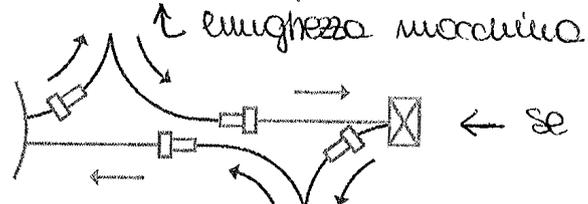


$$t_t = t_{\text{MANOVRA}} + t_{\text{TRASPORTO PURO}}$$

$$t_{\text{manovra}} = 0.10 \text{ min}$$

$$t_{\text{TRASPORTO PURO}} = \text{DISTANZA} / \text{VELOCITA'}$$

(in alternativa ABACHI)

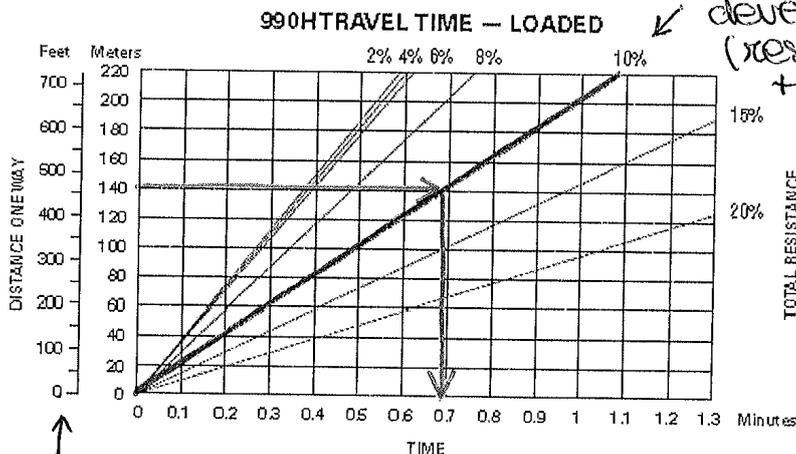


## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### PALA CARICATRICE

Produzione oraria - Metodo analitico

TEMPO AGGIUNTIVO AL CICLO BASE (PALA GOMMATA)



curve in funzione della resistenza totale che deve vincere la pala (resistenza rotolamento + livellata).

↑ distanza tra carico e scarico depurato di 2LM (spazio di trasporto)

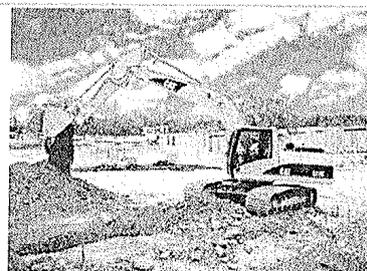
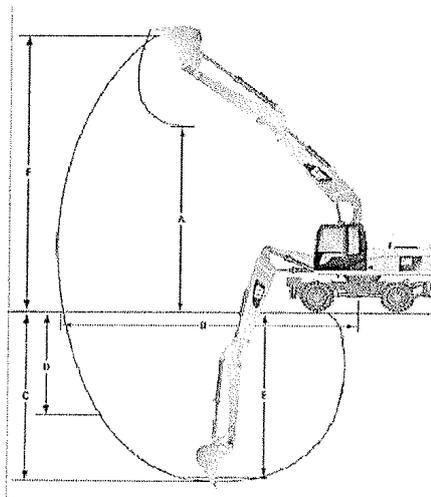
## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE - Lavorazione/operazione: 2/b

Sono costituiti da una macchina base sulla quale possono essere montati differenti equipaggiamenti a seconda del lavoro che si deve svolgere.

La macchina base è costituita da un carro e da una sovrastruttura rotante attorno ad un asse verticale. Il carro ospita i dispositivi che consentono il movimento della macchina e può essere montato su cingoli o su ruote gommate.

I cingoli consentono al mezzo di muoversi su terreni accidentati e, dal momento che trasmettono al terreno pressioni inferiori rispetto alle ruote gommate, permettono di utilizzare il mezzo anche su terreni caratterizzati da scarsa capacità portante. Per queste ragioni gli escavatori più potenti e pesanti sono dotati di cingoli. Gli escavatori cingolati, rispetto a quelli gommati, presentano un baricentro più basso che aumenta la stabilità del mezzo sia in fase di scavo che in movimento. I cingoli sono dimensionati affinché la pressione esercitata sul terreno sia dell'ordine di 0,7 - 0,9 kg/cm<sup>2</sup> quando la macchina è sotto sforzo.



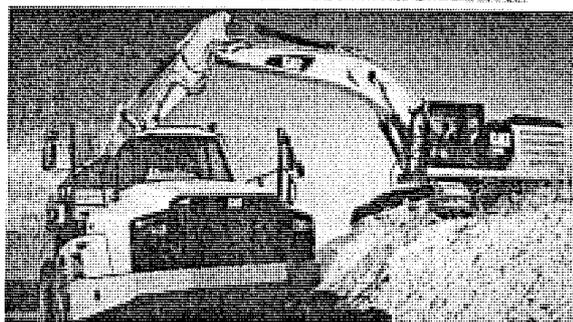
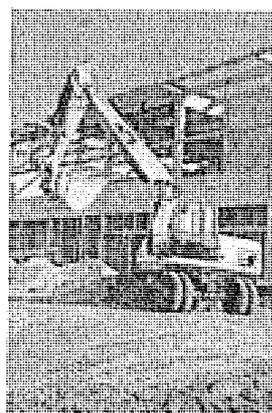
## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE - Lavorazione/operazione: 2/b

Gli escavatori **gommati** sono da preferirsi quando al mezzo è richiesta un'elevata mobilità e quando esiste il rischio che i cingoli possano danneggiare le superfici sulle quali il mezzo deve muoversi.

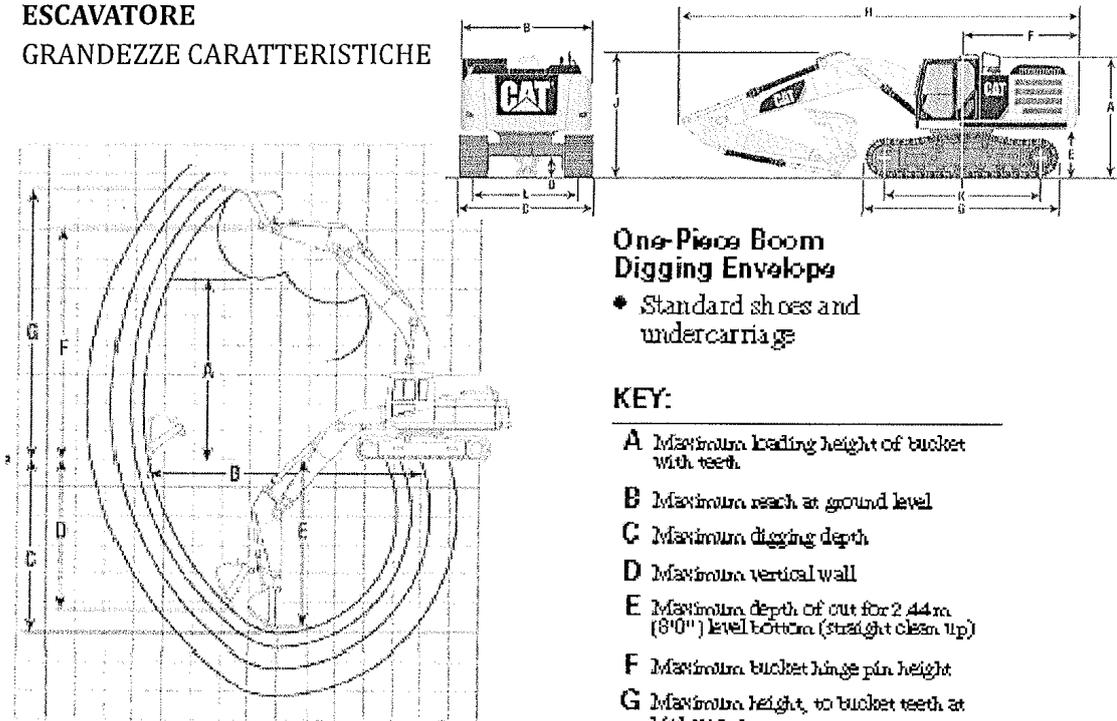
L'**attrezzatura di scavo** è costituita da un primo braccio detto braccio base, incernierato sulla torretta, da un secondo braccio, detto braccio di scavo avambraccio o stick), incernierato al primo ed un attrezzo finale (benna rovescia, frontale, mordente, martello demolitore, ecc.) incernierato al braccio di scavo.

Qualsiasi macchina, anche se dotata di un solo braccio base, offre sempre la scelta fra due o più bracci di scavo, per meglio adattarsi alle varie esigenze di lavoro.



## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE GRANDEZZE CARATTERISTICHE



#### One-Piece Boom Digging Envelope

- Standard shoes and undercarriage

#### KEY:

- A Maximum loading height of bucket with teeth.
- B Maximum reach at ground level
- C Maximum digging depth
- D Maximum vertical wall
- E Maximum depth of cut for 2.44 m (8'0") level bottom (straight clean up)
- F Maximum bucket hinge pin height
- G Maximum height to bucket teeth at highest arc

↑  
si vede la capacità massima dell'attrezzatura in sicurezza

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE CAPACITA' DI SOLLEVAMENTO

← capacità dell'escavatore di movimentare del terreno

In alcune particolari situazioni la capacità di sollevamento diventa determinante per la scelta dell'escavatore.

La capacità di sollevamento di un escavatore dipende dal suo peso, centro di gravità, la posizione del punto sollevamento e dalla sua capacità idraulica.

#### Specifiche SAE:

**CARICO STATICO DI RIBALTAMENTO (T.L.):** corrisponde al massimo carico (kg), (dipendente dalla posizione del punto di sollevamento), il cui momento bilancia esattamente il momento stabilizzante generato dal peso della macchina.

→ CARICO OPERATIVO LIMITE = 75% T.L.

**CAPACITA' IDRAULICA DI SOLLEVAMENTO (C.I.):** il massimo carico che può essere sollevato senza superare la normale pressione di esercizio.

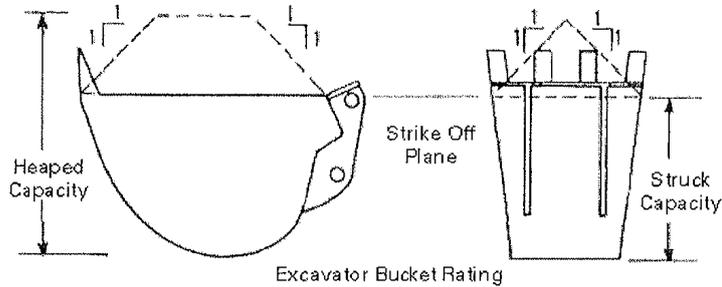
→ CAPACITA' IDRAULICA LIMITE = 87% C.I.

**CAPACITA' NOMINALE DI SOLLEVAMENTO:** è uguale al **minimo** dei due valori precedenti, valutata per ogni specifica posizione.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE CAPACITA' DELLA BENNA

La capacità di sollevamento è in Kg.



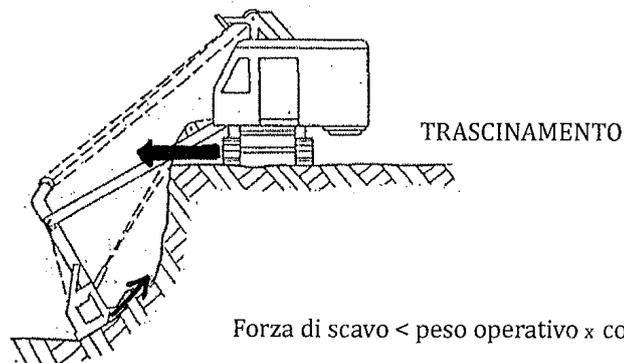
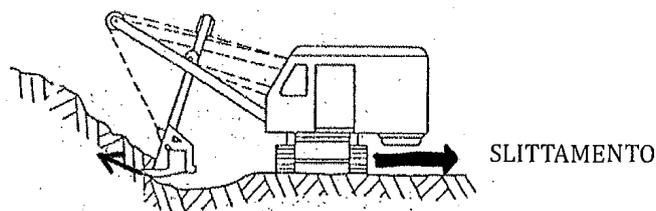
### Specifiche SAE (standard J-296):

**CAPACITA' LIVELLATA (Struck capacity):** il volume effettivamente racchiuso all'interno della benna (escluso il materiale trasportato dai suoi denti) al di sotto del piano di taglio (Strike off Plane)

**CAPACITA' AL COLMO (Heaped Bucket Capacity):** è il volume precedente più il volume presente al di sopra del piano di taglio, valutato come rappresentato in figura. La Committee on European Construction Equipment (CECE) definisce tale capacità al colmo con un angolo a riposo del materiale al di sopra della linea di taglio pari a 2:1.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE STABILITA' DI SCAVO



## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE

Produzione oraria - Metodo analitico

TEMPO CICLO

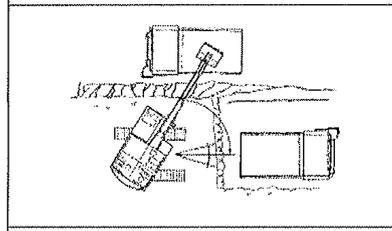
$$t_c = t_{cb} + t_f$$

$t_{cb}$  = tempo ciclo base (tempo di carico, tempo di scarico e tempo le rotazioni a benna carica e scarica) dipendono dalla dimensione della macchina.

$t_f$  = fattori di correzione del tempo ciclo base

I valori di  $t_{cb}$  sono definiti in condizioni standard:

- Terreno comune
- Nessun ostacolo
- Condizioni medie di lavoro
- Operatore di capacità media
- Angolo di rotazione tra i 60-90°



*Se ci muoviamo dalle condizioni ottimali, aumenta il tempo ciclo base.  
Non si considera il tempo di trasporto.*

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE

Produzione oraria - Metodo analitico

TEMPO CICLO BASE

*Le zone grigie danno idea del tempo ciclo base che impiegherebbe la macchina in diverse condizioni.  
→ ho un ampio RANGE di tempo.*

*macchine del produttore*

CYCLETIME	MACHINE SIZE CLASS											CYCLETIME	
	307C 308D CB 308D CR SB	311D	M3 BD 312D	M3 ED M3 FD 315D L	M3 BD 318D L 318D LN	M32D 320D 320D RR 321D CR 323D	324D	328D LCR	329D	336D	345D		345C L 345C
10 SEC.								N/A					0.17 min.
15								N/A					0.25 min.
20 SEC.								N/A					0.33 min.
25													0.42 min.
30 SEC.													0.50 min.
35													0.58 min.
40 SEC.													0.67 min.
45													0.76 min.
50 SEC.													0.83 min.
55													0.92 min.
60 SEC.													1.0 min.

N/A = Not Available

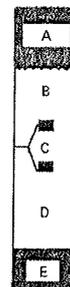
*↑ tempo ciclo base*

Fastest Possible

Fastest Practical

Typical Range

Slow



#### KEY

- A - Excellent
- B - Above Average
- C - Average
- D - Below Average
- E - Severe

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### ESCAVATORE

#### Produzione oraria - Metodo analitico

#### CORREZIONE AL TEMPO BASE ( $t_p$ )/3

PROFONDITÀ DI SCAVO (%)	VARIAZIONI CICLO BASE (secondi)
25	-1
50	0
75	+1
100	+2

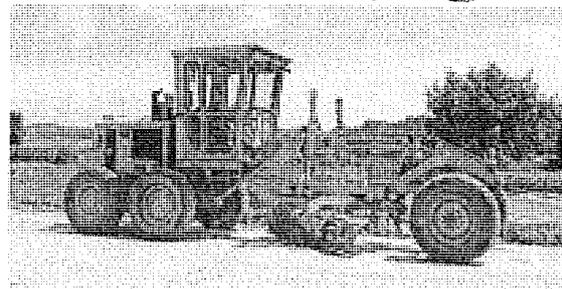
↑  
% rispetto alla max  
estensione in  
profondità.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### MOTOLIVELLATRICE - Lavorazione/operazione: 3,4/a

La livellatrice è una macchina che può essere impiegata in una vastissima gamma di applicazioni:

- finitura scarpate;
- livellazione superfici;
- preparazione siti di cantiere;
- spandimento materie sciolte;
- prescarificazione (pre-ripping);
- rimozione manto nevoso.



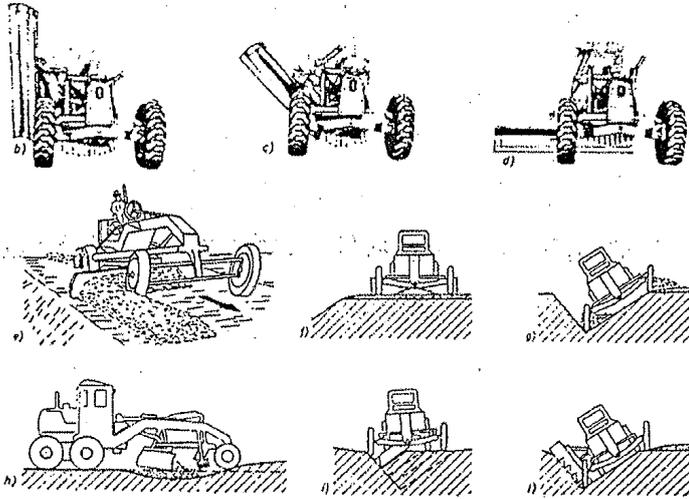
ha il vantaggio di  
avere una lama  
molto più grande  
del dozer

Sono costituite da un telaio a ponte che poggia anteriormente su una coppia di ruote e posteriormente su un carro, su due o quattro ruote, che ospita il motore e la cabina di manovra. Il livellamento del terreno avviene tramite una lama collegata al telaio a ponte attraverso una ralla che le consente di assumere diverse posizioni rispetto alla macchina.

Vengono di norma impiegate lungo percorsi entro i 600 m (tagli pesanti) oppure anche per alcuni km (livellamenti a media-bassa intensità); la penetrazione dello scarificatore si svolge entro 12÷25 cm con velocità comprese entro 4÷24 km/h.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### MOTOLIVELLATRICE (Esempi di utilizzo)



- b) autolivellatore con dispositivo per la ripresa del materiale e la formazione di mucchi laterali o carico dei veicoli con nastro trasportatore;  
 c), d) varie posizioni della lama (vomer) ugualmente possibili sia a destra che a sinistra;  
 e), f) livellamento;  
 g), h), i), l) scavo di fossi, sistemazione di scarpate e operazioni varie

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### MOTOLIVELLATRICE

#### Produzione oraria

La produzione oraria, a seconda del tipo di lavoro, viene espressa in termini di:

- volume di terreno tagliato e posizionato nell'unità di tempo [mc/h];
- chilometri di pista profilata nella unità di tempo [km/h];
- metri quadrati di superficie livellata nell'unità di tempo [mq/h].

Un metodo per valutare il tempo richiesto per l'esecuzione di un certo lavoro è il seguente:

$$t = \frac{D}{V \cdot \eta} \cdot n$$

D = distanza in km

V = velocità (*Operating Speed*) in km/h

n = numero di passate per eseguire la lavorazione

$\eta$  = efficienza

#### Operating Speeds:

Typical operating speeds by application

Finish Grading:	0-4 km/h	(0-2.5 mph)
Heavy Blading:	0-9 km/h	(0-6 mph)
Ditch Repair:	0-5 km/h	(0-3 mph)
Ripping:	0-5 km/h	(0-3 mph)
Road Maintenance:	5-16 km/h	(3-9.5 mph)
Haul Road Maintenance:	5-16 km/h	(3-9.5 mph)
Snow Blowing:	7-21 km/h	(4-13 mph)
Snow Winging:	15-28 km/h	(9-17 mph)

La produzione oraria in [mc/h] di volume tagliato e posizionato può calcolarsi mediante la seguente formula:

$$P = \frac{A \cdot V}{n} \cdot \eta$$

A = area della sezione trasversale di lavoro (lunghezza efficace della lama x profondità di lavoro)

↓  
 lavoro se la lama non forma 90° con la direzione di lavoro la lunghezza sarà minore.

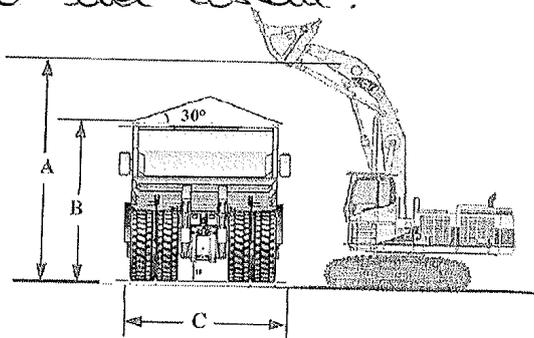
# MACCHINE MOVIMENTO TERRA



## AUTOCARRI - DUMPERS

### Criteria di scelta

Ci interessa la lunghezza e l'altezza del cassone.



Altezza ottimale di caricamento :

$$A > B + \frac{C \cdot \tan(30^\circ)}{2}$$

← h del carico qnd è carico.

Il dumper si sceglie in funzione del caricatore.

Caratteristiche tecniche - Esempio

Bisogna verificare che ci sia un'altezza ottimale di caricamento.

MODEL	772	
Body Type	Medium Impact Steel Flat Floor	
Gross Machine Weight	82 100 kg	181 000 lb
Chassis Weight*	25 425 kg	56 053 lb
Body Weight	10 430 kg	23 013 lb
Payload Without Liner	46 236 kg	101 994 lb
Standard Liner Weight	-	-
Target Payload**	46 236 kg	101 994 lb
Capacity:		
Struck (S&E)	23.3 m <sup>3</sup>	30.5 yd <sup>3</sup>
Heaped (2:1) (S&E)	31.3 m <sup>3</sup>	41.0 yd <sup>3</sup>
Distribution Empty:		
Front	42%	
Rear	52%	
Distribution Loaded:		
Front	39%	
Rear	57%	
Engine Model	C10ACERT	
Number of Cylinders	6	
Bore	145 mm	5.7"
Stroke	183 mm	7.2"
Displacement	18 L	1105 in <sup>3</sup>
Net Power	392 kW	535 hp
Gross Power	445 kW	598 hp
Standard Tires	21.00R33 (E4)	
Machine Clearance Turning Circle	21.6 m	70'10"
Fuel Tank Refill Capacity	629 L	140 U.S. gal
Top Speed (Load)	79.7 km/h	49.5 mph
GENERAL DIMENSIONS (Empty):		
Height to Canopy Rock Guard Rail	4.22 m	13'10"
Wheelbase	3.06 m	10'0"
Overall Length (Operating)	8.74 m	28'9"
Overall Length (Shipping)	8.74 m	28'9"
Loading Height (Empty)	4.50 m	14'8"
Height at Full Dump	6.36 m	21'0"
Body Length (Target Length)	5.65 m	18'5"
Width (Operating)	4.75 m	15'5"
Width (Shipping)***	3.95 m	13'0"
Front Tire Tread	3.17 m	10'5"

← verifica sul peso della macchina che non deve superare le 200 tonnellate.

# MACCHINE MOVIMENTO TERRA

## AUTOCARRI - DUMPERS

### Produzione oraria

$$P_o = \frac{1}{t_c} \cdot Q \cdot \eta$$

← RENDIMENTO

↑ TEMPO CICLO

CAPACITA' EFFETTIVA DEL CASSONE

Q = Capacità teorica x fattore di riempimento

(difficile da valutare, in genere ci si riferisce al valore dichiarato dalla casa - Target Payload)

valore max molto di carico.

### TEMPO CICLO

$$t_c = t_{fisso} + t_{variabile}$$

$t_{fisso}$  → tempo di manovra nella zona di carico = 0.1-0.4 min  
tempo di scarico e relativa manovra = 1.0-1.2 min

$t_{variabile}$  → tempo che occorre al dumper per spostarsi dalla zona di carico alla zona di scarico e viceversa

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### AUTOCARRI - DUMPERS

#### Produzione oraria

#### CALCOLO NUMERO DI DUMPERS PER CARICATORE

$$N_{DUMPERS} = \frac{P_{caricatore}}{P_{dumper}} \left\{ \begin{array}{l} \leftarrow \text{produzione caricatore} \\ \leftarrow \text{produzione dumper} \end{array} \right. > 1$$

Il valore ottenuto dovrà essere approssimato all'intero superiore per garantire una produzione richiesta

Devo sapere quanti dumper sono necessari.  
Deve essere lo polo ad aspettare il camion  
e non il camion ad aspettare lo polo.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

### RULLI (COMPACTORS) - Lavorazione/operazione: 3, 4 / e

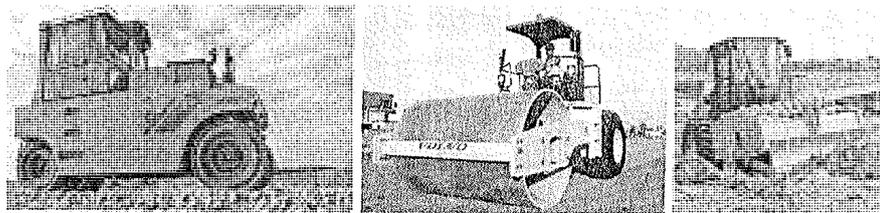
Il costipamento è l'azione che porta ad aumentare la densità del terreno, comprimendo ed avvicinando tra loro le particelle dei materiali con espulsione di una parte dell'acqua e del gas che riempiono i vuoti.

L'energia spesa per questo processo varia secondo il tipo di materiale, la tecnica usata, lo spessore sottoposto a costipamento, il contenuto di acqua.

Lo scopo del costipamento è l'aumento della resistenza meccanica del materiale addensato.

In cantiere il costipamento viene effettuato a mezzo di macchine semoventi o trainate che, in funzione delle loro caratteristiche, sottopongono il materiale da compattare a quattro diverse azioni:

- pressione
- urto
- vibrazione
- manipolazione



I mezzi di costipamento compiono il proprio lavoro esplicando un'azione statica (dovuta essenzialmente al peso proprio della macchina) ed una azione dinamica (di urto o vibrazione).

Secondo se prevale l'una o l'altra di queste due azioni essi si dividono in due grandi classi: **mezzi statici** e **mezzi dinamici**.

## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

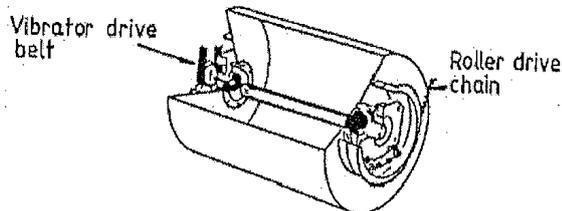
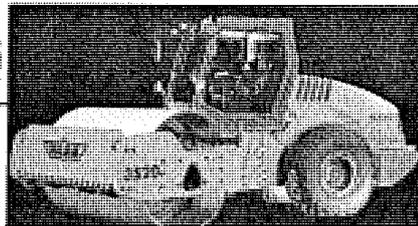
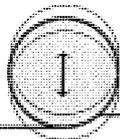
### RULLI

#### RULLI A CILINDRI LISCI VIBRANTI

Sono composti da un telaio isolato dal tamburo metallico vibrante (o dai tamburi) mediante tamponi in gomma.

Le vibrazioni sono generate dalla rotazione di una massa eccentrica posta all'interno del tamburo. La velocità di rotazione di questa massa determina la frequenza; il peso e la forma della massa, oltre al peso del tamburo, determinano la ampiezza di vibrazione.

Garantiscono i migliori risultati in presenza di terreni incoerenti costituiti da sabbie, ghiaia, misti alluvionali.



## MACCHINE MOVIMENTO TERRA

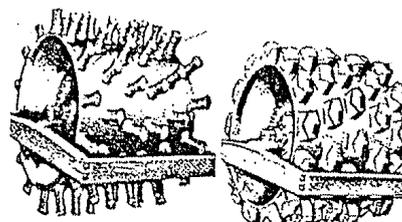
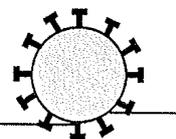
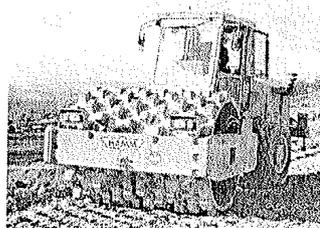
### RULLI

#### RULLI CON TAMBURI A PIEDI DI MONTONE

Sono macchine di tipo statico ideali per l'addensamento dei materiali ad elevata coesione (argilla e limi argillosi), grazie alle azioni di impatto e mescolamento.

