



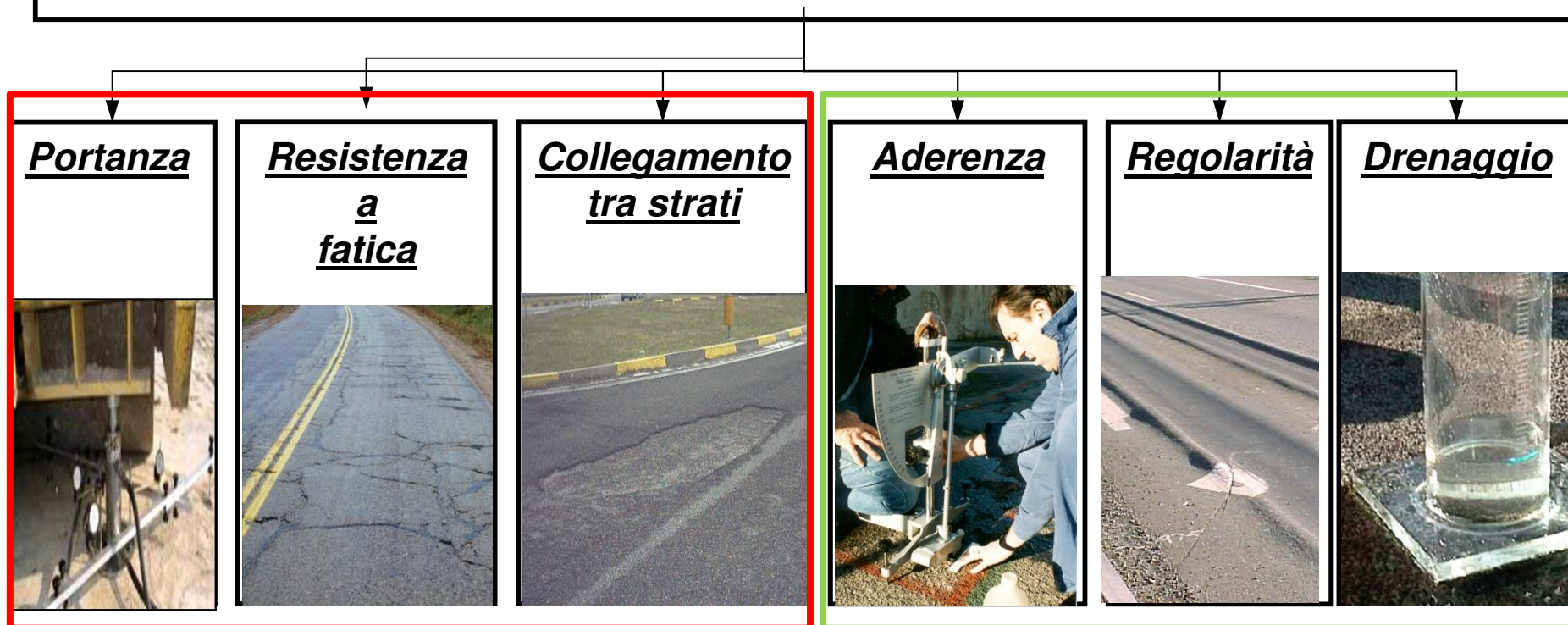
# COSTRUZIONE DI STRADE

## Caratteristiche strutturali e funzionali di una pavimentazione stradale



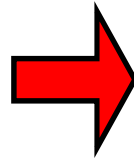
# INTRODUZIONE

## CARATTERISTICHE FUNZIONALI E STRUTTURALI DI UNA PAVIMENTAZIONE



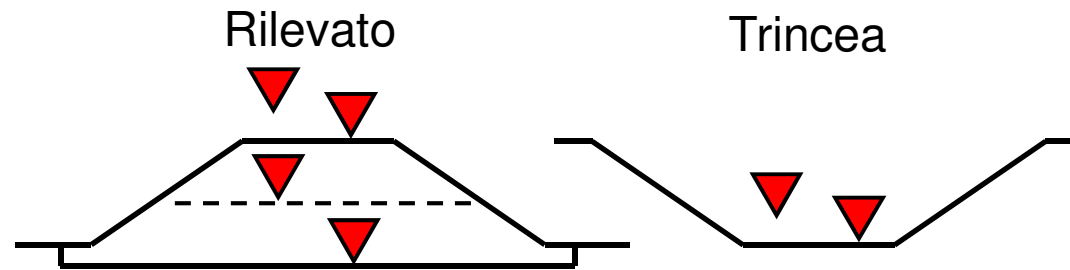
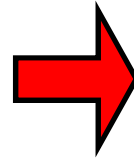
# PORTANZA

## Definizione

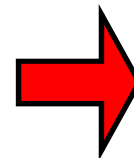


Carico specifico, ricavabile con un dato tipo di prova e con modalità ben definite, che provoca un prestabilito cedimento.

## Punti di prova

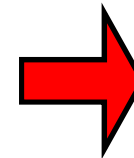


## Perché si misura



Per garantire sufficienti caratteristiche di resistenza e stabilità del terreno nei confronti dei carichi che lo interesseranno.

## Prove



- Trave di Benkelman
- Falling Weight Deflectometer (FWD)
- Plate Loading Test (PLT)

# PORTANZA

Per rilevare la **portanza di una pavimentazione** si possono utilizzare tecniche manuali o ad alto rendimento.

Al primo gruppo appartengono:

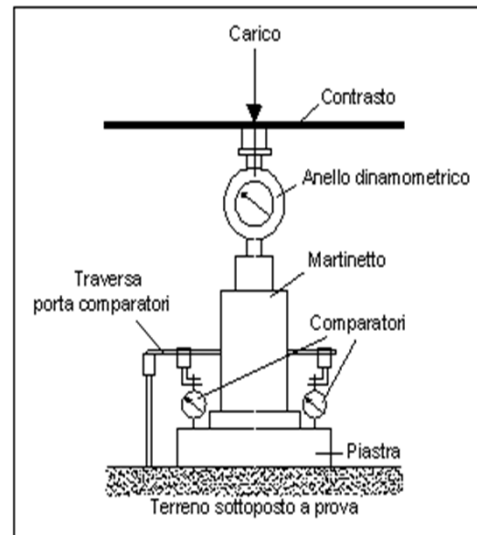
- la trave di Benkelmann
- la prova CBR;
- la prova di carico con pastra;
- il Light Falling Weight Deflectometer.

Al secondo gruppo, invece, appartiene il Falling Weight Deflectometer.

## PORTANZA: PROVA DI CARICO CON PIASTRA (PLT)

**B.U. CNR n. 146/1992**

La **prova di carico con piastra** consiste nel caricare una piastra circolare con un martinetto idraulico imprimendo delle pressioni predefinite e misurando i conseguenti cedimenti per mezzo di comparatori centesimali (posti lungo una circonferenza ad equidistanza angolare di  $120^\circ$  tra loro).



## PORTANZA: PROVA DI CARICO CON PIASTRA (PLT)

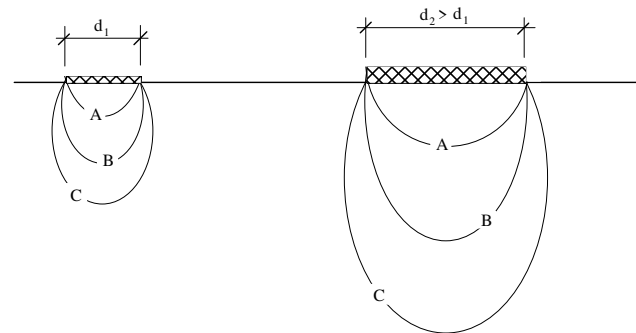
Il **diametro della piastra** è generalmente pari a 300 mm per strade ordinarie e 760 mm per sovrastrutture aeroportuali.

