



Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Laurea Magistrale: Ingegneria Civile
Corso di COSTRUZIONI STRADALI (172MI)

Lezione 01: Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni

Roberto Roberti

Tel.: 040 558 3588

E-mail: roberto.roberti@dia.units.it

Anno accademico 2017/2018



Argomenti

Importanza aderenza

Scorrimento

Ellisse di aderenza

Fattori da cui dipende l'aderenza: Caratteristiche strada, Aderenza e la presenza d'acqua, pneumatici

Gli indicatori di tessitura (ed i valori limite)

Gli indicatori di aderenza (ed i valori limite)

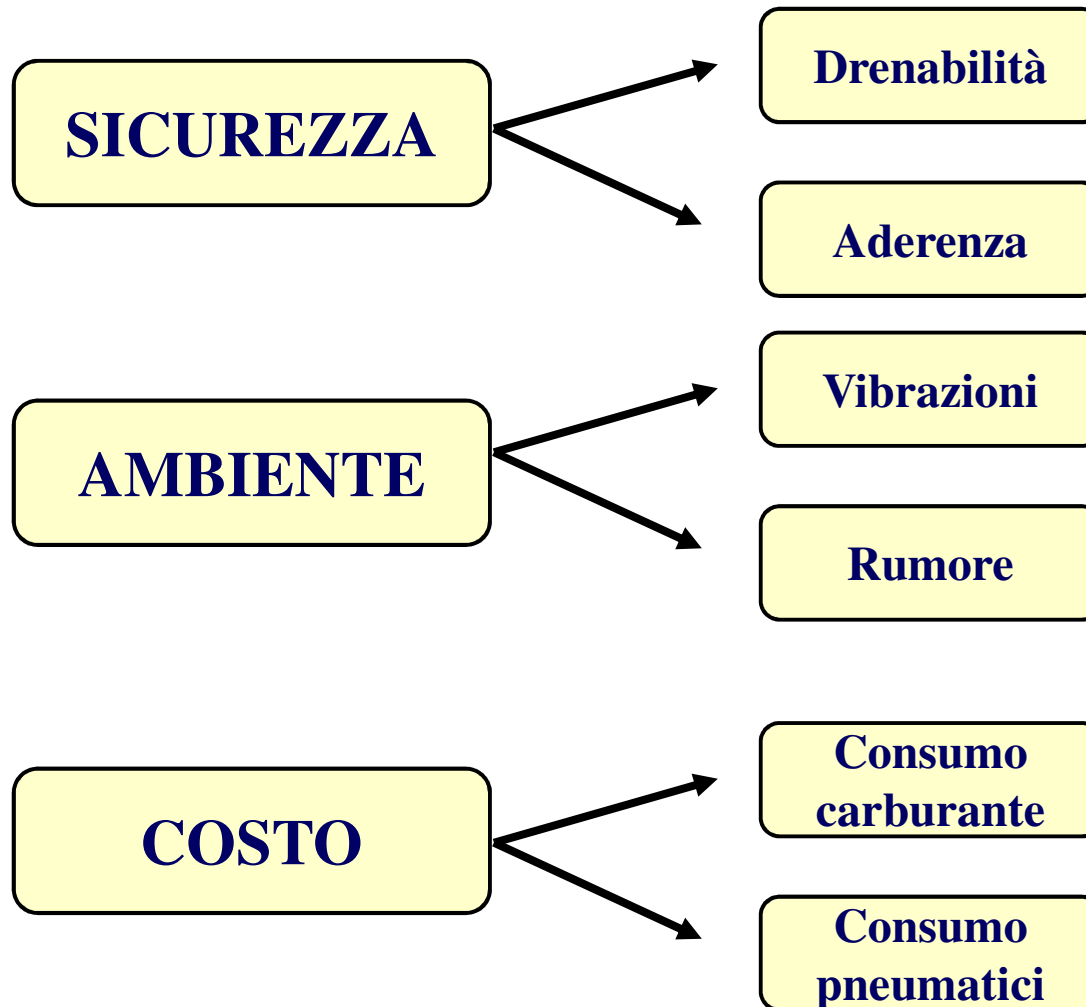
L'indice IFI

I materiali e la loro usura

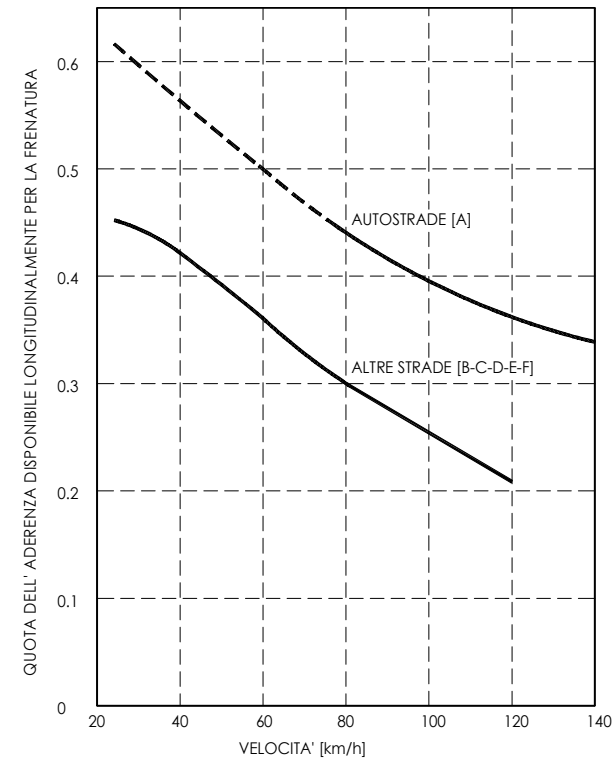
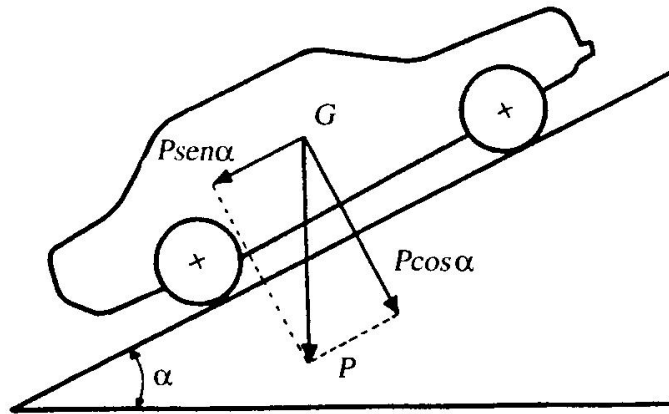
Gli interventi di ripristino dell'aderenza

La regolarità superficiale

Proprietà funzionali degli strati superficiali

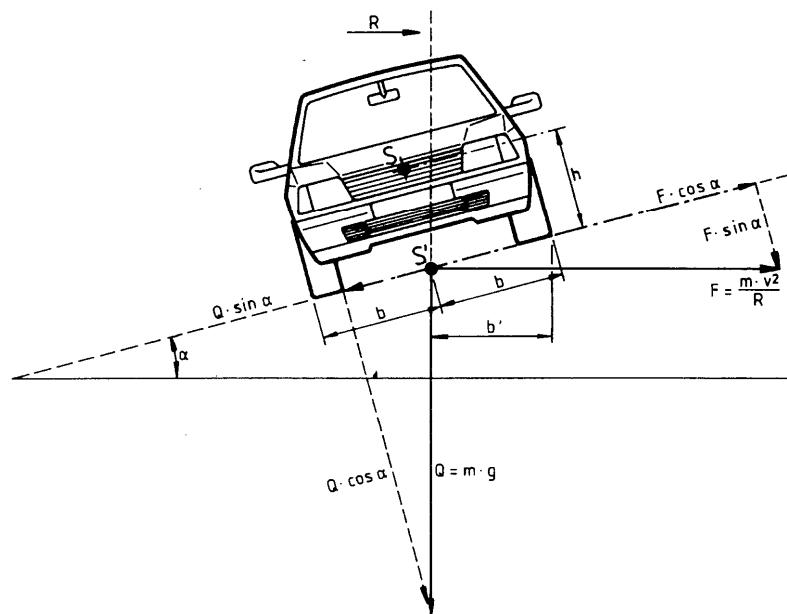


Aderenza e distanza di arresto



$$D_A = D_1 + D_2 = \frac{V_0}{3,6} \cdot \tau - \frac{1}{3,6^2} \cdot \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \cdot \left[f_L(V) \pm \frac{i}{100} \right] + \frac{R_a(V)}{m} + r_0(V)} \cdot dV$$

Aderenza e stabilità in curva



$$\frac{V^2}{R} = 127 \cdot (f_T + e)$$

V (km/h)	25	40	60	80	100	120	140
Strade D, E, F urbane	0,22	0,21	0,20	0,16			
Strade A, B, C, F extr.		0,21	0,17	0,13	0,11	0,10	0,09

Aderenza (1)

$$A = f * P$$

A è chiamata aderenza, “f” è il coefficiente di ADERENZA, P è il peso aderente cioè il peso che grava sulla ruota soggetta al momento di trazione o al momento frenante.

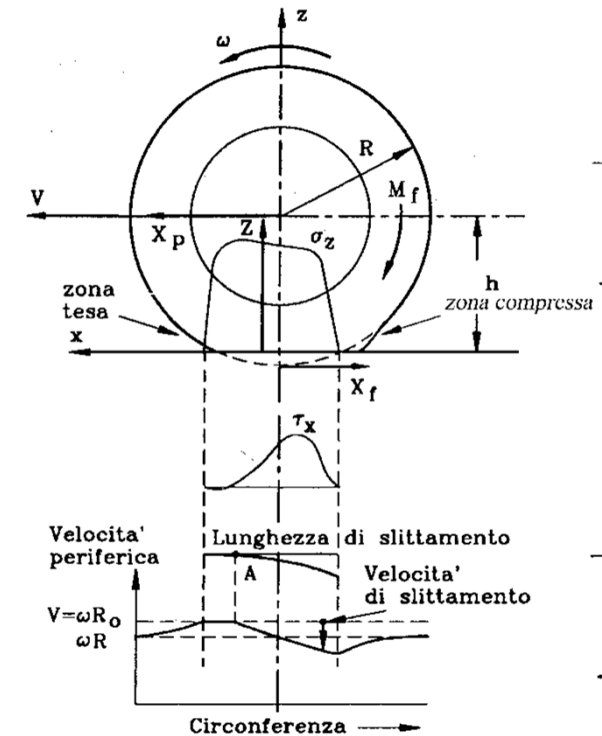
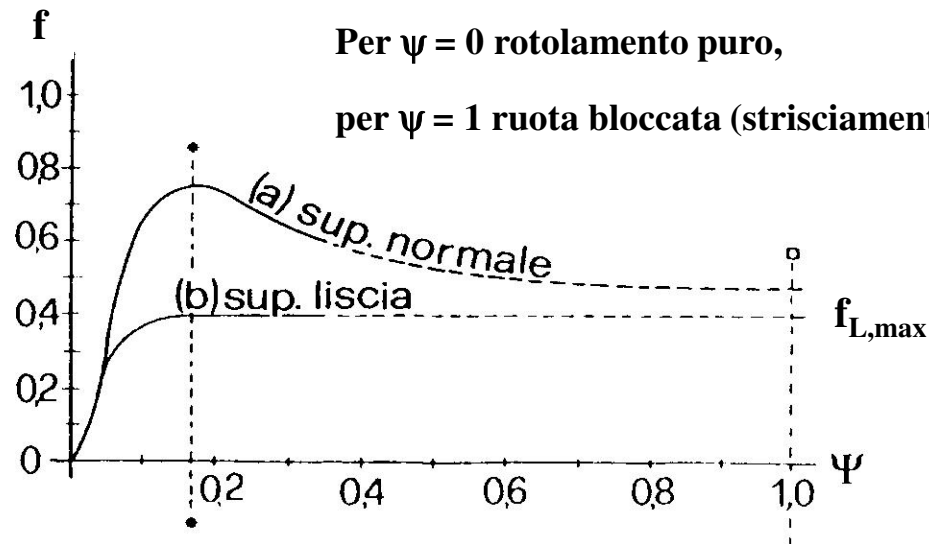
Si definisce SCORRIMENTO

$$\psi = (V - \omega * r) / V \text{ in fase di frenatura}$$

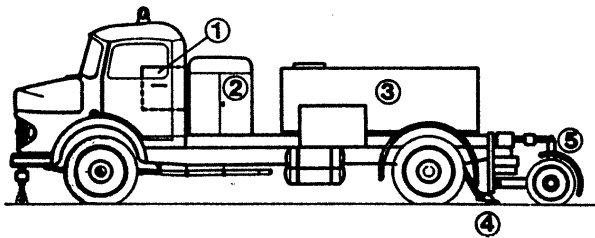
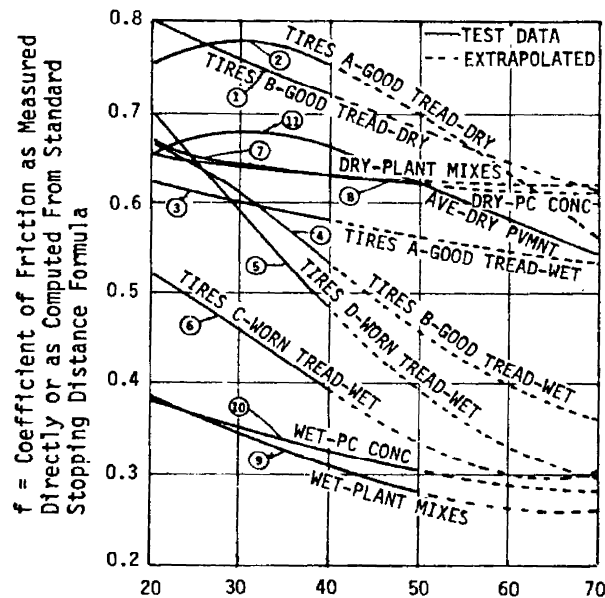
$$\psi = (\omega * r - V) / \omega * r \text{ in fase di accelerazione}$$

Per $\psi = 0$ rotolamento puro,

per $\psi = 1$ ruota bloccata (strisciamento)

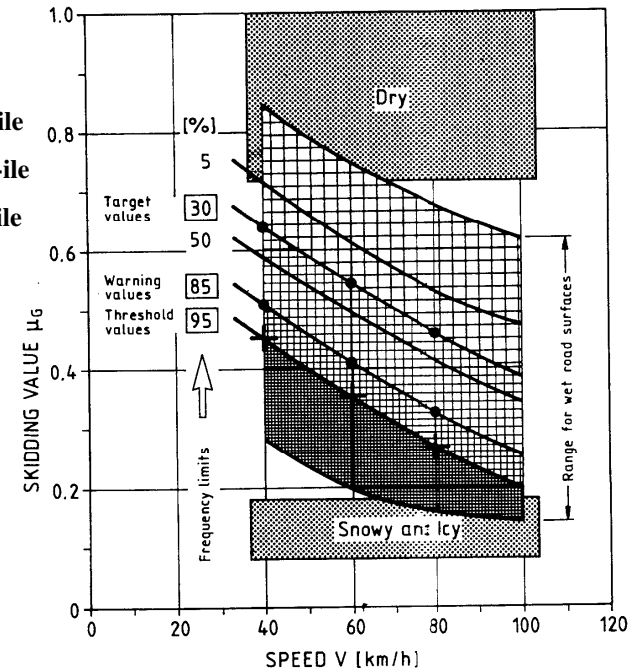


Aderenza (2)



$$f_{L,\max} = \mu_G = 0,241 \cdot \left(\frac{V}{100} \right)^2 - 0,721 \cdot \frac{V}{100} + 0,708$$

VALORE DESIDERABILE 30%-ile
VALORE DI ATTENZIONE 85%-ile
VALORE DI SOGLIA 95%-ile



Pavement condition	Maximum	Slide
Good, dry	1.00	0.80
Good, wet	0.90	0.60
Poor, dry	0.80	0.55
Poor, wet	0.60	0.30
Packed snow and Ice	0.25	0.10

Aderenza (3)

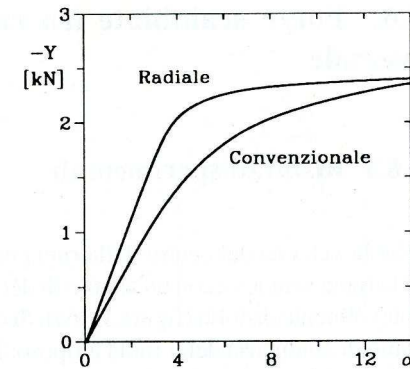
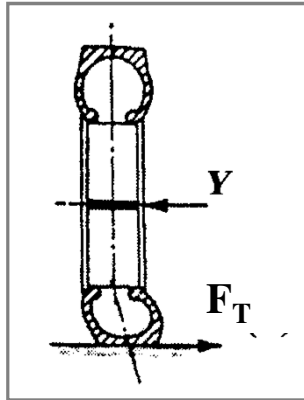


Figura 1-38. Andamenti schematici della forza Y con l'angolo di deriva α per un pneumatico radiale e per uno convenzionale.

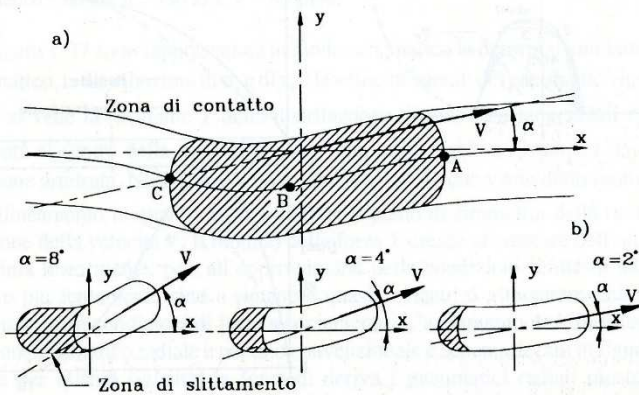
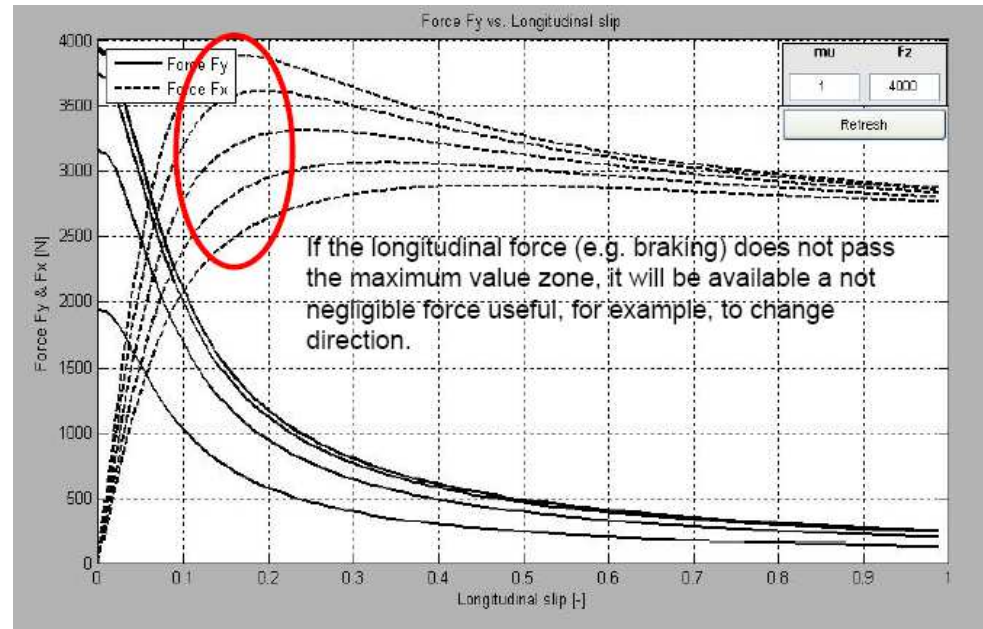
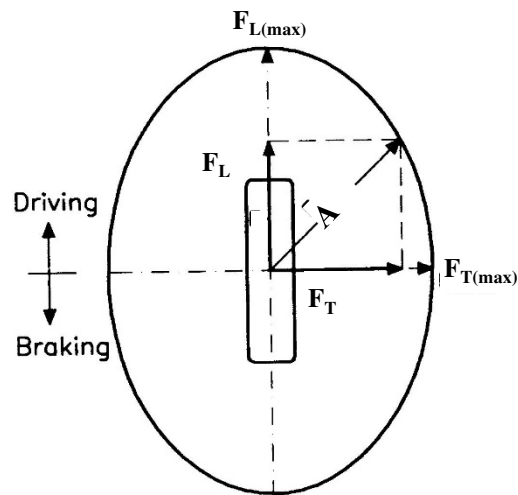
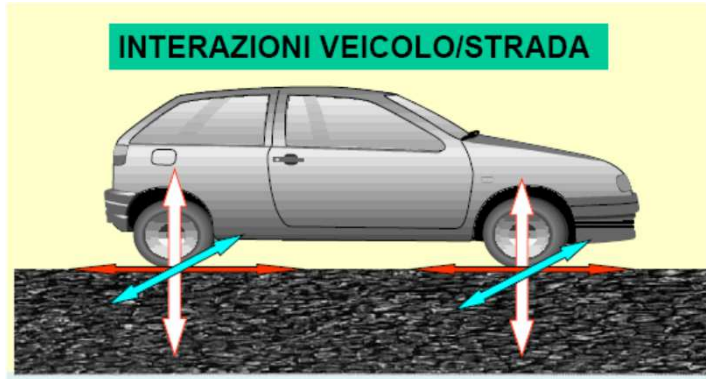


Figura 1-36. Contatto ruota-suolo in presenza di un angolo di deriva. (a) Zona di contatto e traiettoria di un punto sul battistrada appartenente al piano medio della ruota; (b) zona di contatto e zona di slittamento al variare dell'angolo di deriva α .