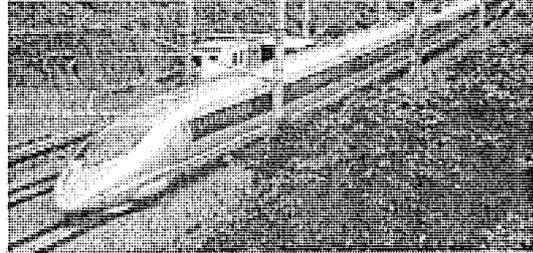
Gli zoccoli sulle generatrici del tamburo a file sfalsate hanno forme diverse e lunghezza variabile da 15 a 25 cm; il tamburo può essere zavorrato per aumentarne il peso.

Il peso della macchina viene trasmesso al terreno dagli zoccoli che, avendo superfici ridotte, esplicano pressioni unitarie molto elevate. Lo svantaggio di questo tipo di tamburi è la ridotta profondità di addensamento limitata alla lunghezza degli zoccoli e la mancanza di effetto addensante sui materiali granulari.





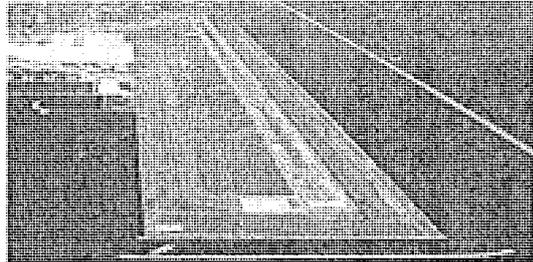
**POLITECNICO DI TORINO**  
**Corso di Laurea Magistrale**  
**in Ingegneria Civile**  
a.a. 2013-14



**Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti (03ALVMX)**

**CORPO STRADALE**

Stabilizzazione delle terre



**GENERALITA'**

In presenza di un terreno di caratteristiche non idonee è possibile prevedere due alternative tecniche.

1. SOSTITUZIONE CON MATERIALE DI CAVA *si deve evitare se si può*

SVANTACCI <

- COSTI MOLTO ELEVATI
- PROBLEMI AMBIENTALI (apertura cave di prestito, conferimento in discarica del rifiuto)

2. STABILIZZAZIONE

*cercò di migliorare la qualità del terreno.*



Processo che prevede l'aggiunta di materiali di apporto (leganti o frazioni granulometrica) allo scopo di migliorare le caratteristiche fisiche e meccaniche delle terre

## STABILIZZAZIONE CHIMICA

La scelta del tipo di additivo e del dosaggio dipende da diversi fattori quali:

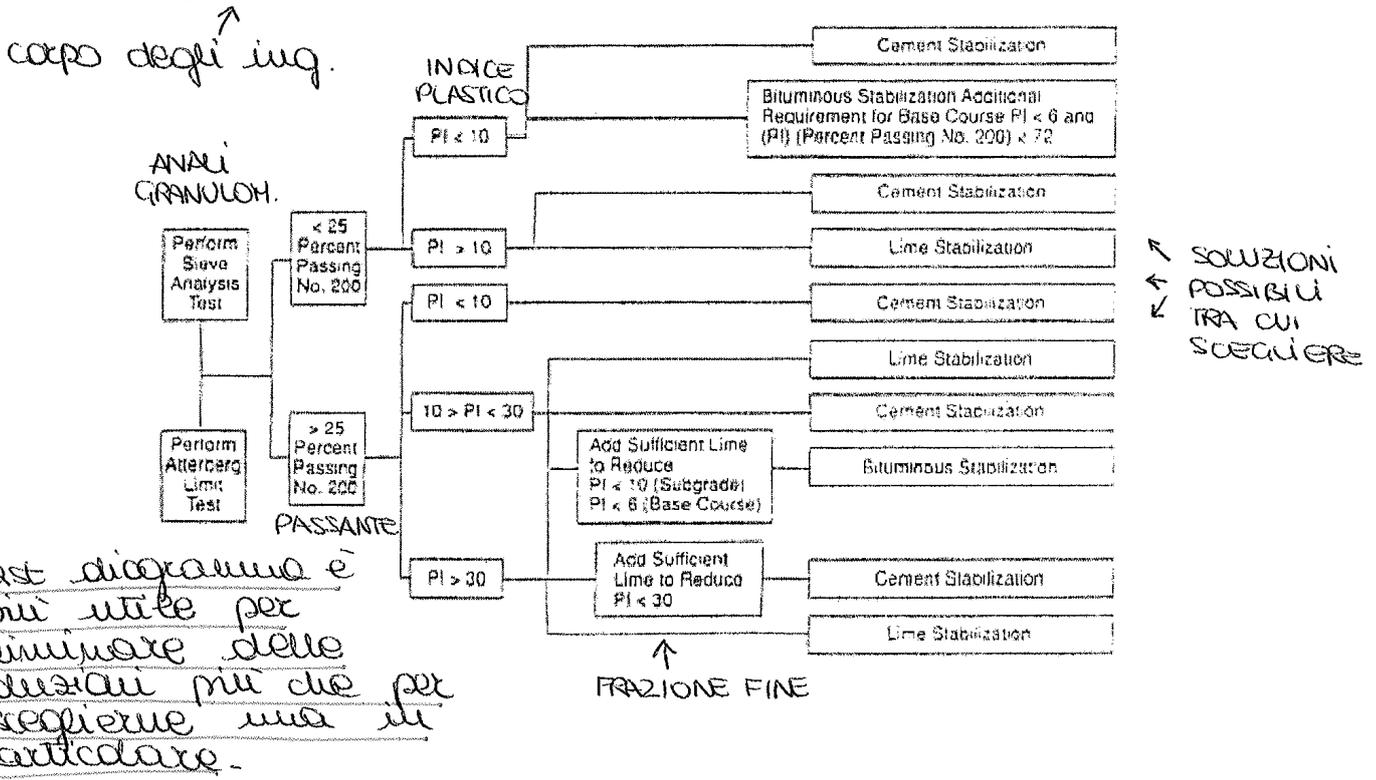
- Natura e caratteristiche del terreno da stabilizzare
- Obiettivi della stabilizzazione (miglioramento delle proprietà a breve termine e/o lungo termine) ← *ci riferiamo alle caratteristiche meccaniche in esercizio.*
- Requisiti finali della miscela stabilizzata (resistenza, rigidezza) ↑ *caratteristiche che intervengono nella fase costruttiva.*
- Costo e fattori ambientali

↑  
 impatto dei cantieri  
 sull'ambiente.

## STABILIZZAZIONE CHIMICA

*Linee guida per lo scelta del tipo di stabilizzazione.*

**Criteria di selezione del tipo di stabilizzazione**  
 (Dept. Of the Army, 1983)



## STABILIZZAZIONE CON CALCE

### Effetti a BREVE TERMINE

- Variazione del contenuto d'acqua naturale
- Variazione delle caratteristiche della terra
  - > GRANULOMETRIA
  - > PLASTICITA'
  - > COMPATTABILITA'
  - > PROPRIETA' MECCANICHE

mediante la stabilizzaz.  
 si può far diminuire  
 il contenuto di acqua  
 che viene consumata  
 durante la stabilizzazione.

Le verifiche a breve termine  
 devono essere eseguite  
 entro le 90h.

### Effetti a LUNGO TERMINE

- Accrescimento delle proprietà meccaniche della terra conseguente all'azione pozzolanica della calce

si creano dei nuovi composti.

## STABILIZZAZIONE CON CALCE

### Meccanismi di Reazione a Breve Termine

#### • **ESSICCAZIONE**

dovuta al fissaggio chimico dell'acqua ed alla evaporazione conseguente a un innalzamento della temperatura generato da una reazione fortemente esotermica (calce viva)



dopo 2h:  $\Delta w\% = 1$  o  $1.5\%$  per ogni  $1\%$  di CaO aggiunto.

uno porzione di H<sub>2</sub>O viene  
 consumata x e idratato.  
 dello calce che passa da  
 vivo ad idrato.

e quindi provoca la produzione di calore che fa evaporare l'acqua che non ha partecipato

#### • **FLOCCULAZIONE** di idratazione

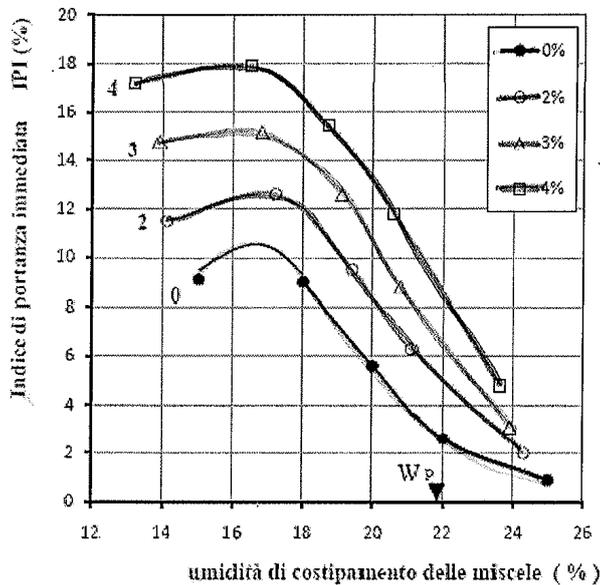
dovuta allo scambio di ioni liberi in soluzione Ca<sup>++</sup> con i cationi Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, ecc., che consente la formazione, nelle primissime ore di trattamento, di legami tra le particelle disperse di argilla che vengono in tal modo agglomerate agevolando le operazioni di miscelazione e compattazione.

la calce idrato in soluz. genera Ca<sup>++</sup> che si scambiano con Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> → si generano dei legami supplementari tra le particelle → si creano i flocculi che facilitano la compattazione cambia la granulometria che diventa quindi più grossolana.

## TRATTAMENTO CON CALCE

### Effetti sulle Miscele a BREVE TERMINE

- miglioramento delle caratteristiche **meccaniche** ↑



Indice di Portanza Immediata (IPI)  
(EN 13286-47)

Al crescere del contenuto di calce, l'indice di portanza varia sensibilmente.

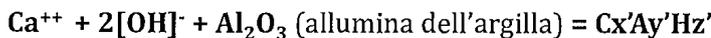
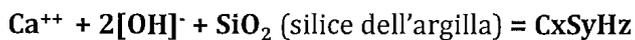
↑ % calce → ↑ IPI

## TRATTAMENTO CON CALCE

### Meccanismi di reazione a LUNGO TERMINE

REAZIONI POZZOLANICHE

Le reazioni tipiche tra calce e terreni argillosi sono rappresentate qualitativamente da



SI FORMANO:  
Silicati e alluminati  
di calcio idrati

in cui gli indici x,y,z e x',y',z' variano a seconda che l'argilla sia una montmorillonite (molto reattiva), una caolinite (mediamente reattiva) oppure una illite (poco reattiva e difficilmente attaccabile).

### PARAMETRI CHE INFLUENZANO LAZIONE DELLA CALCE

- **Superficie Specifica** (elevata) ↑ S → ↑ reazioni
- **Carbonatazione** (evitare l'esposizione all'aria)
- **Durata del Trattamento**
- **Modalità di Compattazione**
- **Tenore d'Acqua**
- **Temperatura** (le reazioni risultano accelerate di 4 volte passando da 10 a 20 °C e di 10 volte passando da 20 a 40 °C), ↑ T → ↑ velocità reaz.
- **Materie Organiche** (composti azotati possono ritardare o inibire le reazioni)

Dividiamo ora l'analisi per terreni in RILEVATO e per i SOTTOFONDI. Per i primi consideriamo solo le caratteristiche a breve termine, per i secondi sia a breve che lungo termine.

## TRATTAMENTO CON CALCE

### Progettazione di Trattamenti a Calce - Impiego in rilevato

REQUISITI DI BREVE TERMINE (per la posa in opera e la compattazione)

↳ *Soil Improved by Lime* (TERRENO STABILIZZATO A CALCE).

Indice di portanza immediato - **IPI** (valutato non oltre 90 minuti dalla compattazione)

Immediate bearing index	Category*
≥ 5	IPI <sub>5</sub>
≥ 7	IPI <sub>7</sub>
≥ 10	IPI <sub>10</sub>
≥ 15	IPI <sub>15</sub>
≥ 20	IPI <sub>20</sub>
≥ 25	IPI <sub>25</sub>
Declared value	IPI <sub>DV</sub>

Bisogna indicare l'IPI che voglio ottenere. In base all'IPI associato al terreno le categorie della 2<sup>a</sup> colonna.

\* La categoria va stabilita in progetto

## TRATTAMENTO CON CALCE

### Progettazione di Trattamenti a Calce - Impiego in rilevato

REQUISITI DI BREVE TERMINE (per la posa in opera e la compattazione)

↳ *Soil Improved by Lime*

Grado di **compattazione**

The ratio in % of the in situ dry density to the Proctor (see NOTE) dry density determined in accordance with EN 13286-2	Category*
≥ 95	DC <sub>95</sub>
≥ 97	DC <sub>97</sub>
Declared value	DC <sub>DV</sub>

Bisogna indicare il livello di addensamento in situ. (γ<sub>s</sub>)

## TRATTAMENTO CON CALCE

### Progettazione di Trattamenti a Calce - Impiego in strati di sottofondo

#### REQUISITI DI LUNGO TERMINE

##### Indice CBR (prova eseguita dopo maturazione e successiva saturazione)

CBR requirement after 4 days soaking (or other longer specified period)	Class *
≥ 15	CBR <sub>15</sub>
≥ 20 and not less than the immediate bearing index	CBR <sub>20</sub>
≥ 30 and not less than the immediate bearing index	CBR <sub>30</sub>
≥ 40 and not less than the immediate bearing index	CBR <sub>40</sub>
≥ 50 and not less than the immediate bearing index	CBR <sub>50</sub>
Declared value (but not less than 15)	CBR <sub>DV</sub>

##### Resistenza a compressione (prova eseguita dopo maturazione e successiva saturazione)

Compressive strength	Class *
≥ 0,2 MPa	R <sub>c</sub> 0,2
≥ 0,5 MPa	R <sub>c</sub> 0,5
≥ 1,0 MPa	R <sub>c</sub> 1,0
Other declared value but not less than 0,2 MPa	R <sub>c</sub> DV

## TRATTAMENTO CON CALCE

### Progettazione di Trattamenti a Calce - Impiego in strati di sottofondo

#### REQUISITI DI LUNGO TERMINE

##### Stabilità all'acqua

$$I_m = \frac{R(x+14i)}{R(x+14)} \geq 0,8$$

i = immersione

RESISTENZA DOPO "x" GIORNI E "i" GIORNI DI IMMERSIONI IN ACQUA  
VALORE DA RISPETTARE.

##### Stabilità al gelo

$$I_g = \frac{R(x+1i+13g)}{R(x+14i)} \geq 0,8$$

g = gelo

13 gg dell'immersione in acqua vengono dedicati ai cicli di gelo - disgelo

x = giorni di maturazione in condizioni controllate

i = immersione in acqua

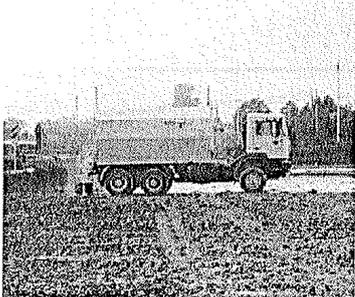
g = condizionamento in gelo

## TRATTAMENTO CON CALCE

---

### 2. Spandimento della Calce e dell'Acqua

- metodo "ASCIUTTO" (in assenza di vento); distribuzione di sacchi di calce sulla superficie da trattare secondo il dosaggio previsto al mq oppure facendo uso di apposito spanditore meccanico; spandimento non superiore a quello della superficie lavorabile in 1 giorno per evitare asportazioni a causa del vento e CARBONATAZIONI;
- metodo "BAGNATO" (in zone ventose); preparazione delle miscele acqua-calce in MESCOLATORI CENTRALI in movimento continuo per evitare SEDIMENTAZIONI durante lo stoccaggio. → non rischio di perdere il materiale  
no quindi un dosaggio preciso.



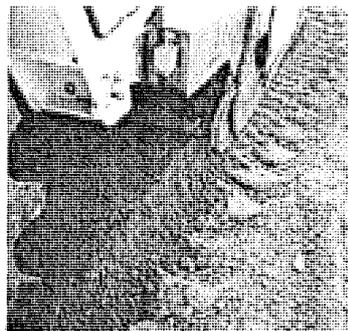
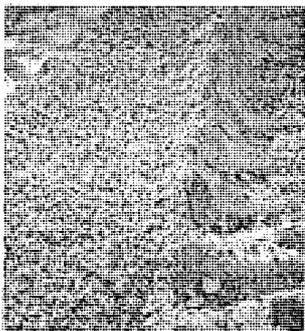
## TRATTAMENTO CON CALCE

---

### 3. Miscelazione e Polverizzazione

Una miscelazione uniforme è garantita da una adeguata *polverizzazione* della terra in sito, quindi per terre fortemente argillose si procede in due tempi:

- prima aggiunta di calce (ed eventualmente di acqua) che dà inizio al processo di polverizzazione;
- dopo 24 - 48 ore seconda aggiunta di calce che può omogeneizzarsi meglio fino alla riduzione delle zolle di argilla in forma sabbiosa passante almeno al 60% al setaccio 4 ASTM.



## STABILIZZAZIONE CON CEMENTO

---

A differenza della calce, il cemento dà origine ad un vero e proprio fenomeno di presa con notevole incremento delle caratteristiche meccaniche.

### FATTORI CHE INCIDONO SULLE CARATTERISTICHE DELLE MISCELE

1. Tipo di terreno
2. Contenuto di cemento
3. Contenuto d'acqua
4. Corretto sviluppo della presa e della maturazione

E' possibile stabilizzare con cemento una vasta gamma di terreni; ne sono esclusi:

- TERRENI MOLTO PLASTICI (IP >15)
- TERRENI CONTENENTI SOLFATI E MATERIE ORGANICHE

## STABILIZZAZIONE CON CEMENTO

---

### STUDIO DI MISCELA (UNI EN 14227-10:2006)

- Dosaggio di cemento
- Contenuto d'acqua

*Se esageriamo con il cemento, otteniamo uno stato troppo rigido, la condizione minima di cemento viene stabilita dal progettista.*

## STABILIZZAZIONE CON CEMENTO

### REQUISITI SULLA MISCELA STABILIZZATA – Indice CBR (dopo condizionamento)

CBR requirements	Class *
No requirement	CBR <sub>NR</sub>
≥ 15	CBR <sub>15</sub>
≥ 20	CBR <sub>20</sub>
≥ 30	CBR <sub>30</sub>
≥ 40	CBR <sub>40</sub>
≥ 50	CBR <sub>50</sub>
≥ 60	CBR <sub>60</sub>
≥ 70	CBR <sub>70</sub>
≥ 80	CBR <sub>80</sub>
Declared value	CBR <sub>DV</sub>

Curing regime	Curing period (days) cured at 20 °C	
	Without change in water content	In water
A	7	0
B	7	21
C	7	28
D	14	14
E	3	4
F	3	25
G	3	88

Il regime di condizionamento va scelto in funzione della severità delle condizioni di impiego

si sceglie il tempo di condizionamento in base alla pressione che subirà il terreno in opera.

## GENERALITA' OPERE IDRAULICHE (in generale)

### Opere per la raccolta e l'allontanamento di acque superficiali

- cunette
- arginelli ed embrici
- fossi di guardia
- pozzetti

### Opere per l'attraversamento di corsi d'acqua

- tombini
- ponticelli
- ponti
- viadotti

Aspetti strutturali ed idraulici che esulano dalla tecnica stradale

### Opere per la raccolta di acque profonde

- drenaggi

## ACQUE SUPERFICIALI

### Acque di piattaforma e velo idrico

La pendenza trasversale della piattaforma stradale consente l'allontanamento delle acque presenti in superficie ed il controllo del velo idrico (DM 5/11/2001 -  $i_t > 2,5\%$ )

$$y = 0,047 \cdot \sqrt{L \cdot j} \cdot i_L^{-0,2}$$

↓

Altezza velo idrico (mm)

*Se y raggiunge valori consistenti ci possono essere problemi di stabilità.*

$j$  = intensità di precipitazione (mm/h)

$i_L$  = pendenza geodetica (m/m)

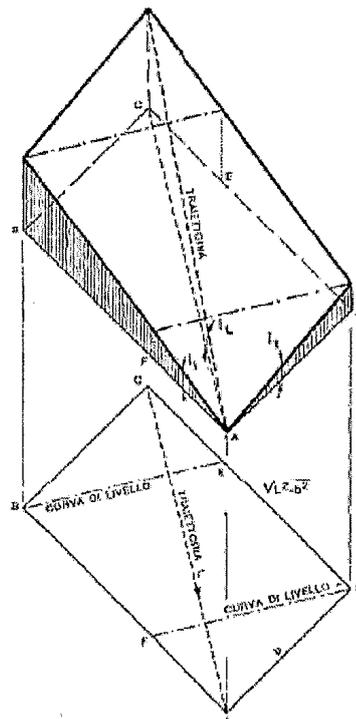
$L$  = lunghezza del percorso d'acqua (m)

$$L = b \cdot \left[ 1 + \left( \frac{i_l}{i_t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad i_L = \sqrt{i_t^2 + i_l^2}$$

$i_l$  = pendenza longitudinale (m/m)

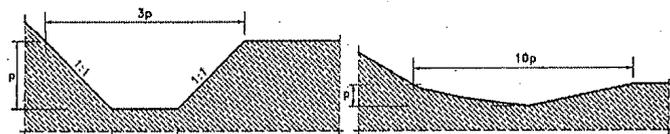
$i_t$  = pendenza trasversale (m/m)

$b$  = larghezza falda stradale (m)

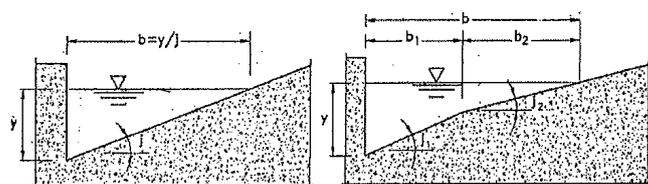
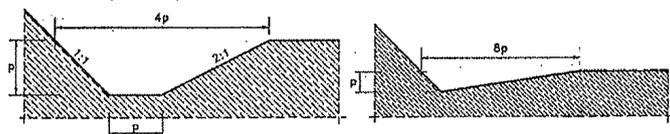


## ACQUE SUPERFICIALI

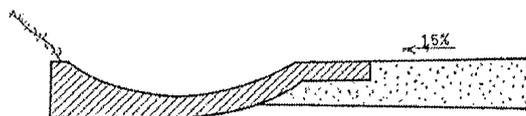
### CUNETTE



Tipologie CNR



Alla francese

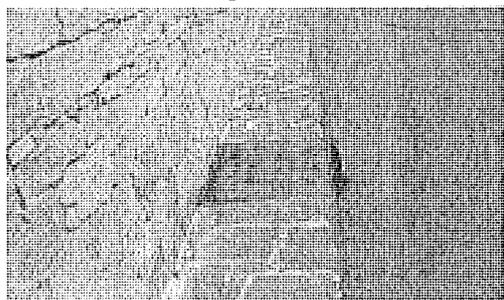


A profilo curvo

## ACQUE SUPERFICIALI

*Ci sono anche dei bacini di raccolta dell'acqua.*

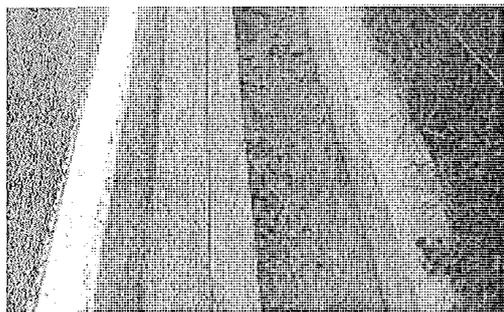
### CUNETTE - Esempi



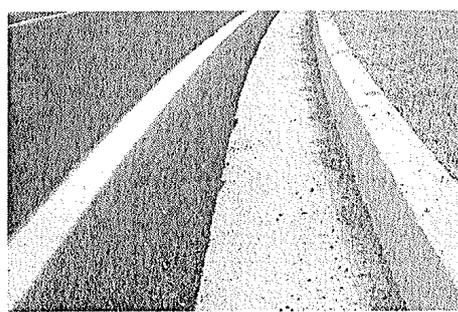
CUNETTA RIVESTITA IN PIETRA



CUNETTA RIVESTITA IN CLB



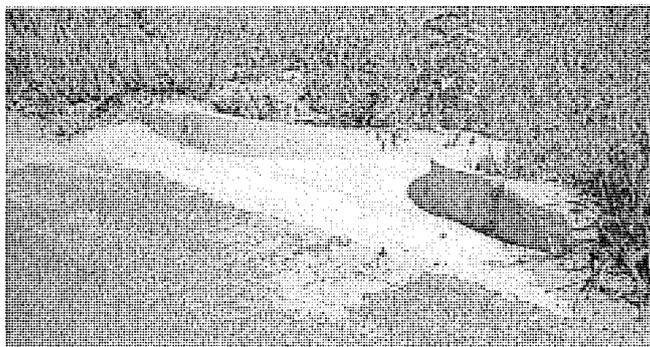
CUNETTA RETTANGOLARE IN ELEMENTI PREFABBRICATI IN CLS



CUNETTA TRIANGOLARE IN CLS GETTATO IN OPERA (CASSERI SCORREVOLI)

## ACQUE SUPERFICIALI

### ARGINELLI E SISTEMI DI SCARICO - Esempi



INVITO

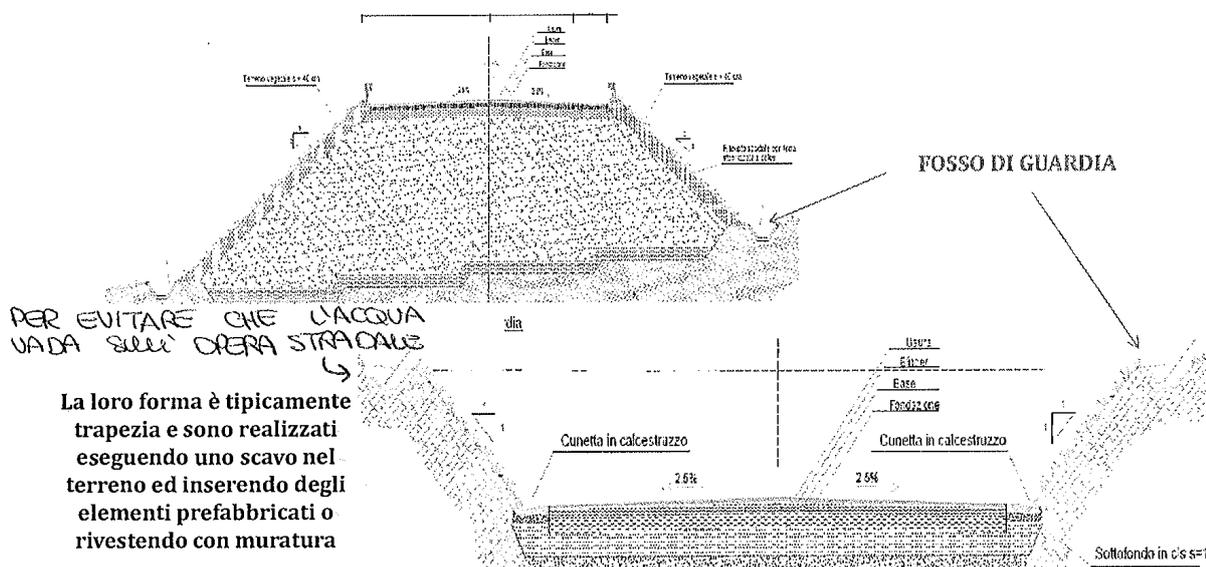


CANALETTA AD EMBRICI PREFABBRICATI

## ACQUE SUPERFICIALI

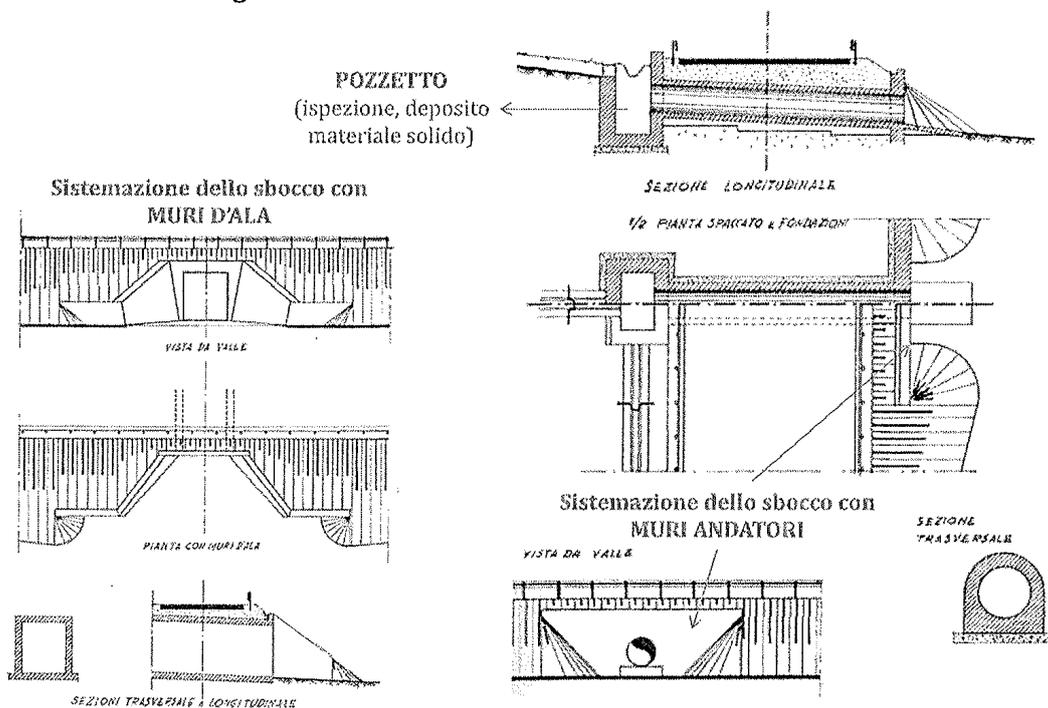
### FOSSI DI GUARDIA

I fossi di guardia sono elementi posti a monte delle scarpate in scavo o al piede delle scarpate in rilevato, allo scopo di raccogliere le acque provenienti da monte, evitando che esse invadano la strada posta in trincea o di ristagnare alla base dei rilevati.