È un dato da scegliere con estrema attenzione perché influenza significativamente il risultato della prova in quanto è funzione:

- del tipo di materiale da testare: per evitare l'effetto scala le norme CNR stabiliscono che tra il diametro della piastra ( $D$ ) e la dimensione massima dell'aggregato da testare ( $d$ ) deve sussistere la relazione:

$$D \geq 3d$$

- della profondità degli strati da indagare: maggiore è il diametro della piastra, maggiore è il bulbo delle tensioni prodotto, maggiore è la profondità di prova.



## PORTANZA: PROVA DI CARICO CON PIASTRA (PLT)

Da una PLT è possibile determinare il **modulo di deformazione**:

$$M_d = D \frac{\Delta p}{\Delta w}$$

con:

D = diametro della piastra;

$\Delta p$  = incremento di tensione = 0.1 MPa;

$\Delta w$  = incremento di cedimento corrispondente (valore medio delle letture dei comparatori).

**$M_d$**  non è un modulo elastico, ma di **deformazione**.



## PORTANZA: PROVA DI CARICO CON PIASTRA (PLT)

I **valori di  $\Delta p$**  specificati dalle norme sono:

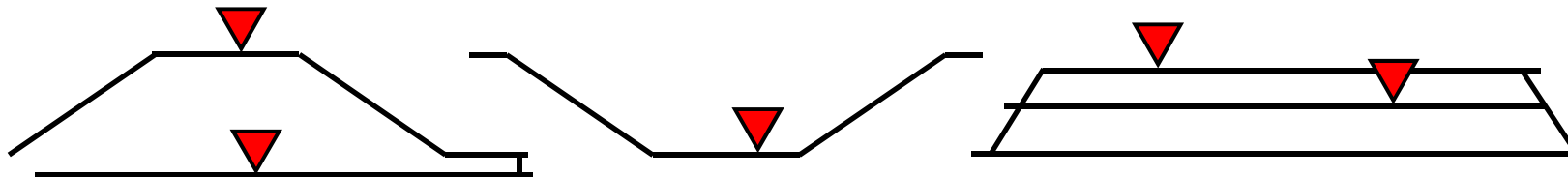
Sottofondo:  $\Delta p = 0.05 - 0.15$  MPa;

Rilevato:  $\Delta p = 0.05 - 0.15$  MPa;

Fondazione:  $\Delta p = 0.15 - 0.25$  MPa;

Base:  $\Delta p = 0.25 - 0.35$  MPa.

$$M_d = D \frac{\Delta p}{\Delta w}$$



L'**incremento di carico** viene dato per passi successivi di 0.05 MPa per quanto attiene il sottofondo e il rilevato, e di 0.1 MPa per i rimanenti strati.

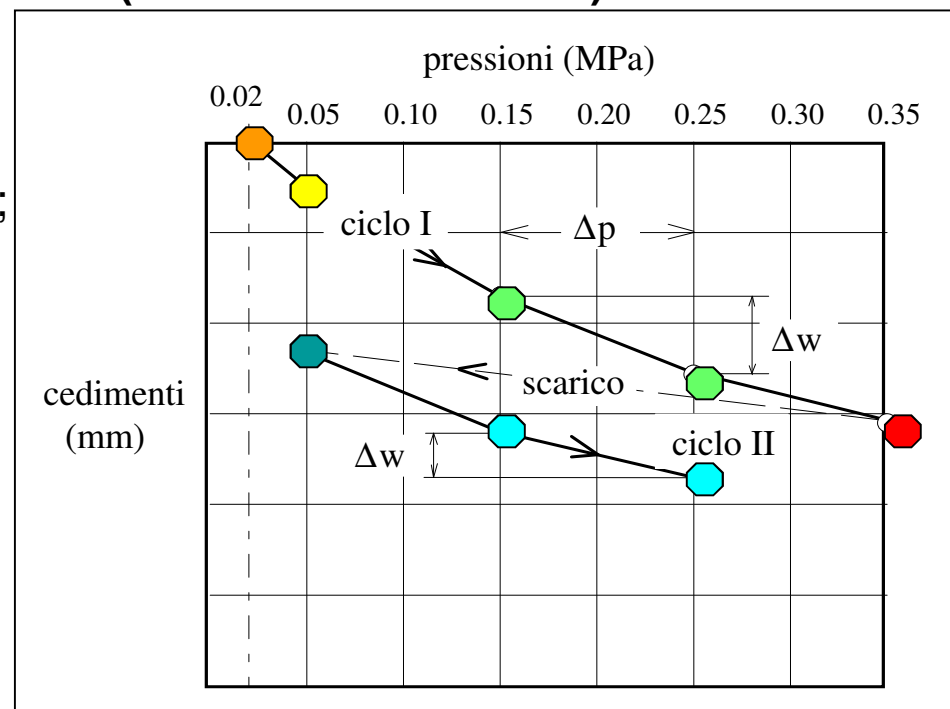
Il **precarico** viene stabilito per tutti gli strati in 0.02 MPa per garantire l'assestamento.



## PORTANZA: PROVA DI CARICO CON PIASTRA (PLT)

### PROVA DI CARICO A DOPPIO CICLO (strato di fondazione)

- Si applica un precarico di assestamento  $P_0 = 0.02$  MPa;
- Si applica il carico  $P_1 = 0.05$  MPa;
- Si incrementa il carico per passi successivi di 0.1 MPa;
- Si prosegue fino a  $P_2 = 0.35$  MPa, al fine di esaltare l'addensamento iniziale;
- Si scarica fino a  $P_3 = 0.05$  MPa;
- Si applica un secondo ciclo di carico con le stesse modalità;



Il risultato è soddisfacente se:  $k = \frac{M_d(I^\circ)}{M_d(II^\circ)} \leq 1$

Se  $M_d(II^\circ) \gg M_d(I^\circ)$ , il primo ciclo di carico ha addensato il terreno, che non era sufficientemente compattato.

## PORTANZA: PROVA DI CARICO CON PIASTRA (PLT)

Nonostante la notevole diffusione di tale prova, legata alla sua affidabilità esecutiva, essa soffre di alcuni **svantaggi** quali:

- è basata su un'applicazione di carico statica, che non riproduce le reali modalità con cui i carichi di traffico interessano le pavimentazioni;
- è prova lenta a causa della grande precisione richiesta nel posizionamento della piastra e nelle modalità d'esecuzione previste dalla Normativa secondo le quali, prima di applicare un nuovo intervallo di carico, è necessario attendere che i comparatori si siano assestati su un valore costante del cedimento;
- richiede l'impiego di un contrasto per l'applicazione del carico quale, in genere, un mezzo di cantiere che in tale modo non risulta più disponibile per altre lavorazioni.
- la necessità di un contrasto fa sì che la prova non sia sempre praticabile in siti di scarsa accessibilità.

Queste limitazioni hanno incoraggiato lo sviluppo di nuovi strumenti in grado di valutare la portanza dei materiali con maggior rapidità e funzionalità.