Aderenza (4)



$$f_L = F_L / Q$$

$$f_T = F_T / Q$$

$$f < f_{\max}$$

$$f^2 = f_L^2 + f_T^2$$

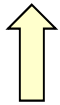
f coeff. aderenza totale, f_L coeff. aderenza longitudinale, f_T coeff. aderenza trasversale.

Aderenza (5)

$$f_{T \max} = 0,925 \cdot f_{L \max}$$

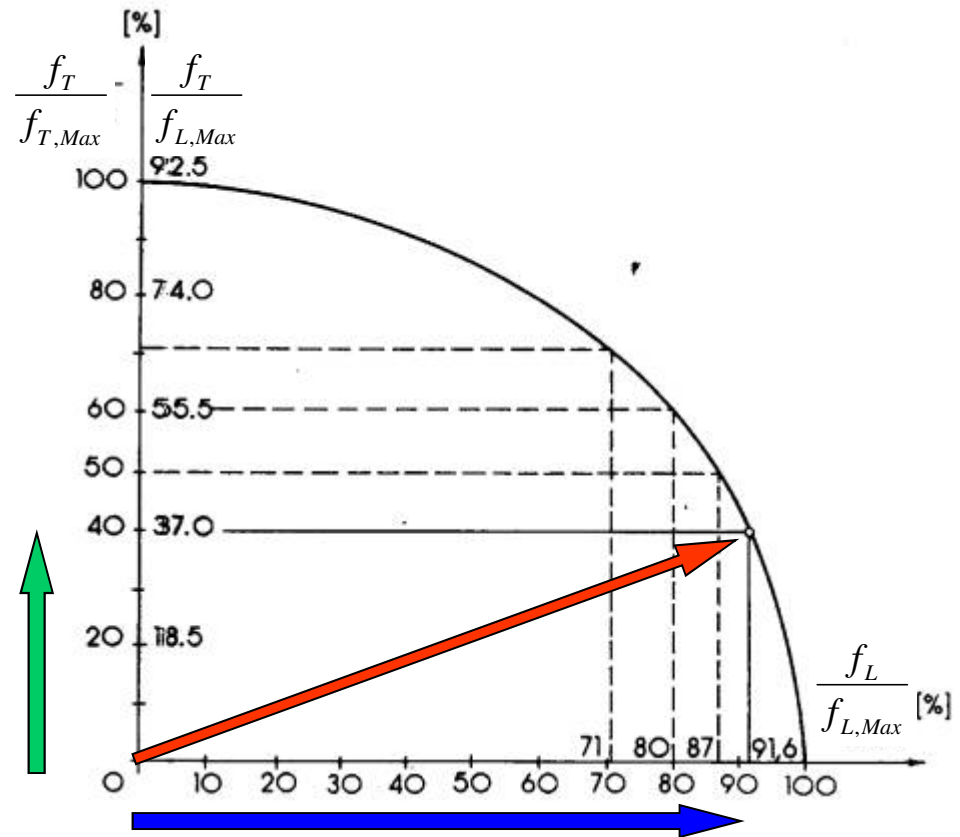
$$\left(\frac{f_T}{f_{T \max}} \right)^2 + \left(\frac{f_L}{f_{L \max}} \right)^2 \leq 1$$

$$f_T = n \cdot 0,925 \cdot f_{L \max}$$



**Coefficiente di utilizzazione
dell'aderenza trasversale**

$$n = \frac{f_T}{f_{T, \max}} = 0,40 \div 0,45$$



Fattori da cui dipende l'aderenza

RELATIVI ALL'INFRASTRUTTURA: Caratteristiche superficiali della pavimentazione;



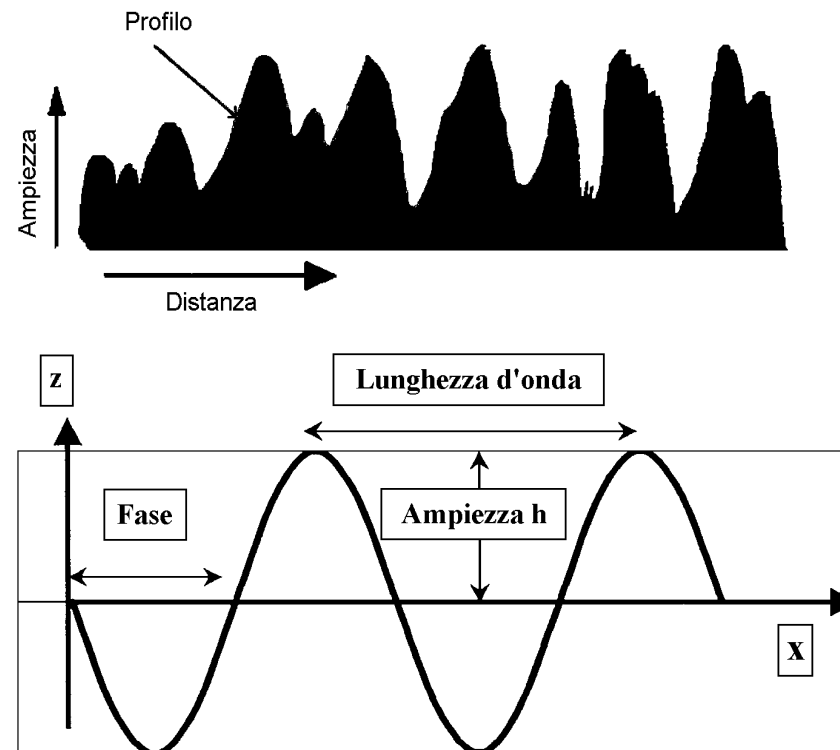
RELATIVI ALL'AMBIENTE:
presenza di sostanze contaminanti
(acqua, neve, gomma);

RELATIVI AL VEICOLO: velocità,
pneumatici, dispositivi antiskid (ABS).

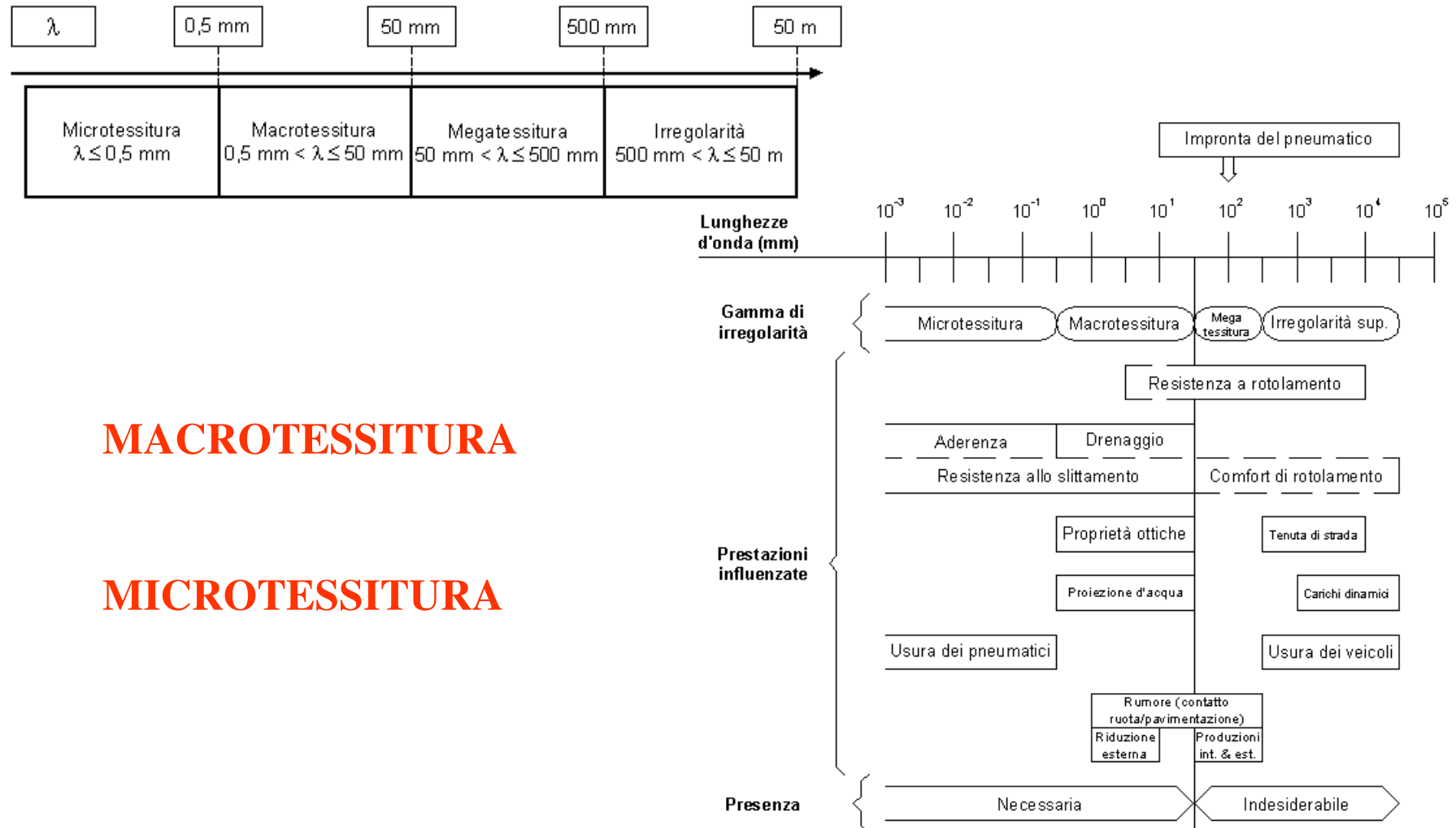


Caratteristiche superficiali e aderenza (1)

TESSITURA: è la deviazione della superficie reale della pavimentazione da un ideale piano di riferimento (ISO 13473-1)



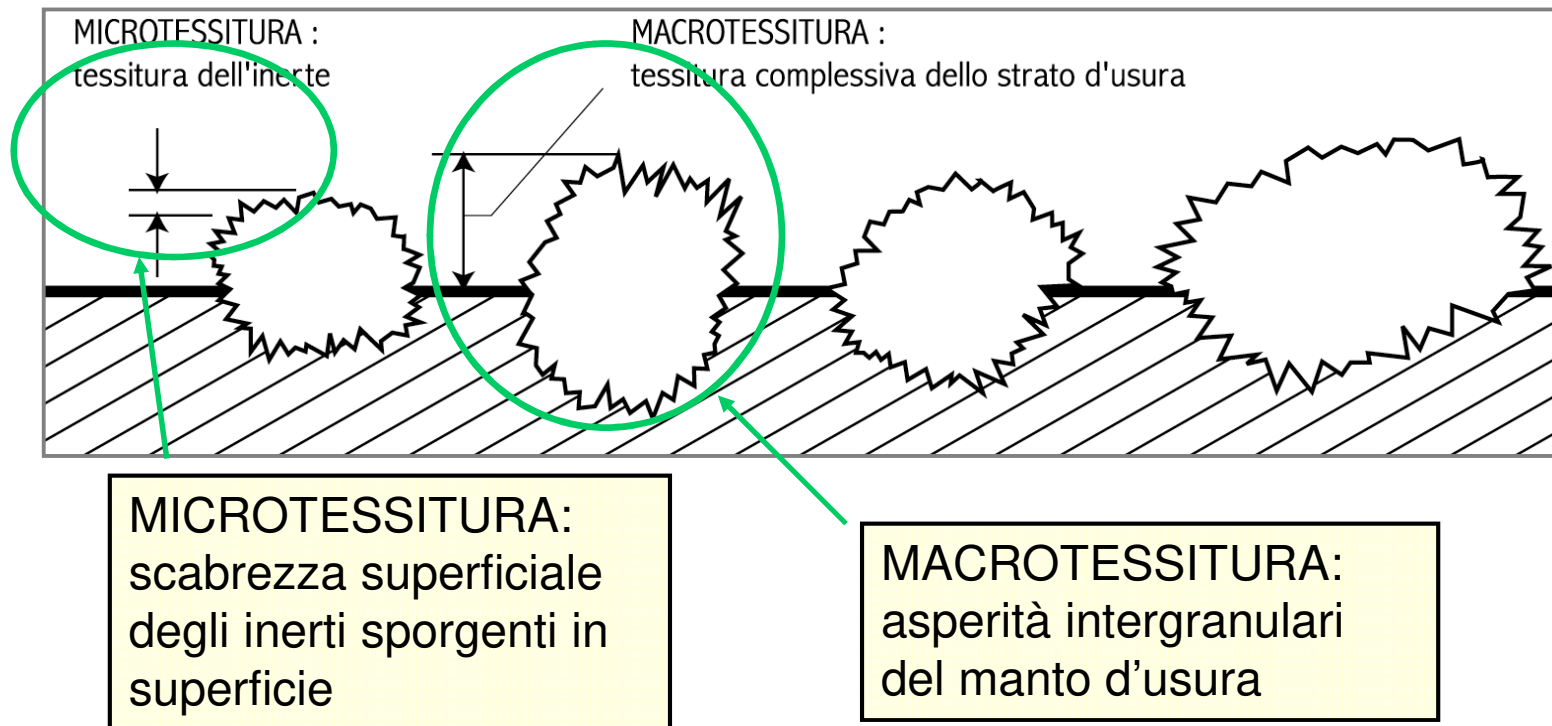
Caratteristiche superficiali e aderenza (2)



MACROTESSITURA

MICROTESSITURA

Macrotesitura e Microtesitura (1)

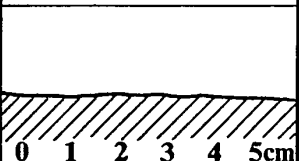


Macrotessitura e Microtessitura (2)

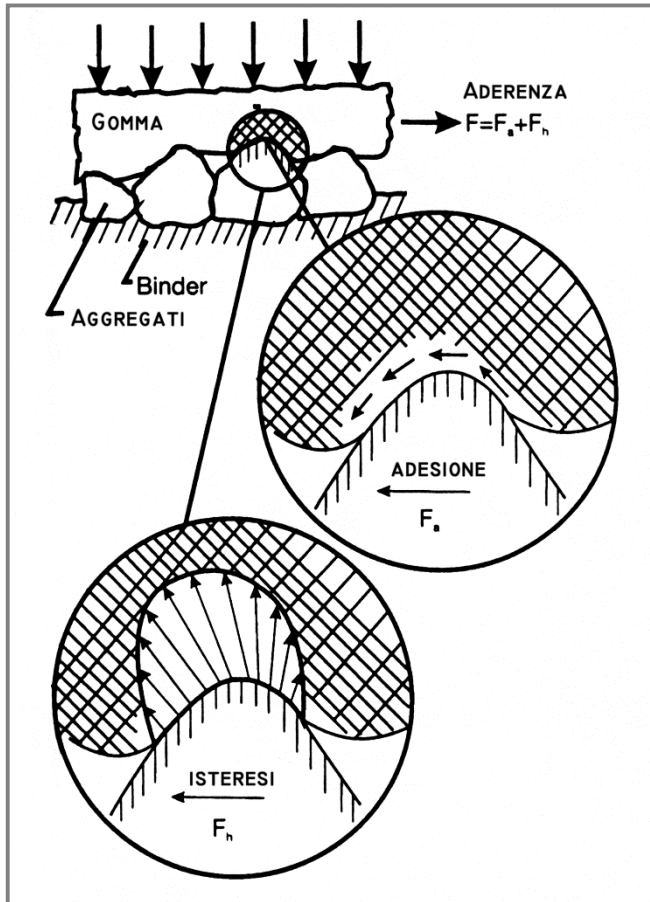
MICROTESSITURA		
Dimensioni	Dipende da:	Influenza:
$1\ \mu\text{m} < \lambda < 0.5\ \text{mm}$ $1\ \mu\text{m} < h < 0.2\ \text{mm}$	• Caratteristiche petrografiche degli aggregati lapidei • Metodo di produzione degli aggregati lapidei	• Aderenza a media e bassa velocità su superficie stradale asciutta e bagnata: componente di adesione molecolare • Usura dei pneumatici • Rumore ad alte frequenze

MACROTESSITURA		
Dimensioni	Dipende da:	Influenza:
$0.5\ \text{mm} < \lambda < 5\ \text{cm}$ $0.2\ \text{mm} < h < 1\ \text{cm}$	• Metodo di produzione degli aggregati lapidei • Dimensioni degli aggregati • Metodo di posa in opera dello strato di usura (compattazione)	• Aderenza a media ed elevata velocità su superficie bagnata: componente di isteresi • Proiezioni d'acqua • Rumore ad alte e basse frequenze • Resistenza al rotolamento • Proprietà ottiche dello strato d'usura

Macrotessitura e Microtessitura (3)

SUPERFICIE		MACRO RUGOSITA'	MICRO RUGOSITA'
A		grossa	aspra-ruvida
B		grossa	levigata
C		fina	aspra-ruvida
D		fina	levigata

Aspetti fisici legati alla tessitura (1)