## OPERE DI ATTRAVERSAMENTO

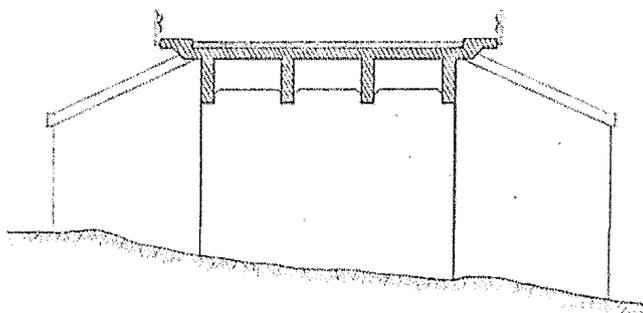
### TOMBINI - *Dettagli costruttivi*



## OPERE DI ATTRAVERSAMENTO

### PONTICELLI

Si tratta di attraversamenti realizzati con manufatti aventi luce > 4 m (per luci superiori a 10 m si parla di PONTI)



**Esempio di ponticello con  
impalcato a travate**

## DIMENSIONAMENTO IDRAULICO

### Tempo di corrivazione $T_c$

È il tempo necessario alla particella di pioggia che cade nel punto idraulicamente più lontano per raggiungere la sezione di chiusura del bacino.



La massima portata si raggiunge quando alla sezione considerata arrivano tutti insieme i contributi di tutte le parti che costituiscono il bacino.



La portata massima si ha per  $t = T_c$



Superato il tempo di corrivazione la portata si attesta sul valore massimo per poi decrescere al cessare dell'evento.

Devo individuare l'altezza di pioggia di progetto (max prevista) x definire le dimensioni del tombino che dipendono dal tempo di corrivazione e da quello di ritorno.

## DIMENSIONAMENTO IDRAULICO

### Tempo di corrivazione $T_c$

FORMULA DEL MARYLAND (cunette e fossi di guardia)

$$T_c = 26,3 \cdot \frac{\left(\frac{L}{K_s}\right)^{0,6}}{i^{0,4} \cdot i_p^{0,3}}$$

$L$  = lunghezza della cunetta o della superficie scolante (m)  
 $K_s$  = coefficiente di resistenza di Gauckler - Strickler ( $m^{1/3}/s$ )  
 (70-75 per rivestimenti in clb, 2-5 per superfici erbose)  
 $i$  = intensità di pioggia (m/h)  
 $i_p$  = pendenza media della superficie scolante

FORMULA DI KIRPICH (piccoli bacini < 10 km<sup>2</sup>)

$$T_c = 0,95 \cdot \frac{L^{1,155}}{d^{0,385}} \cong 0,066 \cdot L^{0,77} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{-0,375}$$

$L$  = lunghezza dell'asta principale (km)  
 $d$  = dislivello dell'asta principale (m)

FORMULA DI GIANDOTTI (bacini estesi)

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H-Z}}$$

$S$  = estensione del bacino (km<sup>2</sup>)  
 $L$  = lunghezza dell'asta principale (km)  
 $H$  = altitudine media del bacino (m s.l.m.)  
 $Z$  = altitudine della sezione di riferimento (m. s.l.m.)

# DIMENSIONAMENTO IDRAULICO MODELLO DI CALCOLO PER IL TEMPO DI RITORNO.

## Legge di probabilità pluviometrica



Stima della massima precipitazione associata ad un periodo di ritorno  $T_r$

## METODO DI GUMBEL

$$h_{t,T_r} = \mu_t \cdot K_{T_r} \rightarrow \text{Legge di variazione relativa al tempo } T_r$$

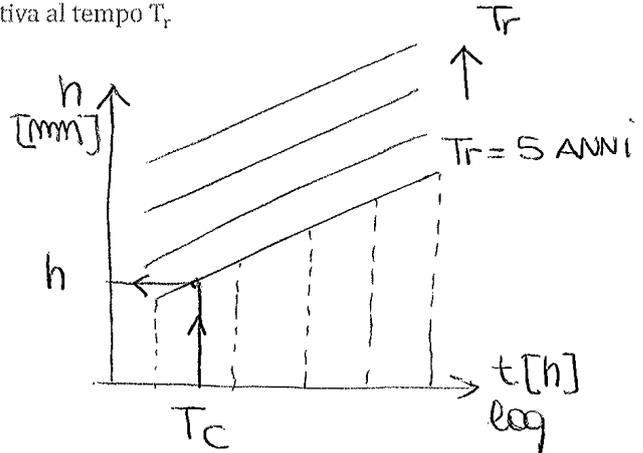


Media dell'altezza di pioggia  
funzione della durata  $t$

Massima altezza di pioggia per una durata dell'evento  $t$  e periodo di ritorno  $T_r$

$$(h_{dt} = \bar{h}_{dt} \cdot K(T))$$

$$\uparrow T_r \rightarrow \uparrow h$$



## DIMENSIONAMENTO IDRAULICO

### Calcolo di $K_{T_r}$

Si utilizza la formula

$$K_{T_r} = \frac{1 - K' \cdot \log\left(\ln\left(\frac{T_r}{T_r - 1}\right)\right)}{1 + 0,251 \cdot K'}$$

da cui

$$K' = \frac{1,795}{\left(\frac{1}{C_v}\right) - 0,45}$$

Coefficiente di variazione

$$C_{v,t} = \frac{S_t}{\bar{h}_t}$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{t,i} - \bar{h}_t)^2}{n}}$$

$$\bar{h}_t = \frac{\sum_{i=1}^n h_{t,i}}{n}$$

$$C_v = \frac{\sum_{t=1}^5 C_{v,t}}{5}$$

Valor medio dei coefficienti di variazione associata ad ogni singola durata

## DIMENSIONAMENTO IDRAULICO

---

Calcolo della portata  $Q'$  di deflusso

**FORMULA DI CHEZY (correnti a pelo libero)**

$$Q' = C \cdot A \cdot \sqrt{R_H \cdot i}$$

A = area della sezione liquida (m<sup>2</sup>)

C = coefficiente di resistenza (m<sup>1/2</sup>/s)

R<sub>H</sub> = raggio idraulico (= A/P con P perimetro bagnato) (m)

i = pendenza longitudinale

**VERIFICA  $Q' > Q$**

## DIMENSIONAMENTO IDRAULICO

---

Calcolo della portata  $Q'$  di deflusso

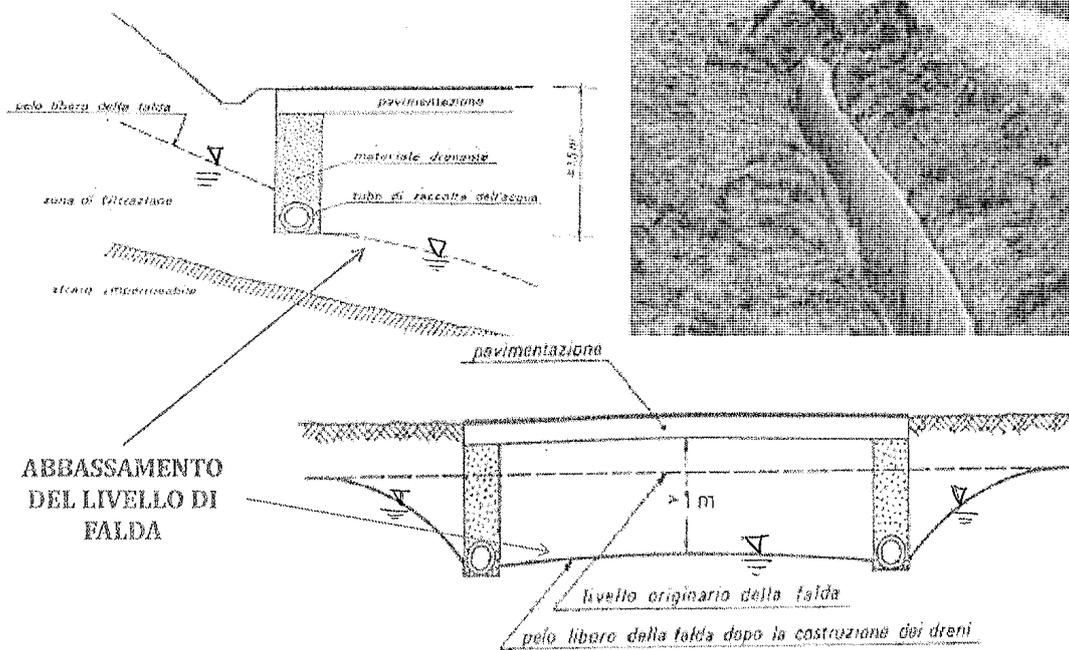
**RELAZIONE DI STRICKLER**

$$C = K_s \cdot R_h^{1/6}$$

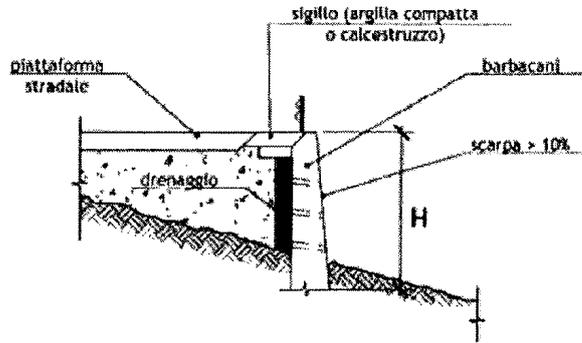
Natura delle pareti dell'opera	Coefficiente di scabrezza K <sub>s</sub>
Intonaco liscio accuratamente liscio	100
Intonaco cementizio liscio o tubi in ghisa nuovi	90
Rivestimento in muratura di mattoni eseguita con cura	80
Intonaco cementizio liscio senza particolare cura	70 + 85
Tubi in lamiera o in ghisa	68 + 70
Calcestruzzo non intonacato	60
Muratura in pietra non intonacata	50
Ghiaia e sabbia	38 + 45
Roccia con sporgenza	15 + 30

## ACQUE PROFONDE

### DRENAGGI

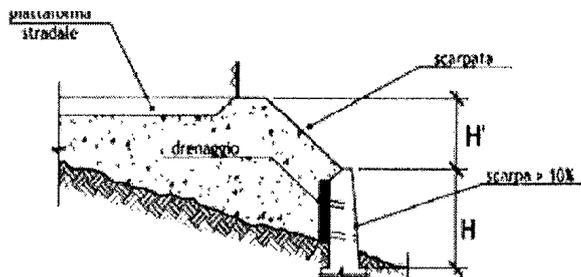


## TIPOLOGIE - Posizione



### MURI DI SOSTEGNO

Adottati nelle sezioni in rilievo in modo da costituire sostegno al terrapieno in assenza di scarpata



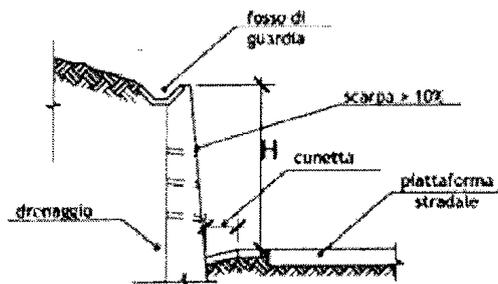
### MURI DI SOTTORIPA

→ STRADA più alta rispetto al PC

Adottati nelle sezioni in rilievo in parziale sostituzione della scarpata.

la scelta della soluz. più idonea è vincolata dalle caratteristiche del terreno o solo è dettata da criteri tecnico-economici.

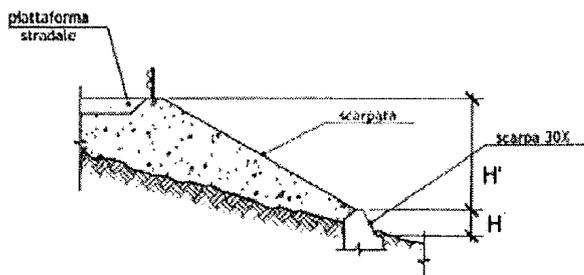
## TIPOLOGIE - Posizione



### MURI DI CONTRORIPA

→ STRADA più in basso rispetto al PC.

Adottati nelle sezioni in scavo in modo da costituire sostegno al terreno a monte della piattaforma stradale



### MURI D'UNGHIA

Hanno il solo compito di realizzare un miglior ammorsamento tra scarpata e terreno; di fatto non contribuisce alla diminuzione dell'ingombro del corpo del rilevato

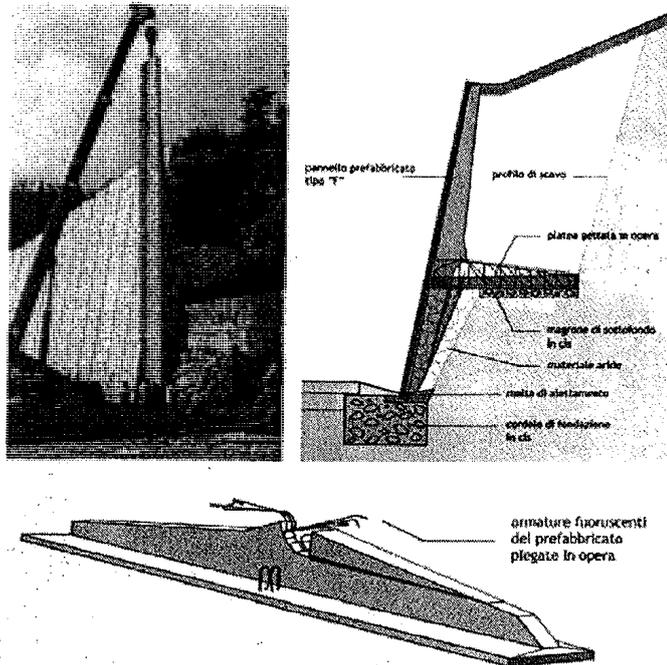
Non hanno compito di sostegno ma aumentano la STABILITA'.

## TIPOLOGIE - Materiali e funzionamento statico

### MURI PREFABBRICATI

La costruzione dei muri prefabbricati in cls armato può essere totale o parziale, a seconda che tutti gli elementi del muro vengano prodotti in stabilimento (lasciando alle operazioni in cantiere solo le attività di sigillatura e finitura) o se una parte di essi sia realizzata in opera.

In entrambi i casi hanno struttura modulare, con altezza variabile e larghezza non superiore a 2,4 m (larghezza massima per il trasporto su strada).



## TIPOLOGIE - Materiali e funzionamento statico

### MURI CELLULARI A GABBIA

Sono realizzati con elementi in cls costruiti in stabilimento e montati successivamente in opera.

Hanno la caratteristica di avere forma tale da permettere la crescita al loro interno di vegetazione e per tale motivo vengono utilizzati per realizzare pareti rinaturalizzate.

La loro struttura è realizzata mediante una intelaiatura di elementi prefabbricati in CLS, raggiunta sovrapponendo gli elementi modulari e riempiendoli al proprio interno di materiale naturale.



#### Vantaggi:

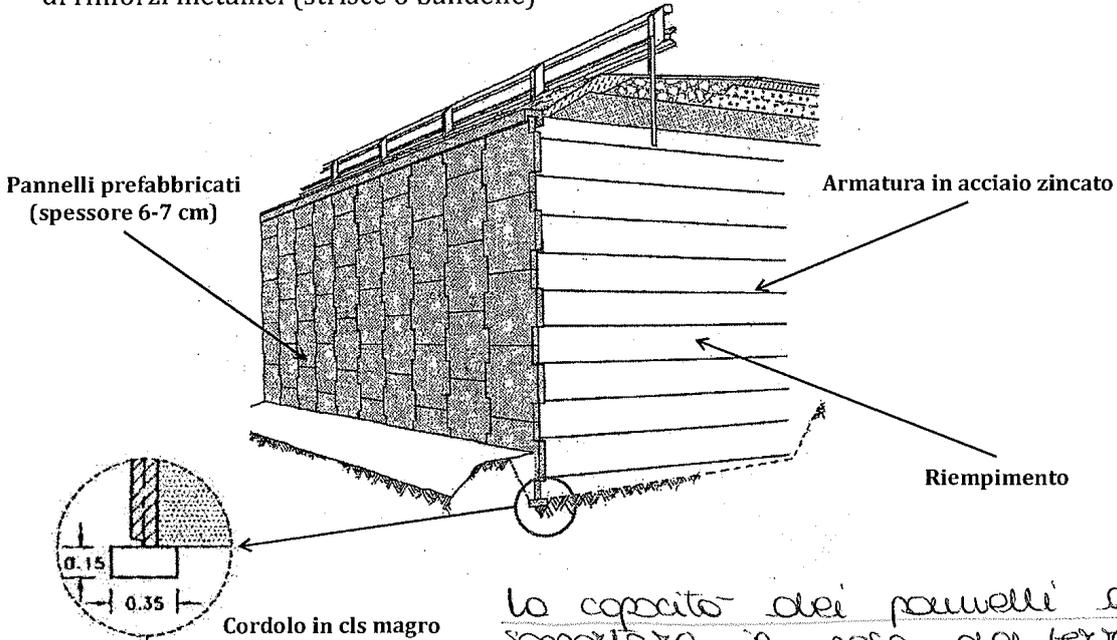
- versatilità
- facilità di impiego
- economicità,
- sicurezza statica

#### Svantaggi:

- necessitano di importanti movimenti di terra per la realizzazione dell'area di posa.

## TERRE ARMATE TERRE ARMATE

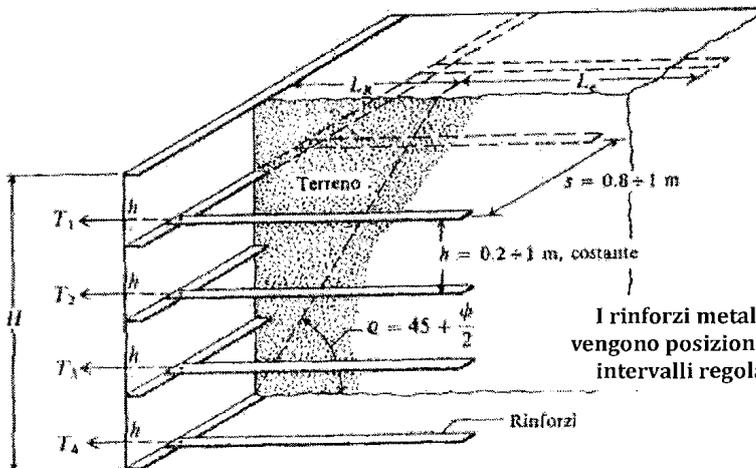
La tecnica delle terre armate prevede la realizzazione di strutture per il contenimento di rilevati o scarpate, spalle di ponti, argini, attraverso l'utilizzo di rinforzi metallici (strisce o bandelle)



*Le bandelle lavorano a trazione e resistono per attrito quindi devo verificare che l'attrito sia suff. a sopportare il peso del terreno.*

## TERRE ARMATE

La tecnica delle terre armate prevede la realizzazione di strutture per il contenimento di rilevati o scarpate, spalle di ponti, argini, attraverso l'utilizzo di rinforzi metallici (strisce o bandelle)



*Le bandelle devono avere una spaziatura regolare in direz. verticale che scizz.*

I rinforzi metallici vengono posizionati ad intervalli regolari.

Il rinforzo della terra avviene attraverso l'attrito (sforzi di taglio) che si genera tra le armature di acciaio ed il terreno.

# TERRE ARMATE

## Progetto di un muro in terra armata

### VERIFICHE ESTERNE

- verifica allo scivolamento;
- verifica al ribaltamento;
- verifica di capacità portante;
- verifica di stabilità globale.

Analoghe a quelle effettuate per i muri tradizionali

### VERIFICHE INTERNE

- verifica a rottura del rinforzo;
- verifica allo sfilamento del rinforzo.

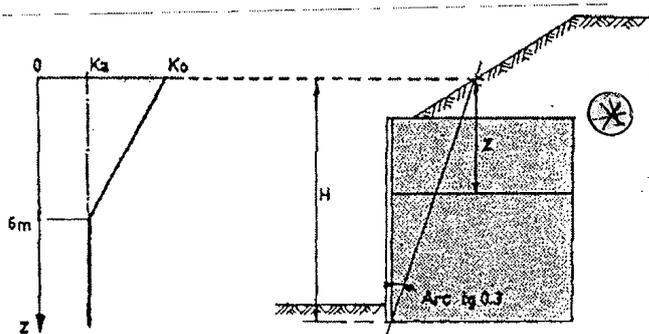
Dobbiamo definire:  
 - COEFF. DI SPINTA  
 - " DI ATTRITO

$$(*) (K_0 - K_A) : z_0 = (K_0 - K_0 - z_0) : z$$

$$\frac{K_0 - K_A}{z_0} = \frac{K_0 - K_0 - z_0}{z}$$

↳ da qui ricavo  $K_0 - z_0$

## TERRE ARMATE - Ipotesi di base



### COEFFICIENTE DI SPINTA

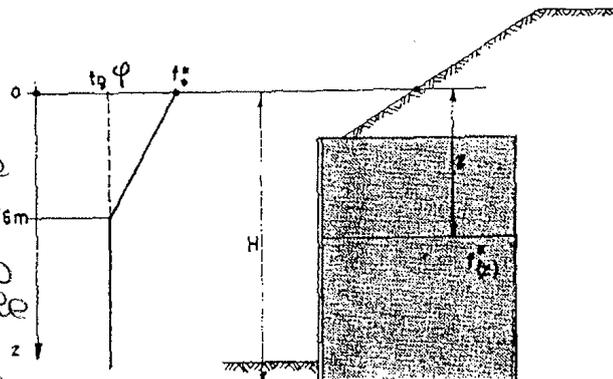
$$(*) K_{0-z_0} = K_0 - \frac{K_0 - K_A}{z_0} z$$

$$K_A = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

si ipotizzo che nei primi 6 m ci sia una variazione lineare del coeff. di spinta.  
 $z_0 = 6 \text{ m}$

### COEFFICIENTE DI ATTRITO

$f_{0-z_0} = f_0 - \frac{f_0 - f_a}{z_0} z$  si ipotizzo di partire da  $f_0$  ed avvicinare fino ad  $f_a$  variabile fino a 6 m,  $z$  dipende vale  $f_a = \tan \varphi$ .



## TERRE ARMATE

### Verifica a rottura del rinforzo (strappo)

$T_{max} < \frac{\sigma_{amm} \cdot A_s}{\gamma_F}$

*stress max*      *tensione ammissibile*      *area della bandella (sezione)*

$\gamma_F \rightarrow \begin{cases} 1,5 \text{ per strutture ordinarie} \\ 1,65 \text{ per strutture sensibili} \end{cases}$  } sono fattori di sicurezza

$A_s = (b - b_s) \cdot (s - s_s)$

*Larghezza e spessore della bandella al netto della perdita per corrosione*

*la corrosione ridurrà nel tempo la sezione delle bandelle e nel tempo conto nella progettazione.  $b_s$  ed  $s_s$  sono espressi di solito in termini %.*

## TERRE ARMATE

### Verifica allo sfilamento

$T = K(z) \cdot \gamma \cdot z \cdot \Delta H \cdot \Delta V$

*Forza di trazione alla profondità z*

$F_r = 2 \cdot L_e \cdot (b - b_s) \cdot \gamma \cdot z \cdot f$

*Forza resistente alla profondità z*

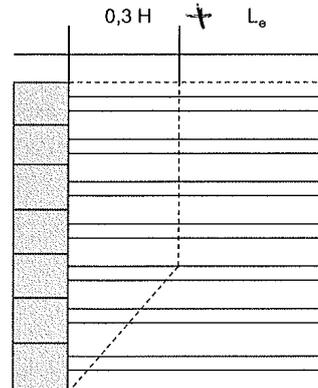
*forza resistente esercitata per attrito*

$L_e = \frac{T \cdot \gamma_F}{2 \cdot (b - b_s) \cdot \gamma \cdot z \cdot f}$

**Lunghezza efficace** - va calcolata per ogni bandella e sommata alla lunghezza ricadente nella zona attiva

*Ricavata uguagliando le due forze, quella di trazione e quella resistente.*

*La lunghezza efficace sarà pari alla somma della lunghezza efficace e di  $0,3H$ .*

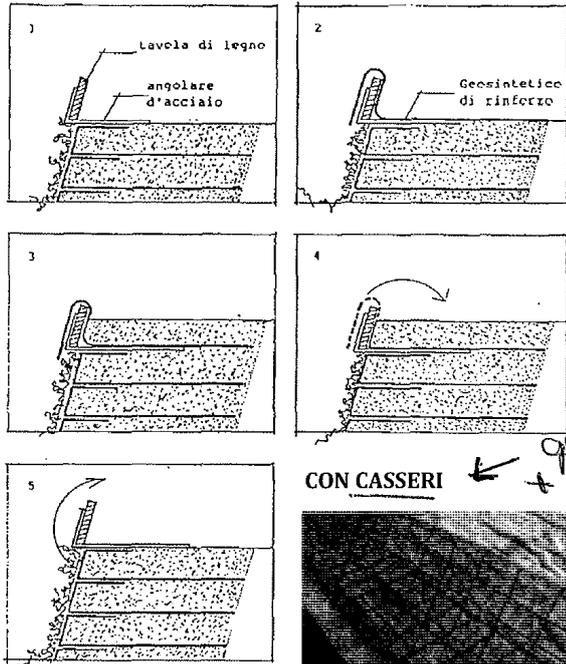
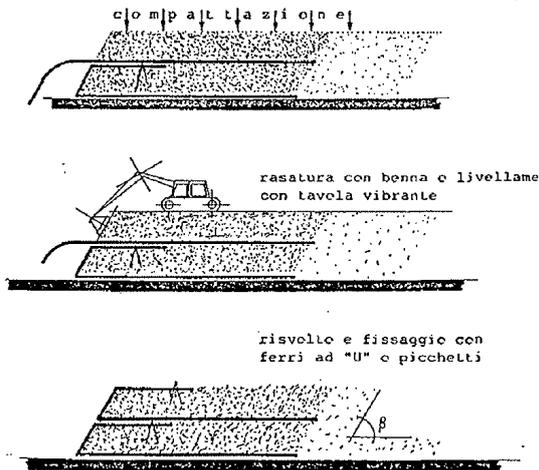


si realizzano per stadi dei  
investimenti.