## PORTANZA: LIGHT FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (LWD) O PIASTRA DINAMICA



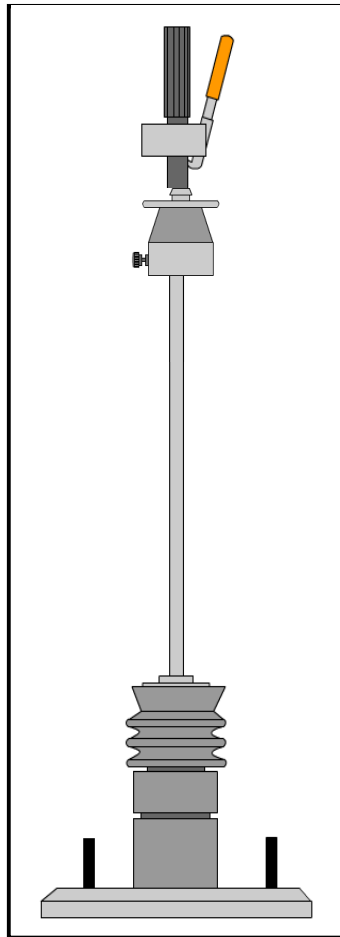
Misura il **Modulo di Deformazione dinamico**.

Una massa battente da 10 o 15 kg cade su una piastra di acciaio circolare di diametro 30 cm. Un accelerometro misura l'abbassamento della piastra.

Rapida e semplice da interpretare.

Non idonea per spessori elevati.

# PORTANZA: LIGHT FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (LWD) O PIASTRA DINAMICA



*massa battente*

*asta di guida*

*centralina stampante*

*accelerometro*

*piastra di carico*



Rilascio massa battente

Cedimento



Tensione sul terreno

Modulo dinamico di deformazione

## PORTANZA: TRAVE DI BENKELMAN

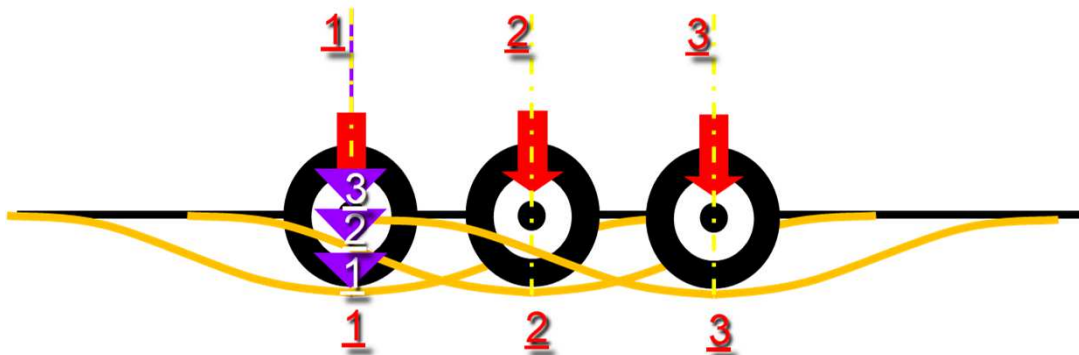
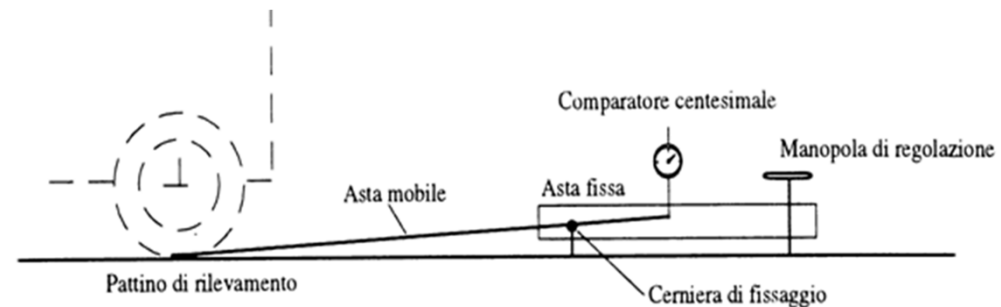
### B.U. CNR n. 141/1992

La **trave di Benkelmann** misura la portanza in termini di deflessione subita dalla pavimentazione fra i pneumatici di una coppia di ruote gemellate di un autocarro di cui sono noti il carico applicato alla coppia di ruote (50 kN) e la pressione di gonfiaggio (0.70 MPa).



## PORTANZA: TRAVE DI BENKELMAN

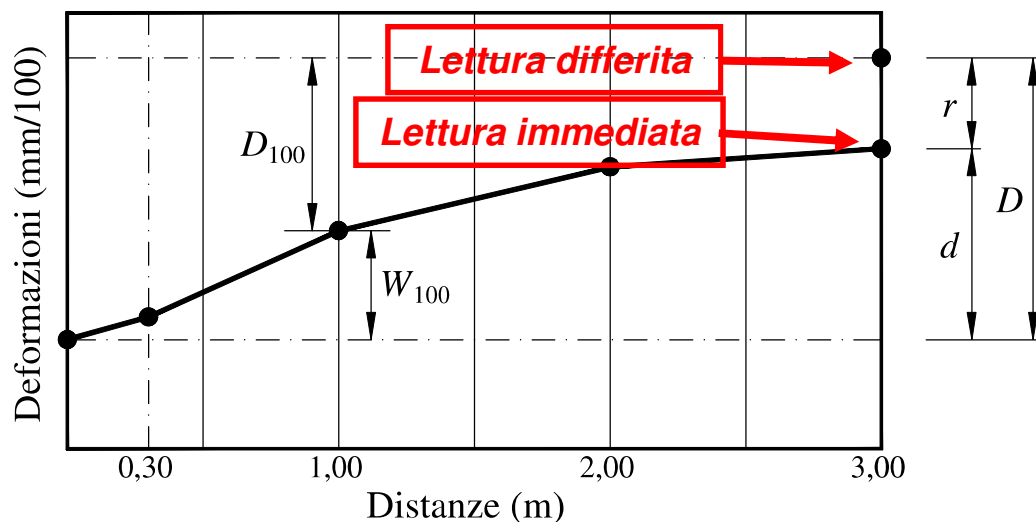
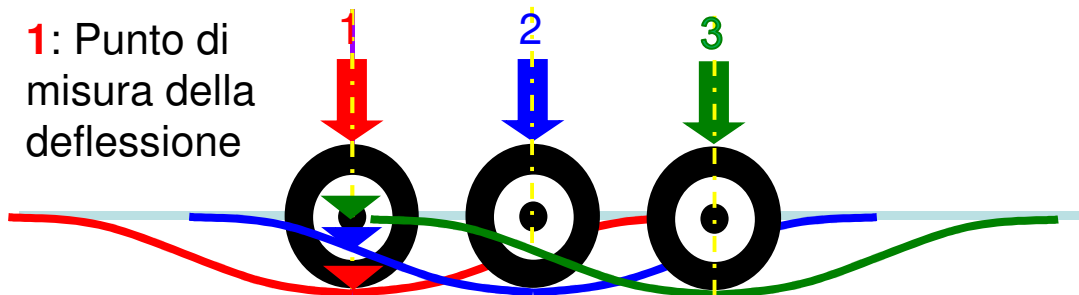
La **trave di Benkelmann** è formata da una parte fissa su due appoggi ed una mobile incernierata ad un'estremità della prima, che trasmette lo spostamento ad un comparatore centesimale. Inizialmente si dispone il veicolo con le ruote gemellate in corrispondenza del punto in esame su cui viene posizionata l'estremità libera della trave. Si sposta quindi il veicolo e si effettuano letture a diverse distanze, rilevando le deflessioni subite e ricavando il bacino di deflessione.