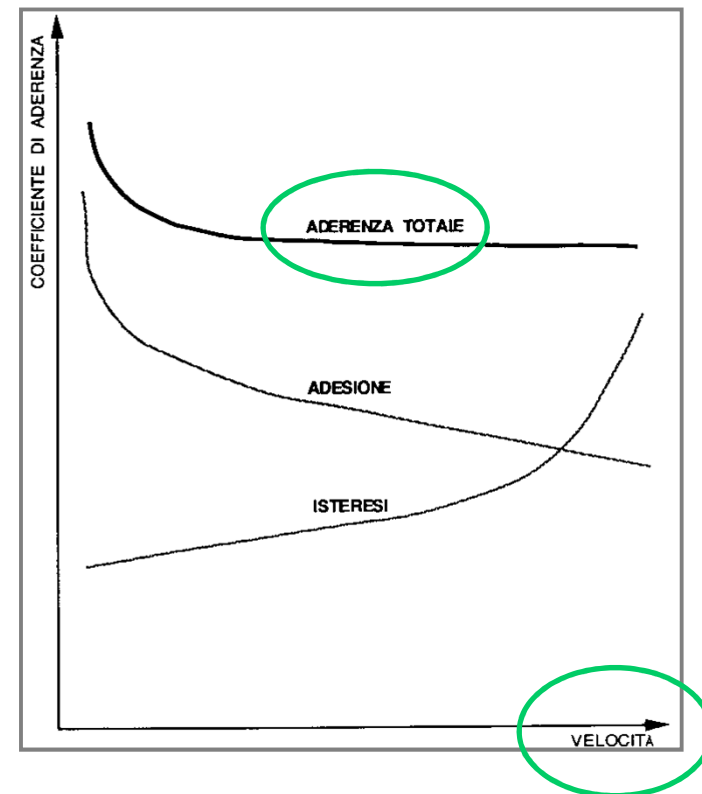
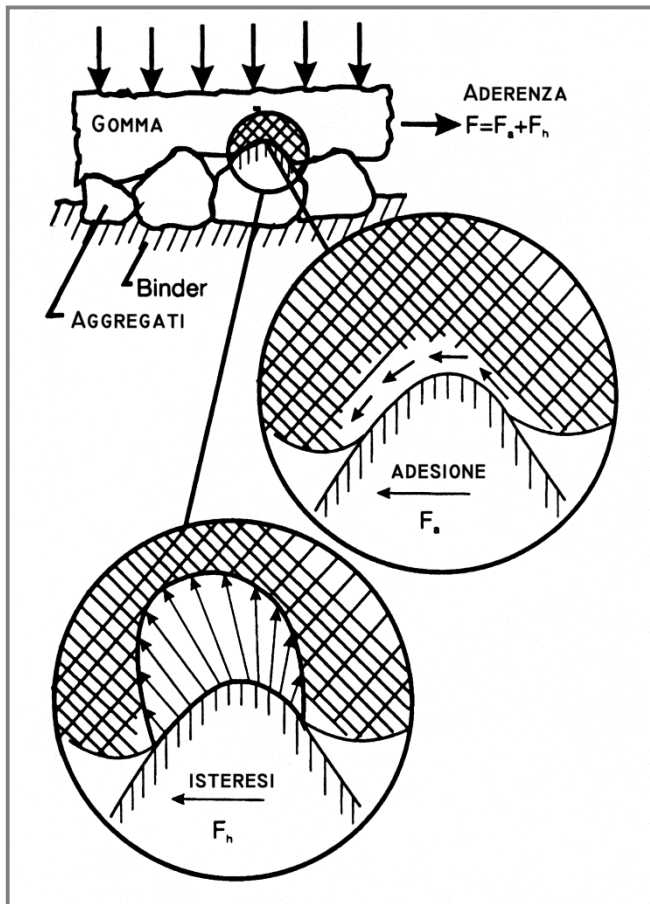
ADESIONE MOLECOLARE:

- Legame temporaneo tra le molecole della gomma e quelle della superficie stradale
- Forze ritardatrici F_a
- Necessità di un contatto asciutto

ISTERESI DELLA GOMMA:

- Dovuta alle deformazioni elasto – viscosi del pneumatico nel superamento delle asperità
- Distribuzione asimmetrica di pressioni
- Forza F_h che si oppone allo slittamento
- Avviene anche in presenza d'acqua

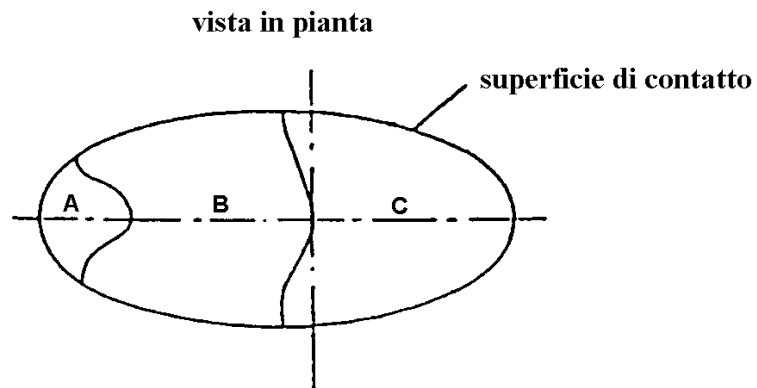
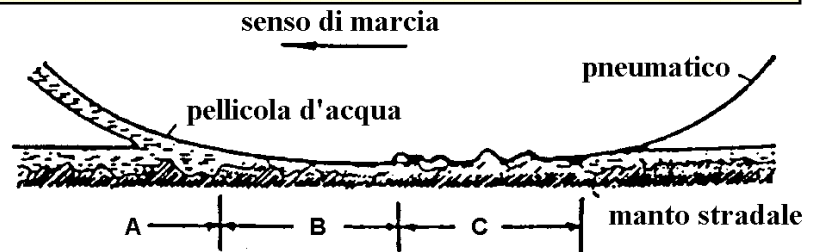
Aspetti fisici legati alla tessitura (2)



La presenza d'acqua sulla pavimentazione

TEORIA DI GOUGH E MOORE

Zona “A” di penetrazione; Zona “B” di transizione; Zona “C” di contatto.



L'aquaplaning (1)

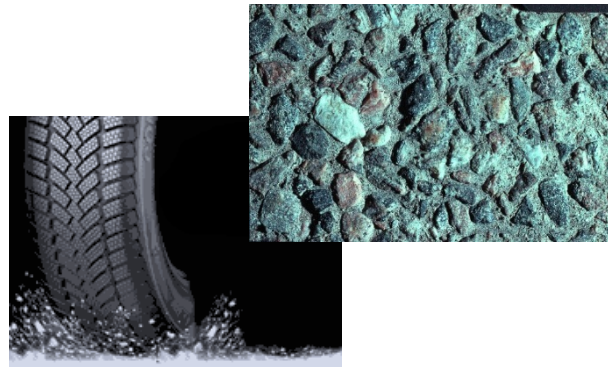
ALTA VELOCITÀ



SPESSORE D'ACQUA



Incapacità a drenare
efficacemente il velo idrico

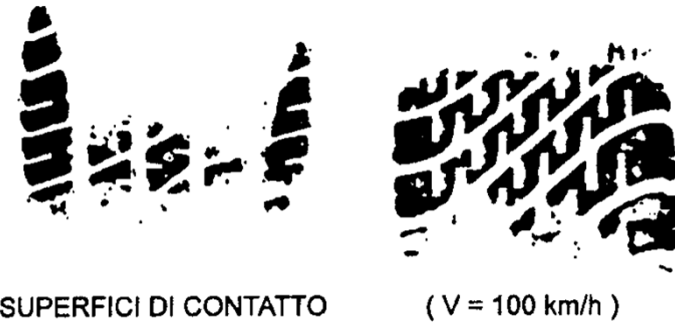
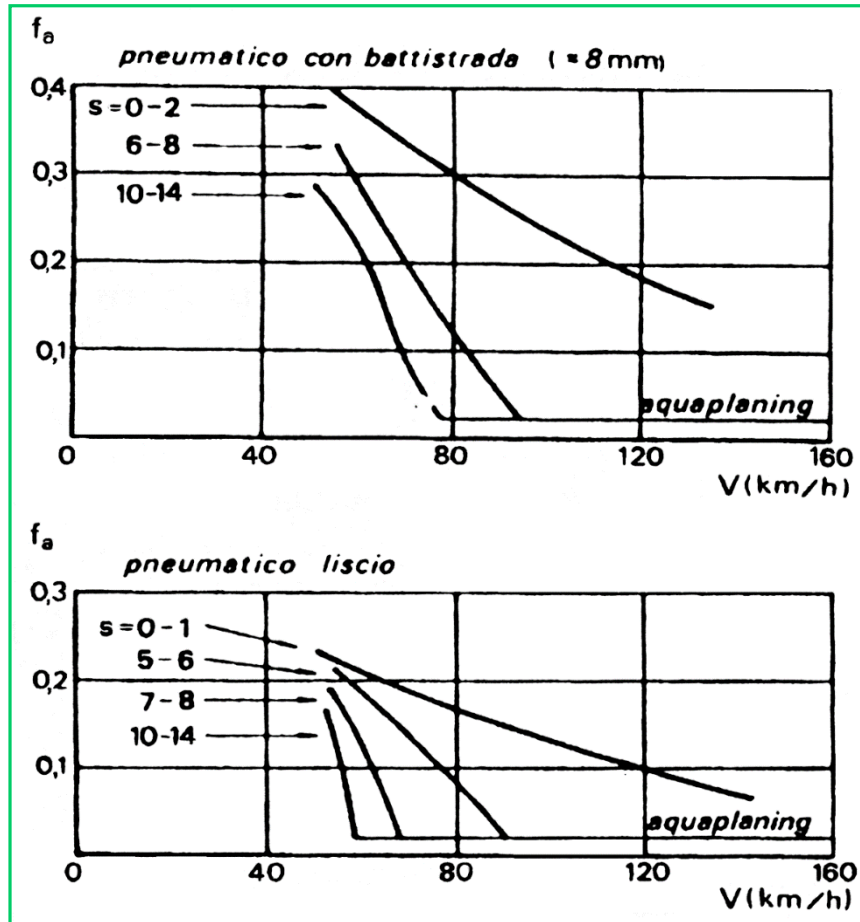


$$d = 0,015 \cdot \frac{(c \cdot L \cdot I)^{1/2}}{S^{1/5}}$$

Formula di Ross e Russam

**MANCANZA DI CONTATTO TRA
PNEUMATICO E SUPERFICIE STRADALE**

L'aquaplaning (2)



$$V = 34\sqrt{P} \quad V \text{ in nodi, } P \text{ in kg/cm}^2$$

SU PAVIMENTAZIONI BAGNATE
l'aderenza dipende dal velo idrico

Idroportanza
O Aquaplaning
H Velo idrico > 0,5 mm

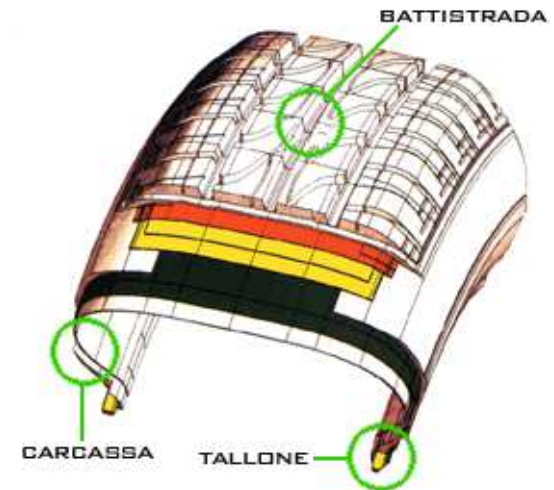
Viscoportanza
H Velo idrico < 0,5 mm

Perdita di tenuta laterale

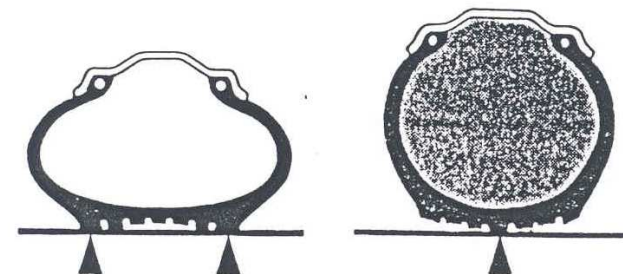
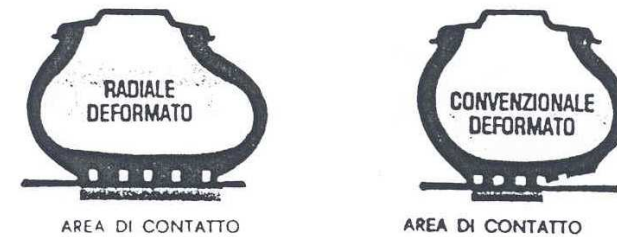
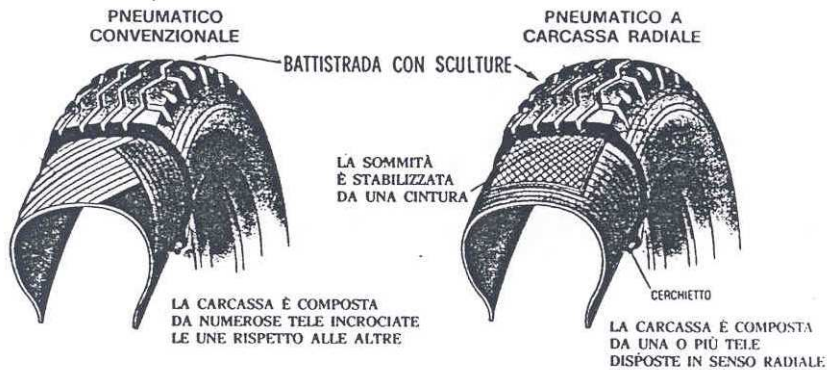
Pneumatici (1)

Fattori legati alle caratteristiche del pneumatico che influenzano l'aderenza:

Scolpitura e mescola;

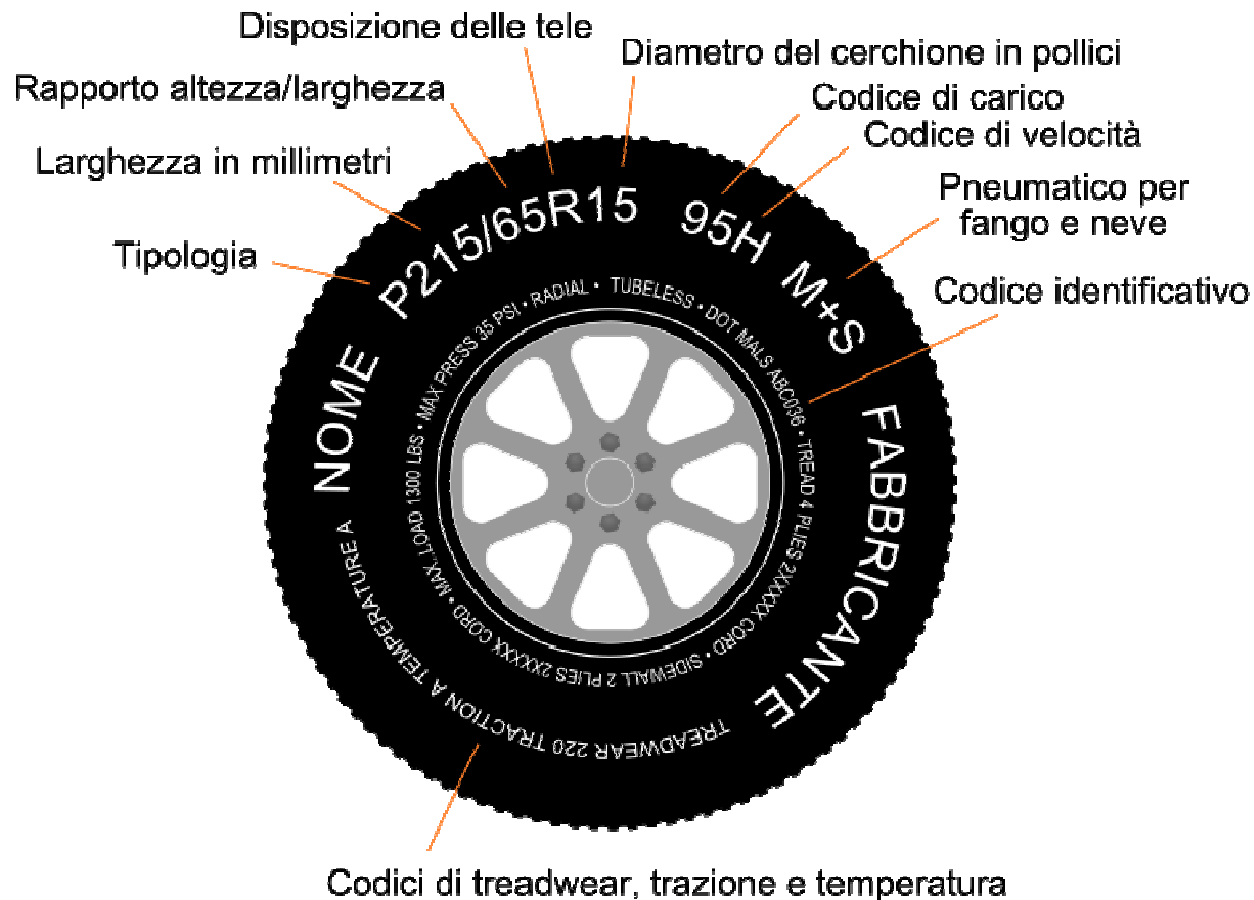


Rigidità della carcassa;



Pressione

Pneumatici (2)



Indicatori di tessitura

Esistono numerosissimi metodi per misurare la tessitura superficiale, usualmente si suddividono in:

- Metodi volumetrici (*HS, drenabilità, ecc.*)
- Metodi statistici (*MPD, RMS, ecc.*)
- Metodi frequenziali (*PSD*)

Si differenziano anche a seconda della classe di tessitura da misurare:

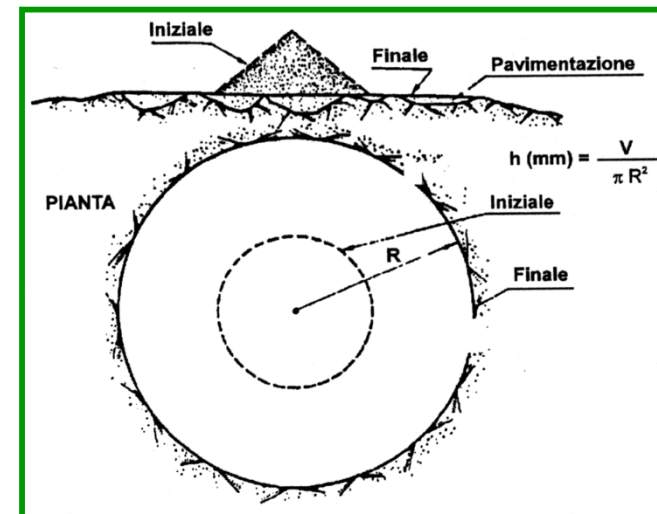
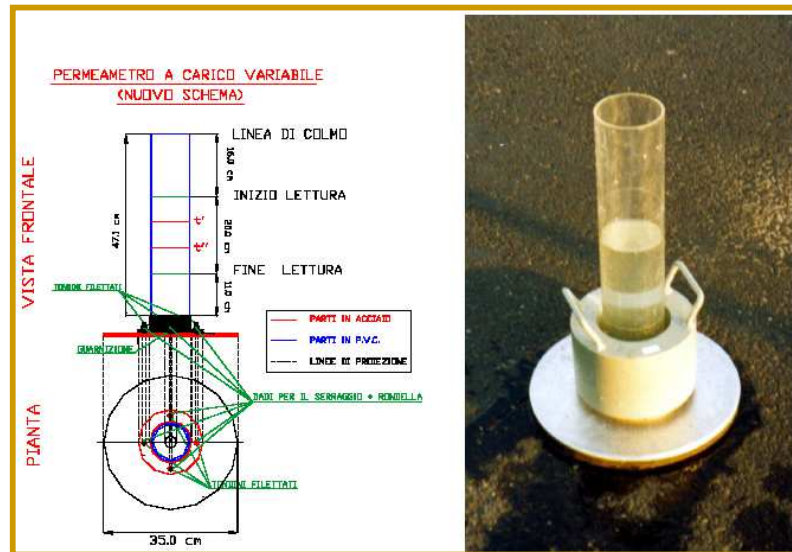
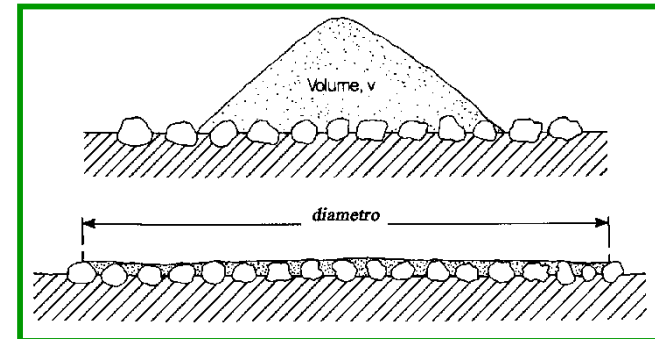
- Microtessitura
- Macrotessitura
- Megatessitura
- Irregolarità