## TERRE RINFORZATE

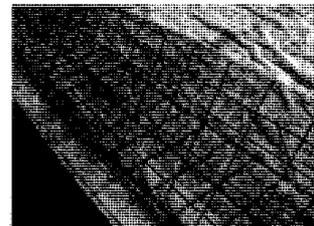
### TECNICHE DI REALIZZAZIONE (Esempi)

#### SENZA CASSERI

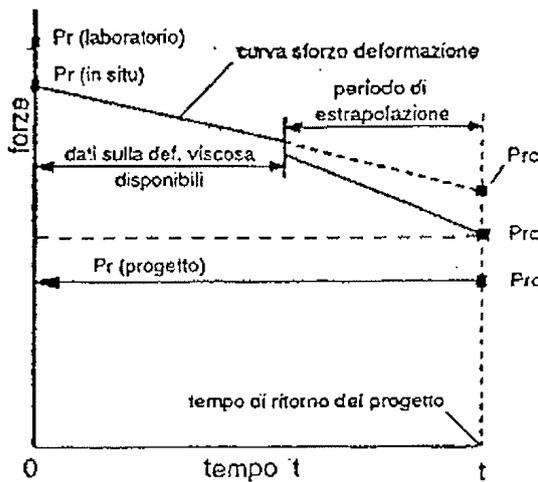


#### CON CASSERI

particolarmente  
+ stabilità.



## TERRE RINFORZATE



Nella progettazione del rinforzo occorre definire il corretto valore di resistenza individuando degli opportuni coefficienti riduttivi per assicurare un corretto comportamento del materiale in opera (il valore di rottura nominale  $P_r$  deve essere opportunamente ridotto)

si devono determinare con i coefficienti di sicurezza alcuni parametri.

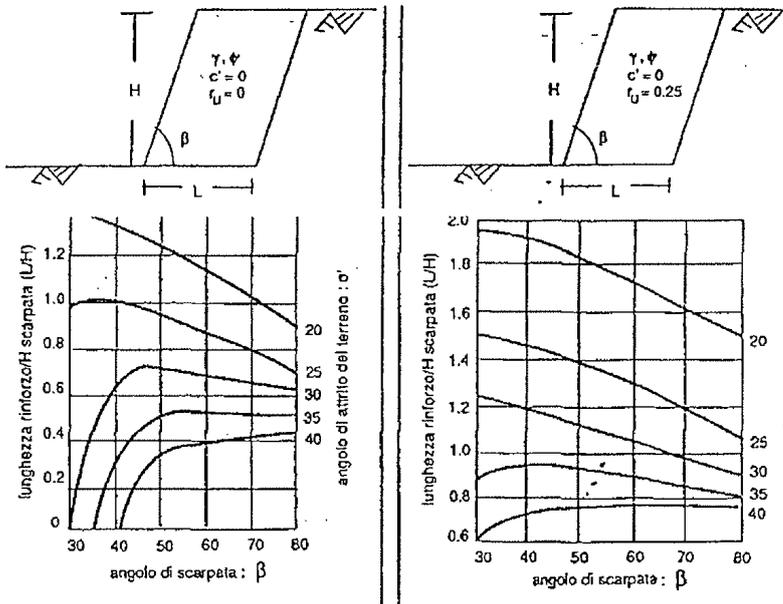
Occorre considerare diversi coefficienti di sicurezza in relazione a:

- danneggiamenti subiti in fase di installazione (1,1 - 1,6)
- variazione delle caratteristiche a lungo termine (creep) (1,3 - 3)
- degradazione chimica e biologica (1,1 - 1,3)
- importanza dell'opera (1,15 - 1,2)

A seguito del creep, nel tempo:  
- si riduce la resistenza.  
- ho deformazione viscosa

## TERRE RINFORZATE

### Progetto di un muro in terra rinforzata



### ABACHI DI JEWELL

Calcolo del rapporto

$\frac{L}{H}$

*L: lunghezza del rinforzo*  
*H: altezza scarpata*

noti

- angolo di scarpata  $\beta$
- angolo di attrito  $\phi$
- pressione interst.  $u$

Nel caso di presenza di sovraccarico

$H' = H + q/\gamma$

## TERRE RINFORZATE

### Progetto di un muro in terra rinforzata



### PROCEDIMENTO OPERATIVO

#### 1 - Lunghezza del rinforzo (L)

Da abaco si calcola il rapporto  $L/H$  ( $H'$ ) da cui  $L$ , nota la geometria del rinforzo (inclinazione  $\beta$ , altezza  $H$  o  $H'$ ), le caratteristiche del terreno (angolo di attrito  $\phi$ ) e pressione interstiziale  $u$

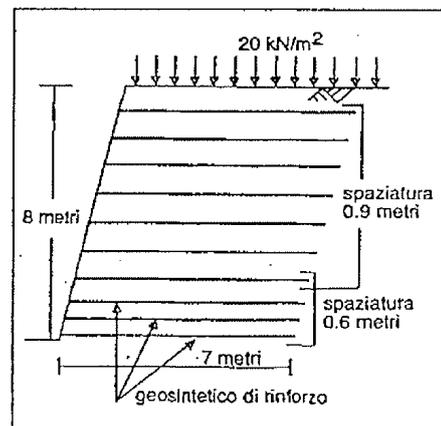
#### 2 - Spaziatura minima (S)

Da abaco si determina il coefficiente di spinta della terra  $k$ ; nota la resistenza di progetto  $P_r$  del geosintetico si ha

$$S = \frac{P_r}{k \cdot (\gamma \cdot z) + q}$$

*può variare in funz. della profondità, e lo si può suddividere all'interno dell'opera.*

Si può differenziare la spaziatura al variare della profondità



I geotessili tessuti hanno un miglior comportamento meccanico.

## GEOTESSILI

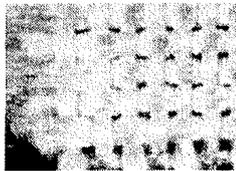
La funz. dei geotessili è quella di separazione. ↓

I geotessili (*Geotextiles*, GTX) sono prodotti piani costituiti da fibre o filamenti continui tessuti (*Woven*, W); non tessuti (*Non-Woven*, NW), o uniti mediante metodi meccanici (agugliatura) o termici (termosaldatare).

Il loro aspetto è simile a quello di un tessuto naturale e sono quindi caratterizzati da una grande flessibilità.



NON TESSUTO



TESSUTO

I non tessuti manifestano un comportamento isotropo, mentre i tessuti esplicano le resistenze maggior lungo due direzioni preferenziali (trama ed ordito)

I non tessuti sono caratterizzati da un maggior assortimento dei filamenti

I tessuti presentano una rigidezza maggiore dei non tessuti

## GEOTESSILI

### FUNZIONI

Separazione - evitare la contaminazione di materiali aventi diversa granulometria posti a contatto (es. fondazione e sottofondo stradale) o impedire la risalita per capillarità della frazione fine all'interno del corpo del rilevato.

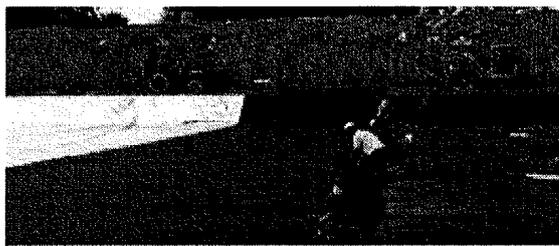
Filtrazione - permettere il passaggio dell'acqua trattenendo le particelle di terreno. Ad esempio, i geotessili sono utilizzati per proteggere gli strati drenanti nelle pavimentazioni stradali e le trincee drenanti, oltre che nella costruzione di geocompositi drenanti e dreni verticali.

Rinforzo - contribuire ad incrementare le caratteristiche di resistenza e deformabilità dei terreni (**terre rinforzate**)

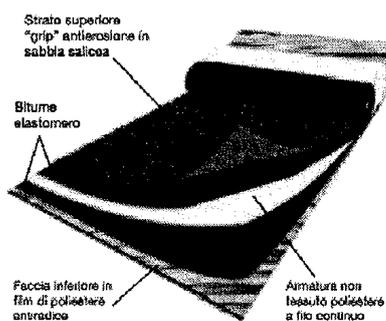
## GEOMEMBRANE

---

Le geomembrane sintetiche (*Synthetic Geomembranes, GMS*) sono fogli continui e impermeabili realizzati con uno o più materiali polimerici (plastomerici o elastomerici). Le geomembrane bituminose (*Bituminous Geomembranes, GMB*) sono invece costituite da un supporto (normalmente un geotessile) impregnato o rivestito da bitume modificato, ed un rivestimento con fogli antiaderenti.



Es. Geomembrana bituminosa



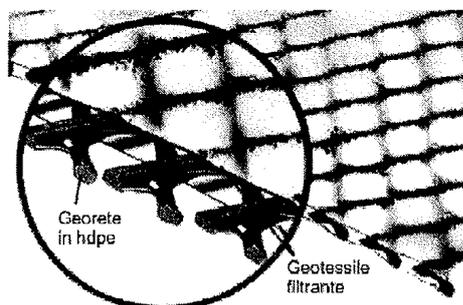
La funzione delle geomembrane è principalmente quella di **separazione ed impermeabilizzazione**.

## GEOCOMPOSITI

---

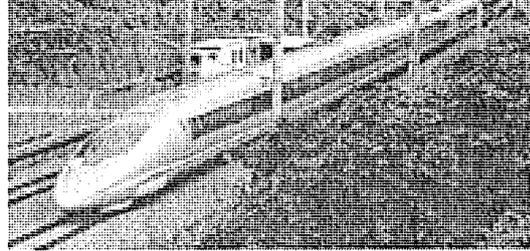
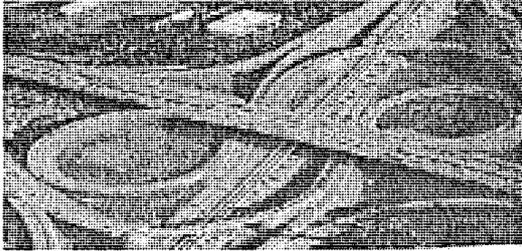
I geocompositi (*Geocomposites, GCO*) sono prodotti costituiti dalla combinazione di due o più tipi di geosintetici: geotessile-georete, geotessile-geogriglia, ecc.

I geocompositi drenanti sono costituiti da un nucleo ad elevata permeabilità in materiale plastico, incluso in un geotessile avente funzione di filtro.





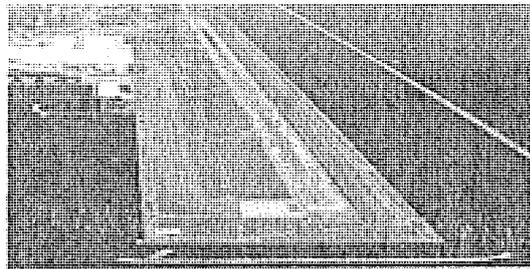
**POLITECNICO DI TORINO**  
**Corso di Laurea Magistrale**  
**in Ingegneria Civile**  
a.a. 2013-14



**Costruzione' di Strade, Ferrovie ed Aeroporti (03ALVMX)**

**SOVRASTRUTTURE  
STRADALI E AEROPORTUALI**

Tipologie e prestazioni



**GENERALITA'**

Per sovrastruttura o pavimentazione si intende la parte superiore del corpo stradale, normalmente realizzata in più strati, direttamente interessata dal moto dei veicoli.

**REQUISITI**

**STRUTTURALI**

- capacità di trasmissione dei carichi veicolari al sottofondo;
- resistenza ai fenomeni di degrado strutturale;

**FUNZIONALI**

- regolarità e aderenza della superficiale viabile (comfort e sicurezza di guida)

*1 requisiti devono essere garantiti nel tempo*

\* I giunti ~~tra~~ longitudinali sono quelli più lunghi. Le forme di compartecipazione trasversale e sollecitazioni.

I giunti sfioranti sono + convenienti dell'unico giunzione perché consentono le piccole deformazioni.

Spesso oltre ai giunti ci sono le armature che rinforzano le lastre.

La maglia interna collega le lastre e dà la direzione alle fessurazioni.

Le pavimentazioni semi-rigide sono una via di mezzo tra le due soluzioni.

Nelle pavimentazioni rigide spreco c'è in lastre in grado di diffondere il carico su un sp. molto ampio.

Nelle pavimentazioni flessibili ci sono i leganti bituminosi che consentono la flessione dello strato sotto carico.

## TIPOLOGIE - Ambiti di applicazione (indicativi)

### PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI

- Viabilità ordinaria urbana ed extraurbana
- Piste di volo e vie di rullaggio aeroportuali

### PAVIMENTAZIONI SEMI-RIGIDE

- Rete autostradale
- Strade a forte traffico pesante

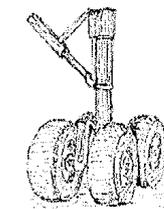
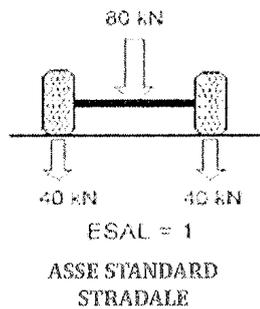
### PAVIMENTAZIONI RIGIDE

- Presenza di sottofondo di scarse caratteristiche e/o condizioni climatiche molto severe
- Piazzali di stazionamento aeroportuali

## TIPOLOGIE - Stradali vs Aeroportuali

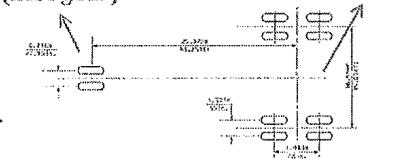
*Le pavimentazioni rigide e semirigide si differenziano per i tipi di carichi*

### ENTITA' E DISTRIBUZIONE DEI CARICHI

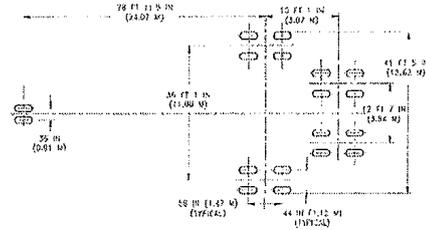


GAMBE DI FORZA AEROMOBILE

Ruote direzionali (nose gear) → *portano il 5% peso.*  
Carrello principale



TRICICLO (es. A 330)



PENTACICLO (es. B 747)

Diverse metodologie di calcolo e criteri di progetto

No sostanziali differenze in termini costruttivi

*Al variare delle configurazioni delle gambe di forza devono cambiare i tipi di infrastrutture.*

## PRESTAZIONI – Indici di stato

❑ **Prestazioni strutturali** – legate alla durabilità dell'opera ed espresse in termini di capacità portante della sovrastruttura e di resistenza nei riguardi dei fenomeni di degrado strutturale

- Moduli elastici degli strati (FWD)
- Indici di deflessione  $d_i - d_j$  (FWD)
- Danno  $D = 1 - E(t)/E_0$

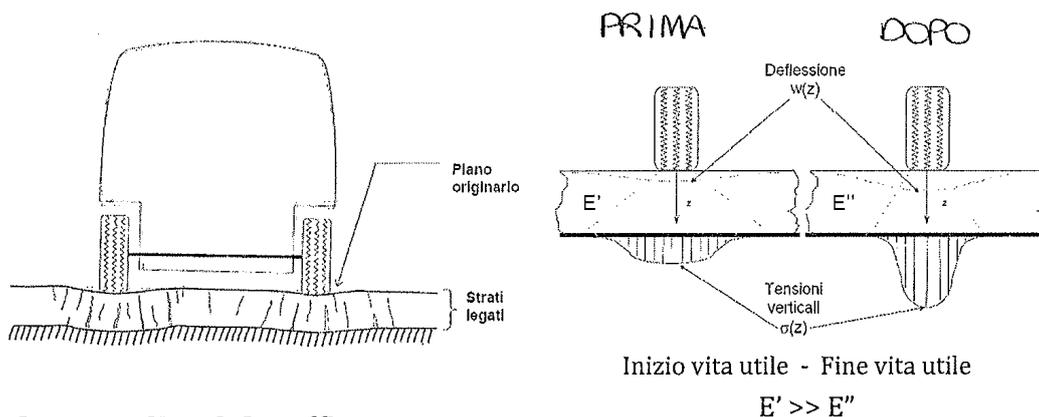
❑ **Prestazioni funzionali** – legate alla sicurezza e confort di guida ed espresse in termini di aderenza e regolarità

- International Roughness Index (IRI) – Regolarità
- Coefficiente di aderenza trasversale (CAT) – Aderenza
- British Pendulum Number (BPN), Friction Number (FN) – Aderenza
- Altezza di sabbia (HS) – Macrorugosità superficiale

❑ **Prestazioni globali**

- Present Serviceability Index (PSI)
- Pavement Condition Index (PCI)

## FENOMENI DI DEGRADO – Pavimentazioni flessibili



### Al progredire del traffico

- Decadimento delle caratteristiche strutturali
- Decadimento del livello di comfort
- Decadimento delle condizioni di sicurezza

*Nel tempo il materiale si fessura → ↓ rigidità  
↓ att. l'area di distribuzione di carico.*

## DEGRADO STRUTTURALE - Pavimentazioni flessibili

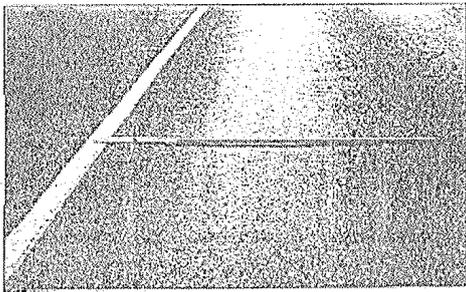
### 2. Accumulo di deformazioni permanenti (ormaiamento)



• Formazione di ormaie in corrispondenza delle tracce percorse dai veicoli

→ • Riguarda tutti gli strati

→ • Causata dalle sollecitazioni ripetute prodotte dal traffico in combinazione col clima (alte temperature)



FORMA DELL'ORMAIA

Sezione ridotta - strati superficiali (strati bituminosi)

Sezione estesa - sottofondo

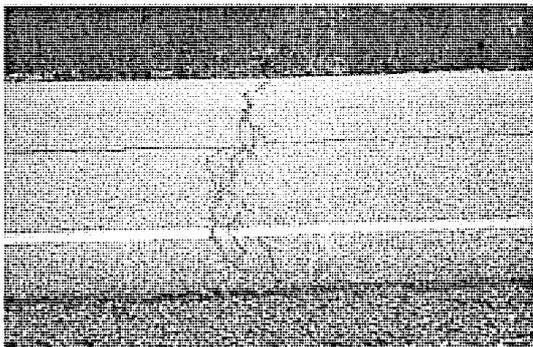
All'accumulo di deformaz. verticali momentaneamente contribuiscono tutti gli strati. Se il contributo prevalente

è quello degli strati superficiali legati a bitume, si crea delle ormaie dette ruoli di bitume.

NB ↑ T → ↑ possibilità che si verifichino ormaie.

## DEGRADO STRUTTURALE - Pavimentazioni flessibili

### 3. Fessurazione di origine termica



\* Fessure trasversali nette ed equidistanziate

→ \* Riguarda gli strati legati (a bitume)

→ \* Causata dallo stato di coazione conseguente a repentini abbassamenti di temperatura (no carichi di traffico)

Analogia a quella che si verificherebbe nelle pavimentaz. rigide se non ci fossero i giunti.

Se ↓ T non si verifica l'arretramento proprio per la CONTINUITÀ DEL MATERIALE che per il PESO PROPRIO, si generano delle fratture trasversali (giunto naturale) che riguardano solo lo strato bituminoso.

## DEGRADO STRUTTURALE - Pavimentazioni rigide

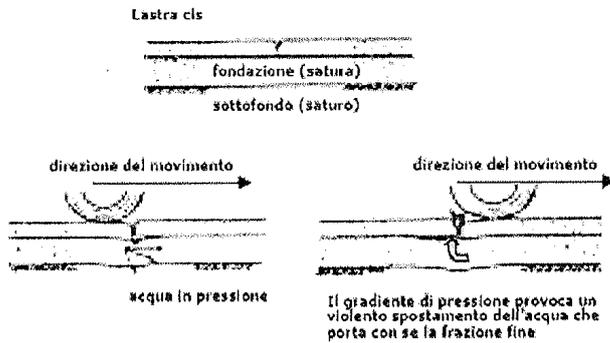
### 2. Pumping e rottura del giunto

#### CAUSE

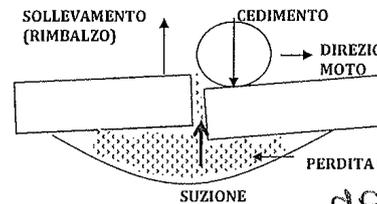
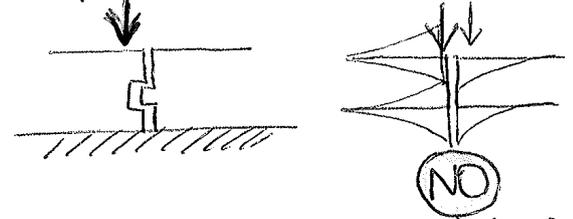
- Inefficiente collaborazione strutturale delle lastre
- Non corretta sigillatura del giunto
- Fondazione e/o sottofondo imbibito d'acqua

#### EFFETTI

- Rottura della lastra e scalettamento del giunto
- Deposito di materiale fino in superficie



Si crea quindi una collaborazione strutturale tra 2 lastre contigue. Quando carico il lastra di una lastra ci deve essere comportatrice e l'inflessione di una non deve essere indipendente da quello dell'altra.



non si deve generare l'oscillazione della lastra o seguito del passaggio del carico. Se x caso ci fosse anche H<sub>2</sub>O pot. causerebbe anche l'apporto di materiale fine.

## CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

Le caratteristiche della superficie stradale condizionano le prestazioni funzionali della pavimentazione:

- Aderenza (sicurezza)
- Regolarità (sicurezza e comfort)
- Rumorosità (comfort)

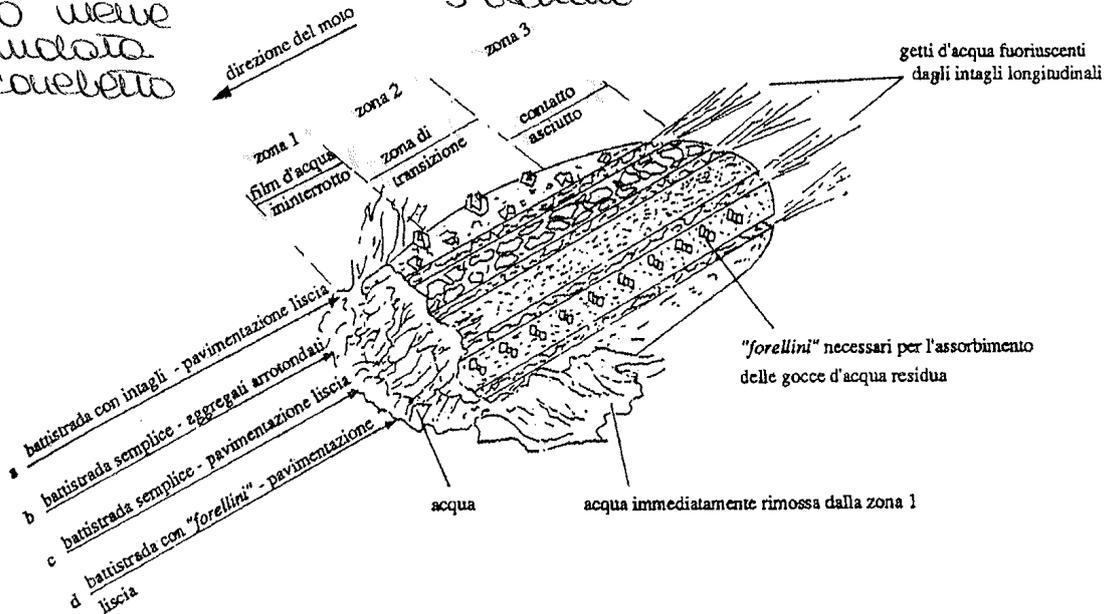
## CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

Quid lo pneumatico ruota,

Aderenza su suolo bagnato

Si realizzano 3 zone:  
 4 film d'acqua ininterrotto  
 2 transizione  
 3 asciutto

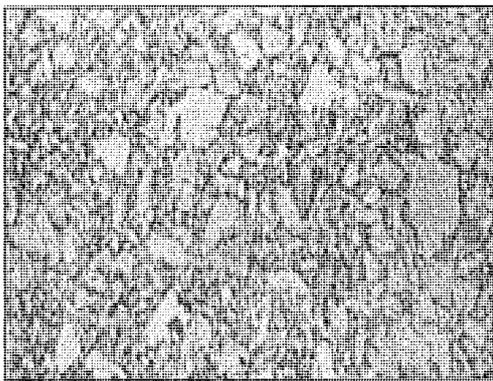
② l'acqua viene accumulata nel cono d'acqua



Il tipo di distribuzione di acqua cambia in base al tipo di aggregato e al tipo di battistrada.

## DEGRADO FUNZIONALE - Pavim. flessibili e rigide

Perdita di tessitura superficiale (micro e macrorugosità)



• Levigazione della superficie stradale causata dall'azione abrasiva prodotta dal traffico

• Azione concorrente prodotta dall'acqua (dilavamento, gelo)

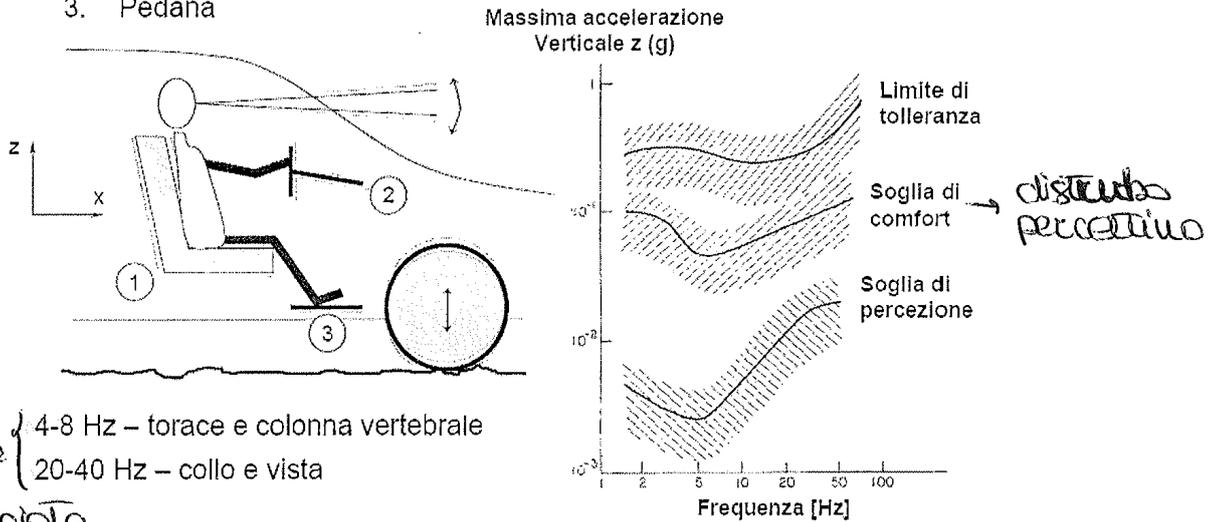
• Drastica riduzione dei livelli di aderenza

La tessitura si perde nel corso del tempo, o causa dell'azione abrasiva, o sono aggregati che al contatto si levigano, altri che invece, molto duri e abrasivi continuano a mostrare una certa rugosità. Se la pavimentazione perde la tessitura → ↓ aderenza. Per ristabilire la stessa, posso stendere un nuovo strato o attaccare meccanicamente la sp. stradale, creando una nuova tessitura.

## CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

### Effetti sull'uomo

1. Sedile di guida
2. Volante
3. Pedana



coupi di frequenza } 4-8 Hz - torace e colonna vertebrale  
a cui } 20-40 Hz - collo e vista  
sono associate  
le varie parti  
del corpo.

L'uomo si affatica → se lo vibraz. dura x molto tempo  
superiamo il limite di tolleranza. Il tempo quindi  
influisce sulla percezione.

## ORIGINE LITOLOGICA

---

Gli aggregati lapidei hanno origine dalle rocce e possono trovarsi in depositi naturali (soprattutto sabbie e ghiaie) o essere prodotti mediante estrazione (e successiva trasformazione) da cava

☐ **Rocce ignee** → si originano da raffreddamento di massa fusa incandescente

- intrusive (a raffreddamento lento - graniti, dioriti, gabbri, ...)
- vulcaniche (a raffreddamento rapido - porfidi, basalti, tufi e pomici, ...)

☐ **Rocce sedimentarie** → derivano da processi esogeni, hanno struttura stratificata per effetto del processo di sedimentazione nel tempo

- clastiche (deposito di rocce disgregate - brecce, arenarie, argille ...)
- chimiche (precipitazione di cristalli - gessi, travertini, ...)
- organogene (accumulo di spoglie di organismi - calcari, ...)

☐ **Rocce metamorfiche** → derivano dalle ignee e sedimentarie e si formano per effetto di azioni di calore, pressione, attività chimica associata che alterano la struttura originaria

- marmi, gneiss, micascisti, ...

## ORIGINE LITOLOGICA

---

Dal punto di vista mineralogico, i depositi rocciosi (e dunque gli aggregati) sono composti dalla combinazione di molteplici elementi.

Tra i minerali più comuni si hanno

- silicei (quarzo)
- feldspati (ortoclasti, plagioclasti)
- ferromagnetici (moscovite, vermiculite)
- carbonati (calcite, dolomite)
- minerali d'argilla (illite, caolinite, montmorillonite).

le bitume riveste gli aggregati e crea un legame solido  
con essi, ci sono aggregati più affini ai bitumi.

## PROPRIETA' GEOMETRICHE - Dimensioni

Si distingue tra

### ➤ Aggregato grosso

- trattenuto al crivello 5 mm secondo classificazione tradizionale (es. Capitolato CIRS)
- trattenuto al setaccio 2 mm secondo la UNI EN 13043-2004 ← Nuova nomenclatura.

### ➤ Aggregato fino (O FINE)

- dimensioni comprese tra 5 e 0,075 mm (es. Capitolato CIRS)
- dimensioni comprese tra 2 e 0,063 mm (UNI EN 13043-2004)

### ➤ Filler

- passante al setaccio 0,075 mm (Capitolato CIRS) o 0,063 mm (UNI EN 13043-2004)

## PROPRIETA' GEOMETRICHE - Dimensioni

### Classi dimensionali

Gli aggregati devono essere descritti in termini di dimensione dei granuli tramite la designazione  $d/D$ , ove  $d$  è la dimensione del vaglio inferiore e  $D$  è la dimensione del vaglio superiore

← intervallo delle dimensioni medie che compaiono quell'aggregato.

i pedici indicano il min e il max  
↓ passante per il vaglio superiore ed inferiore.

### UNI EN 13043-2004

Aggregato	Dimensione mm	Percentuale passante in massa					Categoria G
		2 D	1,4 D <sup>a)</sup>	D <sup>b)</sup>	d	d/2 <sup>c)</sup>	
Grosso	D > 2	100	100	da 90 a 99	da 0 a 10	da 0 a 2	G <sub>c</sub> 90/10
		100	da 98 a 100	da 90 a 99	da 0 a 15	da 0 a 5	G <sub>c</sub> 90/15
		100	da 98 a 100	da 90 a 99	da 0 a 20	da 0 a 5	G <sub>c</sub> 90/20
		100	da 98 a 100	da 85 a 99 <sup>c)</sup>	da 0 a 15	da 0 a 2	G <sub>c</sub> 85/15
		100	da 98 a 100	da 85 a 99 <sup>c)</sup>	da 0 a 20	da 0 a 5	G <sub>c</sub> 85/20
		100	da 98 a 100	da 85 a 99 <sup>c)</sup>	da 0 a 35	da 0 a 5	G <sub>c</sub> 85/35
Fine	D ≤ 2	100	-	da 85 a 99	-	-	G <sub>p</sub> 85
In frazione unica	D ≤ 45 e d = 0	100	da 98 a 100	da 90 a 99	-	-	G <sub>p</sub> 90
		100	da 98 a 100	da 85 a 99	-	-	G <sub>p</sub> 85

- a) Qualora gli stacci calcolati come 1,4 D e d/2 non siano esattamente corrispondenti ai numeri indicati nella serie ISO 565:1990, R20, deve essere adottata la dimensione dello staccio successiva più vicina.  
 b) Se la percentuale trattenuta su D è < 1% in massa, il produttore deve documentare e dichiarare la granulometria tipica includendo gli stacci D, d, d/2 e gli stacci del gruppo di base più il gruppo 1 o del gruppo di base più gli stacci del gruppo 2 compresi tra d e D.  
 c) Per gli aggregati grossi di dimensione singola d/D, dove D/d < 2, delle categorie G<sub>c</sub>85/15, G<sub>c</sub>85/20 e G<sub>c</sub>85/35, il valore della percentuale passante in massa su D può essere diminuito del 5% in base alla particolare applicazione o impiego finale.

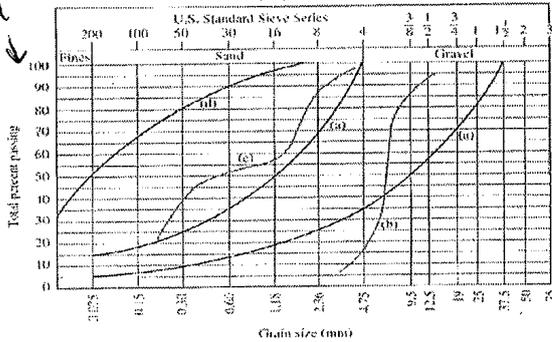
↑ intervallo dei passanti → nel tempo può variare la curva granulometrica.

## PROPRIETA' GEOMETRICHE - Granulometria

Rappresentazione grafica

### CURVE GRANULOMETRICHE

% tot di passante ↓



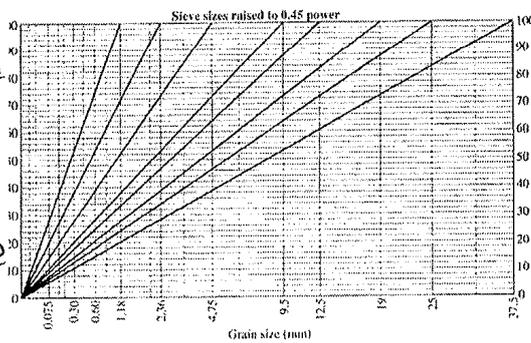
- a: curva di massima densità;
- b: distribuzione monogranulare;
- c: distribuzione gap-graded;
- d: curva aperta

FATTORE DI FORMA DELLA CURVA

$$F = \frac{D_{P1}}{D_{P2}} \left( \text{es. } \frac{D_{70}}{D_{30}} \right)$$

← dimensione [mm]

Nota i  $d_{max}$  della miscela so' quide e se passante percentuale



Rappresentazione FHWA

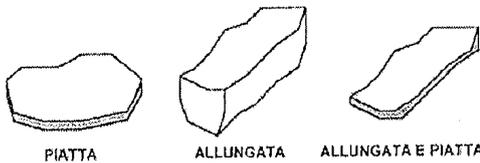
Introduzione dei fattori di forma per rapp. in modo compatto le curve.

↑ % passante

↑ dimensione particelle [mm] con solo pot a 0,45

## PROPRIETA' GEOMETRICHE - Forma

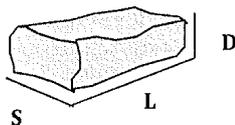
La forma interessa essenzialmente gli **aggregati grossi** e influenza in maniera determinante la struttura litica della miscela finale. In linea generale si richiede che i granuli abbiano una forma cubica o sferoidale evitando invece la presenza di elementi piatti e/o allungati.



PIATTA

ALLUNGATA

ALLUNGATA E PIATTA



S

L

D

L'elemento è detto non cubico quando  
 $L/\min(S,D) > 3$

la forma influenza lo scheletro litico. Più gli elementi sono regolari, migliore sarà la distribuzione delle tensioni (sarà uniforme).

*JS*



il volume effettivo occupato dall'aggregato è quello che comprende anche i vuoti perché questi non possono essere occupati da altro materiale. Solo l'acqua può occupare le vuoti.

**PROPRIETA' FISICO-MECCANICHE - Massa volumica**

sp. irregolare



Aggregato asciutto -  $M_s$  = massa secca;  $V_N$  = Volume netto

difficile da valutare

Ciò che determina il comportamento del materiale è dato dalla disposizione degli aggregati nel volume.



Aggregato saturo a superficie secca -  $M_{SSD}$  = massa saturo a superficie secca (comprende la massa secca più l'acqua di assorbimento);  $V_B$  = Volume effettivo (comprende il volume netto e la porosità superficiale permeabile all'acqua)

$MV_A = \frac{M_s}{V_N}$  Massa volumica apparente

$MV_B = \frac{M_s}{V_B}$  Massa volumica effettiva

$MV_{SSD} = \frac{M_{SSD}}{V_B}$  Massa volumica saturo a superficie secca

$A[\%] = 100 \cdot \frac{M_{SSD} - M_s}{M_s}$  Percentuale d'assorbimento  
 quantitativo di acqua assorbito riferito alla massa secca, in percentuale.

Per misurare il volume sfruttato il principio di Archimede. Quindi misuro la massa dell'aggregato sia in acqua che in aria.

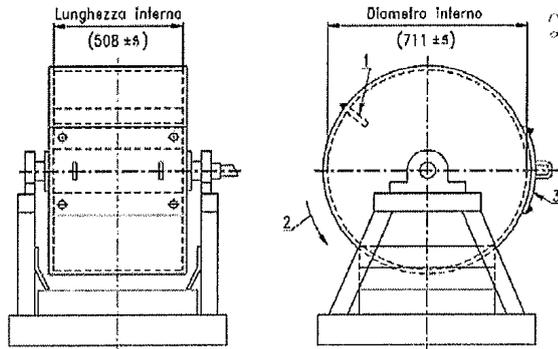
la massa volumica reale si misura al voto delle porosità interne. A vol però non interessa le porosità interne, quindi considero la massa volumica effettiva.

**PROPRIETA' FISICO-MECCANICHE - Res. alla frammentazione**

Prova Los Angeles (UNI EN 1097-2:1999)

APPARECCHIO LOS ANGELES

Il campione di aggregati viene inserito nel tamburo insieme ad un numero predefinito di sfere metalliche (carica abrasiva) di note caratteristiche e posto in rotazione per un predefinito numero di ripetizioni



il valore di soglia dell'indice LA è 20 per le sfere.

$LA = 100 \cdot \frac{M_0 - M_{1,60}}{M_0}$  materiale passato al 1,60 mm dopo la prova

$M_0$  = massa iniziale del campione (5 kg)  
 $M_{1,60}$  = massa di materiale trattenuto al setaccio 1,60 mm dopo la prova

- Carica abrasiva: 11 sfere di acciaio di diametro 45-49 mm e massa 400-445 g
- Velocità di rotazione tamburo: 33 giri/min
- Peso del campione = 5000 g
- Numero rotazioni: 5000

Il coefficiente LA misura la perdita in peso dovuta all'abrasione e agli urti subiti durante la prova

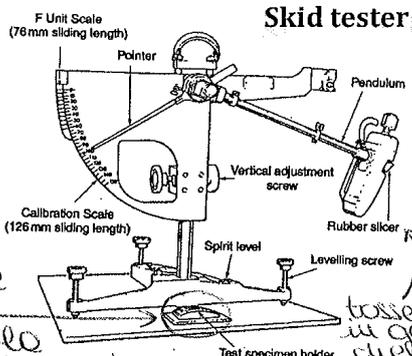
↑ LA → ↑ produzione di materiale fine → ↓ resistenza del materiale. Per avere un materiale resistente alla frammentazione devo richiedere un basso indice LA.

Al termine della prova si ricava il valore empirico del valore di levigamento.

## PROPRIETA' FISICO-MECCANICHE - Res. alla levigazione

Prova di levigazione (UNI EN 1097-8:1999) → prova ENARIA

- ✓ SEMPLICE
- ✓ MOLTI DATI e DISPOSIZIONE
- ✓ PUO' ESSERE ESEGUITA IN SITO



Valore di levigabilità

$$VL = S + (52,5) - C$$

S = media dei valori ottenuti al pendolo sui campioni del materiale da caratterizzare

C = media dei valori ottenuti sui campioni del materiale di riferimento (montati anch'essi sulle ruote)

campione che ho eseguito lo prova visto prima.

La prova restituisce un parametro (BPN) indicativo dell'energia dissipata quando un pattino, dotato di uno slider in gomma, viene fatto strisciare su una superficie.

### CONDIZIONI DI PROVA

- superficie di prova bagnata in modo sufficiente da essere ricoperta d'acqua;
  - si esegue una oscillazione di assestamento senza registrare il valore BPN;
  - si ripetono 5 oscillazioni registrando i valori di BPN e avendo cura ogni volta di bagnare la superficie in esame
- IL VALORE MISURATO È DATO DALLA MEDIA ARITMETRICA DELLE ULTIME 3 LETTURE
- La temperatura di prova della superficie di 16.5 °C;

La prova parte con il pendolo inclinato di un angolo e il pendolo tocca il campione strisciando sopra. Il pendolo viene rallentato per una distanza che dipende da qui e solo rallentato. Il pendolo risale ancora insieme un tondello che

## PROPRIETA' FISICO-MECCANICHE - Sensibilità al gelo

indica lo max risalito del pendolo.

Agli aggregati è richiesta la capacità di resistere alle azioni di natura termica ed in particolare agli effetti combinati della temperatura e della presenza dell'acqua.

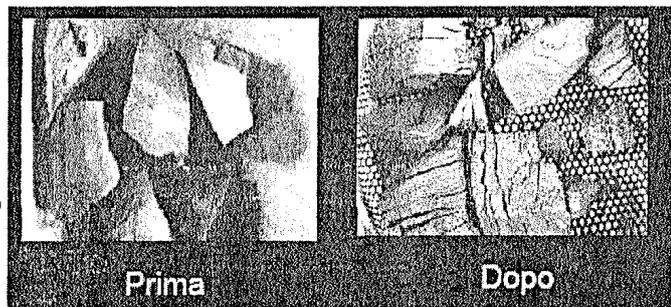
Un metodo diretto per valutare il comportamento dell'aggregato nei riguardi di tali azioni consiste nel sottoporre un campione (8-16 mm) rappresentativo dello stesso a cicli di gelo e disgelo

### UNI EN 1367-1

- Temperatura ciclo compresa fra - 17,5 a + 20°C
- 10 cicli di gelo e disgelo

$$\Delta_{LA} = 100 \cdot \frac{LA_2 - LA_1}{LA_1}$$

- LA<sub>2</sub> - materiale post cicli gelo-disgelo
- LA<sub>1</sub> - materiale originale



variazione percentuale del coeff. Los Angeles a seguito della prova. Il materiale dopo la prova si indebolisce → può star meno e più materiale fine → ↑ LA.

## QUALITA' DEI FINI – Equivalente in sabbia

La qualificazione degli aggregati fini richiede la determinazione di proprietà specifiche legate essenzialmente al loro grado di pulizia, ovvero alla presenza più o meno elevata di materiale contaminante di natura organica e argillosa che riveste i granuli.

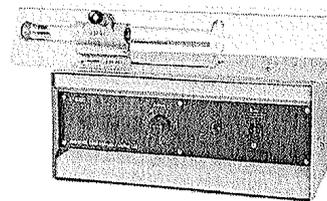
### Prova dell'equivalente in sabbia - UNI EN 933-8

Una quantità prefissata del materiale viene sottoposta ad un'azione di lavaggio per mezzo di una soluzione flocculante

#### ESECUZIONE DELLA PROVA

- si versa all'interno della provetta il campione di materiale fine e la soluzione flocculante fino ad un primo livello di traguardo;
- detta provetta viene disposta in una macchina agitatrice in grado di imprimere un movimento rettilineo, orizzontale, periodico e sinusoidale, con una corsa di 200 mm e facendo eseguire 90 cicli totali in un tempo di 30 secondi;
- si procede ad un secondo lavaggio rabboccando con la soluzione fino ad un secondo livello di riferimento;
- si lascia riposare per un tempo predefinito (generalmente 20 minuti).

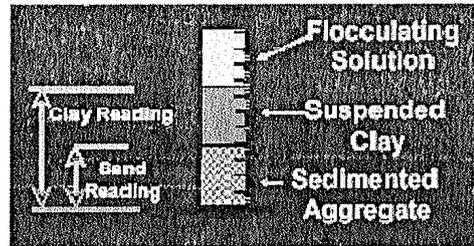
AGITATORE MECCANICO



← agito la provetta →  
lavo gli aggregati.

#### Soluzione flocculante

Cloruro di calcio anidro, glicerina, soluzione di formaldeide al 40%, acqua distillata e demineralizzata, successivamente diluita con ulteriore acqua distillata o demineralizzata.



metto in verticale la buxetta

$$ES = 100 \cdot \frac{h_2}{h_1}$$

$h_2$  = lettura della sabbia  
 $h_1$  = lettura dell'argilla

se lo sabbia è sporca si possono avere dei problemi quando il materiale viene a contatto con il bitume. Dopo 20 min in alto ho la soluz. limpida, in basso ho l'aggregato pulito, a metà ho la sporca in sospensione.  
 $h_2 \ll h_1 \rightarrow$  SABBIA SPORCA  $\rightarrow$  ES ↓       $h_2 \gg h_1 \rightarrow$  SABBIA PULITA  $\rightarrow$  ↑ ES.

## MARCATURA CE

### Norme armonizzate europee

UNI EN 13043:2004 - aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali

UNI EN 13242:2004 - aggregati per materiali non legati o legati con leganti idraulici,

UNI EN 12620:2003 - aggregati per calcestruzzi.



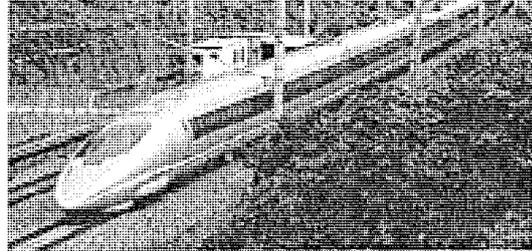
Definiscono le proprietà generali per gli aggregati in relazione alle diverse tipologie d'uso

Per ogni caratteristica considerata vengono stabilite delle categorie di qualità (Es. LA)

Coefficiente Los Angeles	Categoria LA
≤15	LA <sub>15</sub>
≤20	LA <sub>20</sub>
≤25	LA <sub>25</sub>
≤30	LA <sub>30</sub>
≤40	LA <sub>40</sub>
≤50	LA <sub>50</sub>
>50	LA <sub>Distante</sub>
Nessun requisito	LA <sub>HR</sub>

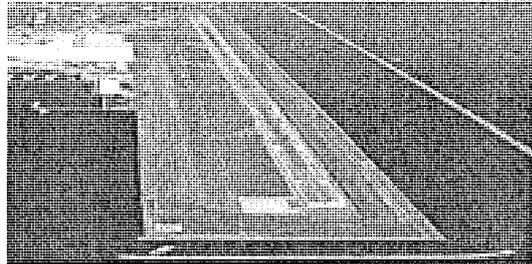


**POLITECNICO DI TORINO**  
**Corso di Laurea Magistrale**  
**in Ingegneria Civile**  
 a.a. 2013-14



**Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti (03ALVMX)**

**SOVRASTRUTTURE STRADALI E AEROPORTUALI**  
 Leganti bituminosi

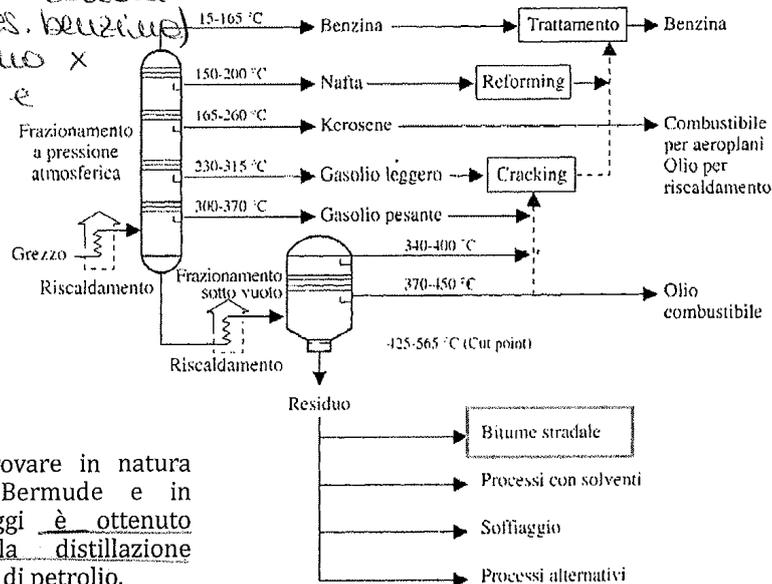


**GENERALITA'**

**BITUME - Definizione**

Miscela di idrocarburi paraffinici ed aromatici ad alto peso molecolare solubili nel solfuro di carbonio CS<sub>2</sub>.

*Del petrolio vengono estratte diverse frazioni (es. benzina) che si distinguono x peso molecolare e temp. di ebulliz.*



**BITUME - Origine**

Il bitume si può trovare in natura (laghi neri delle Bermude e in Venezuela), ma oggi è ottenuto principalmente dalla distillazione frazionata del greggio di petrolio.

## GENERALITA'

### BITUMI MODIFICATI

Sono ottenuti dai bitumi convenzionali mediante l'aggiunta di un polimero, il quale ne altera la struttura chimica e le proprietà fisiche e reologiche

o più polimeri

**POLIMERI** sono macromolecole.

Materiali organici di sintesi, costituiti da molecole aventi un elevatissimo numero di atomi legati tra loro con legami covalenti.

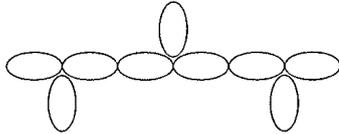
Polimero = unione di più molecole elementari, detti monomeri

Alcuni esempi di strutture dei polimeri



Omopolimero lineare

OMOPOLIMERO → costituito da monomeri dello stesso tipo



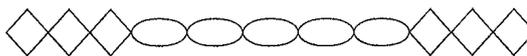
Omopolimero ramificato

COPOLIMERO → costituito da due o più tipologie di monomeri



Copolimero random

← monomeri distribuiti in modo casuale



Copolimero a blocchi

← monomeri ordinati secondo uno schema.

I polimeri vengono mischiati al bitume caldo in modo da migliorare le caratteristiche di quest'ultimo.

## GENERALITA'

### BITUMI MODIFICATI

Principali agenti chimici usati come modificanti

#### ELASTOMERI TERMOPLASTICI

è il più noto ed usato.	→ Styrene-Butadiene-Styrene	SBS
	Styrene-Isoprene-Styrene	SIS
	Styrene-Butadiene	SB
	Copolymer Random	SBR

TERMOPLASTICI: perdono consistenza con l'aumentare della temperatura e la ricquistano quando si abbassa la temperatura. Il fenomeno è REVERSIBILE.

→ Elastomeri = incremento del grado di elasticità

#### PLASTOMERI TERMOPLASTICI

Ethylene-Vinyl-Acetate	EVA
Ethylene-Metyl-Acrylate	EMA
Plisobutylene	PIB

← non hanno caratteristiche elastiche ma plastiche.

→ Plastomeri = irrigidimento del bitume senza incremento del grado di elasticità

Ci sono anche i polimeri TERMOINDURENTI che diventano più consistenti quando si abbassa la temperatura (a seguito di un innalzamento) e il fenomeno è però irreversibile.

## GENERALITA'

**BITUMI MODIFICATI** I polimeri devono essere compatibili con i bitumi. Si deve avere compatibilità termodinamica. Nel tempo, dopo aver disperso il polimero nel bitume, non ci devono essere dei raggruppamenti di polimeri.

Compatibilità bitume-polimero  
 ↓  
 Stabilità del bitume modificato

Compatibilità termodinamica = capacità di formare una soluzione stabile

→ bitume e polimero termodinamicamente incompatibili

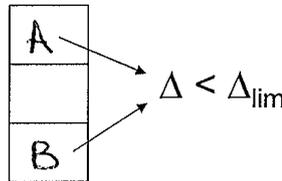
Compatibilità "pratica" = dispendio energetico (e. termica, e. meccanica di agitazione) per garantire un sufficiente livello di stabilità

← tempi e costi per formare una soluzione stabile, devono essere accettabili.

Stabilità allo stoccaggio  
 (TUBE Test - EN 13399)  
 TUBEN

Temperatura = 180°C

Tempo di maturazione = 3 gg

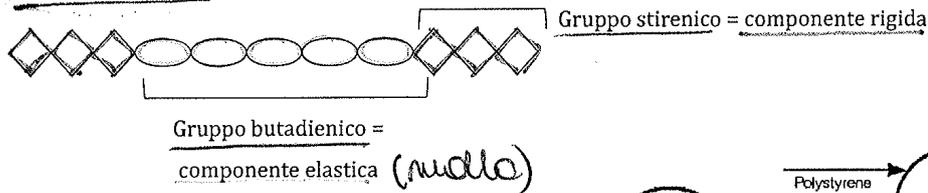


Si considera un campione di bitume modificato, lo si inserisce in un tubicino e viene messo verticalmente in un forno. Se sono incompatibili, con l'alta temperatura, bitume e polimeri si separano, e su queste parti separate si possono eseguire dei test. Se bitume A e B sono compatibili, non si separano.

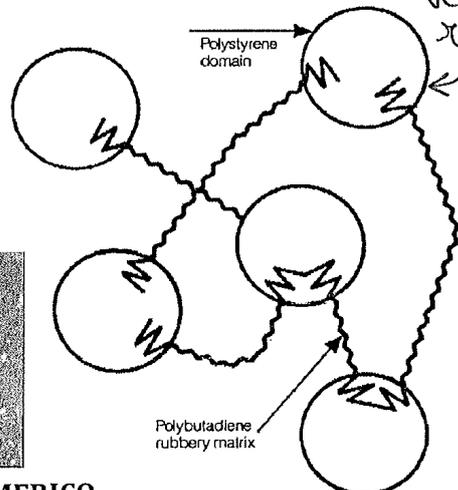
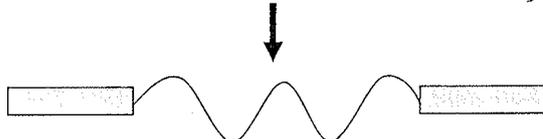
**GENERALITA'** hanno caratteristiche simili → sono stabili allo stoccaggio.

## BITUMI MODIFICATI CON SBS

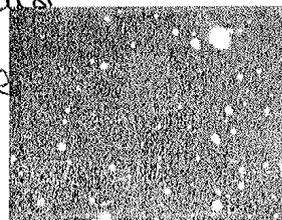
Elastomero SBS ← è il polimero più usato.



Le macromolecole formano un vero e proprio reticolo.



I blocchi stirenici tendono ad aggregarsi, tra loro formando delle macro-molecole aggregate e collegate con delle molle



**RETICOLO ELASTOMERICO**



Nei climi più caldi dove usale dei bitumi più rigidi perché altrimenti si genera il rammollimento eccessivo del bitume.  
Nei climi freddi si usa invece il bitume meno rigido.