## PORTANZA: TRAVE DI BENKELMAN

### RILIEVO DELLA DEFLESSIONE DELLA SOVRASTRUTTURA PER EFFETTO DELLA APPLICAZIONE DI UN CARICO

1: Punto di misura della deflessione



deflettogramma per diverse posizioni del carico

Si allontana il veicolo e, a distanze crescenti, si effettuano la:

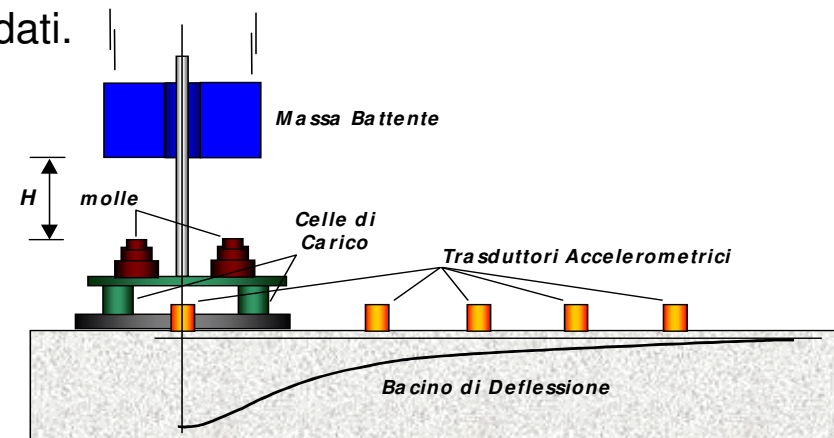
- lettura immediata → **deflessione elastica istantanea**
- lettura differita → **deflessione restituita totale** (completato il ritorno viscoso)

Deflessione (mm)	Portanza	Strada a traffico
< 0.50	ottima	molto intenso
0.50÷ 0.60	buona	intenso
0.60÷0.70	mediocre	medio
0.70÷0.80	scarsa	modesto
> 0.80	molto scarsa	molto modesto

## ASTM D 4694, ASTM D 4695

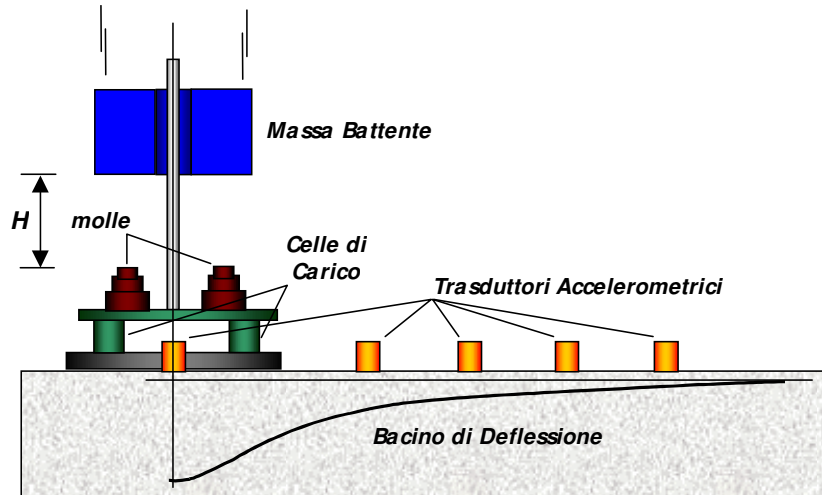
Il **Falling Weight Deflectometer** è un deflettometro dinamico a massa battente in grado di simulare le condizioni reali di sollecitazione indotte dai veicoli pesanti. È montato su un carrello ad asse unico ed è costituito:

- da una massa che cade su una piattaforma connessa con il piatto base per mezzo di molle, le quali hanno la funzione di rendere dinamica la sollecitazione applicata alla pavimentazione e sono dotate di una costante tale da determinare impulsi caratterizzati da frequenze corrispondenti al passaggio di un veicolo alla velocità di 50-75 km/h;
- da una serie di geofoni posti nel punto di applicazione del carico ed a distanza crescente dal punto dell'impatto;
- dalle unità di manovra ed acquisizione dati.



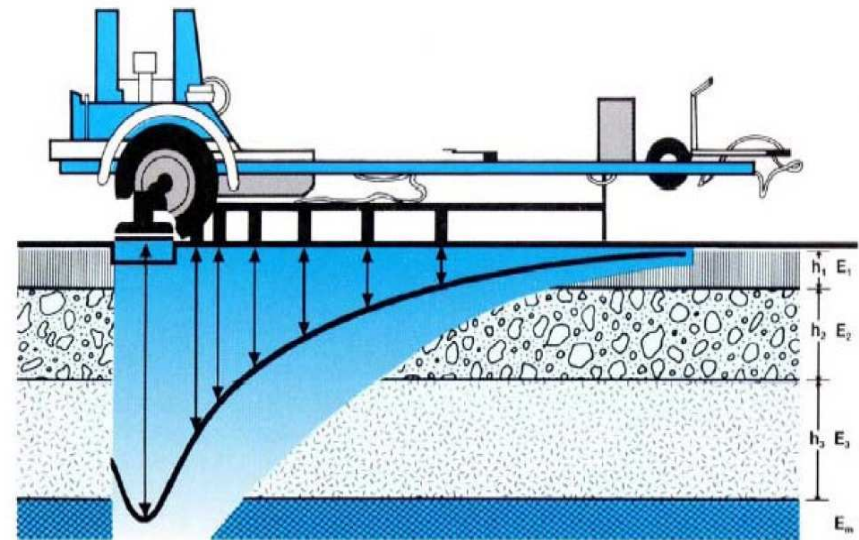
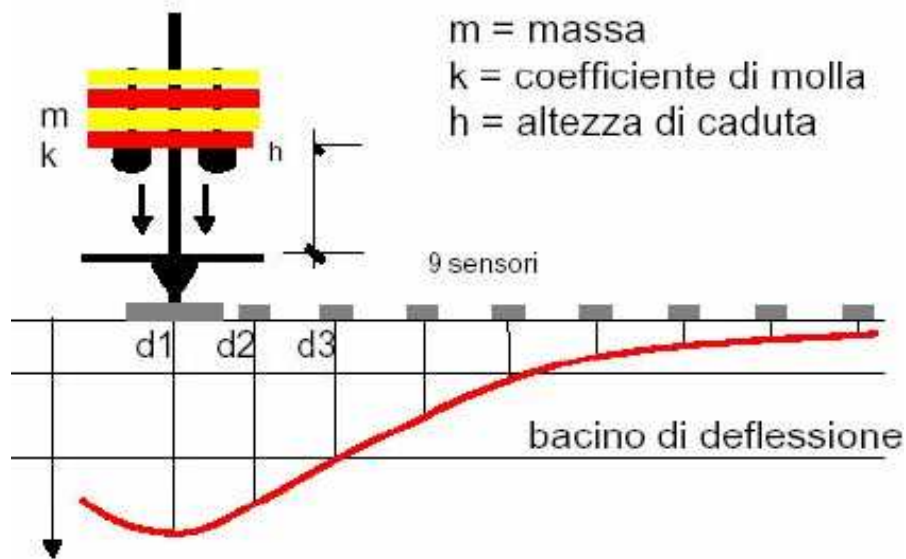


# PORTANZA: FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)



## PORTANZA: FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

Dopo aver posizionato l'apparecchiatura sul punto di prova si lascia cadere la massa variabile (da 1 a 3 kN) da un'altezza prestabilita (da 10 a 40 cm) provocando una sollecitazione di tipo sinusoidale. Le misure di deflessione misurate vengono elaborate con apposita procedura di back analysis, la quale consente di determinare il valore del **modulo elastico dinamico** dei materiali dei diversi strati della pavimentazione attraverso un algoritmo di ottimizzazione di tipo iterativo, il quale ricerca quei valori dei moduli che producono deformazioni calcolate quanto più prossime a quelle rilevate.