Metodi di prova per la valutazione della macrotessitura

Metodi di prova		Gamma di validità (espressa in valori di profondità media del profilo, MPD)
EN 13036-1	Misurazione della profondità della macrotessitura superficiale della pavimentazione utilizzando una tecnica volumetrica	da 0,25 mm a 5 mm
ISO 13473-1	Determinazione della profondità media del profilo (MPD)	da 0 mm a 5 mm
EN 13036-3	Misurazione della drenabilità orizzontale della superficie della pavimentazione	da 0 mm a 0,4 mm

Indicatori di macrotesttura (1)

Tra i metodi più semplici e diffusi vi sono i metodi volumetrici dell'altezza in sabbia e del drenometro



Indicatori di macrotestitura (2)

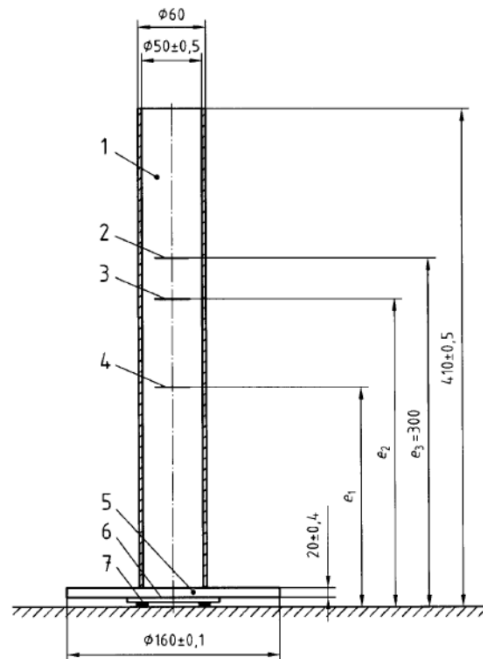
Norma UNI EN 13036-3: Misurazione della drenabilità orizzontale della superficie delle pavimentazioni

figura 1 Indicatore d'efflusso

Legenda

- 1 Plastica trasparente solida
- 2 Tacca superiore
- 3 Tacca intermedia
- 4 Tacca inferiore
- 5 Anello di pesatura di ottone (materiale MS 58)
- 6 Anello portante di ottone come illustrato nella figura 2
- 7 Anello di gomma

Dimensioni in millimetri



Metodi di prova per la valutazione della macrotestitura

Metodi di prova		Gamma di validità (espressa in valori di profondità media del profilo, MPD)
EN 13036-1	Misurazione della profondità della macrotestitura superficiale della pavimentazione utilizzando una tecnica volumetrica	da 0,25 mm a 5 mm
ISO 13473-1	Determinazione della profondità media del profilo (MPD)	da 0 mm a 5 mm
EN 13036-3	Misurazione della drenabilità orizzontale della superficie della pavimentazione	da 0 mm a 0,4 mm

RISULTATI DELLE PROVE

I risultati dei dieci punti di prova OT_i devono essere mediati per ottenere il valore OT_p per la lunghezza della superficie.

Non deve essere effettuata nessuna correzione per la temperatura.

$$OT_p = \frac{OT_1 + OT_2 + \dots + OT_{10}}{10} \quad (1)$$

dove:

OT_p è il tempo di efflusso per una superficie della lunghezza di 25 m;

$OT_1 \dots OT_{10}$ sono il tempo di efflusso sul punto di prova 1 ... fino al punto di prova 10.

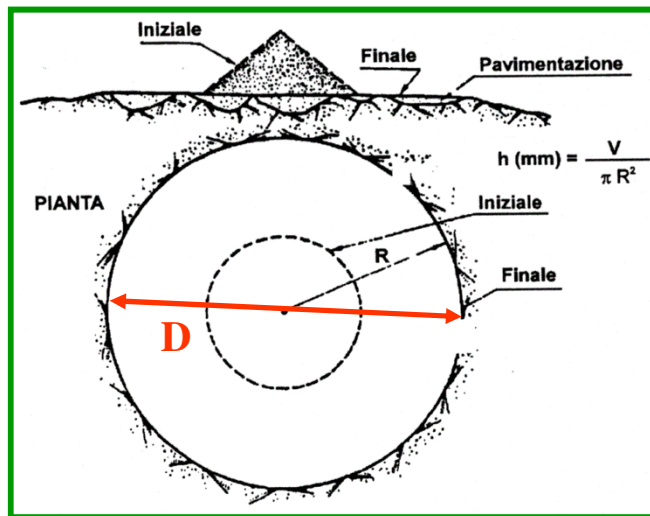
Indicatori di macrotesttura (3)

NORMA UNI EN 13036-1: Misurazione della profondità della macrotesttura della superficie delle pavimentazioni tramite tecnica volumetrica.

NORMA CNR N. 94 15 OTTOBRE 1983 : Metodo di prova per la misura della macro-rugosità superficiale con il sistema della altezza di sabbia

$$\text{MTD (Mean Texture Depth)} = \text{HS (altezza in sabbia)} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad [\text{mm}]$$

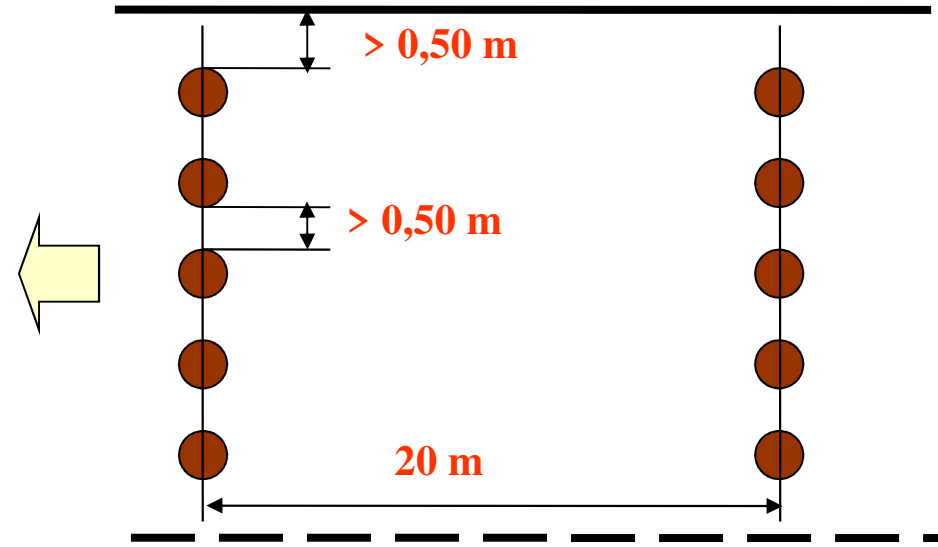
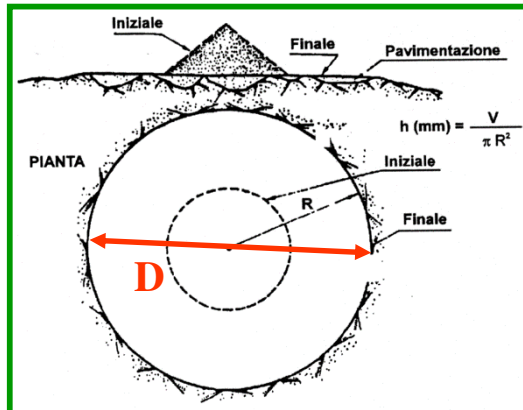
$$V = 25.000 \pm 150 \text{ mm}^3$$



Altezza di sabbia	macrorugosità
HS ≤ 0,20 mm	molto fina
0,20 < HS ≤ 0,40	fina
0,40 < HS ≤ 0,80	media
0,80 < HS ≤ 1,20	grossa
1,20 < HS	molto grossa

Indicatori di macrotestitura (4)

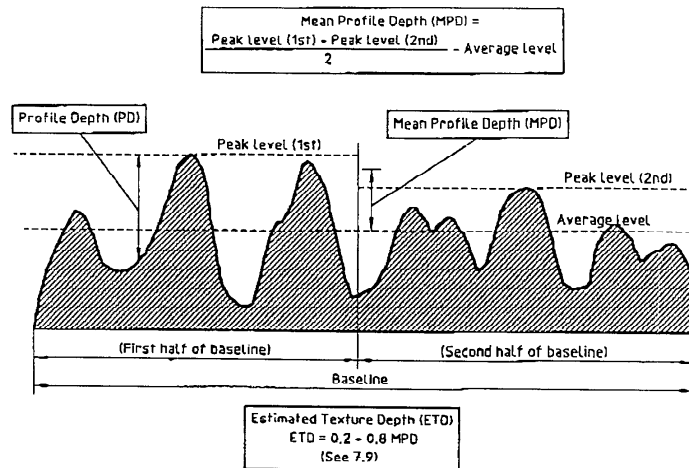
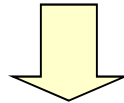
Allineamento	Trasversale 1					Trasversale 2				
Punto di misura	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
Distanza longitudinale dal P.R.: [m]										
Distanza dal bordo destro della corsia [m]										
Valore misurato diametro D1 [mm]										
Valore misurato diametro D2 [mm]										
Valore medio calcolato del diametro [mm]										
Valore altezza in sabbia HS [mm]										
Media altezza in sabbia degli allineamenti			HS (1):					HS (2):		



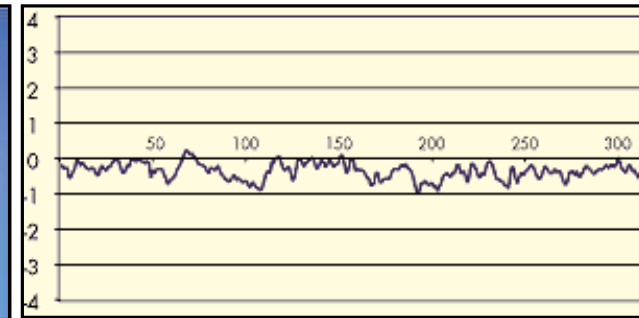
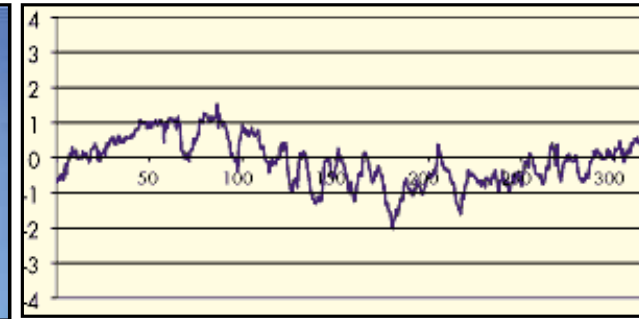
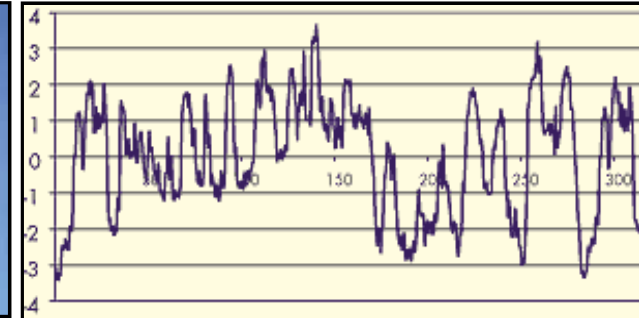
Indicatori di macrotestitura (5)

Tra i metodi statistici più diffusi, ottenuto mediante profilometro laser, c'è:

MPD (Mean Profile Depth) Norma UNI EN ISO 13473-1

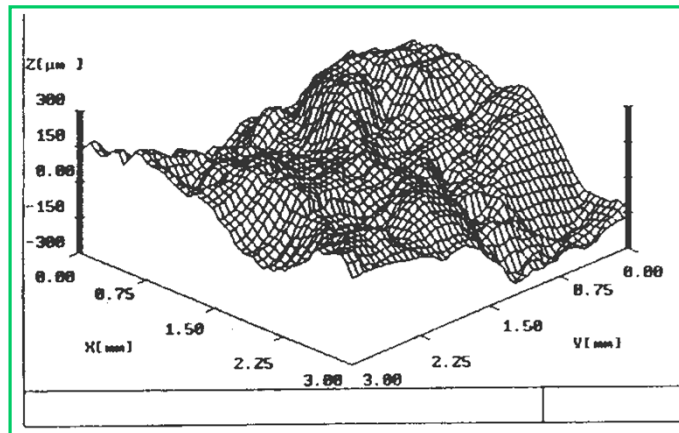
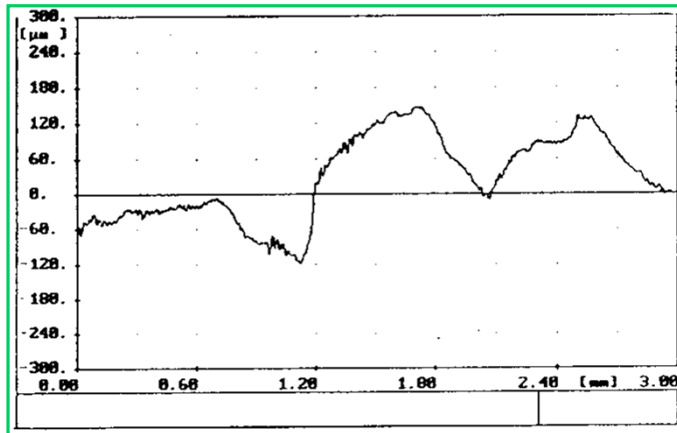


$$HS \cong ETD = 0,2 + 0,8 \text{ MPD [mm]}$$



Indicatori di microtessitura

METODI DIRETTI



METODI INDIRETTI



BPN - British Portable Number (1)

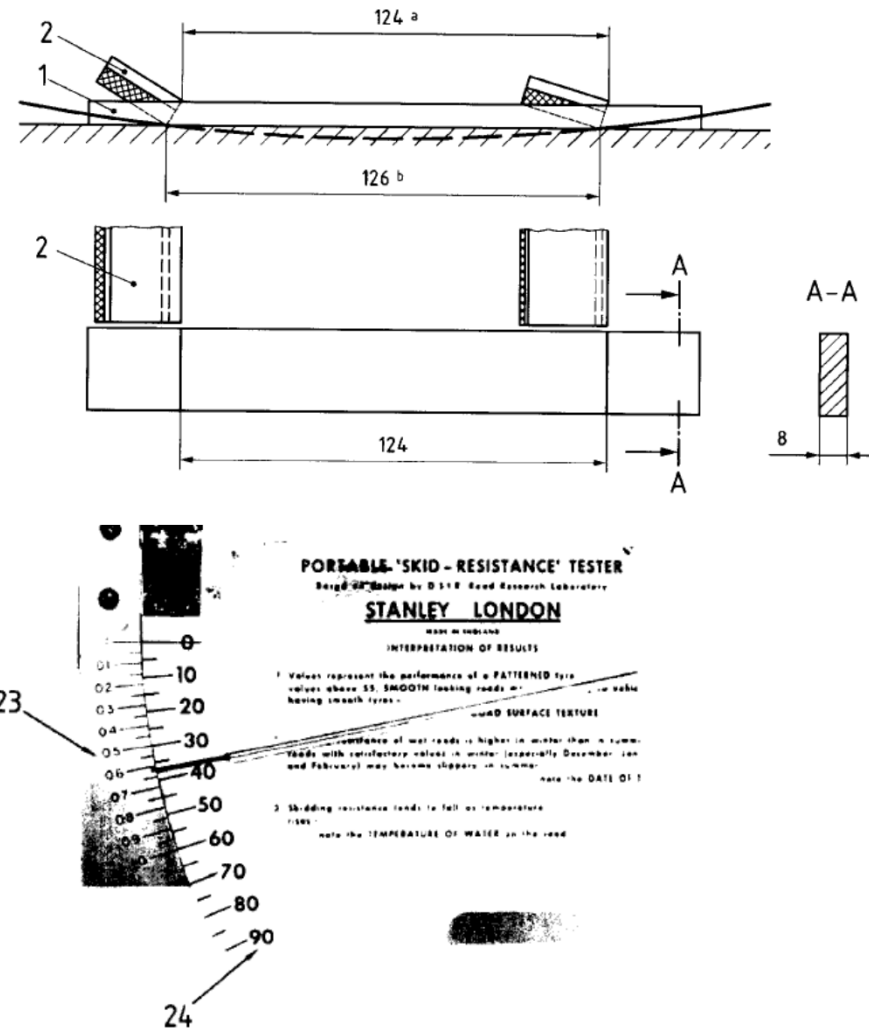
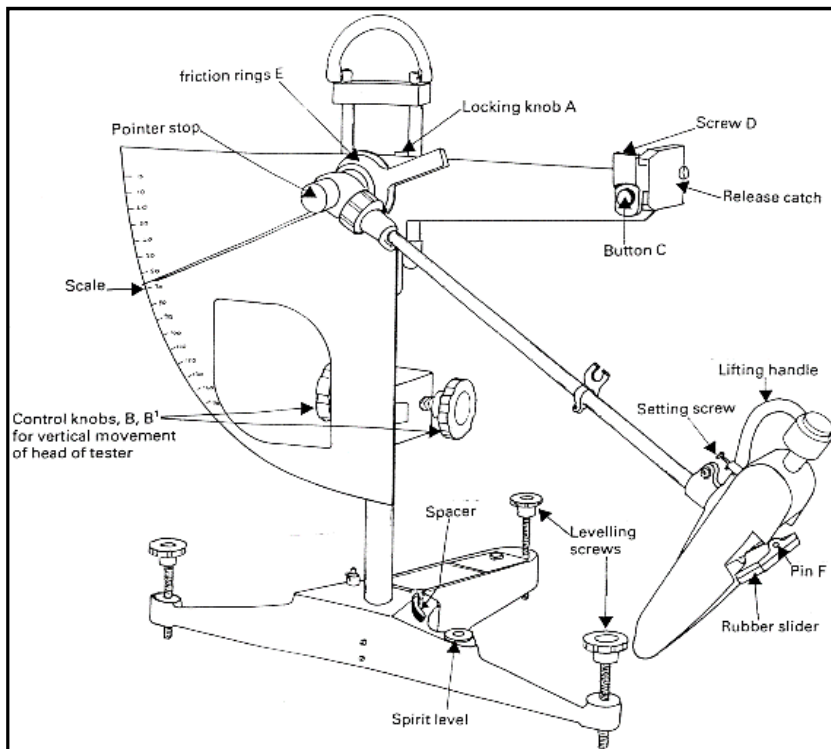
NORMA UNI EN 13036-4: Metodo per la misurazione della resistenza/derapaggio di una superficie: metodo del pendolo.