① COSA VUOL DIRE BITUME 80/100?

80/100 sono i decimi di mm di penetrazione a seguito della prova di penetrazione.

interrompe e si registrano le condizioni a cui ciò avviene. la temperatura infatti parte da  $5^{\circ}\text{C}$  ed aumenta nel tempo ( $5^{\circ}\text{C}$  ogni 60 secondi).

Il disco di bitume si deforma sia x la presenza dello sferzetto che per l'aumento della temperatura.

A fine prova si valuta la temperatura  $\rightarrow T$  di RANNOIAMENTO. la prova vuole individuare una  $T$  alla quale tutti i bitumi hanno lo stesso comportamento ma il modo e i tempi a cui i bitumi arrivano alle stesse condizioni, sono diversi.

I bitumi + molli hanno  $T$  di rammollimento molto basse rispetto a quelli più rigidi.

NB  $T$  di rammollimento  $\neq T_{\text{max}}$  alla quale può liquefare il bitume.

la temperatura alla quale il bitume ha un comportamento fragile.

NB Questo NON è la temperatura minima alla quale il bitume può lavorare.

I bitumi duri con bassi valori di penetraz, hanno valori di temperatura Fraas alti, (la temperatura non deve essere molto bassa x far avvenire la rottura).

I bitumi molli hanno temperatura Fraas basse.

BITUME DURO

BITUME MOLLE

• PROVA DI PENETRAZIONE	⊖ PENETRAZ.	⊕ PENETRAZIONE
• PROVA DI RAMMOLLIMENTO	T ALTE RAMM.	T BASSE RAMM.
• PROVA FRAAS	T ALTE FRAAS	T BASSE FRAAS
• PROVA DI DUTTILITÀ	⊖ DUTTILITÀ	⊕ DUTTILITÀ

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE EMPIRICO

### SPECIFICHE C.E.N. (EN 12591:2009)

prospetto 1A Specifiche dei bitumi per applicazioni stradali con classe di penetrazione da 20 x 0,1 mm a 220 x 0,1 mm - Proprietà applicabili a tutti i bitumi per applicazioni stradali elencati nel presente prospetto

Proprietà	Test method	Unità	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetrazione a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	20 - 30	30 - 45	35 - 50	40 - 60	50 - 70	70 - 100	100 - 150	160 - 220
Punto di rammollimento	EN 1427	°C	55 - 63	52 - 60	50 - 58	48 - 56	46 - 54	43 - 51	39 - 47	35 - 43
Resistenza all'indurimento a 163 °C	EN 12607-1									
Penetrazione residua		%	≥ 55	≥ 53	≥ 53	≥ 50	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
Incremento del punto di rammollimento - <i>Severità 1</i>		°C	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11
		°C	0	0	0	0	0	0	0	0
Incremento del punto di rammollimento - <i>Severità 2<sup>a</sup></i>		°C	≤ 10	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 12	≤ 12
		°C	0	0	0	0	0	0	0	0
Variazione di massa <sup>b)</sup> (valore assoluto)		%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
Punto di infiammabilità	EN ISO 2592	°C	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
Solubilità	EN 12592	%	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0

a) Se si seleziona la severità 2, essa deve essere associata ai requisiti per il punto di rottura secondo Fraass o all'indice di penetrazione o ad entrambi, misurati sul legante non invecchiato (vedere prospetto 1B).

b) La variazione di massa può essere positiva o negativa.

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE EMPIRICO

### SPECIFICHE C.E.N. (EN 12591:2009)

prospetto 1B Specifiche dei bitumi per applicazioni stradali con classe di penetrazione da 20 x 0,1 mm a 220 x 0,1 mm - Proprietà associate a regolamenti o ad altri requisiti regionali

Proprietà	Metodo di prova	Unità	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Indice di penetrazione <sup>a)</sup>	Appendice A <sup>b)</sup>	-	Da -1,5 a +0,7 o NR <sup>c)</sup>							
Viscosità dinamica a 60 °C	EN 12596	Pa x s	≥ 440 o NR <sup>c)</sup>	≥ 260 o NR <sup>c)</sup>	≥ 225 o NR <sup>c)</sup>	≥ 175 o NR <sup>c)</sup>	≥ 145 o NR <sup>c)</sup>	≥ 90 o NR <sup>c)</sup>	≥ 55 o NR <sup>c)</sup>	≥ 30 o NR <sup>c)</sup>
Punto di rottura secondo Fraass <sup>a)</sup>	EN 12593	°C	NR <sup>c)</sup>	≤ -5 o NR <sup>c)</sup>	≤ -5 o NR <sup>c)</sup>	≤ -7 o NR <sup>c)</sup>	≤ -8 o NR <sup>c)</sup>	≤ -10 o NR <sup>c)</sup>	≤ -12 o NR <sup>c)</sup>	≤ -15 o NR <sup>c)</sup>
Viscosità cinematica a 135 °C	EN 12595	mm <sup>2</sup> /s	≥ 530 o NR <sup>c)</sup>	≥ 400 o NR <sup>c)</sup>	≥ 370 o NR <sup>c)</sup>	≥ 325 o NR <sup>c)</sup>	≥ 295 o NR <sup>c)</sup>	≥ 230 o NR <sup>c)</sup>	≥ 175 o NR <sup>c)</sup>	≥ 135 o NR <sup>c)</sup>

a) Se si seleziona la severità 2, essa deve essere associata ai requisiti per il punto di rottura secondo Fraass o all'indice di penetrazione o ad entrambi, misurati sul legante non invecchiato.

b) Riferimento all'appendice A normativa del presente documento, che tratta il calcolo dell'indice di penetrazione.

c) NR. Nessun Requisito può essere utilizzato in assenza di regolamenti o altri requisiti regionali per la proprietà nel territorio di utilizzo previsto.

**La norma obbliga tutti i produttori a dichiarare questi dati e a conformarsi alla marcatura CE.**

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### REOLOGIA

Studia i fenomeni connessi al flusso e alla deformazione di materiali complessi, che non obbediscono a leggi semplici di comportamento



### MATERIALI VISCO-ELASTICI

Compresenza di componenti elastiche e viscose

Il bitume è un materiale visco-elastico

Il comportamento dei bitumi dipende da:

- Temperatura
- Tempo di carico (frequenza)
- Invecchiamento (le proprietà variano nel tempo)



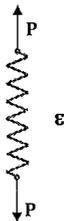
IMPORTANTE

Il comportamento visco-elastico dei bitumi influenza le prestazioni in opera delle pavimentazioni

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### MODELLI ANALOGICI

Elasticità lineare - corpo solido ideale



Molla di Hooke

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

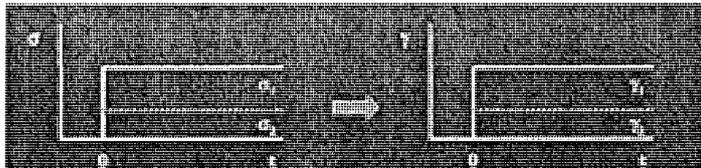
$$\tau = G \cdot \gamma$$

Un materiale elastico può essere definito attraverso la proporzionalità  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  e  $\tau = G \cdot \gamma$ .

≠ corpi perfettamente elastici

Applico a  $t=0$ , uno sollecito unitario  $\sigma$  cost nel tempo → si mantiene cost anche la

def. Se  $\sigma$  va a zero,  $\varepsilon$  va a zero anche la deformaz. indipendentemente dallo stato di carico.



Lo sforzo applicato  $\sigma$  ( $\tau$ ) produce una deformazione  $\varepsilon$  ( $\gamma$ ) linearmente dipendente allo sforzo stesso per mezzo del modulo  $E$  ( $G$ )  $F = kx$

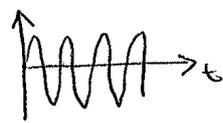
La deformazione è recuperata interamente e istantaneamente una volta rimosso il carico

non c'è dissipazione di energia.

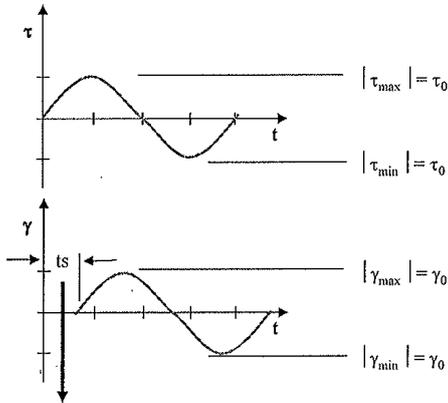
le bitume alle altissime  $T$  ha un comportamento newtoniano, se  $\downarrow T$  il comportamento è sempre meno newtoniano, le bitume ha un comportamento PSEUDO-PLASTICO definito attraverso il modello CROSS.

Alternativo dei modelli ologici sono quelli  
sperimentali

⊗  $G'$ : MODULO CONSERVATIVO descrive lo capacità di immagazzinare energia elastica di deformaz.  
 $G''$ : MODULO DISSIPATIVO: capacità di disperdere energia.  
**REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI**

$\tau$  ↑  
  
 ← sinusoidale ad alta frequenza, il carico viene rapidamente

**Prove in regime oscillatorio**



inputto al materiale

↓ oscillazione  
 $\tau(t) = \tau_0 \cdot \sin(\omega t)$

↑ detto la velocità con cui varia la tensione nel tempo.

$\omega$ : pulsazione

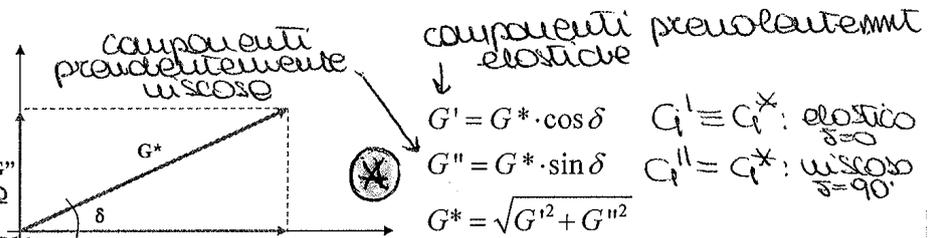
SFASAMENTO!  
 ANGOLO DI FASE

Sfasamento

**Modulo complesso**

$E^* = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$

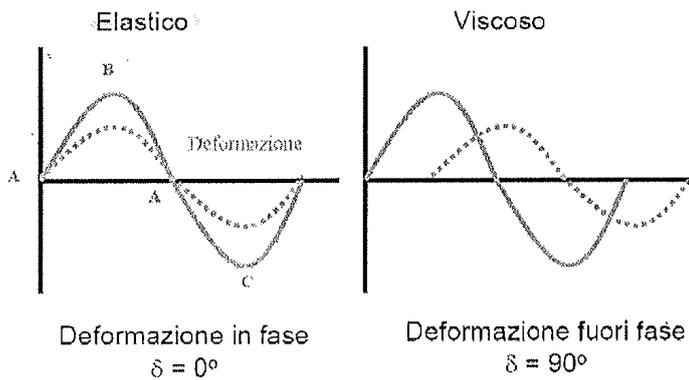
$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0}$   
 ← max ampiezza  $G''$  di tensione  
 ← max ampiezza di deformaz.



inputto una sinusoidale di tensione, misuro una  $\gamma$  sinusoidale che risponde con la stessa frequenza della tensione e le 2 sinusoidi presentano uno sfasamento che viene quantificato inserendo  $(-\delta)$

**REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI**

**Prove in regime oscillatorio**



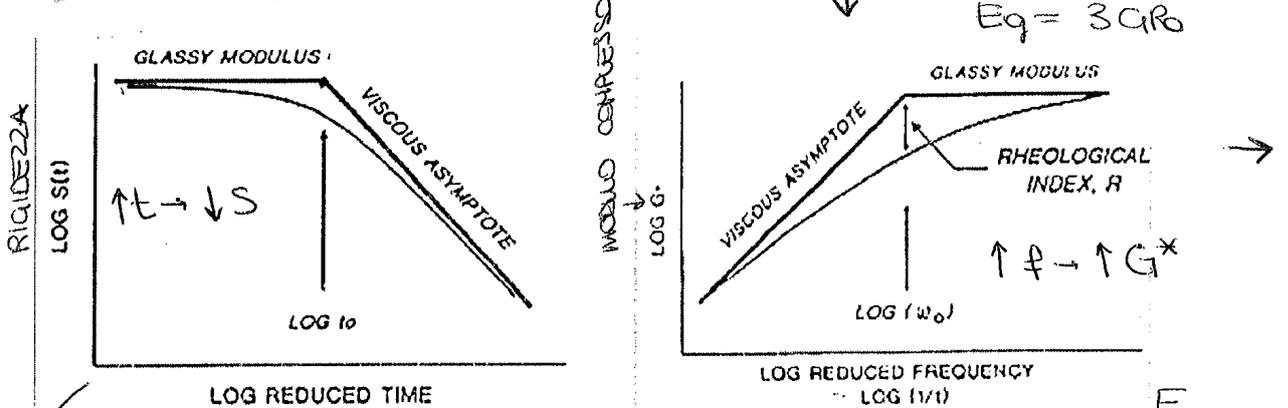
Il "tipo" di risposta varia al variare della temperatura e della frequenza di oscillazione

Più il materiale si allontana dal comportamento elastico, più aumenta lo sfasamento.

Per frequenze di carico basse, auto in comportamento che succi se il carico fosse applicato più lentamente e ho una rigidità molto bassa.

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

Curve maestre (Master curve)



- GRANDEZZE CARATTERISTICHE:
- R = indice reologico
  - $t_c$  = tempo di cross-over (in regime continuo)
  - $\omega_c$  = frequenza di cross-over (in regime oscillatorio)

Il comportamento del bitume varia con continuità da quello di solido elastico a quello di fluido viscoso

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

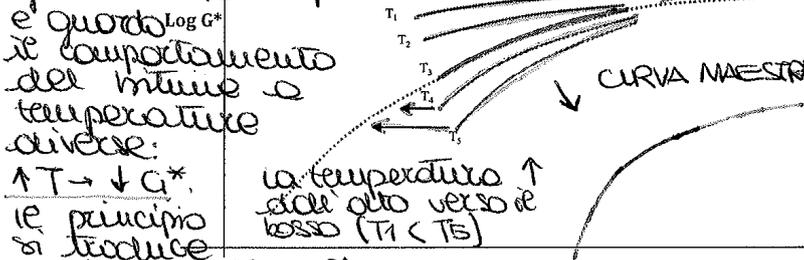
↑  
= 0,5 x  
materiale  
compressibile

Per tempi di carico sufficientemente piccoli, il materiale risponde con un comportamento simile a quello di un materiale elastico, quasi non si ha la temperatura. Il comportamento del bitume è compreso tra 2 stati:

- VETROSO → ricco modulo elastico
- VISCOSO → ricco modulo viscoso

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

lo voglio conoscere il comportamento della curva reale. Sfrutto il principio di equivalenza



e quindi il comportamento del bitume a temperature diverse. Il principio si traduce qualitativamente nel metodo delle variabili ridotte. Trovo le curve reali (s) ed ottengo (s dx) ed ottengo una curva continua, detta CURVA MAESTRA.

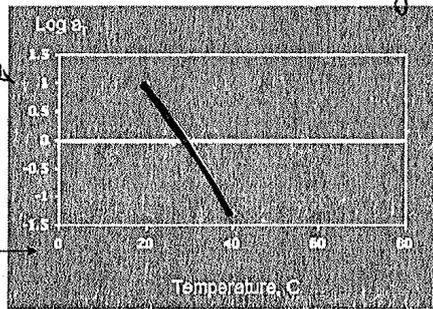
Ho così il tempo di frequenza e chi posso descrivere il comportamento del bitume. la curva maestro mostra la tempo-dipendenza del bitume. la dipendenza dalla temperatura è descritta solo dagli shift factor e dalla loro curva.

$$\omega_r = \omega_s \cdot a(T) \rightarrow \log(\omega_r) = \log(\omega_s) + \log a(T)$$

↓  
Frequenza misurata

↓  
Frequenza ridotta

poi i valori delle curve viscoelastiche possono essere ottenute con le variazioni di: frequenza di oscillazione o della temperatura



Shift Factors

$$\log \frac{a(T)}{a(T_0)} = \frac{-C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + T - T_0}$$

Williams - Landel - Ferry

$C_1 = 19, C_2 = 92$  (bitumi)

$C_1 = 17,44, C_2 = 51,6$  (polimeri)

valori da assegnare al bitume per poter costruire la curva maestro.

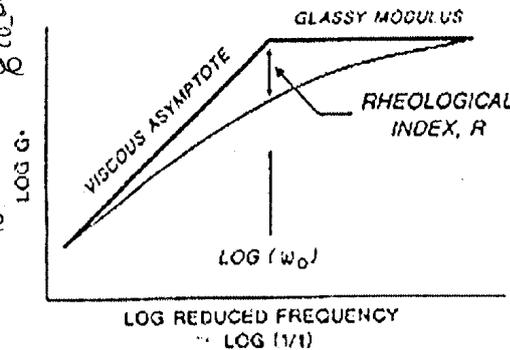
## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### Modello analitico di Christensen - Anderson (CA model)

Ad una generica temperatura, il modulo elastico può essere espresso in funzione di  $\omega$ .

$$G^*(\omega) = G_g \left[ 1 + \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]^{\frac{R}{\log 2}}$$

Si usano i modelli per poter ridurre  $G^*$  ad ogni temperatura e frequenza.



### Modello analitico di Christensen - Anderson - Marasteanu (CAM model)

$$G^*(\omega) = G_g \left[ 1 + \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]^{\frac{mR}{\log 2}}$$

$m$  = parametro di modello per meglio modellare il comportamento dei bitumi modificati

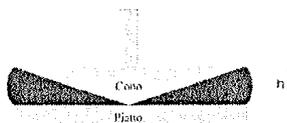
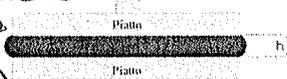
Le prove sui bitumi si eseguono con dei reometri con controllo di sollecitazione ad una determinata  $T$ .

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### Attrezzature sperimentali e configurazioni di prova

#### Prove di taglio per la misura di grandezze tangenziali

**Sistema piatto-piatto**  
 Ho 2 piatti circolari e su quel superiore viene applicato una coppia torcente (rotazione). Il bitume è sandwichato ai piatti e viene indotto un campo di deformazione derivante dall'applicazione della coppia.



lo stato di scorrimento non è il variabile del raggio

$$\tau = (2M)/(\pi R^3)$$

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot R}{h}$$

$$\tau = (3M)/(2\pi R^3)$$

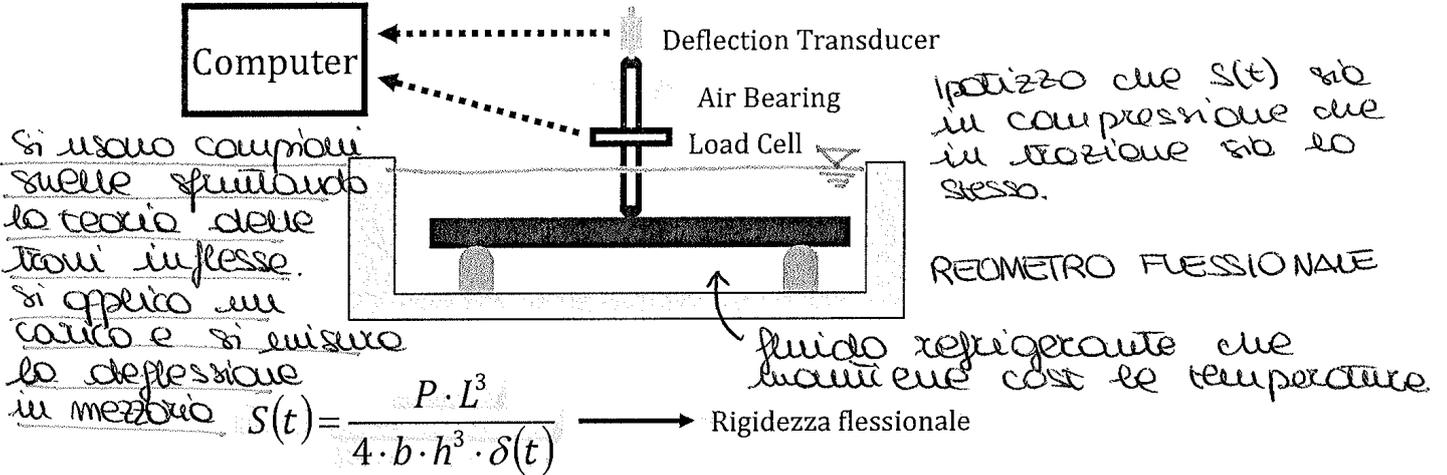
$$\gamma = \frac{R \cdot \varphi}{h} = \frac{R \cdot \varphi}{R \cdot \tan \theta} = \frac{\varphi}{\tan \theta} = \frac{\varphi}{\theta}$$

Lo scorrimento è proporzionale al rapporto tra rotazione  $\varphi$  ed angolo di apertura del cono.

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### Attrezzature sperimentali e configurazioni di prova

Prove di tipo flessionale usate alle basse temperature quando il bitume è piuttosto rigido.



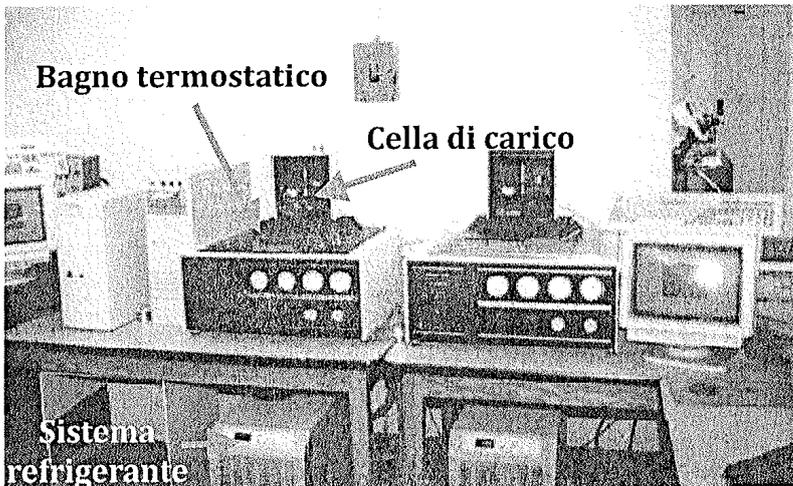
$P$ : carico applicato  
 $L$ : lunghezza libera di inflessione  
 $h$ : spessore  
 $b$ : larghezza

↑  
 abbassamento in funzione del tempo o seguito dell'applicazione di un carico costante.

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### Attrezzature sperimentali e configurazioni di prova

↙ FLESSIONE  
**BBR (Bending Beam Rheometer)**



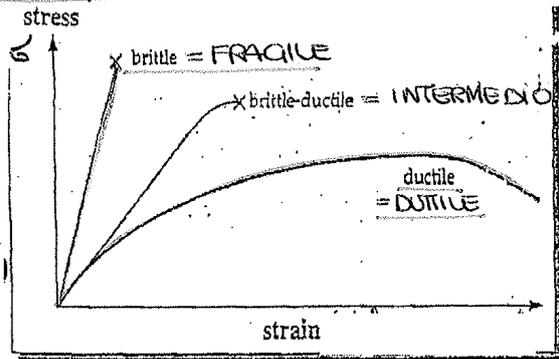
## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### Attrezzature sperimentali e configurazioni di prova

#### DTT (Direct Tension Tester)



Il comportamento (e il corso) dipende dalla temperatura e dal tempo (velocità di applicaz. del carico), in particolare dal 2° parametro per qst tipo di prova



↓ velocità  
 ↑ V → ↑ RIGIDEZZA → ↑ FRAGILITÀ  
 ↓ V → ↓ " → ↓ "  
 ↓ T → ↑ FRAGILITÀ  
 ↑ T → ↓ FRAGILITÀ

## REOLOGIA E REOMETRIA DEI BITUMI

### Invecchiamento dei bitumi (aging)

← nel tempo cambia lo str. molecolare e quindi anche lo corso di rottura.

Processo di alterazione fisico-chimico dei bitumi dovuto alle alte temperature

#### • Invecchiamento a breve termine (short term aging)

Riguarda le fasi di miscelazione e costruzione (trasporto e stesa)

> Volatilizzazione → si sciolta il bitume che ha molecole + volatili, quelle + volatili alle alte temperature volatilizzano.

> Ossidazione  
 > Polimerizzazione → le molecole si uniscono alle molecole adiacenti creando delle macro-molecole strutturate. (↑ rigidità)

#### • Invecchiamento a lungo termine (long term aging)

Riguarda la vita di servizio della pavimentazione

> Ossidazione

> Polimerizzazione

↑  
 le ossidazioni più elevate si verificano nei primi 10 anni

Effetti dei processi di alterazione chimico-fisici

#### • Incremento della rigidità

#### • Aumento del grado di "elasticità"

↑ G\* ↓ δ

ad alte temperature il bitume è attivo, le molecole sono molto reattive ed agiscono con l'ossigeno  
 ossidaz. e polimerizzaz. continuano a svolgersi.

↑ rigidità, ↑ angolo di fase, ↑ fragilità, ↑ grado di elasticità

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

---

### Requisiti di un sistema di caratterizzazione prestazionale

- ① • Basato su grandezze razionali e non empiriche
- ② • Misure sperimentali eseguite in condizioni controllate e significative
- ③ • Specifiche tecniche legate ai principali fenomeni di degrado

- ① grandezze che influenzano sul comportamento del manto  
② le condizioni controllate per  $\uparrow\downarrow$  di temperatura o carico applic.

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

---

PROGRAMMA SHRP (*Strategic Highway Research Program, 1994*) ← *programma di ricerca federale.*

Obiettivi

- Miglioramento delle prestazioni delle sovrastrutture
- Incremento delle conoscenze sui leganti e sui conglomerati bituminosi
- Migliorare lo stato dell'arte (Norme Tecniche di Capitolato, metodologie di prova)

Il prodotto di SHRP è il sistema

**SUPERPAVE**

Superior Performing Asphalt Pavements

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

### Sistema SUPERPAVE

- Prove reologiche
  - Misura di proprietà fondamentali legate alle prestazioni in opera delle miscele
- Condizioni di prova
  - Rappresentative delle temperature di servizio e delle fasi costruttive
- Stato del bitume
  - Grado di invecchiamento a breve e lungo termine

- PROVE CARATTERIZZANTI PER BITUMI SUPERPAVE → PROVA DSR, BBR, DTT
- REQUISITI RICHIESTI DA SUPERPAVE PER FATICA
- PERFORMANCE GRADE

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

### Sistema SUPERPAVE (AASHTO M 320) classi prestazionali

PERFORMANCE GRADE	PG 46-			PG 52-						PG 58-				PG 64-							
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average 7-day Maximum Pavement Design Temperature, °C	<46			<52						<58				<64							
Minimum Pavement Design Temperature, °C	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
ORIGINAL BINDER : BITUME NUOVO STATO ORIGINARIO.																					
Flash Point Temp, T48: Minimum °C	230																				
Viscosity, ASTM D4402: Maximum, 3 Pas, Test Temp @ 10 rad/s, °C	135																				
Dynamic Shear, TP5: G* sinδ, Minimum, 1.00 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
BITUME INVECCHIATO A BREVE TERMINE ROLLING THIN FILM OVEN (RTFO) OR THIN FILM OVEN RESIDUE (TF19)																					
Mass Loss, Maximum, percent	1.00																				
Dynamic Shear, TP5: G* sinδ, Minimum, 2.20 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
BITUME INVECCHIATO A LUNGO TERMINE PRESSURE AGING VESSEL (PAV) RESIDUE (PP1)																					
PAV Aging Temperature, °C	90			90						100				100							
Dynamic Shear, TP5: G* sinδ, Maximum, 5000 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Physical Hardening* Report																					
Creep Stiffness, TP1: S, Maximum, 300 MPa, m - value, Minimum, 0.300 Test Temp @ 60s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-3
Direct Tension, TP3: Failure Strain, Minimum, 1.0% Test Temp @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-3

liquore dopo le caudiz. di impiego del bitume  
T in corrisp. delle quote lo viscosità e poi a 3,5 R.S. deve essere al max 135°

← temperatura max di progetto della pavimentazione  
← temp. min.  
← min valore di T della T di sufficienza  
← DSR  
← max perdita in peso in %  
← DSR  
← DSR  
← BBR  
← DTT

Tutti i valori sono temperature espresse in °C.