## PORTANZA: FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

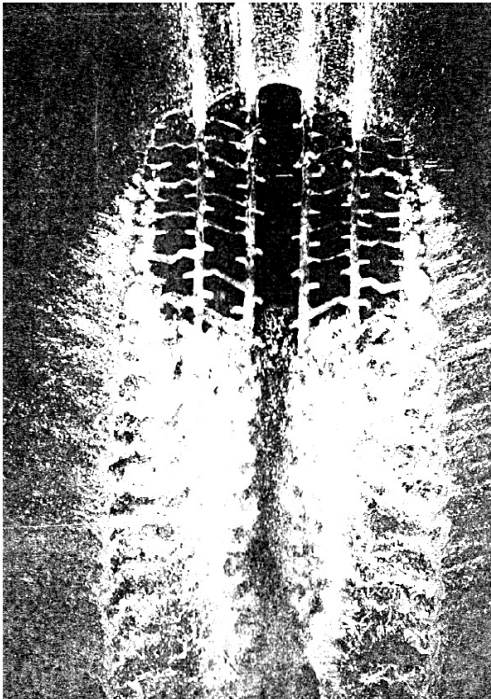
Vari rilevamenti effettuati su strade statali e provinciali, con pavimentazioni in opera da lungo tempo, hanno dimostrato che i *moduli dinamici dei conglomerati bituminosi*, a seconda delle *condizioni superficiali* rilevate visivamente possono assumere i seguenti valori:

assenza di lesioni	$E_d = 4000 \div 8000 \text{ MPa}$
poche lesioni	$E_d = 2000 \div 4000 \text{ MPa}$
molte lesioni	$E_d = 500 \div 2000 \text{ MPa}$



## ADERENZA

Il fenomeno dell'**aderenza** avviene **al contatto tra pavimentazione e pneumatico**. L'aderenza è quel fenomeno che permette al pneumatico di trasmettere alla pavimentazione le forze di trazione – frenatura e di guida.



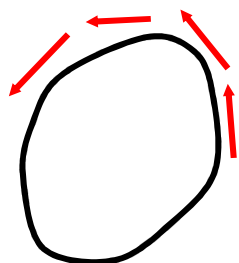
Le caratteristiche di aderenza dipendono da:

- velocità del mezzo;
- caratteristiche dei pneumatici;
- caratteristiche del manto superficiale;
- condizioni ambientali.

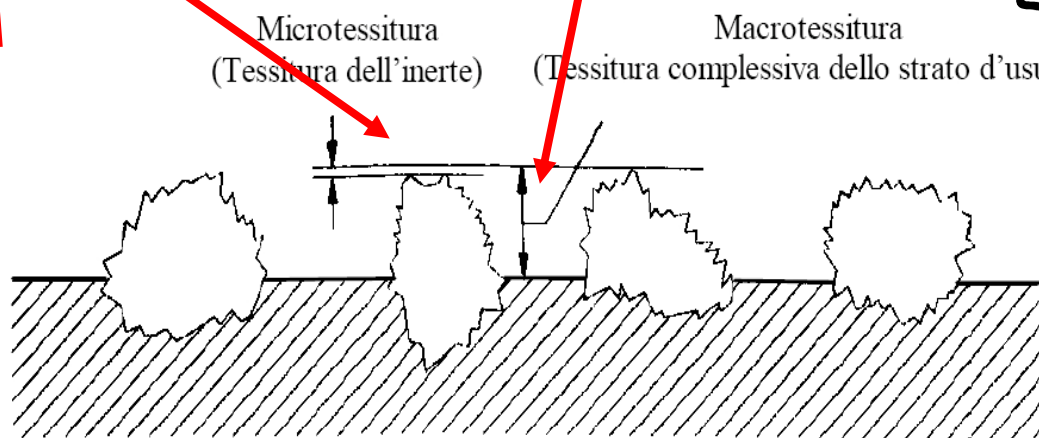
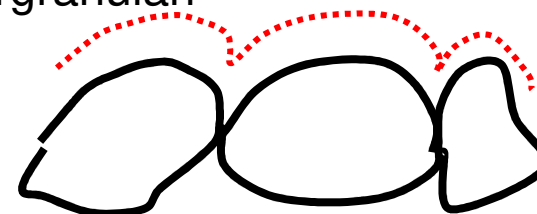
## ADERENZA

Dal punto di vista delle pavimentazioni, i fattori che creano una buona aderenza sono legati alla **rugosità superficiale** del piano viabile.

**MICRORUGOSITA'**  
scabrezza dei singoli  
elementi lapidei



**MACRORUGOSITA'**  
insieme delle asperità  
superficiali intergranulari



## ADERENZA

Le tecniche manuali per la misura dell'aderenza comunemente utilizzate sono:

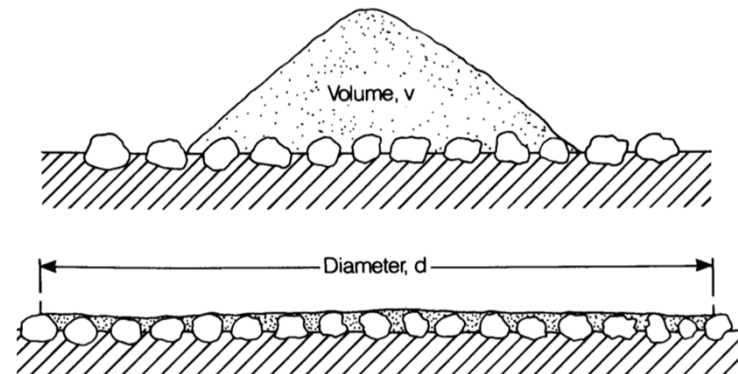
- tecnica volumetrica ad impronta;
- metodo del pendolo.

Lo strumento ad alto rendimento più diffuso, invece, è il veicolo SCRIM.

## ADERENZA: SISTEMA DELL'ALTEZZA DI SABBIA (HS)

Il **sistema dell'altezza di sabbia** per la valutazione della macrorugosità, si svolge stendendo accuratamente e rasando un determinato volume di sabbia sulla superficie della pavimentazione in modo da interessare un'area di forma circolare. Il rapporto tra il volume della sabbia e l'area ricoperta rappresenta il valore medio dell'altezza delle asperità superficiali ed è espresso convenzionalmente come altezza media di sabbia (HS) della pavimentazione.

La prova, di tipo puntuale, si effettua in alcuni minuti con una modesta apparecchiatura ma richiede l'interruzione o la limitazione del traffico.