NORMA CNR N. 94 15 OTTOBRE 1983 : Metodo di prova per la misura della resistenza di attrito radente con l'apparecchio portatile a pendolo

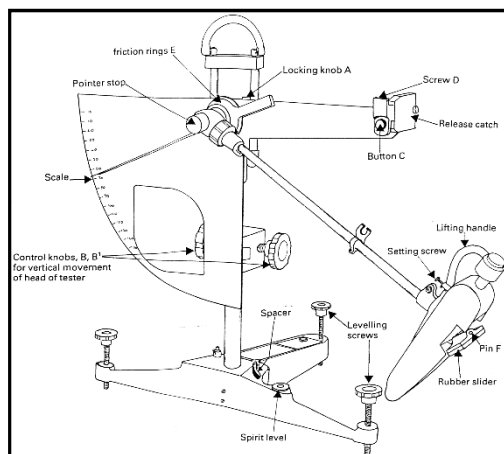


Categoria	Tipologia di zona	valore minimo
A	Rotatorie, Curve con $R < 150m$	65
	Pendenze long. $> 5\%$, in prossimità	
	di semafori su strade senza limiti di vel.	
B	Autostrade, strade extraurbane principali e strade urbane con traffico > 2000 veic./g	55
C	Tutti gli altri siti	45

BPN - British Portable Number (2)



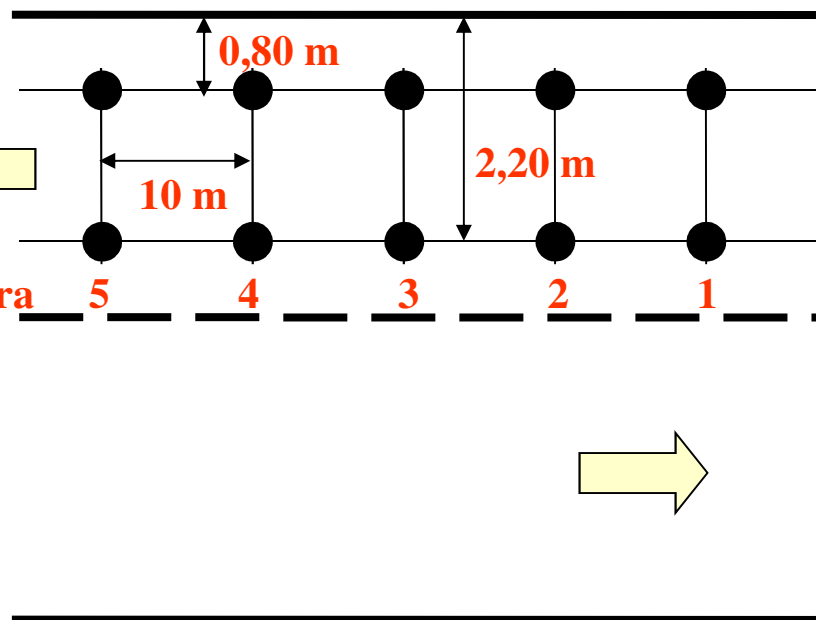
BPN - British Portable Number (3)



Allineamento 1

Allineamento 2

Punti di misura



$$\text{BPN} = \text{PTV (Pendulum Test Value)} = \frac{\sum v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{5}$$

Oppure se i valori differiscono di più di 3 unità, utilizzare la seguente

$$\text{BPN} = \text{PTV (Pendulum Test Value)} = \frac{\sum v_3 + v_4 + v_5}{3}$$

BPN - British Portable Number (4)

Table 3 — Correction of *PTV* when the test is carried out at other than 20 °C using slider 57

Measured slider temperature °C	Correction to measured value
36 to 40	+3
20 to 35	+2
23 to 29	+1
19 to 22	0
16 to 18	-1
11 to 15	-2
8 to 10	-3
5 to 7	-4
NOTE The temperature correction can be affected by the texture of the surface.	

Norma CNR

Temperatura C°	5-7	8-10	11-13	14-16	17-20	21-24	25-29	30-40
Correzione	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

BPN - British Portable Number (5)

Allineamento	1					2				
Punto di misura	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
Distanza longitudinale dal P.R. [m]										
Distanza dal bordo destro della corsia [m]										
Pendenza trasversale (%)										
Pendenza longitudinale (%)										
valori BPN misurati lettura 1										
valori BPN misurati lettura 2										
valori BPN misurati lettura 3										
valori BPN misurati lettura 4										
Valori BPN misurati lettura 5										
valori BPN misurati letture supplementari										
Media BPN ultime 3 letture utili										
Temperatura pavimentazione (° C)										
Fattore di correzione										
Valori BPN medi corretti										
Media BPN corretta degli allineamenti			BPN (1):					BPN (2):		

Metodi di misura dell'aderenza (1)

Le diverse apparecchiature per misurare l'aderenza possono essere classificate secondo tre modalità di prova:

1. Metodo con ruota bloccata

- *Skid Number, CAL*



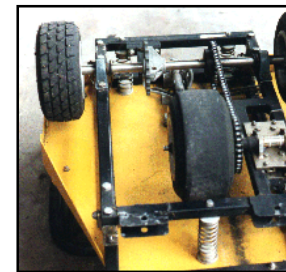
2. Metodo con forza trasversale

- *Side force coefficient SFC, CAT*



3. Metodo con scorrimento della ruota

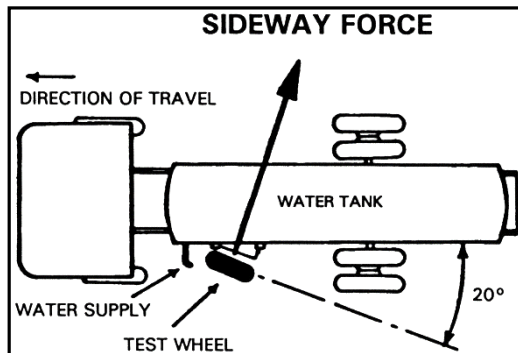
- *Brake slip number BSN*



Metodi di misura dell'aderenza (2)

NORMA UNI CEN/TS 15901-6: Procedura per determinare l'aderenza della pavimentazione mediante misurazione del coefficiente di aderenza trasversale (SFCS): SCRIM

CNR B.U. n.147/92 - Metodo di prova per la misura del coefficiente di aderenza con l'apparecchio S.C.R.I.M.



$$CAT = \frac{N}{P}$$

$$CAT_{20^\circ} = \frac{CAT_{t_0}}{0,548 \cdot \frac{45,2}{t + 80}}$$

Metodi di misura dell'aderenza (3)

CNR B.U. n.147/92 - Metodo di prova per la misura del coefficiente di aderenza con l'apparecchi S.C.R.I.M.

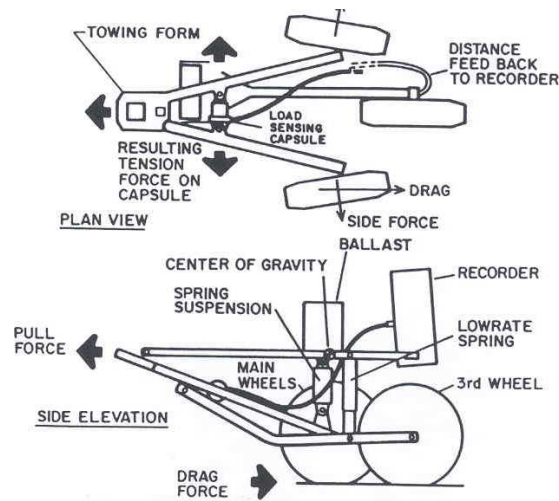
VALORI	GIUDIZIO	OPERAZIONI
CAT < 0,35	Aderenza mediocre	Necessità controlli molto frequenti
0,35 < CAT < 0,45	Aderenza discreta	Necessità controlli frequenti
0,45 < CAT < 0,55	Aderenza soddisfacente	Sorveglianza periodica della pavimentazione
0,55 < CAT	Aderenza buona	Sorveglianza diradata

CNR B.U. n.125/88 Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale

Grado di gravità	Parametri ausiliari	Indicazioni per la manutenzione
3 CAT = 0,40 – 0,50	Tasso di incidenti sulla strada superiore alla media	Sorveglianza della sezione
2 CAT = 0,35 – 0,40	Condizioni sfavorevoli dei luoghi e dei tracciati. Incidenti	Sorveglianza della sezione o rinnovo dello strato superficiale, a seconda della sua età
1 CAT = 0,35 – 0,28 (*)		Rinnovo dello strato superficiale

(*) 40% delle misure $\leq 0,30$ oppure 60% delle misure sono $\leq 0,35$

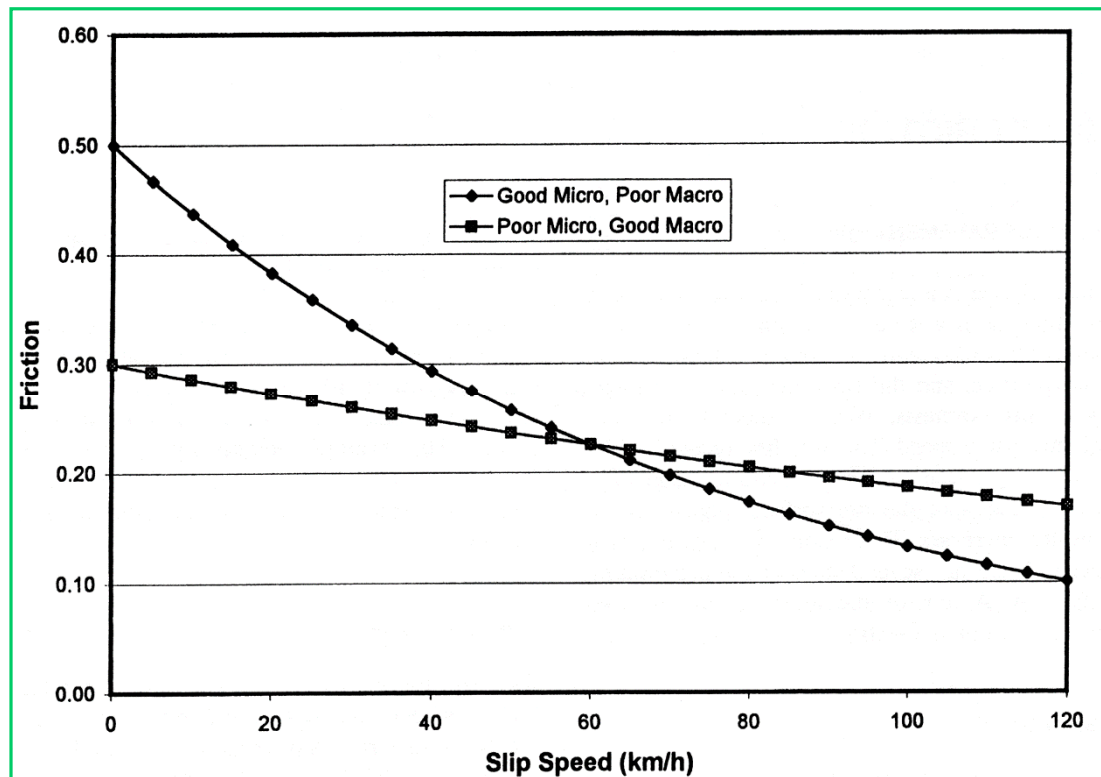
Metodi di misura dell'aderenza (4)



Test equipment	Test tire		Test speed (km/h)	Test water depth (mm)	Design objective for new surface	Maintenance planning level	Minimum friction level
	Type	Pressure (kPa)					
(1)	(2)		(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Mu-meter Trailer	A	70	65	1.0	0.72	0.52	0.42
	A	70	95	1.0	0.66	0.38	0.26
Skiddometer Trailer	B	210	65	1.0	0.82	0.60	0.50
	B	210	95	1.0	0.74	0.47	0.34
Surface Friction Tester Vehicle	B	210	65	1.0	0.82	0.60	0.50
	B	210	95	1.0	0.74	0.47	0.34
Runway Friction Tester Vehicle	B	210	65	1.0	0.82	0.60	0.50
	B	210	95	1.0	0.74	0.54	0.41
TATRA Friction Tester Vehicle	B	210	65	1.0	0.76	0.57	0.48
	B	210	95	1.0	0.67	0.52	0.42
GRIPTESTER Trailer	C	140	65	1.0	0.74	0.53	0.43
	C	140	95	1.0	0.64	0.36	0.24

Modelli di previsione dell'aderenza

Sono modelli che considerano l'aderenza come funzione della velocità del veicolo: la caratterizzazione della pavimentazione viene eseguita attraverso una misura di aderenza e di tessitura superficiale.



$$SN_V = SN_0 e^{-\frac{PGN}{100} V}$$
$$SN_0 = 1,32 BPN - 34,9$$
$$PGN = 0,45 MTD^{-0,47}$$

Modello di Leu-Henry

$$F(S) = F_0 e^{-\frac{S}{S_P}}$$

Penn State Model

Indici IFI, EFI e IRFI (1)

DEVICE	FRS	V	%SLIP	S	TYPE	ln FRS
C4	.685	30.5	10	3.1	SLIP	-0.38
C4	.660	49.0	10	4.9	SLIP	-0.42
C4	.640	61.5	10	6.2	SLIP	-0.45
D8	.660	30.0	14	4.4	SLIP	-0.42
D8	.535	65.0	14	9.4	SLIP	-0.63
D8	.480	90.0	14	13.0	SLIP	-0.73
C8	.820	30.0	21	6.3	SFC 12 DEG	-0.20
C8	.715	60.0	21	12.0	SFC 12 DEG	-0.34
C8	.605	90.0	21	18.0	SFC 12 DEG	-0.50
C9	.645	30.0	26	7.9	SFC 15 DEG	-0.44
C9	.565	52.0	26	13.0	SFC 15 DEG	-0.57
C9	.385	90.0	26	23.0	SFC 15 DEG	-0.95
C10	.670	30.0	34	10.2	SFC 20 DEG	-0.40
C10	.520	61.5	34	20.9	SFC 20 DEG	-0.65
C10	.370	93.0	34	31.6	SFC 20 DEG	-0.99
C3B	.565	32.0	34	10.9	SFC 20 DEG	-0.57
C3B	.525	61.5	34	24.6	SFC 20 DEG	-0.64
C3B	.475	79.5	34	27.0	SFC 20 DEG	-0.74
D2	.700	30.0	34	10.2	SFC 20 DEG	-0.36
D2	.820	58.0	34	19.7	SFC 20 DEG	-0.48
D2	.555	84.0	34	28.6	SFC 20 DEG	-0.59
D3	.780	30.5	34	10.4	SFC 20 DEG	-0.25
D3	.685	61.0	34	20.7	SFC 20 DEG	-0.41
D3	.605	86.0	34	29.2	SFC 20 DEG	-0.50
D4	.660	30.0	34	10.2	SFC 20 DEG	-0.42
D4	.575	60.1	34	20.4	SFC 20 DEG	-0.55
D4	.540	88.1	34	30.0	SFC 20 DEG	-0.62
D5	.659	30.6	34	10.4	SFC 20 DEG	-0.42
D5	.610	49.9	34	17.0	SFC 20 DEG	-0.49
D5	.514	91.9	34	31.2	SFC 20 DEG	-0.67
C5	.599	30.0	86	25.8	SLIP	-0.51
C5	.513	50.0	86	43.0	SLIP	-0.67
C5	.381	90.0	86	77.4	SLIP	-1.02
B6	.560	29.6	100	29.6	LOCKED	-0.58
B6	.322	67.2	100	67.2	LOCKED	-1.13
B6	.229	92.5	100	92.5	LOCKED	-1.47
D6	.480	38.5	100	38.5	LOCKED	-0.73
D6	.345	61.5	100	61.5	LOCKED	-1.08
D6	.220	91.5	100	91.5	LOCKED	-1.51

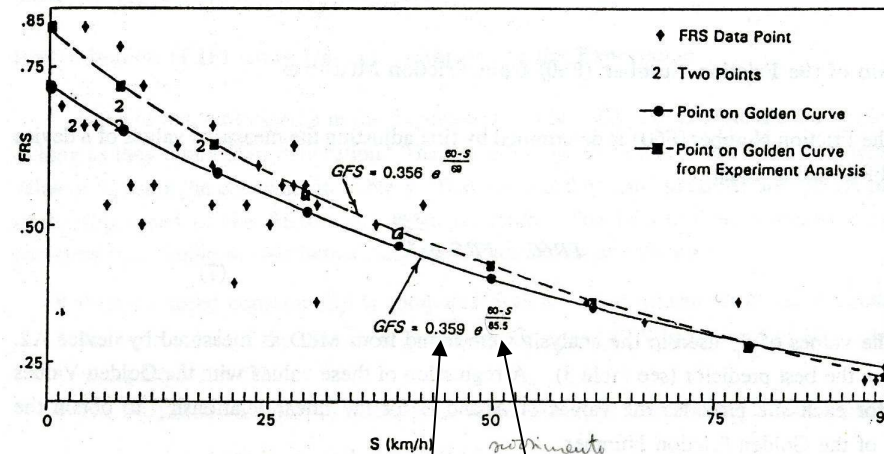


FIGURE 1. The Golden Curve for Site 6 Section A

$$F(S) = F60 \cdot e^{\frac{60-S}{S_p}}$$

↓

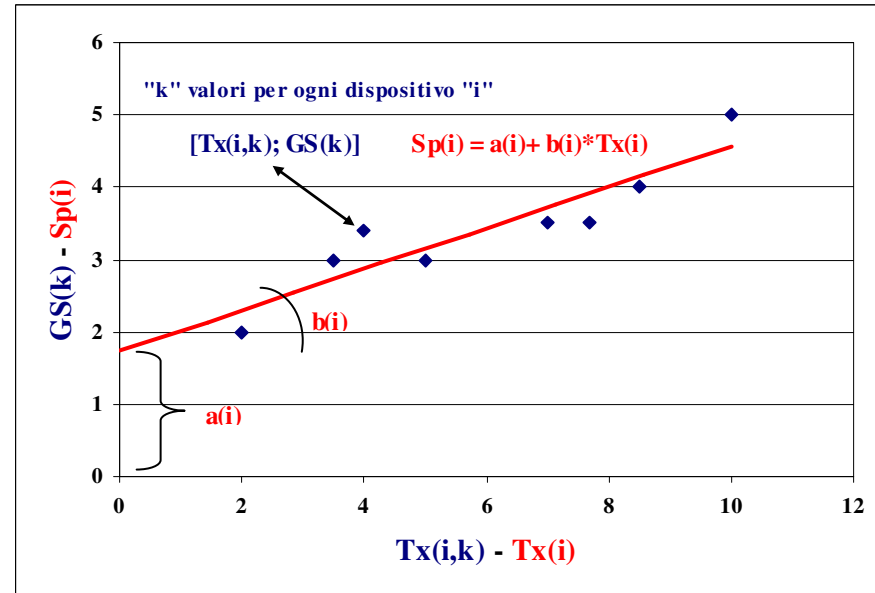
$$GF(S)_k = GF(60)_k \cdot e^{\frac{60-S}{GS_k}}$$

↑ ↑ ↑

Misurato = FRS Costanti calcolati dall'analisi di regr.

Misurato = S

Indici IFI, EFI e IRFI (2)



$$\begin{aligned}
 GF(S)_1 &= GF(60)_1 \cdot e^{\frac{60-S}{GS_1}} \\
 GF(S)_2 &= GF(60)_2 \cdot e^{\frac{60-S}{GS_2}} \\
 &\dots\dots\dots \\
 GF(S)_k &= GF(60)_k \cdot e^{\frac{60-S}{GS_k}}
 \end{aligned}$$

Arrows from the GS_k terms point to the box below.

**GSk calcolati da
Pagina precedente**

**Costanti calcolati dall'analisi di regr.
Valide per il dispositivo "i"**

Misurato $Tx_{i,k}$

$$S_{P_i} = GS = a_i + b_i \cdot Tx_i$$

Indici IFI, EFI e IRFI (3)

TABLE 24. REGRESSIONS OF THE PREDICTED SPEED CONSTANT S_p WITH THE GOLD SPEED CONSTANT GS.
TABLEAU 24. RÉGRESIONS SERVANT À PRÉDIRE LA CONSTANCE S_p À PARTIR DE LA CONSTANCE DE VITESSE D'OR GS.
TABLA 24. REGRESIÓN ENTRE LA CONSTANCE DE VELOCIDAD S_p Y LA CONSTANCE DE VELOCIDAD DE REFERENCIA GS.