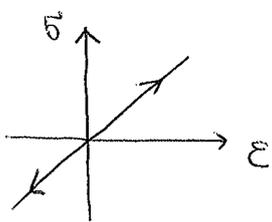
L'investimento  $\uparrow G^*$  e  $\downarrow \delta \rightarrow$  l'investimento si migliora dal punto di vista dell'ammortamento. Quindi considero il rapporto  $G^*/\text{sen} \delta$  solo nelle condiz. di investimento a breve termine.

È minimo originale (vergieme) dove con esso aspetto il limite imposto su  $G^*/\text{sen} \delta$ . (qst limite è messo x motivi di sicurezza).

• Diretta significativo indagare il comportamento a fatica del bitume ad una temperatura media (+4°C) tra la min e la max del range FA.

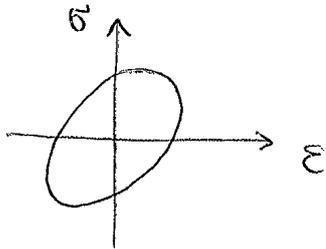
Il fenomeno di fatica è intrinsecamente a lungo termine per qst udito il comportamento a fatica dopo un invecchiamento a lungo termine. (simulo lo xedo)

si indaga il valore  $q^*$  seu  $\bar{\delta}$  (energia dissipata del bitume x ciclo di carico).



L'energia <sup>persa</sup> in un materiale elastico lineare è nulla x'  $\epsilon = 0$  e' area sotto.

Per un materiale visco elastico, l'energia dissipata max deve essere pari a 5000 KR



Il parametro  $m$  introduce il comportamento elastico.

Per  $m=1$  ho un comportamento viscoso.

Per  $m=0$  ho un comportamento elastico.

$$\epsilon = \alpha \cdot \Delta T : \text{deformaz. impedita}$$

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Per un materiale visco elastico devo limitare le tensioni

$$\sigma = S(t) \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

quindi devo limitare  $S(t)$ , quindi limito la rigidità:

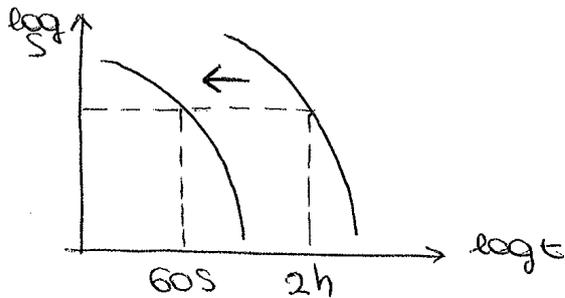
$$S \leq 300 \text{ MPa}$$

$m > 0,3$  questo vuol dire chiedere che il materiale non sia troppo elastico, deve essere suff. deformabile e viscoso. la temp.-dipendenza delle tensioni deriva dalle caratteristiche viscoso del materiale.

Per  $m$  grandi, le coazioni che nascono vengono rapidamente rimosse.

Devo quindi limitare le coazioni ( $S < 300$ ) e far sì che qst si rimosse rapidamente ( $m > 0,3$ ).

La temperatura dello penultimo rigo è aumentata di  $10^\circ\text{C}$  rispetto al minimo del pg. perché il valore di 300 MPa era riferito ad un tempo di cura di 2h. si è applicato il principio di equivalenza temp.-temperatura si riduce il tempo e si aumenta la temperatura.



### INDURIMENTO FISICO → REPORT

I materiali polimerici presentano il fenomeno dell'indurimento fisico e quindi se posto per un determinato tempo ad una temp. bassa, cambiano nel tempo le caratteristiche reologiche del bitume. Il bitume riesce a ridurre il volume libero tra le varie macromolecole. → volume ed ↑ rigidità. si stabilisce quindi il tempo di condizionamento e lo si può poi sd 1h. con "report" si intende che il bitume va curato indotto e studiato anche dopo 24h di condizionamento.

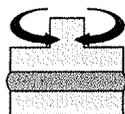
ci si riferisce ai risultati di trazione diretto e si richiede che la deformaz. min sia pari al 1% e la velocità di esecuzione della prova deve essere pari a 1 mm/min. si richiede quindi che il materiale sia sufficientemente duttile ( $\epsilon_f \geq 0,1\%$ ). la duttilità alle basse  $T$  serve a omettere i bitumi che hanno valori di rigidità  $S$  superiori a 300 MPa ma deve comunque essere  $< 600 \text{ MPa}$ .

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

---

### Sistema SUPERPAVE

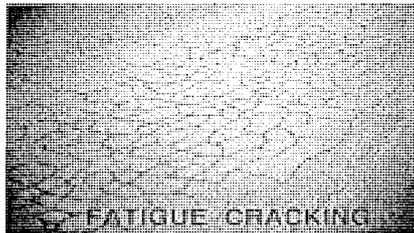
Fatica - Parametro di controllo



Prova al DSR

$\omega = 10 \text{ rad/s}$ ,

$T_{\text{intermedia}}$  di progetto



- o Provocata dai carichi veicolari ripetuti
- o Il fenomeno coinvolge tutte le fasi della vita d'esercizio)

$G^* \cdot \sin \delta$  sul bitume trattato al PAV  $\leq 5000 \text{ kPa}$

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

---

### Sistema SUPERPAVE

Fatica - Parametro di controllo

#### Domanda

Perchè imporre un valore di soglia massimo al parametro  $G^* \cdot \sin \delta$ ?

#### Risposta

Occorre ridurre la dissipazione di energia ad ogni ciclo per garantire una sufficiente resistenza al danneggiamento per fatica

Il controllo va effettuato nelle condizioni di invecchiamento più rappresentative (bitume invecchiato a lungo termine)

## SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

---

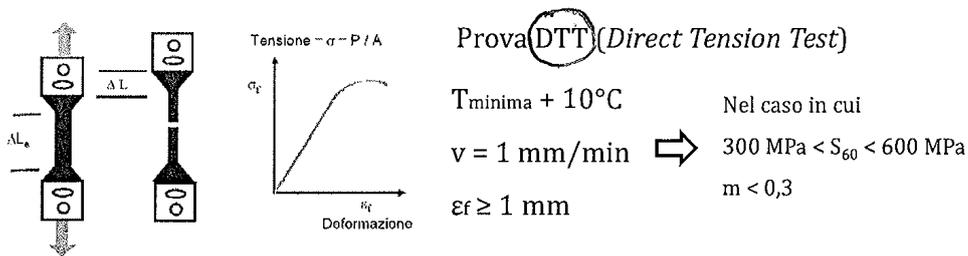
### Sistema SUPERPAVE

Rottura di origine termica – Parametro di controllo (integrativo)

#### Problema

La misura della rigidità non è sempre sufficiente per controllare la fessurazione termica.

Vi può essere la necessità di valutare il livello di deformazione richiesto per portare a rottura il materiale (duttilità)



## METODI EVOLUTI

---

### Limiti sistema SUPERPAVE

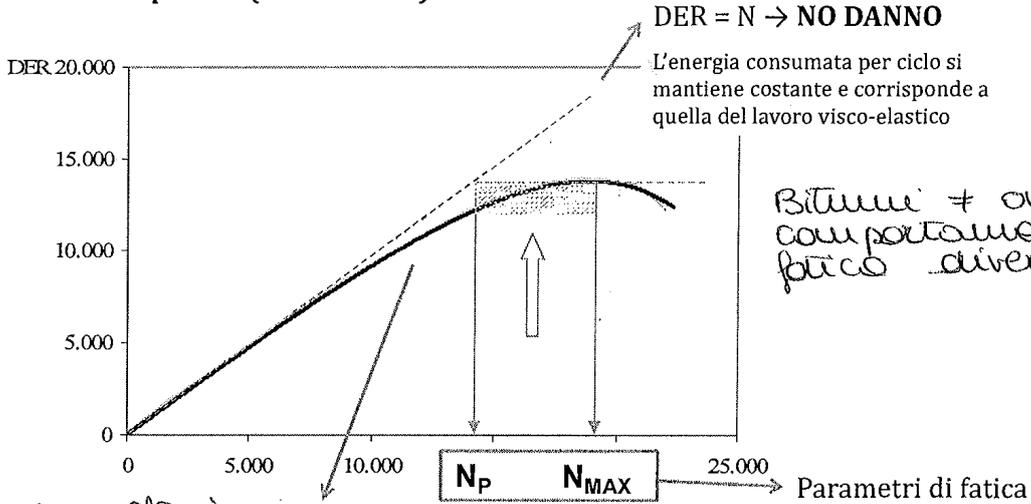
Nel caso dei bituminosi modificati, non sempre l'approccio SHRP-SUPERPAVE risulta efficace (sottostima delle effettive proprietà dei materiali).

Per far fronte a questo problema, sono stati proposti metodi di prova evoluti relativi a:

- FATICA (*Time Sweep Tests*)
- ORMAIAMENTO (*Multiple-Stress Creep Recovery Tests*)

## METODI EVOLUTI per la FATICA

### Time Sweep Tests (NCHRP 9-10)



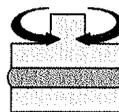
se la curva devia dalla retta glielo vuole dire che il materiale si sta danneggiando.  
↑ spostamento della bretella glielo → ↑ danno.

## METODI EVOLUTI

per e' INORMALAMENTO :

### Multiple-Stress Creep Recovery Tests (AASHTO TP 70-10)

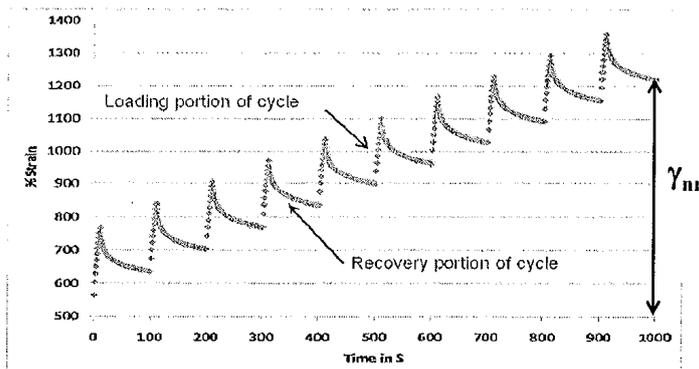
Prova al DSR eseguita a frequenza e temperatura costante imponendo cicli ripetuti di creep-recovery a differenti livelli tensionali



la prova viene eseguita in regime oscillatorio.

10 cicli di creep (1 s) - recovery (9 s) a:

- 0,1 kPa
- 3,2 kPa



azione ripetuta dei carichi.

### Indice prestazionale

(Non-recoverable creep compliance)

$$J_{nr} = \frac{(\gamma_{nr}/10)}{\tau}$$

deformazione NON recuperabile

↑ sollecitazione applicata.

$J_{nr0.1}$

$J_{nr3.2}$

## EMULSIONI BITUMINOSE

Composizione *Oggi tutti i bitumi sono emulsionabili.*

Bitume + Acqua + Agente Emulsionante (tensioattivo)

L'acqua rappresenta la fase disperdente.

Il bitume rappresenta la fase dispersa sotto forma di goccioline; in passato si preferiva utilizzare bitumi ad elevata penetrazione (160/220 dmm), allo stato attuale si riesce ad emulsionare leganti più duri anche modificati con polimeri.

Gli agenti emulsionanti (tensioattivi) favoriscono la dispersione del bitume in acqua controllandone la velocità di rottura; conferiscono inoltre la polarità superficiale alle goccioline di legante permettendo di produrre emulsioni anioniche e cationiche

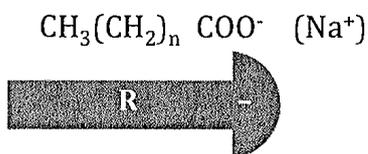
- Emulsionanti anionici
- Emulsionanti cationici

## EMULSIONI BITUMINOSE

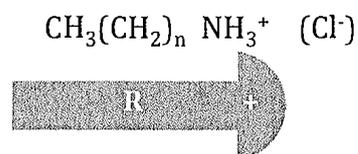
### Emulsionanti

Sono costituiti da due sezioni:

- Gruppo polare ( $\text{COO}^-$  oppure  $\text{NH}_3^+$ ) = proprietà idrofile *← presente aggiunto con l' $\text{H}_2\text{O}$*
- Gruppo apolare ( $\text{R} = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_n$ ) = proprietà lipofile *← grazie al bitume*



Emulsionanti Anionici  
(Saponi degli acidi grassi)



Emulsionanti Cationici  
(Ammine o Sali di ammonio)

## EMULSIONI BITUMINOSE

### CLASSIFICAZIONE

#### 1. Carica Superficiale: Anioniche (-) e Cationiche (+)

Le emulsioni bituminose cationiche sono più difficili da produrre ma **DECISAMENTE PIÙ AFFIDABILI** rispetto alle emulsioni anioniche.

EUROPA  
↓



In ambito CEN solo le emulsioni cationiche sono oggetto di normazione!!

#### 2. Percentuale di Bitume Residuo: 50 - 55 - 60 - 65 - 69 %

← quantità di emulsione rispetto alla massa totale

Conoscere la quantità di bitume residuo presente nelle emulsioni bituminose consente di applicare i dosaggi corretti nelle lavorazioni stradali. La fluidità dell'emulsione varia, a parità di tipologia di bitume, al variare del contenuto di acqua.

L'acqua nel tempo se ne va quindi quello che rimane è il bitume che rappresenta dunque la metà del sistema. Se c'è troppo bitume le operazioni non riescono a rimanere in sospensione e tendono a floccolare.

Tra 2 studi di bitume si può inserire una MANO DI ATTACCO e per far ciò è importante avere una buona % di bitume residuo.

## EMULSIONI BITUMINOSE

### CLASSIFICAZIONE

Il processo di rottura porta l'emulsione da uno stato disperso ad uno in cui le 2 componenti sono divise.

#### 3. Velocità di Rottura

La velocità di rottura si associa al tempo richiesto affinché il bitume si separi dall'acqua.

Il **processo di rottura** si sviluppa in 3 fasi distinte:

- SEDIMENTAZIONE** (decantazione delle goccioline di bitume);
- FLOCCULAZIONE** (avvicinamento delle goccioline sedimentate);
- COAGULAZIONE** (fusione delle goccioline flocculate e formazione di una fase continua).

Al termine della rottura avviene una ulteriore fase:

- PRESA** (completa eliminazione dell'acqua residua dalla fase continua coagulata a contatto con gli aggregati).

Il rapporto influenza l'equilibrio dell'emulsione perché tende ad attirare le goccioline di bitume.

## EMULSIONI BITUMINOSE

### CLASSIFICAZIONE

#### 4. Tipo di bitume residuo: tradizionale o modificato

Il **bitume tradizionale** impiegato per la produzione di E.B. è classificabile, secondo le specifiche tecniche contenute nella norma UNI EN 12591, in diverse gradazioni in funzione della prova di penetrazione.

Se il legante residuo consiste in un **bitume modificato** l'emulsione viene detta **MODIFICATA**. Si distinguono due tipologie di emulsioni modificate:

##### ■ emulsioni modificate monofase:

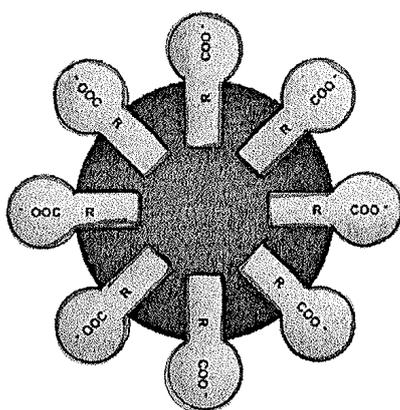
caratterizzate da un'unica fase dispersa di goccioline di **bitume modificato**; In questo caso l'emulsione si ricava a partire da un bitume modificato elastomerizzato (polimeri SBS, SB) oppure plastomerizzato (polimeri EVA).

##### ■ emulsioni modificate bifase:

caratterizzate da una fase dispersa costituita da **due tipi di goccioline** costituite rispettivamente da **bitume** e da **lattice di gomma naturale o sintetico**.

## EMULSIONI BITUMINOSE

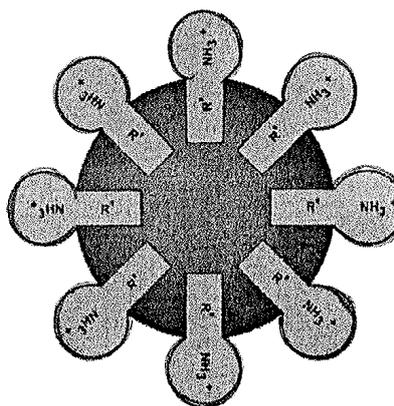
### Adesione legante-aggregato



Schema di emulsione anionica ( - )



Buona adesione con aggregati alcalini (calcarei) e scarsa adesione con aggregati acidi (silicei)



Schema di emulsione cationica ( + )



Buona adesione sia con aggregati alcalini (calcarei) che con aggregati acidi (silicei)

\* I fessati si possono riciclare a freddo. Vengono trattati come aggregati fino a formare una curva granulometrica e qst vengono poi miscelati con il bitume creando dei conglomerati bituminosi con buone prestazioni meccaniche.

## EMULSIONI BITUMINOSE

Applicazioni → tecnologie "a freddo"

- ① • Mani d'attacco (o di ancoraggio)
- ② • Trattamenti superficiali
- ③ • Micro-tappeti a freddo (slurry seal)
- ④ • Riciclaggio a freddo di conglomerati fresati
- ⑤ • Ripozzo di bache

① si vogliono impedire degli scollamenti relativi orizzontali e si vuole una buona distribuzione delle tensioni (carichi) applicate. Nell'incollaggio richiede la penetrazione dell'emulsione nel supporto e quindi voglio un'alta velocità di rotazione (altissimi e emulsione si rompe appena gettata)

② si eseguono sulle sup. servono per sigillare le fessure superficiali che però non devono compromettere l'adesione x ripristinare l'aderenza superficiale.

③ sono miscele bituminose fini x impermeabilizzare e rendere ruvido lo sup. (ricquistare l'aderenza). la miscelazione di emulsione e graniglie avviene prima.

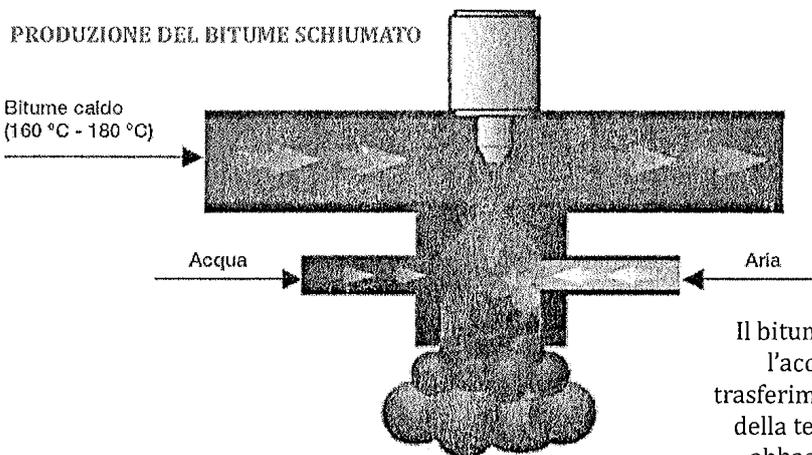
④ il problema è la gestione dei FRESATI. I conglomerati bituminosi rotati vanno FRESATI e sono così ridotti in frammenti. L'uso dei conglomerati fresati è quello di ripare i conglomerati bituminosi sostituendo gli aggregati veri. L'uso di qst conglomerati fresati deve essere limitato (<20%) per non pregiudicare le prestazioni.

### BITUME SCHIUMATO

È ottenuto miscelando il bitume portato ad elevata temperatura (160 - 180 °C) e per eliminare i fumi. \*  
 in un contenitore di calce con fumo. di  
 bolle di bitume

Allo stato schiumato (stato temporaneo di bassa viscosità) il bitume può essere mescolato con aggregati freddi e umidi ottenendo delle miscele bituminose stabilizzate a freddo.

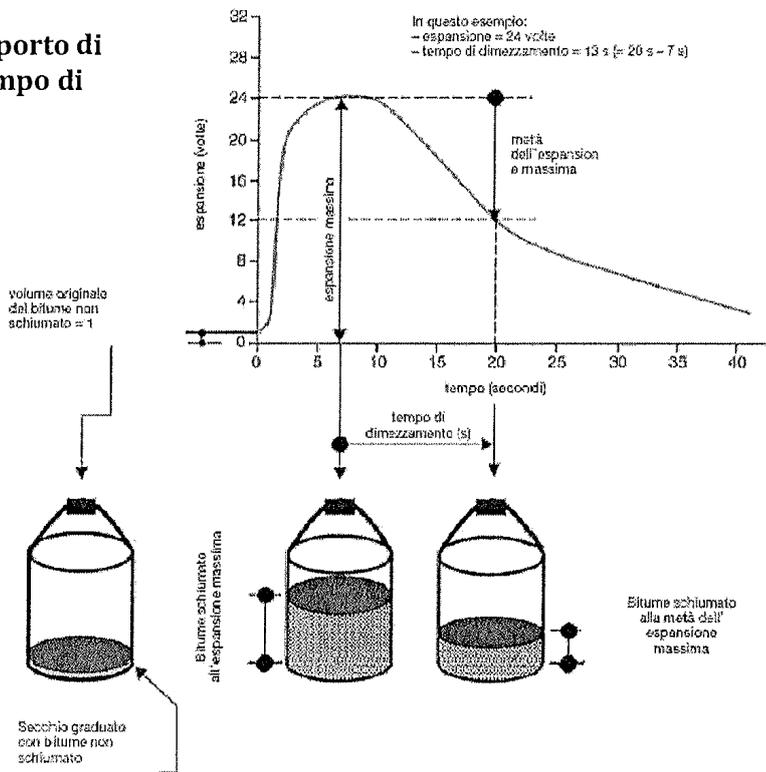
con il bitume schiumato si creano dei punti residui di bitume



Il bitume scambia energia con l'acqua con conseguente trasferimento del calore, aumento della temperatura dell'acqua e abbassamento di quella del bitume

## BITUME SCHIUMATO

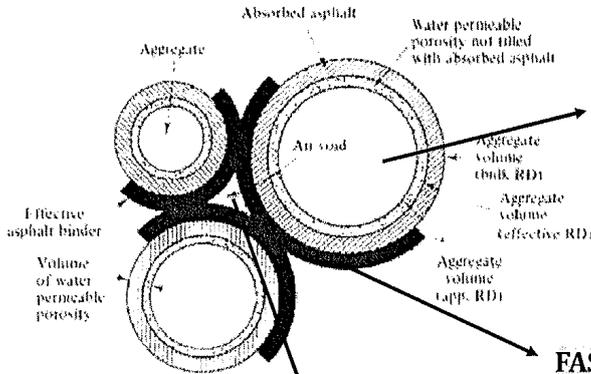
### Valutazione del rapporto di espansione e del tempo di dimezzamento



# RUOLO DEL BITUME NELLE MISCELE

## GENERALITA'

### CONGLOMERATI BITUMINOSI - Fasi costituenti



#### FASE SOLIDA

Gli aggregati lapidei costituiscono lo scheletro litico portante del conglomerato

#### FASE LEGANTE

Il mastice bituminoso (bitume + filler) fornisce coesione alla miscela dei granuli

#### FASE GASSOSA

La porosità consente, entro certi limiti, il verificarsi delle dilatazioni termiche del bitume

*SONO VUOTI RESIDUI, devono sempre essere presenti per consentire al bitume di espandersi senza fenomeni di risalita.*

*in ogni poro, una parte è accessibile all'acqua e al bitume.*

## GENERALITA'

### CONGLOMERATI BITUMINOSI - Prestazioni

*il conglomerato si deve comportare bene sotto l'azione dei carichi.*

Le prestazioni di una miscela bituminosa dipendono da

#### > materiali costituenti

*già fatti prima*

- legante (proprietà visco-elastiche)
- aggregati (proprietà fisico-meccaniche)
- affinità bitume-aggregato

QUALIFICAZIONE

#### > composizione

- granulometria
- contenuto di bitume

MIX DESIGN

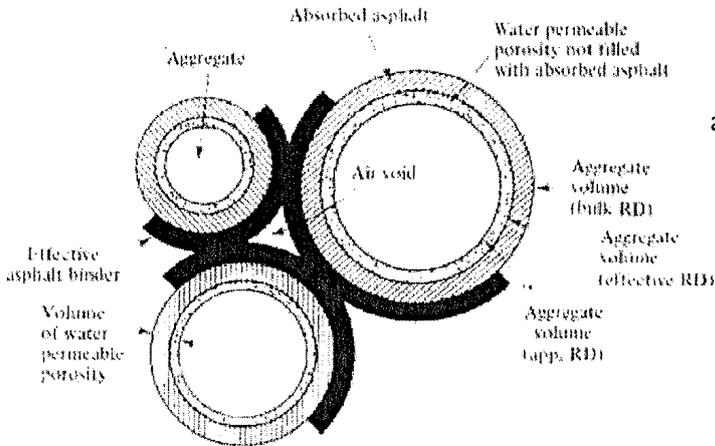
#### > proprietà volumetriche finali

- vuoti, VMA, VFA

COSTITUENTI  
COMPOSIZIONE MESSA IN  
OPERA

*↑  
devono essere volutate durante la messa in opera.*

## CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE



Il bitume, miscelandosi con gli aggregati, in parte forma una sottile pellicola che ricopre i granuli (**bitume efficace**) ed in parte riempie i pori presenti sulla loro superficie esterna (**bitume assorbito**)

**Bitume efficace** → svolge funzione legante e di coesione

**Bitume assorbito** → non fornisce alcun contributo

\* È la massa volumica del conglomerato bituminoso nel caso non ci siano vuoti. È una condiz. e cui il conglomerato bituminoso cui non arriverà mai, x questo si dice "TEORICA".

\* VMA intende i vuoti che si hanno nella miscela se non ci fosse il bitume.

## CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE

DIAGRAMMA DELLE FASI

- Massa volumica

$$MV = \frac{M}{V} [g/cm^3]$$

- Volume dei vuoti (porosità)

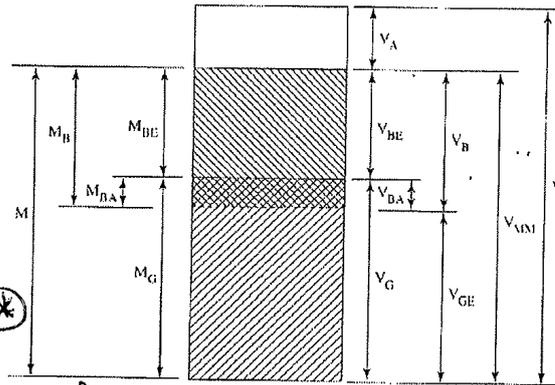
$$v = 100 \cdot \frac{V_A}{V} [%]$$

- Voids in Mineral Aggregates \*

$$VMA = 100 \cdot \frac{V_A + V_{BE}}{V} [%]$$

- Voids Filled with Asphalt \*

$$VFA = 100 \cdot \frac{V_{BE}}{V_{BE} + V_A} [%]$$



- Air (A) ARIA
- ▨ Asphalt binder (B) BITUME
- ▩ Aggregate (G) AGGREGATI
- ▧ BITUME ASSORBITO

VMM: volume miscela in assenza di vuoti

V: volume miscela + vuoti.