## ADERENZA: SISTEMA DELL'ALTEZZA DI SABBIA (HS)



$$HS = \frac{V}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

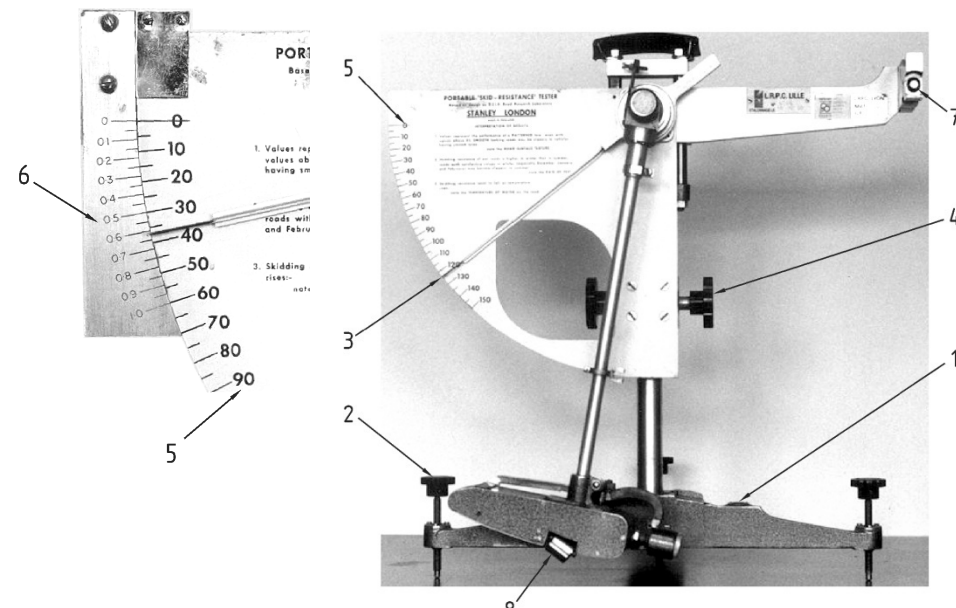
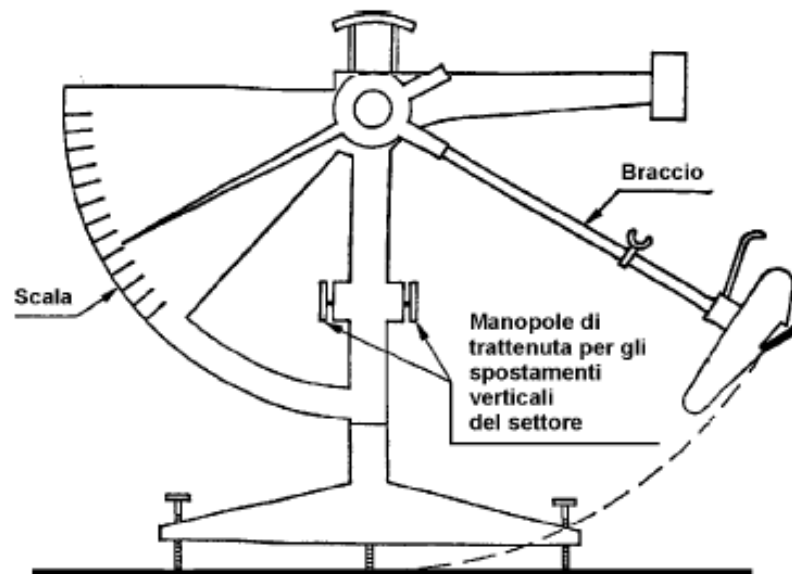
HS	CLASSIFICA
$HS \leq 0.20$	Molto fine.
$0.20 < HS \leq 0.40$	Fine.
$0.40 < HS \leq 0.80$	Media.
$0.80 < HS \leq 1.20$	Grossa.
$HS > 1.20$	Molto grossa.

Molti Capitolati italiani fanno riferimento a **HS=0,40** come soglia di sicurezza.



## ADERENZA: APPARECCHIO PORTATILE A PENDOLO

L'attrito radente può essere misurato puntualmente mediante l'**apparecchio portatile a pendolo** secondo la Norma CNR n. 105/1985. Il pendolo porta all'estremità libera un pattino di gomma di circa 1500 g e la prova consiste nel far cadere il pendolo dalla posizione orizzontale sulla superficie della pavimentazione abbondantemente bagnata con acqua. I risultati sono espressi in BPN (British portable tester number).



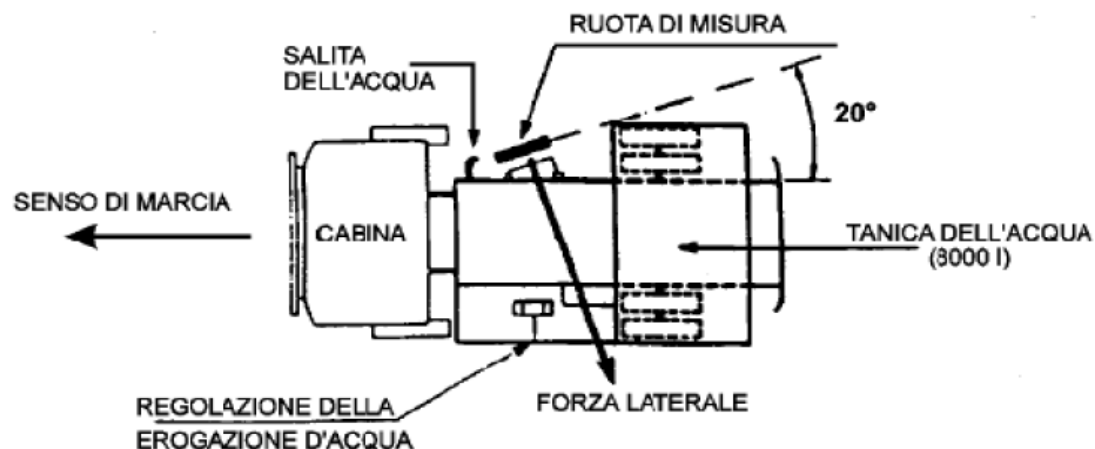
## ADERENZA: APPARECCHIO PORTATILE A PENDOLO

Generalmente per nuove costruzioni si fissa un limite di accettabilità inferiore pari a  $BPN > 55$ , mentre la soglia di sicurezza per la quale si impone un intervento per una strada esistente è  $BPN < 35$ .



## ADERENZA: SCRIM

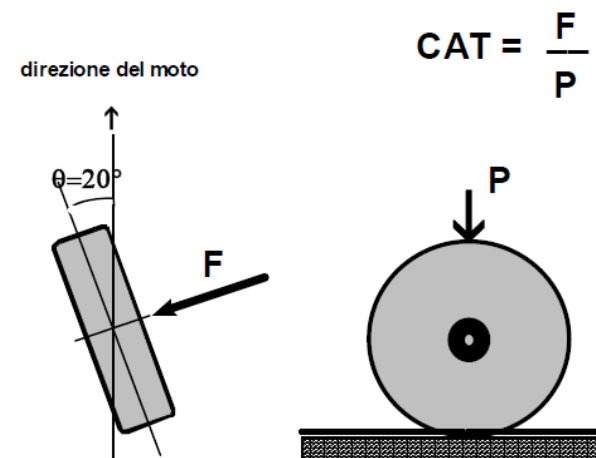
Lo **SCRIM** (Sideway Force Coefficient Investigation Machine) è un apparecchio ad alto rendimento in grado di misurare il coefficiente di aderenza trasversale (CAT). L'apparecchiatura è costituita da un autocarro sul quale è posizionato il complesso di misura, costituito da una ruota inclinata di  $20^\circ$  rispetto alla direzione del moto e caricata mediante una massa sospesa di 2 kN. Un dispositivo d'innaffiamento garantisce la presenza di un velo idrico davanti alla ruota di misura, in modo da valutare l'aderenza in condizioni critiche.



## ADERENZA: SCRIM

Quando la ruota viene posta a contatto con la pavimentazione in corrispondenza dell'area di contatto si genera una forza ortogonale al piano di rotolamento corrispondente alla componente trasversale dell'aderenza, rilevabile in modo continuo mediante idonei trasduttori di pressione. Tale forza, rapportata al valore della forza normale che grava sulla ruota di misura, fornisce il valore del **coefficiente di aderenza trasversale**.