METHOD	DEVICE	V	N	a	b	Max E	Ave E	RMSE	R
MPD	A2	34	69	14.235	89.719746	77.80	14.78	21.33	0.956
ETD	A2	34	69	37.3855	76.9768	78.27	14.79	21.42	0.950
MPD	A5	0	65	9.74081	81.67568	77.19	16.94	23.18	0.941
TDMA	A2	34	69	17.3401	94.25999	69.42	17.75	23.59	0.939
MTD	A8	0	69	-11.5981	113.63246	85.38	17.95	25.42	0.930
MTD	A3B	60	25	-12.6729	119.769	57.90	18.70	25.39	0.920
4SC	D3	60	67	17.628	92.9984	125.73	18.54	28.02	0.915
RQ	D3	60	67	14.1414	180.6588	130.17	19.33	28.71	0.911
MPD	A4	18	69	11.5017	69.13345	96.95	20.80	29.14	0.906
RMS	A2	34	69	18.7992	170.08937	96.47	20.14	28.57	0.906
RA	D3	60	64	16.395	225.4199	126.00	19.07	28.56	0.906
RMS	A1	30	69	22.6763	285.61917	86.20	23.48	29.31	0.902
MPD	A4	36	69	9.22889	83.2893	109.41	21.59	30.39	0.897
MTD	A3B	30	25	-3.4267	116.55418	73.32	21.48	29.27	0.892
RMS	A3B	60	25	13.9824	186.7008	71.52	23.41	30.97	0.878
1/TIME	B11E	80	33	48.1228	129.9821	69.52	15.45	24.20	0.877
MTD	A3B	80	25	-3.05123	108.202	72.06	24.69	31.96	0.870
RMS	A5	0	66	21.1784	158.69943	96.14	24.67	35.10	0.862
CSMTD	D4	50	58	30.6987	148.4899	141.45	23.44	34.48	0.814
MTD	D2	69	62	-34.9681	142.6474	128.76	20.01	37.21	0.806
RMS	A3B	80	25	21.4705	172.5365	95.43	29.92	39.02	0.798
SMTD	D5	50	63	25.8322	139.6801	151.73	24.40	36.48	0.793
RMS	A3B	30	25	35.2133	154.6843	114.56	29.22	46.46	0.781
ROUGH	A3E	30	33	9.67855	215.1516	71.81	21.62	31.61	0.779
MEGA	A3E	30	33	32.535	247.9318	90.98	21.96	32.78	0.759
MPD	A4	72	69	42.256	139.2028	146.97	35.23	48.10	0.714
FINE	A3E	30	33	21.9145	317.0124	115.30	29.81	43.74	0.496
BPN	A14	0	68	-130.262	3.70656	177.74	48.60	61.44	0.451
BPN	B7	0	62	-44.4114	2.99675	162.51	50.41	60.05	0.397

Method / Méthode / Método

Device / Appareil / Equipo

Max |E| = Maximum absolute error / Erreur absolue maximum / Error absoluto máximo

Ave |E| = Average absolute error / Erreur absolue moyenne / Error absoluto medio

RMSE = Root mean square of the residual error / Moyenne quadratique de l'erreur (SD des restes) / Raíz media cuadrática del error residual

Indici IFI, EFI e IRFI (4)

Velocità di misura reale

$$F60 = F(S) \cdot e^{\frac{S-60}{S_p}}$$

Riferiti al dispositivo "j"

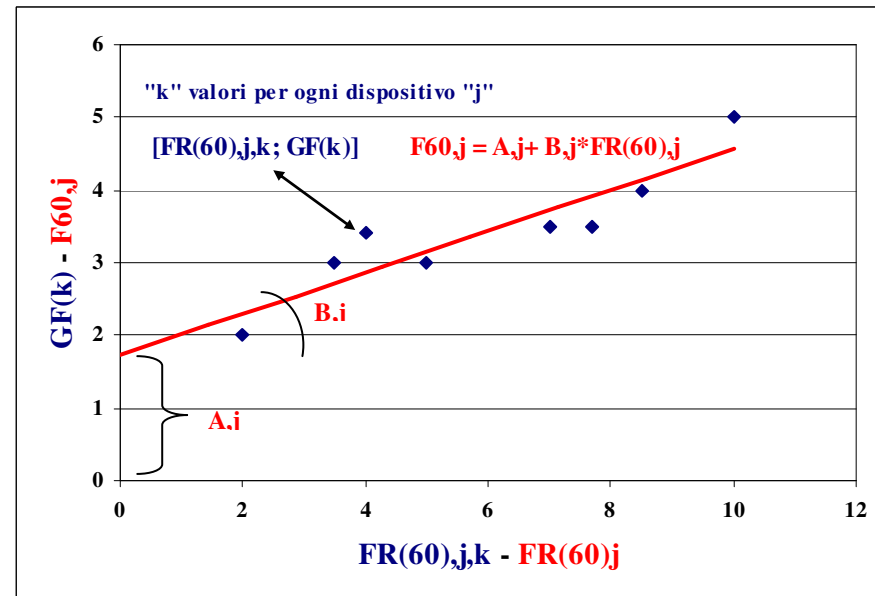
$$FR(60)_{j,1} = FR(S)_{j,1} \cdot e^{\frac{S-60}{S_{p1}}}$$

$$FR(60)_{j,2} = FR(S)_{j,2} \cdot e^{\frac{S-60}{S_{p2}}}$$

.....

$$FR(60)_{j,k} = FR(S)_{j,k} \cdot e^{\frac{S-60}{S_{pk}}}$$

Riferito al sito "k"



Misurato = $FR(60),j,k$

$$F60_j = GF(60) = A_j + B_j \cdot FR(60)_j \leftarrow$$

$\uparrow$ $\uparrow$ $\uparrow$
 Calcolati = $GF(60)k$ Costanti calcolate dall'analisi di regr.

Indici IFI e IRFI (5)

$$F60_j = A_j + B_j \cdot FR(60)_j$$

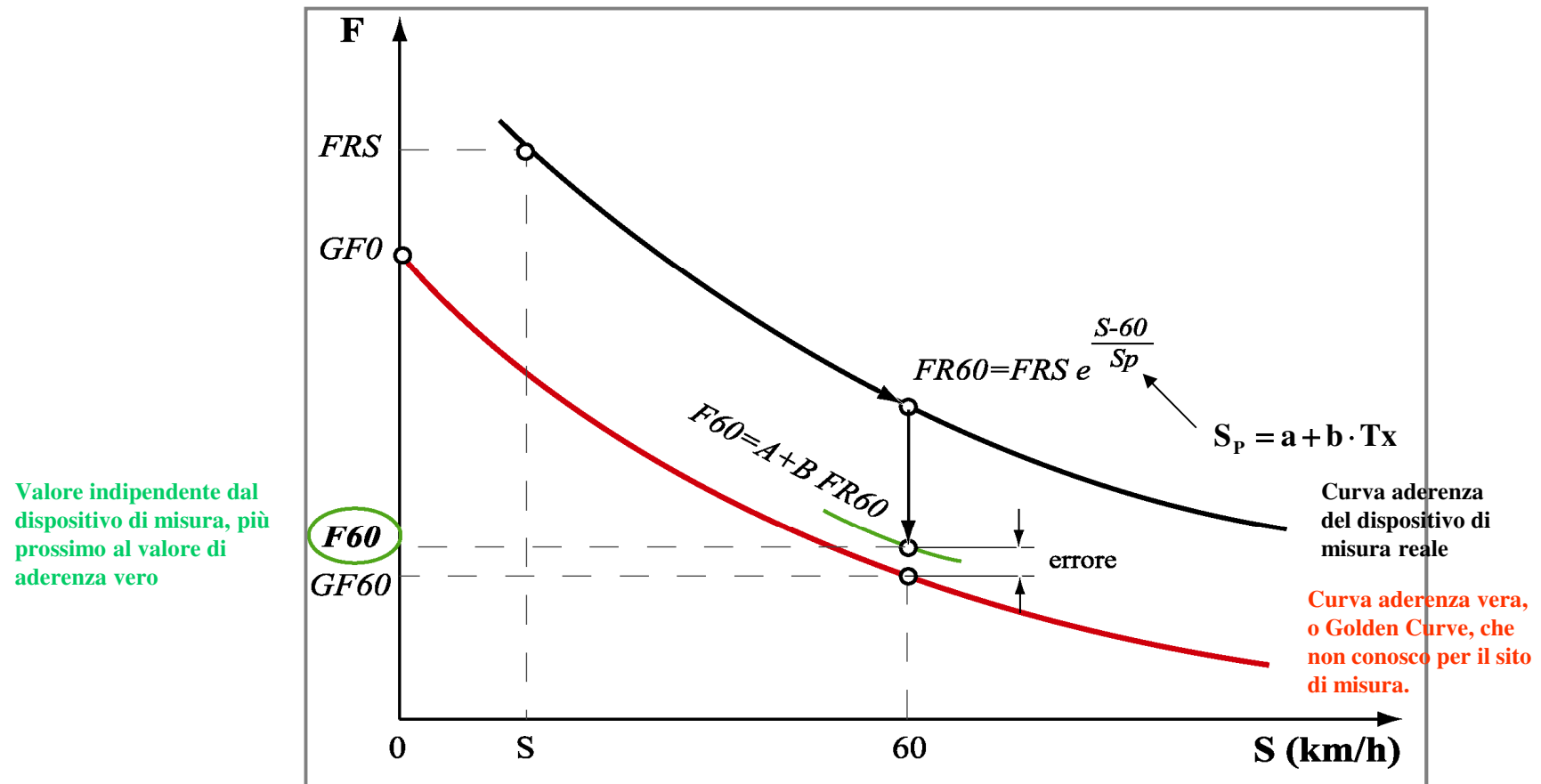
TABLE 25. REGRESSIONS TO PREDICT GF60 USING THE PIARC MODEL $F60 = A + B \cdot FRS \cdot \exp[(S-60)/S_p]$ WHERE S_p WAS DETERMINED USING MPD
 TABLEAU 25. REGRESSIONS SERVANT A PREDIRE GF60 EN METTANT EN OEUVRE LE MODELE AIPCR $F60 = A + B \cdot \exp[(S-60)/S_p]$, DANS LEQUEL S_p A ETE
 CALCULE A PARTIR DE LA MPD
 TABLA 25. REGRESIONES PARA OBTENER GF60 UTILIZANDO EL MODELO AIPCR: $F60 = A + B \cdot FRS \cdot \exp[(S-60)/S_p]$, DONDE S_p SE HA DETERMINADO
 UTILIZANDO MPD

BLANK TIRE		S	N	A	B	C	Max E	Ave E	RMSE	R
LKD	B6.524	65	69	0.04461	0.92549	0	0.095	0.020	0.0267	0.969
	D6	60	69	0.00226	1.00762	0	0.060	0.016	0.0243	0.981
SLP	B4SLP-86	52	15	-0.03033	0.86411	0	0.038	0.021	0.0267	0.96
	B4SLP-20	12	15	0.11917	0.64319	0	0.089	0.031	0.0411	0.915
	C4	10	63	0.04195	0.84865	0	0.091	0.031	0.0394	0.936
	C5	43	69	0.01883	0.8678	0	0.203	0.043	0.0584	0.84
	D8	9.4	67	0.08209	0.9104	0	0.086	0.027	0.0346	0.947
SFC	C8	12.5	69	0.05436	0.7702	0	0.091	0.029	0.0362	0.941
	C9	12.9	69	0.1134	0.7291	0	0.081	0.024	0.0301	0.960
	C10	20.5	61	0.1135	0.74581	0	0.085	0.025	0.0311	0.962
	C3B	20.5	35	0.04912	0.96738	0	0.074	0.023	0.03	0.955
	C3E	20.5	27	0.0188	0.8127	0	0.131	0.043	0.0558	0.839
	C6E	20.5	29	0.0319	0.8734	0	0.063	0.020	0.0262	0.959
	D1E	20.5	31	0.0165	0.8495	0	0.067	0.018	0.026	0.967
	D2	20.5	68	0.02102	0.9276	0	0.113	0.039	0.0516	0.879
	D3	20.5	69	-0.00594	0.86211	0	0.085	0.026	0.0342	0.948
	D4	20.5	69	0.00195	0.9867	0	0.094	0.031	0.0373	0.938
	D5	17.1	69	0.03258	0.8717	0	0.112	0.030	0.0385	0.933
RIBBED TIRE		S	N	A	B	C	Max E	Ave E	RMSE	R
LKD	B1LKD	60	42	0.02204	0.50025	0.082158	0.085	0.033	0.0419	0.903
	B2LKD	60	63	0.02634	0.5042	0.099195	0.114	0.039	0.0491	0.895
	B5LKD	60	59	-0.07215	0.76744	0.085505	0.124	0.038	0.049	0.904
	B6-501	65	67	-0.02283	0.60682	0.097589	0.115	0.033	0.043	0.916
	C1	60	62	-0.02534	0.80685	0.067724	0.011	0.033	0.0414	0.927
SLP	B1SLP	12	46	0.14107	0.32256	0.07388	0.126	0.050	0.0624	0.8305
	B2SLP	12	64	0.02968	0.91848	-0.01362	0.073	0.028	0.035	0.9498
	B3	12	68	0.03964	0.85618	-0.01589	0.084	0.029	0.0365	0.9415
	B5SLP	12		0.01962	0.8673	-0.00588	0.118	0.033	0.0414	0.9179
SLIDER		S	N	A	B	C	Max E	Ave E	RMSE	R
	A13.60	60	68	-0.03365	0.77098	0	0.086	0.027	0.048	0.9
	A13.20	20	68	0.08114	0.73158	0	0.069	0.026	0.0307	0.96
	A14-BPT	10	68	0.05626	0.00756	0	0.109	0.043	0.0526	0.874
	B7-SRT	10	62	0.0436	0.00953	0	0.173	0.030	0.0454	0.913

Blank tire / Pneu sans sculpture / Neumático liso
 Ribbed tire / Pneu nervuré / Neumático estriado
 Slider / Curseur / Zapata

Max |E|: Maximum absolute error / Erreur absolue maximum / Error absoluto máximo
 Ave |E|: Average absolute error / Erreur absolue moyenne / Error absoluto medio
 RMSE= Root mean square of the residual error / Moyenne quadratique de l'erreur (SD des
 restes) / Raíz media cuadrática del error residual

Indici IFI e IRFI (6)



Indici IFI e IRFI (7)

International Friction Index *IFI* (F_{60} , S_p)

International Runway Friction Index *IRFI* (*sperimentazione in corso; le costanti saranno legate alla tipologia e allo stato della pavimentazione e allo strumento di misura*)

$$S_p = a + b \cdot TX$$

$$FR_{60} = CAT_{60} \cdot e^{\frac{60 \sin 20^\circ - 60}{S_p}}$$

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60}$$

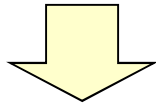
$$F(S) = F_{60} \cdot e^{\frac{60 - S}{S_p}}$$

Strada "A" - direzione <u>SUD</u>				Corsia di marcia	
		Velocità: 60 Km/h		t = 20°	
Progressiva [m]	EVENTI	CAT Media	MPD	SP	F60
50		0,32	0,46	55,69	0,157
100		0,36	0,55	63,42	0,191
150		0,38	0,44	53,22	0,182
200		0,43	0,43	52,66	0,204
250		0,45	0,41	50,75	0,206
300		0,37	0,39	49,07	0,167
350		0,43	0,42	51,99	0,201
400		0,45	0,45	54,12	0,217
450		0,35	0,45	54,12	0,168
500		0,35	0,42	52,10	0,165
550		0,33	0,43	53,11	0,158
600			0,36	46,80	0,163

Valori di soglia

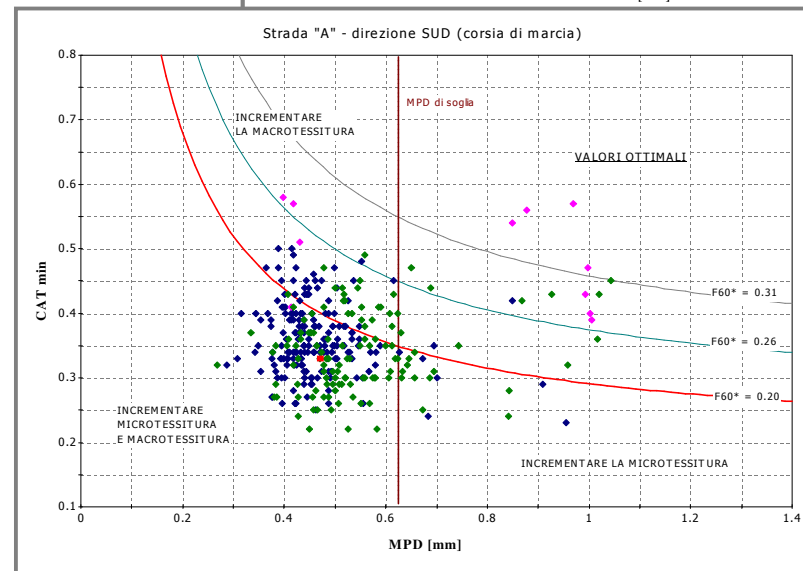
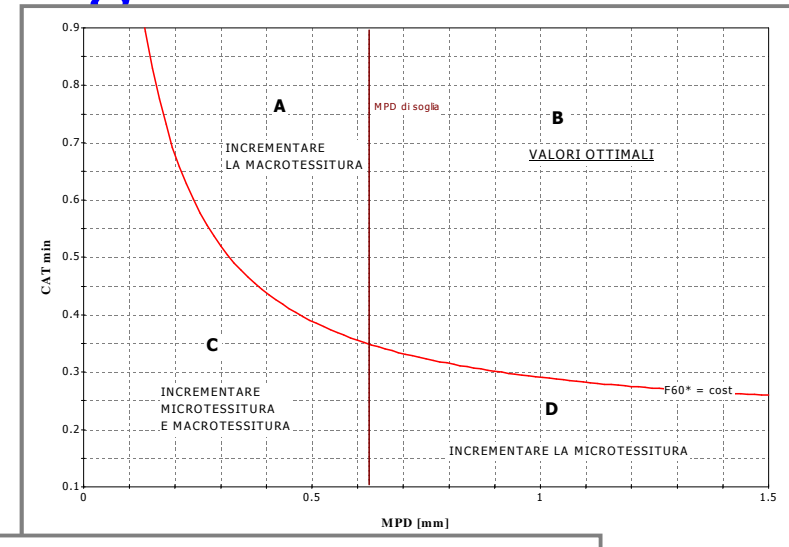
$$FRS_{\min} = \frac{(F60^* - A)}{B} \cdot e^{\frac{60-S}{a+b \cdot TX}}$$

$$TX_{\min} = \frac{(S_p^* - a)}{b}$$



$$CAT_{\min} = \frac{(F60^* - A)}{B} \cdot e^{\frac{60-S}{a+b \cdot MPD}}$$

$$MPD_{\min} = \frac{S_p^* - a}{b}$$



I materiali per lo strato superficiale



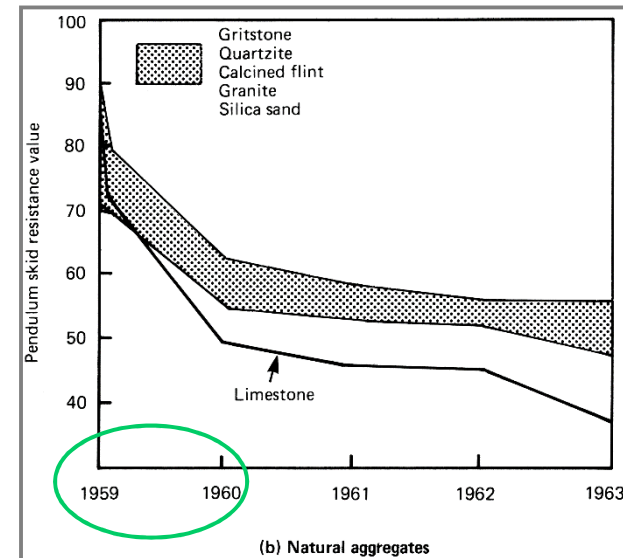
Gli aggregati costituiscono più del 90 % in peso dei conglomerati bituminosi impiegati nelle pavimentazioni stradali

Caratteristiche petrografiche degli inerti

Provengono dalla frantumazione delle rocce presenti in natura:

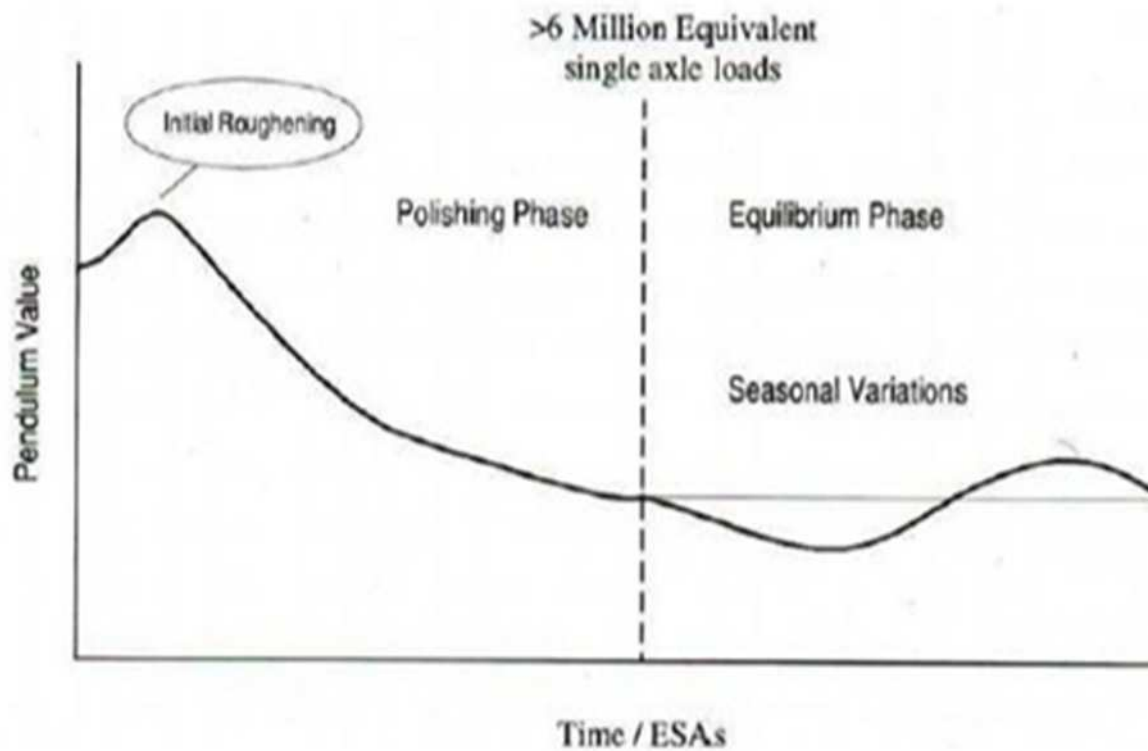
- **Eruttive**
- **Metamorfiche**
- **Sedimentarie**

Le rocce più resistenti hanno grana fina e porosità quasi nulla



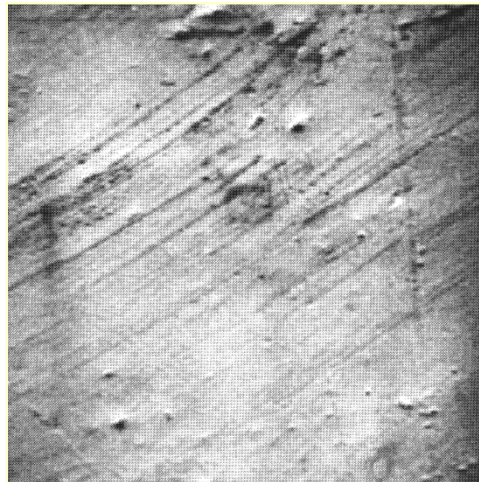
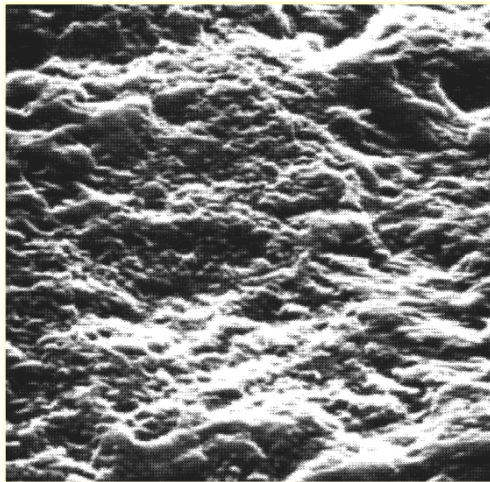
Tipi di roccia	Strati della sovrastruttura	
	usura	base e fondazioni
<i>Rocce eruttive</i>	50 %	12.5 %
<i>Rocce metamorfiche</i>	28 %	14 %
<i>Calcari</i>	2 %	25 %
<i>Alluvionali calcaree</i>	0 %	3.8 %
<i>Alluvionali silico-calcaree</i>	8 %	23 %
<i>Alluvionali silicee</i>	12 %	21.7 %
Totale	100 %	100 %

La resistenza all'usura (1)



La resistenza all'usura (2)

USURA PER ATTRITO



Test CLA

*Superficie dell'inerte prima e dopo il test CLA
(secondo la norma CNR B.U. n. 140/92)*

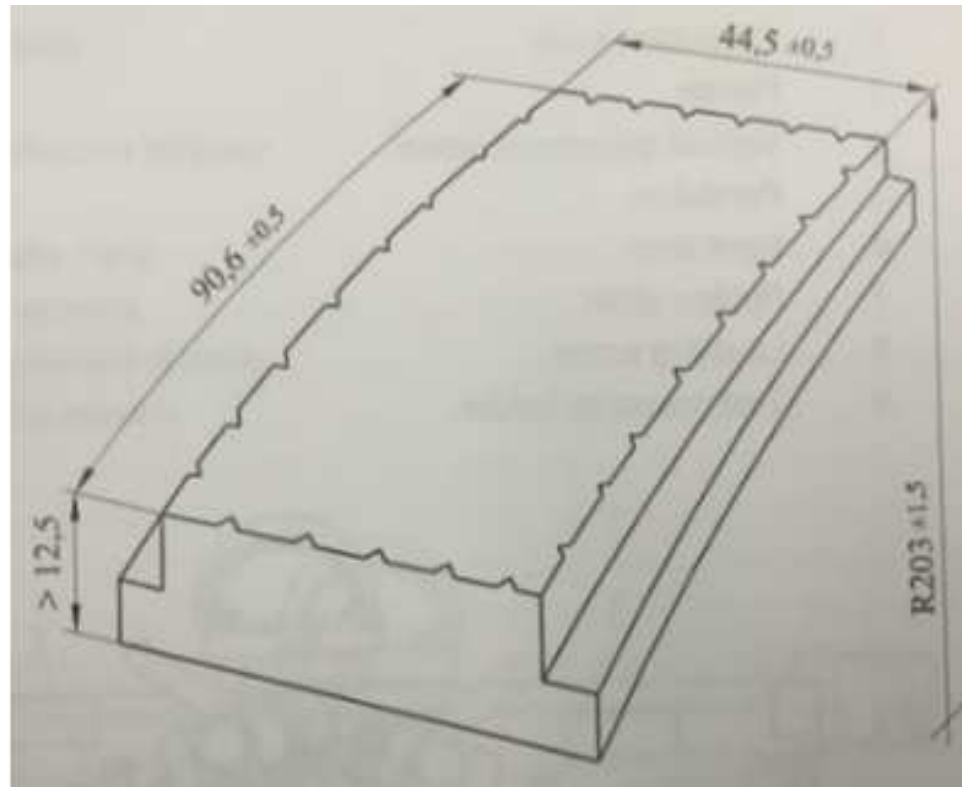
CLA, coefficiente levigabilità accelerata (1)

- Norma CNR B.U. 140/1992; Norma UNI EN 1097-8 (Valore di levigabilità VL)
- Vanno preparati 4 provini per ogni materiale da testare e 4 provini di un materiale di riferimento.
- La pezzatura da utilizzare viene ottenuta raccogliendo, prima, il passante ad un setaccio a maglie quadrate di luce 10 mm, poi, il trattenuto ad un setaccio a barre con interasse ($7,2 \pm 0,1$)mm



CLA, coefficiente levigabilità accelerata (2)

- I provini sono stati realizzati tramite stampi rettificati di precisione con coperchio avente la faccia interna curva.



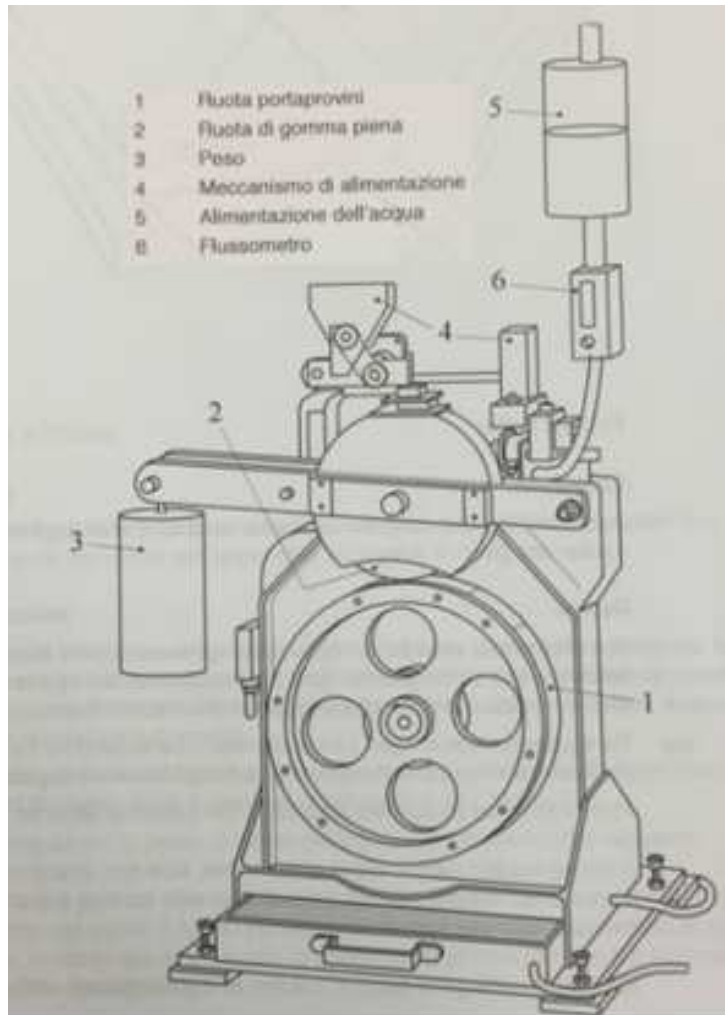
CLA, coefficiente levigabilità accelerata (3)



CLA, coefficiente levigabilità accelerata (4)



CLA, coefficiente levigabilità accelerata (5)



CLA, coefficiente levigabilità accelerata (6)



$$PSV = S + 52,5 - C$$

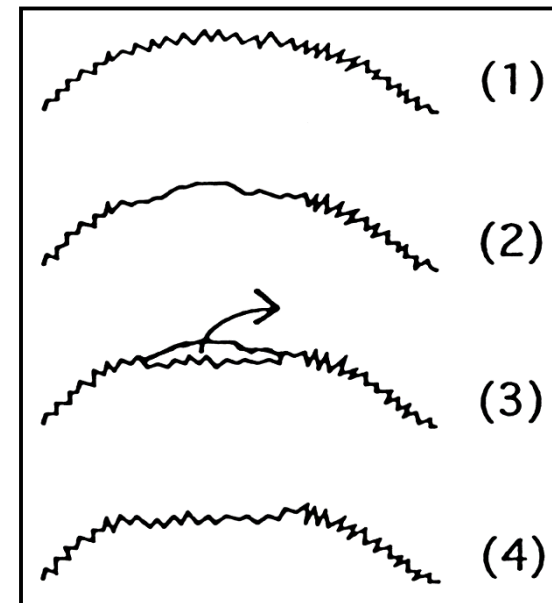
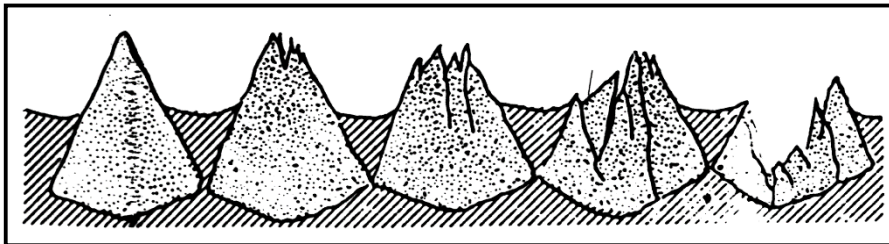
PSV polished stone value
o valore di levigabilità

S media valori 4 provini
materiale da testare

C media valori 4 provini
pietra di riferimento

La resistenza all'usura (1)

USURA PER FRAMMENTAZIONE



La resistenza all'usura (2)

NORMA UNI EN 1097-2: Metodi per la determinazione della resistenza alla frammentazione

CNR B.U. n. 34/73 - Determinazione della perdita in peso per abrasione di aggregati lapidei con l'apparecchio Los Angeles



$$L.A. = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

La resistenza all'usura (3)

NORMA UNI EN 1097-1: Determinazione della resistenza all'usura (micro-Deval)

CNR B.U. n. 109/85 - Norme sugli aggregati: determinazione del coefficiente di usura Micro-Deval



$$MD = \frac{M - m}{M} * 100$$

Dove:

M massa in g del provino prima della prova, definito pari a (500 ± 2) g;

m massa in g del trattenuto al setaccio da 1,6 mm dopo la prova.

La resistenza all'usura (4)

Prova MicroDeval



La granulometria (1)



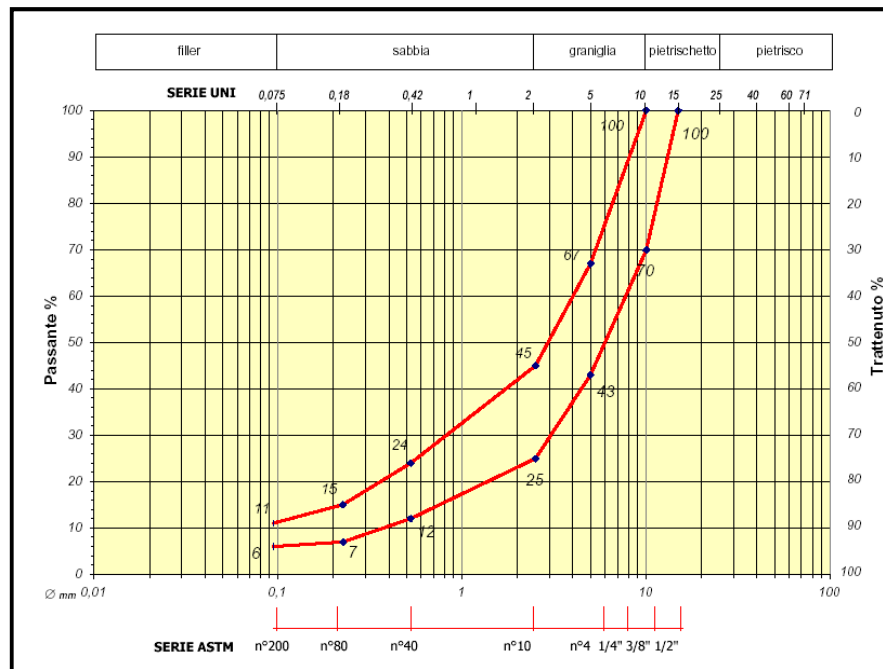
NORMA UNI EN 12697-2: Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Determinazione della granulometria.

NORMA CNR 23/71: Analisi granulometrica di una terra mediante crivelli e setacci.

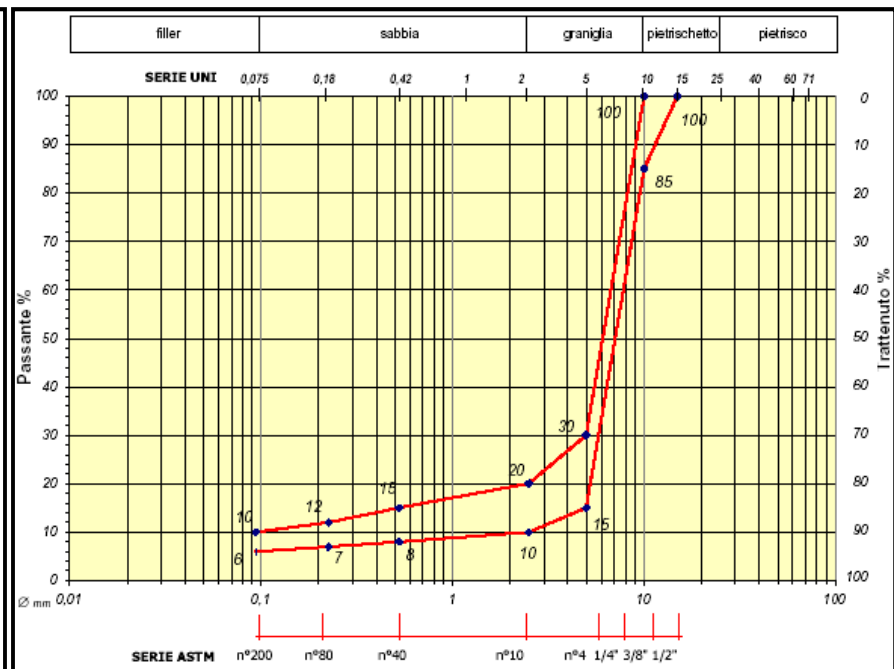
La curva granulometrica determina la porosità finale del manto d'usura influenzandone:

- **Capacità di drenaggio superficiale**
- **Aderenza (specialmente sul bagnato)**
- **Inquinamento acustico**
- **Condizioni di visibilità in presenza di pioggia**

La granulometria (2)



TRADIZIONALE



DRENANTE FONOASSORBENTE

Gli interventi di ripristino dell'aderenza (1)

Interventi con apporto di materiale **Interventi a caldo**

Strati di usura drenanti;



Microtappeti;



Splittmastix;



Gli interventi di ripristino dell'aderenza (2)

Interventi con apporto di materiale (interventi a freddo):

Trattamenti superficiali di irruvidimento (monostrato o bistrato);



Microtappeti (Slurry – Seal);