V<sub>BE</sub>: volume bitume efficace

Massima Massa Volumica Teorica

$$MMVT(TMD) = \frac{M}{V_G + V_{BE}} [g/cm^3]$$

Non dipende dal grado di compattazione

Dipendono dal grado di compattazione

\* Ci dice in che % i vuoti sono occupati da bitume o da aria. ci dice del grado di compattazione.

occupati l'idea

Vuoti nella miscela di aggregati ci dà l'idea dell'impermeabilità dello scheletro litico della miscela

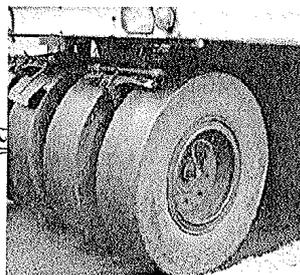
complemento al volume tot rispetto agli aggregati

## LAVORABILITA'

### COMPATTAZIONE

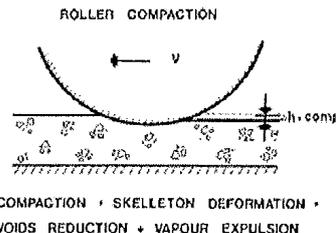
Una corretta procedura di addensamento consente di:

- prevenire fenomeni di compattazione differita → *ovale di post-compattazione.*
- assicurare adeguate caratteristiche meccaniche
- garantire impermeabilità all'acqua ← *l'acqua non si deve infiltrare → deve compattarsi bene gli strati*
- prevenire eccessiva ossidazione del legante bituminoso



L'attitudine alla messa in opera ed il grado di addensamento raggiungibile dipendono da numerosi fattori:

- proprietà della miscela (aggregati, granulometria, bitume)
  - temperatura ← *influenza le propr. reologiche dello miscelo*
  - spessore dello strato
  - mezzi d'opera
- Dato fore in modo che le caratteristiche dello miscelo mi dia una buona qualità, ma tutto messo in opera.*



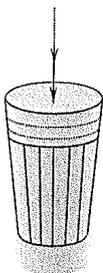
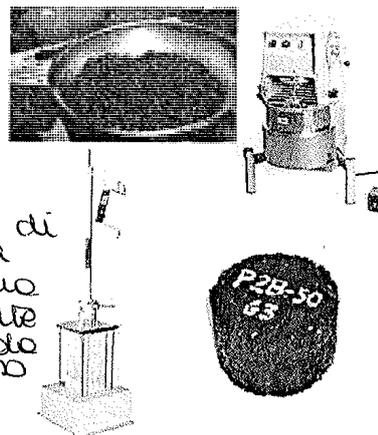
### CARATTERIZZAZIONE IN LABORATORIO

## LAVORABILITA'

### Tecnica di costipamento MARSHALL

La compattazione avviene entro uno stampo cilindrico per mezzo di un maglio battente lasciato cadere da un'altezza predefinita

- campioni cilindrici (D = 101,7 mm, h ≈ 63,5 mm)
- 50 colpi per lato



#### LIMITI

Il mutuo avvicinamento dei granuli avviene per azione unicamente verticale ed impulsiva (**non simulativa**)

Non è possibile controllare l'evoluzione del processo di addensamento (**lavorabilità**)

*non è simulativo di ciò che avviene in opera, dove ho una forza verticale agente che però agisce da un colpo.*

Bitume	Temperature di equiviscosità	
	miscelamento	costipamento
B 100/200	141 ± 5° C	131 ± 5° C
B 80/100	152 ± 5° C	142 ± 5° C
B 60/80	158 ± 5° C	148 ± 5° C
B 40/50	165 ± 5° C	155 ± 5° C

## CURVA DI COMPATTAZIONE

### LAVORABILITA'

#### Misura della lavorabilità (pre-requisito)

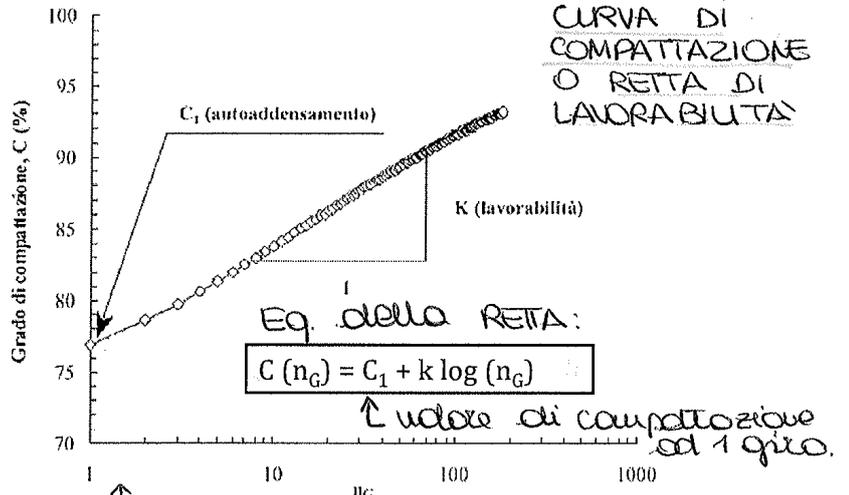
Durante la prova un sistema di acquisizione registra la variazione dell'altezza del provino al crescere del numero di giri

I dati elaborati consentono di determinare la retta di lavorabilità

**GRADO DI COMPATTAZIONE**  
 Complemento a 100 della % di vuoti =  $MV/MMVT$   
 $C(\%) = 100 \cdot (1 - v)$

**AUTOADDENSAMENTO**  
 Compattor che si raggiunge solo con il peso proprio.  $C_1 = C(n_G = 1)$

**LAVORABILITA'**  
 $k = \Delta C / \Delta \log(n)$   
 Gradiente di addensamento pendenza della retta interpolante



voglio arrivare ad un certo grado di addensamento con il minor n° di giri. Spesso si richiede che C1 non sia troppo eccessivo per non dare un k troppo piccolo.

I pts seguono un andamento ± rettilineo.

se C1 è troppo alto non si ha una buona ridistribuzione dei grani che invece è desiderato.

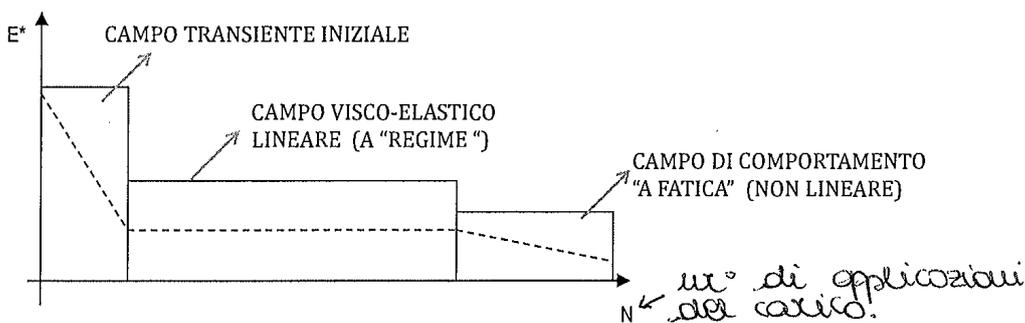
#### PROPRIETA' MECCANICHE - Rigidezza → influenza e l'attitudine della miscela a

Costituisce una proprietà fondamentale delle miscele bituminose e legata alla risposta tenso-deformativa sotto l'azione dei carichi esterni.

redistribuire i carichi su tutta lo strato sott.

**RIGIDEZZA** → dipende da:

- Temperatura
- Frequenza e/o tempi di carico
- Stato tensionale /livello deformativo (non linearità)

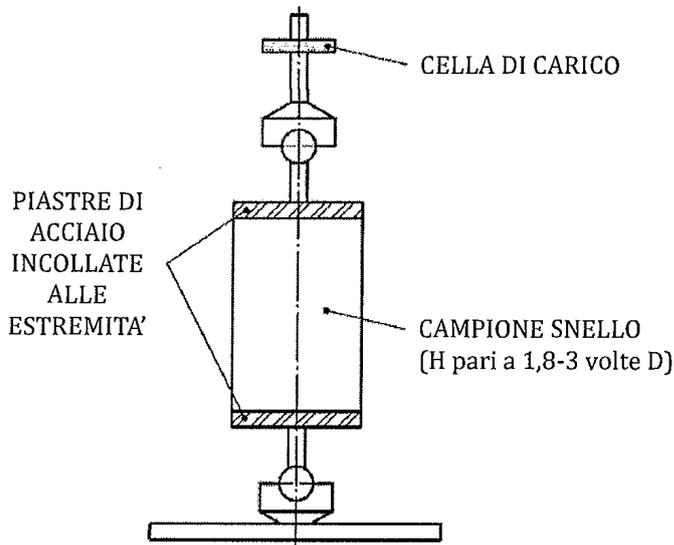


Schematizzazione della risposta meccanica dei conglomerati bituminosi al progredire delle sollecitazioni cicliche.

## PROPRIETA' MECCANICHE - Rigidezza

Prove dinamiche → configurazione monoassiale  
(EN 12697-26:2004 - Direct Tension Compression Test)

Si lavora con campione snello e prismatico di tipo sinusoidale.



$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t)$$

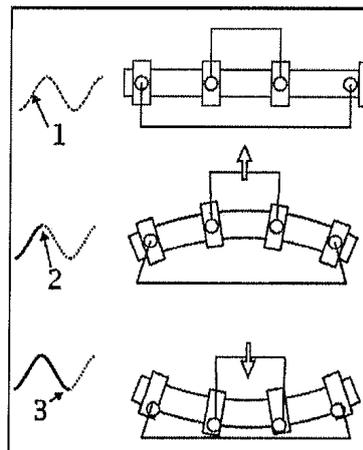
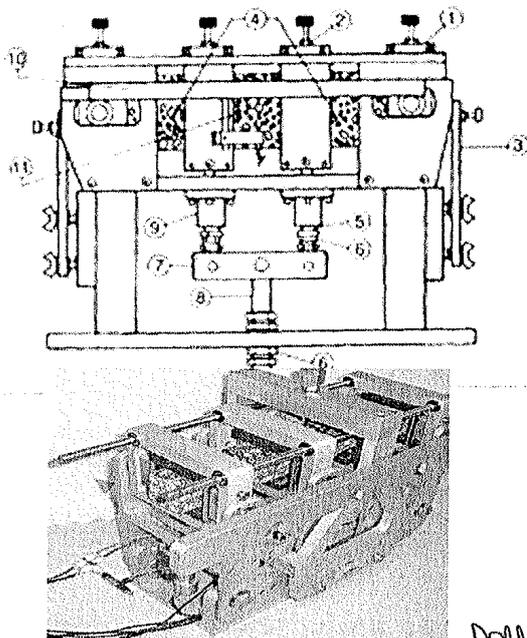
Si applica una deformazione assiale variabile con legge sinusoidale ( $\varepsilon_0 < 25 \cdot 10^{-6}$ )

per evitare che vengano danneggiati i materiali

## PROPRIETA' MECCANICHE - Rigidezza

Prove dinamiche → configurazione di flessione su quattro punti  
(EN 12697-26:2004 - Four Point Bending Test)

Le prove vengono eseguite su travi prismatiche



I morsetti di estremità rimangono fissi mentre quelli centrali si spostano verticalmente con legge armonica

La sollecitazione è armonica e si inflette il prisma lungo le due direzioni.

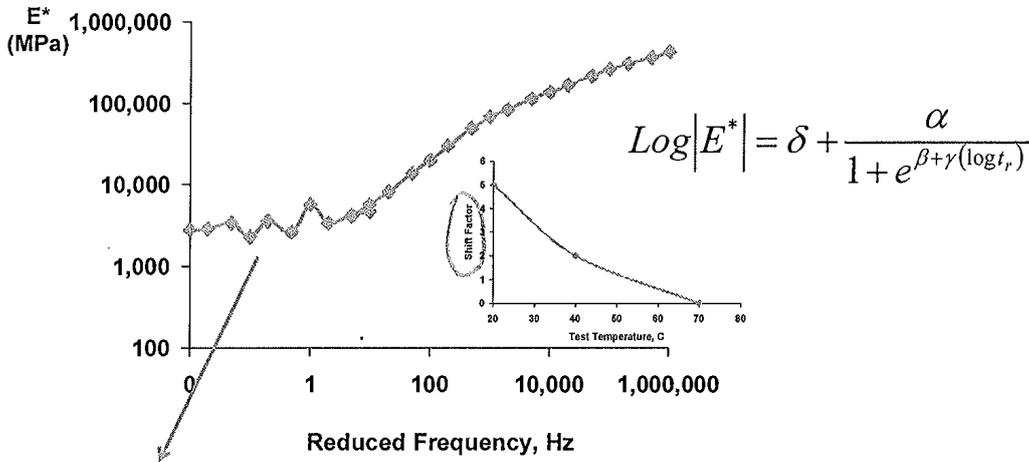
MODULO COMPLESSO

$$E^* = \frac{23 \cdot PL^3}{108bh^3\delta}$$

Dalle letture delle deformazioni e sollecitazioni imposte si può risalire al valore del modulo complesso,  $E^*$ .

## PROPRIETA' MECCANICHE - Rigidezza

Modulo complesso → curve maestre



La curva non presenta asintoto obliquo → contributo dello scheletro litico

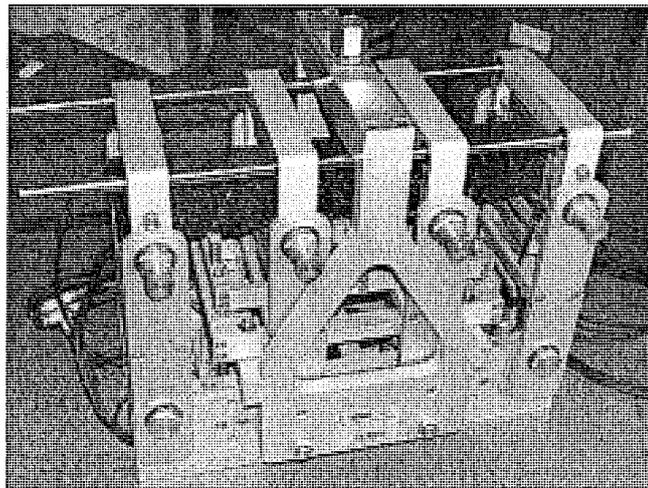
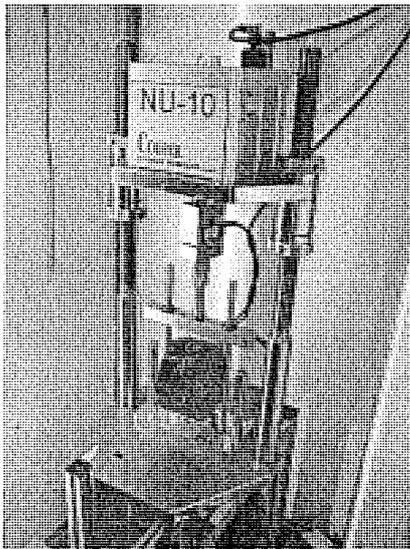
variando frequenza e temperatura ottenp delle curve di risposta diverse tra loro.

Per le alte frequenze si intuisce che  $E^*$  tende al modulo elastico. And ↓ le frequenze, influisce molto anche lo scheletro litico che ha un comportamento elastico.

## PROPRIETA' MECCANICHE - Resistenza a fatica

Comunemente le prove di fatica vengono eseguite utilizzando le medesime configurazioni di prova utilizzate per la misura della rigidezza

→ si porta il provino a rottura.



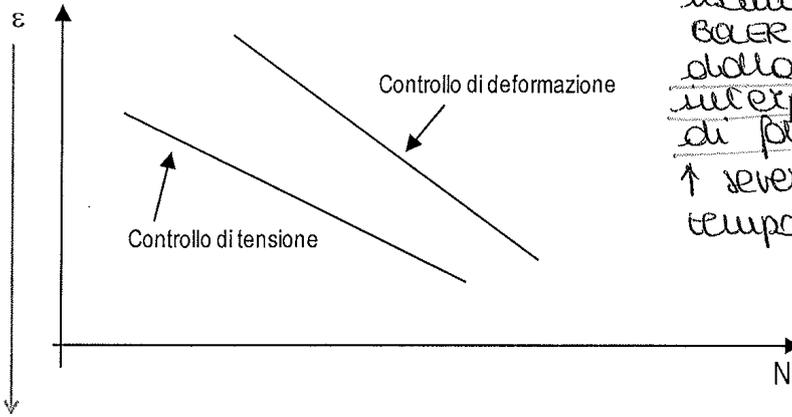
Applicati i carichi x pochi cicli ottenp il modello elastico, se applicati più volte ottenp la rottura del provino.

Normativa di riferimento  
EN 12697-24:2005

PROVE DI FATICA  
COME RICAVO  
LE CURVE

## PROPRIETA' MECCANICHE - Resistenza a fatica

Sperimentalmente si osserva una maggiore resistenza a fatica delle miscele operando in controllo di deformazione anziché di tensione



le curve di resp. che si usano, sono le curve di BAUER. I p.t. ottenuti dallo prova si possono interpolare con la retta di fatica.  
 ↑ severità di imposto ↓ tempo

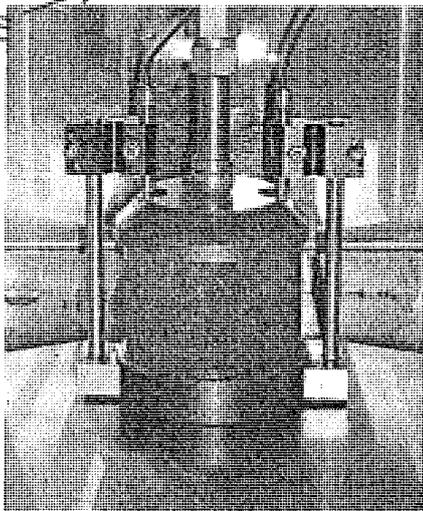
NB. Il parametro che controlla la durata a fatica è la deformazione iniziale indipendentemente dal fatto che si operi in controllo di tensione o deformazione

In opera il meccanismo di slittamento avviene in modo simile allo prova di controllo di tensione, qual lo spessore dello spessore della pavimentaz. è elevato, se lo pavimento è sottile o prova controllo di deformazione.

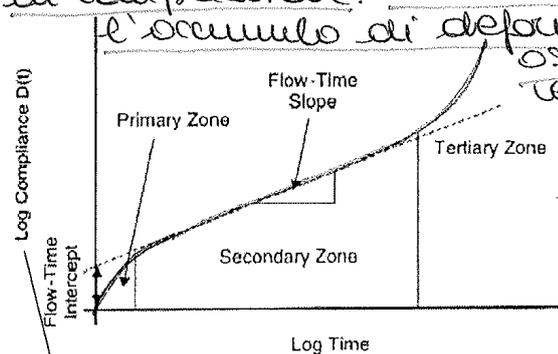
## PROPRIETA' MECCANICHE - Deformazioni permanenti

Prova di creep (prova a carico costante) è una semplice prova di compressione. si misura l'accumulo di deformazione.

DEFORMAZIONE VISCOSA



Configurazione assiale senza confinamento laterale



ossia, se temperatura di prova sia tra 40 e 60°C.

Evoluzione del creep nel tempo tensione applicata

$J(t) = \epsilon(t) / \sigma_0 \rightarrow$  Deformabilità (inverso della rigidità).

nel grafico dove ho curvatura, ho un comportamento viscoso (comportamento viscoso come le molle che si allungano). la retta è ricambiata = cioè a fenomeni di flusso, la zona critica è quella in cui dopo il flusso vengono mobilitati gli aggregati e si ha perdita di stabilità. le miscele devono avere un basso valore di creep in 2 e 3 dove essere costante.

## PROPRIETA' MECCANICHE - Deformazioni permanenti

### Prova di compressione ciclica monoassiale (EN 12697-25:2005 - Uniaxial Cyclic Compression Test)

Condizioni di prova

↳ valore del carico max + rettangolo di carico.

➤ Tensione applicata = 100 kPa

➤ Numero di cicli di carico = 3600 (2 h)

Parametri di misura

$$\varepsilon_n = 100 \cdot \left( \frac{h_0 - h_n}{h_0} \right) \rightarrow \text{Deformazione permanente cumulata dopo } n \text{ cicli}$$

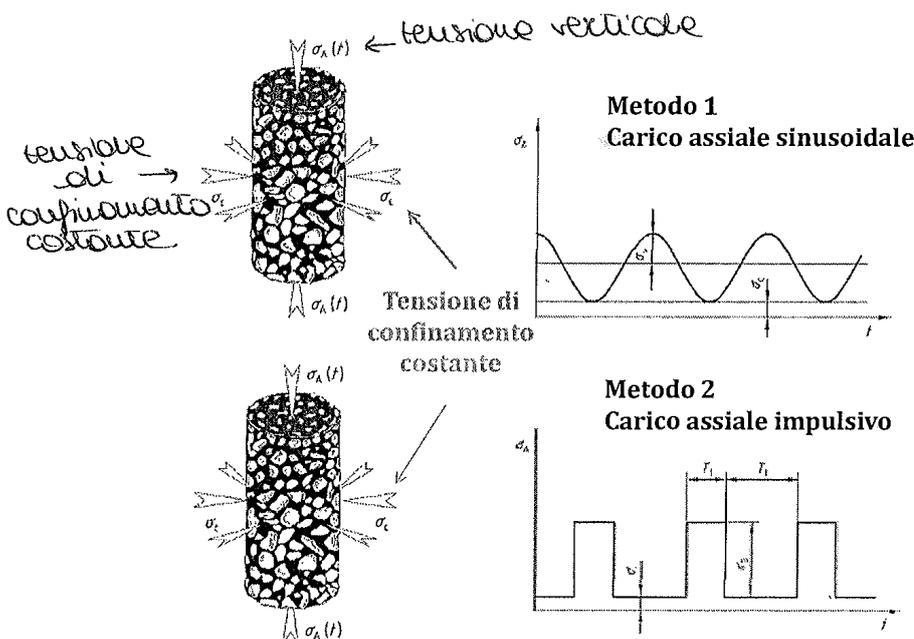
$$f_c = \frac{\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}}{n_1 - n_2} \rightarrow \text{Gradiente di creep (Creep Rate)}$$

↳ incremento di deformazione.  
↳ incremento n° di cicli

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} \cdot 1000 \rightarrow \text{Modulo di creep dopo } n \text{ cicli}$$

## PROPRIETA' MECCANICHE - Deformazioni permanenti

### Prova di compressione ciclica triassiale (EN 12697-25:2005 - Triaxial Cyclic Compression Test)



Analisi della parte lineare della curva di creep

$$\varepsilon_n = A_1 + B_1 \cdot n \leftarrow \text{deformaz. con legge lineare}$$

$$f_c = B_1 \cdot 10^4$$

↳ Creep Rate  $\rightarrow$  serve a discriminare delle miscele differenti.

## PROPRIETA' MECCANICHE - Resistenza a trazione indiretta

Permette di ricavare un parametro di resistenza a rottura

Viene utilizzata per:

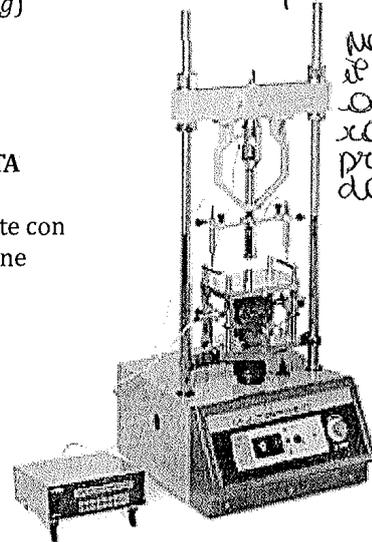
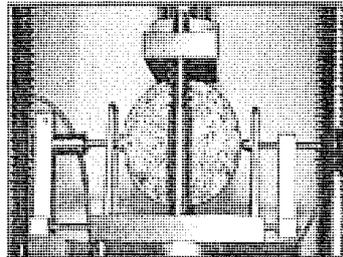
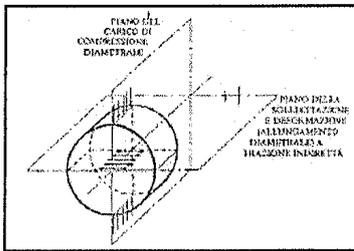
- Controllo in fase di mix design e/o costruzione
- Resistenza a trazione alle basse temperature (*thermal cracking*)
- Durabilità all'acqua (*metodo Root-Tunnicliff*)

comprime cilindrico caricato sul diametro verticale. la distrib. delle sollecitazioni lungo l'asse verticale è pressoché uniforme

$$RTI = \sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t}$$

### RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA

Il carico viene applicato monotonicamente con una predefinita velocità di deformazione



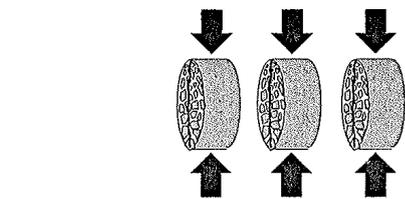
non sempre il campione arriva a rottura come previsto dallo teorico.

## PROPRIETA' MECCANICHE - Resistenza a trazione indiretta

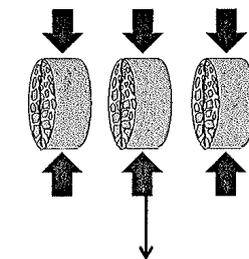
### Metodo Root-Tunnicliff (AASHTO T 283)

Si preparano 6 campioni con %v = 6-8%

per avere dei pori in cui si infiltrerà l'acqua.



veggono sottoposti a trazione senza

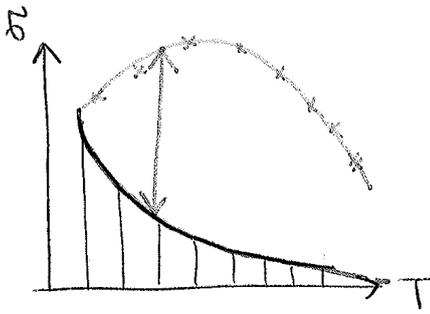


Saturazione e immersione in acqua a 60°C per 24 h (RT2)

Resistenza residua

$$ITSR = \frac{RT_2}{RT_1}$$

è acqua sfoglie gli aggregati e la resistenza a trazione diretta è inferiore rispetto a quella dei prassi non condiz.



A T fornito uno stesso peso di trazione, ottenuto una resistenza  $\sigma T$ .  
Alle varie temperature posso ricavare la RISERVA DI RESISTENZA che è la differenza tra le due curve che si annulla quando avviene la rottura.

La velocità di elongazione influisce sui risultati della prova a trazione. La velocità di elongazione si deve correlare con la velocità di raffreddamento in base al principio di equivalenza temp-temperatura.

## MIX DESIGN – Metodo Marshall

### Curva di progetto

La miscela degli aggregati deve rispettare predefiniti limiti granulometrici

#### Conglomerati tradizionali (CIRS)

**Tabella 4.6**

Serie crivelli e setacci UNI	Base	Binder	Usura		
			A	B	C
Crivello 40	100	-	-	-	-
Crivello 30	80-100	-	-	-	-
Crivello 25	70-95	100	100	-	-
Crivello 15	45-70	65-85	90-100	100	-
Crivello 10	35-60	55-75	70-90	70-90	100
Crivello 5	25-50	35-55	40-55	40-55	45-65
Setaccio 2	20-35	25-38	25-38	25-38	28-45
Setaccio 0,4	6-20	10-30	11-20	11-20	13-25
Setaccio 0,15	4-14	3-15	6-15	6-15	8-15
Setaccio 0,075	4-8	4-8	6-10	6-10	6-10
% di bitume	4,0-5,0	4,5-5,5	4,8-5,8	5,0-6,0	5,2-6,2

Per i tappeti di usura il fuso A è da impiegare per spessori superiori a 4 cm, il fuso B per spessori di 3 - 4 cm, il fuso C per spessori inferiori a 3 cm.

*la curva granulometrica deve rientrare nel fuso granulometrico.*

#### Miscele drenanti (CIRS)

**Tabella 6.5.1**

Serie crivelli e setacci UNI	%Passanti
Crivello 20	100
Crivello 15	80-100
Crivello 10	20-40
Crivello 5	15-25
Setaccio 2	10-20
Setaccio 0,4	8-12
Setaccio 0,15	7-10
Setaccio 0,075	5-7

#### Curva discontinua

(in questo caso i campioni Marshall vengono costipati con un numero inferiore di colpi, in genere 50)

## MIX DESIGN – Metodo Marshall

### Curva di progetto

Le frazioni a disposizione devono essere dosate per ottenere la curva di progetto