Si definisce, infatti, CAT di una pavimentazione il rapporto fra la forza  $N$  agente perpendicolarmente al piano di rotazione di una ruota che avanza con un'angolazione prestabilita rispetto alla direzione del moto, ed il carico verticale agente sulla stessa.

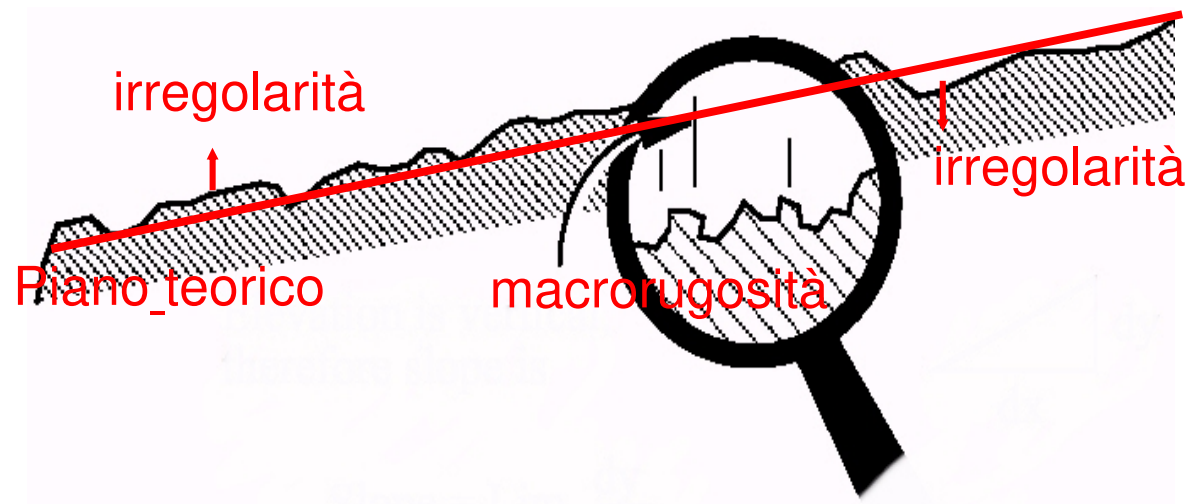


## ADERENZA

	HS [mm]	BPN	CAT
Conglomerati bituminosi	> 0.40	> 55	>0.60
Conglomerati bituminosi drenanti	> 0.50	> 65	>0.55
Trattamenti superficiali	> 0.70	> 65	>0.65
Microtappeti a freddo (Dmax 5-6 mm)	> 0.40	> 55	>0.55
Microtappeti a freddo (Dmax 7-9 mm)	> 0.50	> 60	>0.60
Microtappeti a freddo (Dmax 10-13 mm)	> 0.60	> 65	>0.65
Vecchie pavimentazioni	< 0.25	< 35	< 0.40
<b>Soglia di allarme</b>	<b>0.60</b>	<b>63</b>	<b>0.58</b>
<b>Soglia di sicurezza</b>	<b>0.45</b>	<b>53</b>	<b>0.48</b>

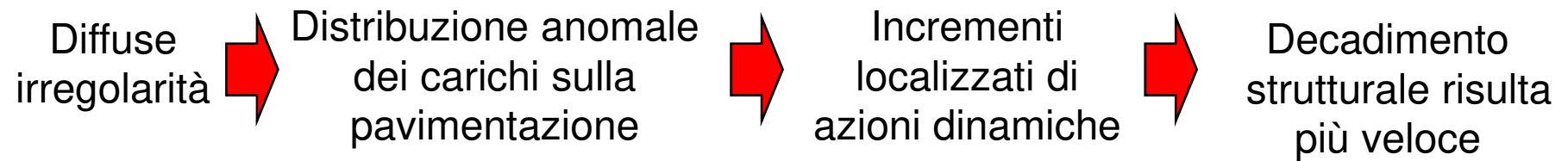
# REGOLARITÀ

La **regolarità superficiale** di una pavimentazione viene definita come l'entità dello scostamento della superficie stradale da un piano ideale.



## REGOLARITÀ

Le irregolarità influiscono sul comfort di moto, inducono sollecitazioni anomale sul veicolo, possono comportare riduzione di aderenza.



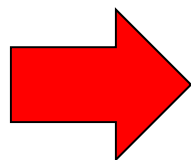
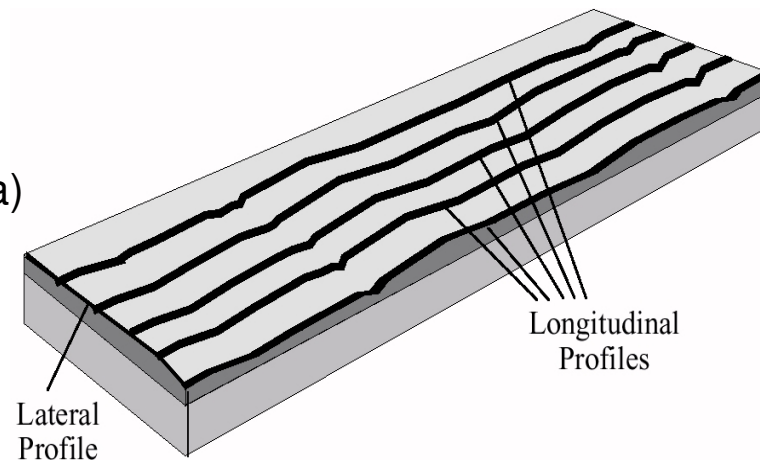
# REGOLARITÀ

## DA COSA SCATURISCE L'IRREGOLARITA'?

### CARENZE STRUTTURALI

(cedimento di sottofondo, fondazione ,  
fenomeni di crisi interni alla sovrastruttura)

### ERRATA TECNOLOGIA DI POSA IN OPERA

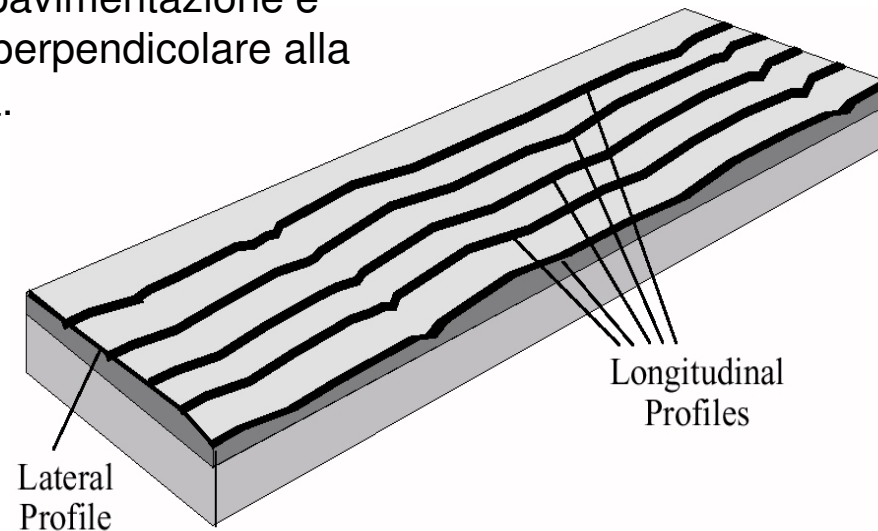


ERRORI IN SEDE PROGETTUALE  
SCARSA QUALITA' DEI MATERIALI STRADALI



## LA REGOLARITA': definizioni

**profilo trasversale:** Intersezione tra la superficie della pavimentazione e un piano verticale perpendicolare alla direzione di marcia.



**profilo longitudinale:** Intersezione tra la superficie della pavimentazione e un piano verticale parallelo alla direzione di marcia.

## UNI EN13036-8: REGOLARITÀ

### **DISPOSITIVI DI MISURAZIONE**

- ✓ **profilometro**, un dispositivo **dinamico** idoneo alla misurazione di singoli indici di profilo oltre che di valori di sezioni (medi), come descritto nella EN 13036-6;
- ✓ **regolo**, un dispositivo **statico** idoneo alla misurazione di singoli indici di profilo, come descritto nella EN 13036-7 e nell'appendice A;
- ✓ attrezzatura di misurazione di provata idoneità alle specifiche richieste, quale per esempio la **livellazione topografica**.

## UNI EN13036-8: REGOLARITÀ



✓ **attrezzature stazionarie**, ad esempio i **regoli** (EN 13036-7) per le irregolarità e le ormaie longitudinali o livellazione topografica per le pendenze trasversali nei singoli profili;

✓ **attrezzature dinamiche**, ad esempio il **profilometro**, (EN 13036-6) idonee per la misurazione di tutti i parametri per i singoli profili oltre che per i valori (medi) della sezione.



## REGOLARITÀ: AUTOMATIC ROAD ANALYSER (ARAN)

Il rilievo della regolarità, dovendo essere effettuato per lunghe distanze, si effettua generalmente con tecniche ad alto rendimento.

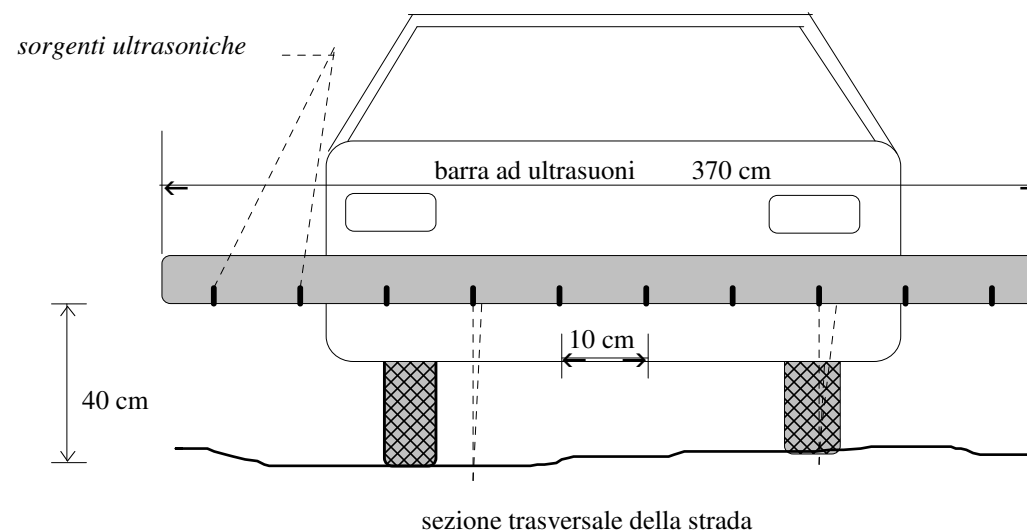
Per il rilievo della sezione trasversale si utilizza una profilometro ad alto rendimento denominato **ARAN** che consente di operare in continuo ad una velocità di 80÷100 km/h, in quanto le misure avvengono senza contatto diretto con la superficie stradale.



## REGOLARITÀ: AUTOMATIC ROAD ANALYSER (ARAN)

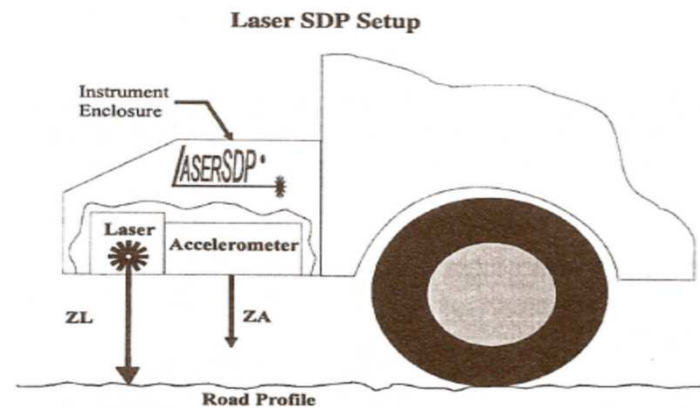
### Regolarità trasversale

Su una rut bar posizionata trasversalmente al veicolo, ad un'altezza di circa 40 cm dal piano viabile, sono alloggiate delle sorgenti ultrasoniche a distanza di 10 cm l'una dall'altra in grado di generare impulsi ad una frequenza di 50 Hz che vengono riflessi dalla pavimentazione attivando un sistema di misura di precisione. La distanza tra il sensore e la superficie stradale, viene calcolata sulla base dell'intervallo di tempo intercorso tra il momento di generazione dell'impulso ed il momento in cui il sensore riceve l'impulso riflesso. Con questo rilievo si determina la pendenza trasversale, la profondità delle ormaie ed il profilo trasversale.



## REGOLARITÀ: AUTOMATIC ROAD ANALYSER (ARAN)

L'apparecchiatura ARAN può essere utilizzata anche per valutare la **regolarità longitudinale**. In questo caso il veicolo è dotato di un profilometro costituito da laser ed accelerometri che hanno rispettivamente la funzione di misurare lo scostamento verticale e di registrare l'influenza delle accelerazioni verticali sui laser. Il laser fornisce la distanza da terra dell'apparato (ZL) e dalle letture dell'accelerometro si ricavano gli spostamenti nello spazio (ZA) dell'apparato; il profilo è dato dalla differenza tra ZL e ZA. Si tratta quindi di una misura indiretta in quanto non vengono misurate direttamente le irregolarità geometriche, bensì le accelerazioni verticali cui è soggetto l'asse posteriore dell'ARAN quando percorre la pavimentazione.



## REGOLARITÀ: INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI)

Dall'elaborazione dei dati è possibile determinare il profilo longitudinale e valutare l'IRI (**International Roughness Index**), indice standardizzato dal World Bank Technical Paper n. 45, per la misura della regolarità di una superficie stradale. Le unità di misura dell'IRI sono m/km, mm/m cioè pendenza media per 1000 della sezione considerata.

Da numerose osservazioni sperimentali è stato possibile correlare il coefficiente IRI al PSI (**Present Serviceability Index**) attraverso la relazione:

$$IRI = 5.5 \cdot \ln\left(\frac{5}{PSI}\right)$$

Il PSI fornisce un'indicazione delle condizioni della pavimentazione stradale ai fini della sicurezza della circolazione ed assume valori compresi tra 5 (strada in ottime condizioni) e 0 (strada in pessime condizioni).

Per pavimentazioni nuove generalmente è richiesto un IRI minore di 2 mm/m.

Tipo di Strada	V [km/h]	IRI [m/km]
Autostrada	>100	< 3.8
Extraurbane Secondarie	80-100	< 4.5
Urbane di scorrimento	50-80	< 5.0
Urbane di quartiere, extr. locali	< 50	< 6.6

**IRI<sub>MAX</sub> per strade in esercizio**