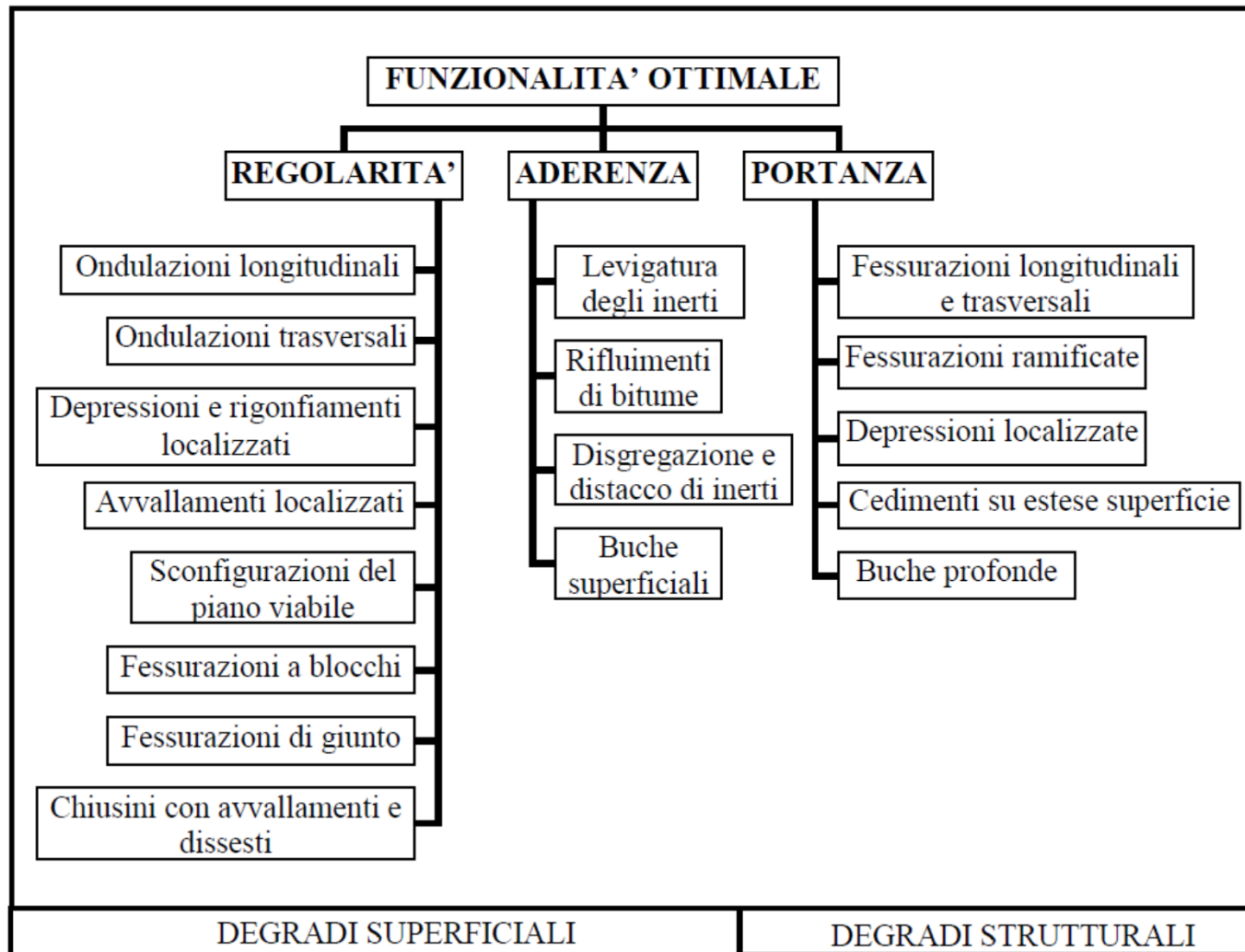
Gli interventi di ripristino dell'aderenza (3)

Interventi senza apporto di materiale

Irruvidimenti: **Striature;**
 Pallinature;



La regolarità superficiale



Ondulazioni longitudinali e trasversali



Livello di severità	Entità dell'ammaloramento (f/L =freccia media/lung. onda)
Basso	$1,25/1000 \leq f/L < 2,5/1000$
Moderato	$2,5/1000 < f/L < 5/1000$
Alto	$f/L \geq 5/1000$

Livello di severità	Entità dell'ammaloramento (z =massima profondità del cavo)
Basso	$z \leq 10 \text{ mm}$
Moderato	$10 \text{ mm} < z < 20 \text{ mm}$
Alto	$z \geq 20 \text{ mm}$

Depressioni e rigonfiamenti localizzati



Livello di severità	Entità dell'ammaloramento (Δz = escursione quota min-max)
Basso	$\Delta z \leq 15 \text{ mm}$
Moderato	$15 \text{ mm} < \Delta z < 30 \text{ mm}$
Alto	$\Delta z \geq 30 \text{ mm}$

Avvallamenti



Livello di severità	Entità dell'ammaloramento (z=massima profondità del cavo)
Basso	$z \leq 10 \text{ mm}$
Moderato	$10 \text{ mm} < z < 20 \text{ mm}$
Alto	$z \geq 20 \text{ mm}$

Sconfigurazioni piano viabile



Livello di severità	Entità dell'ammaloramento (A = ampiezza della zona)
Basso	$A \leq 1 \text{ m}^2$
Moderato	$1 \text{ m}^2 < A < 5 \text{ m}^2$
Alto	$A \geq 5 \text{ m}^2$

Fessurazioni a blocchi



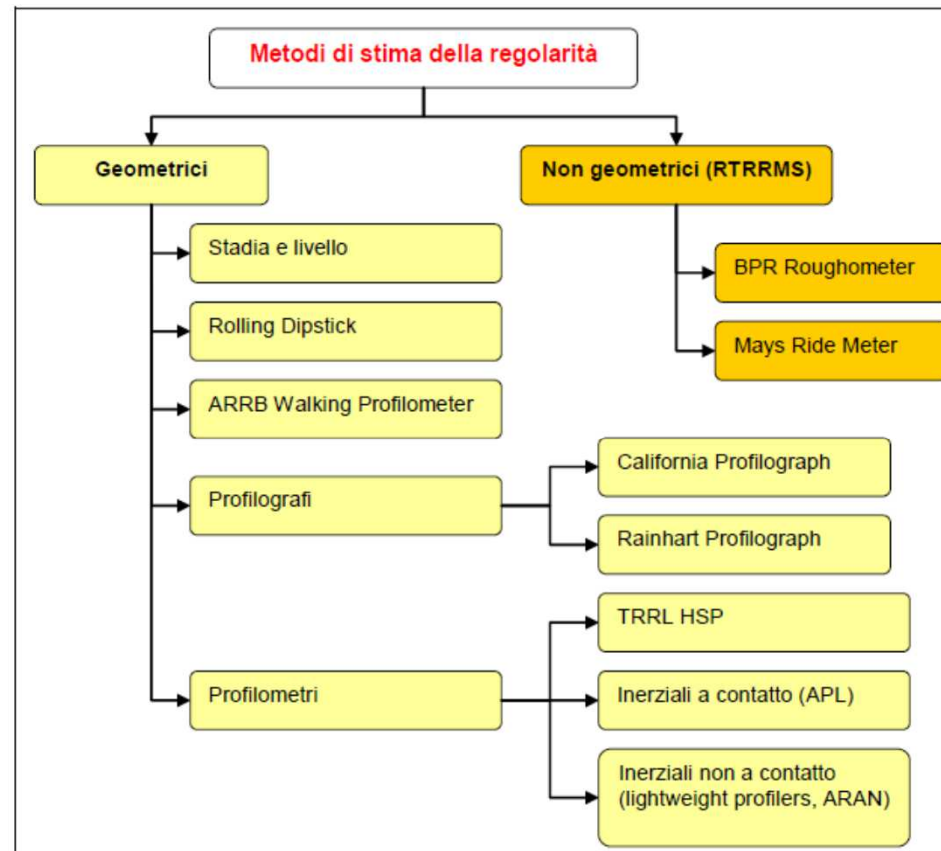
Livello di severità	Entità dell'ammaloramento
Basso	Fessurazioni lievi
Moderato	Fessurazioni multiple in progressivo peggioramento
Alto	Presenza di rotture con ammaloramento dei bordi delle fessure e asportazione di materiale

Fessurazioni di giunto



Livello di severità	Entità dell'ammaloramento
Basso	Fessura lievemente accennata
Moderato	Fessura multiple parallele e a pelle di coccodrillo, con allontanamento progressivo dei lembi (0,5 – 1 cm)
Alto	Presenza di rotture con ammaloramento dei bordi delle fessure e asportazione di materiale

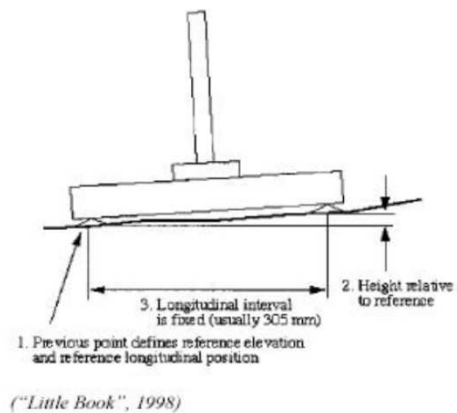
La regolarità superficiale



La regolarità superficiale

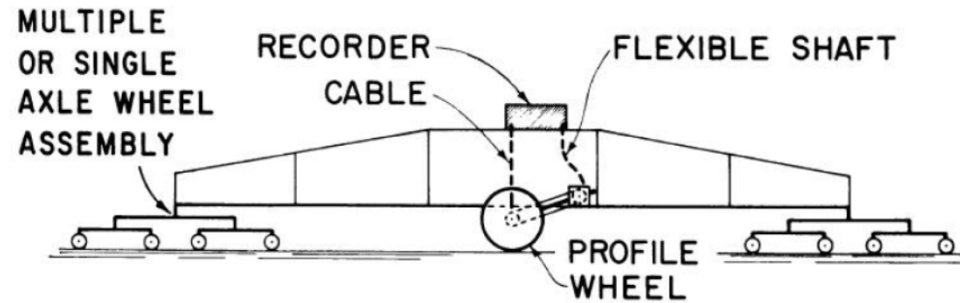


Profile Measurement: Dipstick Profiler



Walking Profiler, ARRB

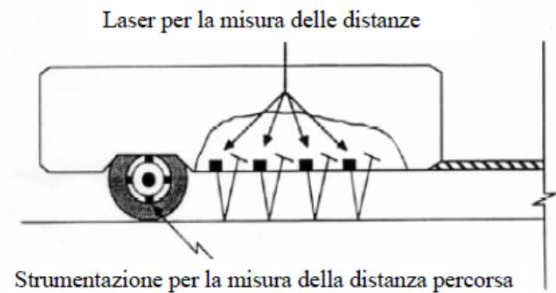
La regolarità superficiale



California PROFILOGRAPH



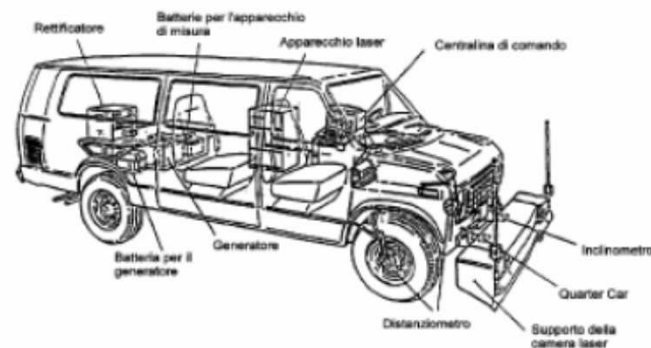
La regolarità superficiale



Texture Meter TRRL



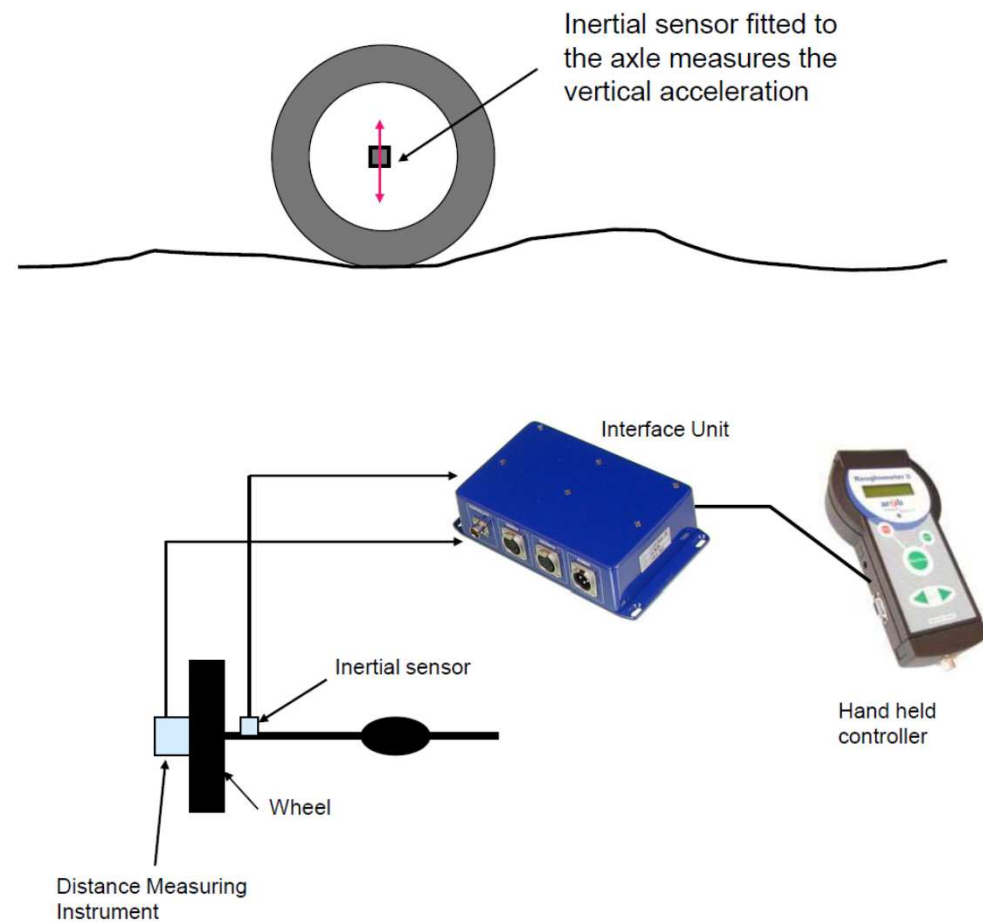
APL (Analizateur de Profil en Long):



ARAN (Automatic Road Analyzer)

La regolarità superficiale

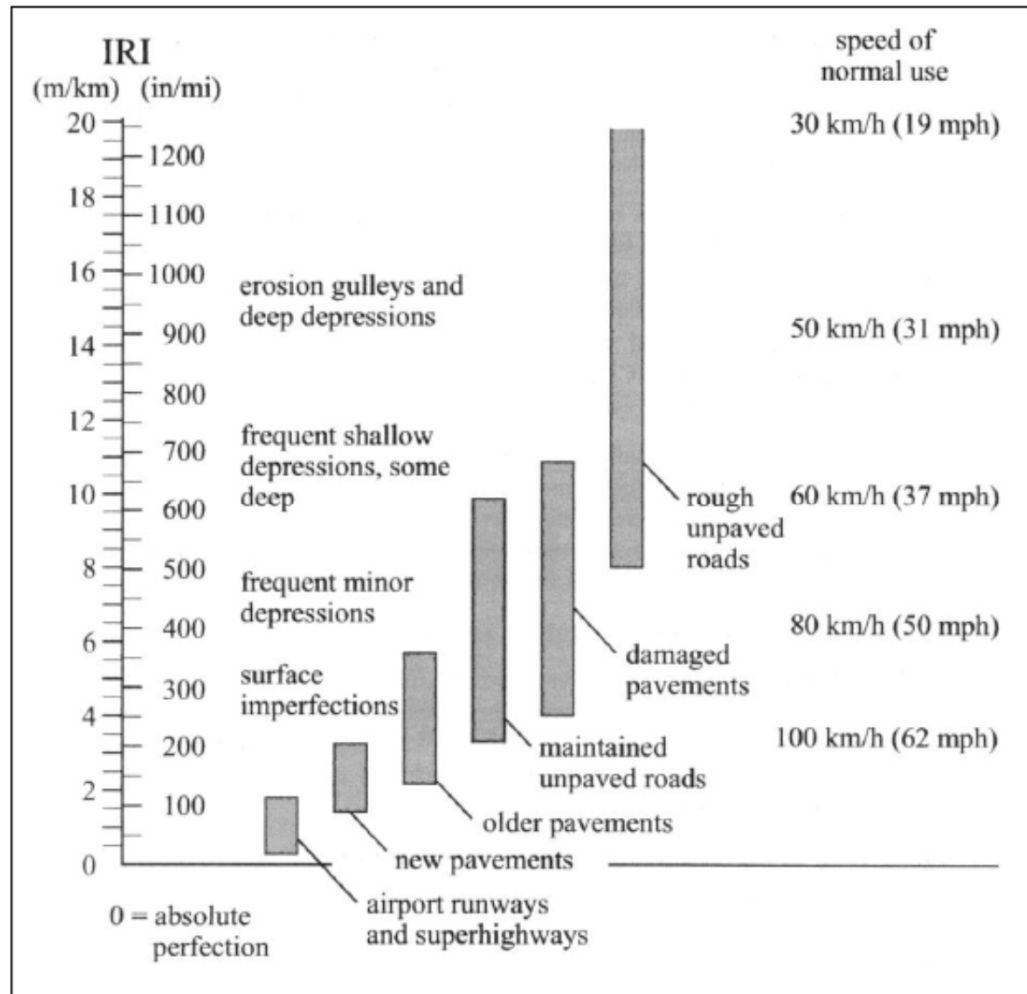
Response-Type Road Roughness Measuring Systems (RTRMS): Roughmeter



La regolarità superficiale

SIGLA NORMA	N° NORMA	ANNO DI RIAPPROVAZIONE	TITOLO	NORME DI RIFERIMENTO
UNI EN	13036-6	2008	Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali - Metodi di prova - Parte 6: Misurazione dei profili trasversali e longitudinali nei settori e nei campi di lunghezza d'onda della regolarità e della megatessitura	ASTM E 867 ASTM E 950 ASTM E 1170 ASTM E 1364 ASTM E 1489 ASTM E 1500 ISO 8608 EN ISO 13473-1 EN 13036-8 WB TP N 45 WB TP N 46 TRB - NCHRP Report 434
UNI EN	13036-8	2008	Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali - Metodi di prova - Parte 8: Determinazione degli indici di irregolarità trasversale	ISO 3534-1

La regolarità superficiale



La regolarità superficiale

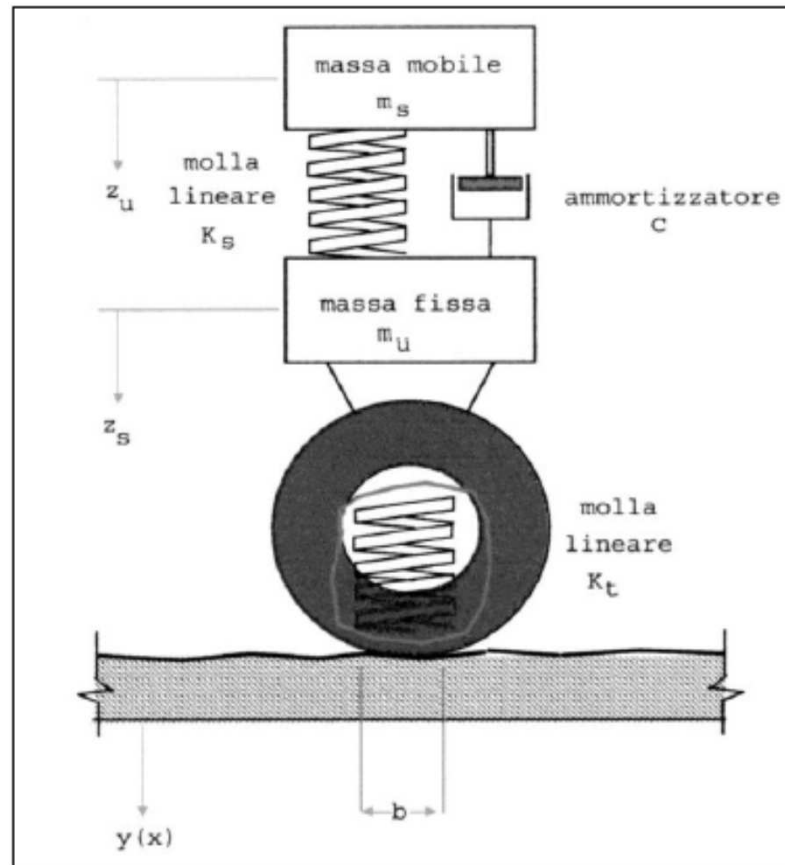


Figura 16: modello Quarter-Car Simulation

La regolarità superficiale

L'IRI corrisponde all' accumulo degli spostamenti delle sospensioni, diviso per la lunghezza del profilo analizzato. Per un profilo lungo L , percorso a velocità V standardizzata, si ha:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} \left| \dot{Z}_s - \dot{Z}_u \right| dt$$

dove:

Z_s = è la quota della massa sospesa relativa alla posizione di equilibrio statico;

Z_u = è la quota della massa non sospesa relativa alla posizione di equilibrio statico.

$\dot{Z}_s$ e $\dot{Z}_u$ = derivata rispetto al tempo dell'altezza della massa sospesa e non sospesa.

La regolarità superficiale

Present Serviceability Index (PSI)

$$PSI = 5,03 - 1,91 \times \log(1 + SV) - 1,38 \times RD^2 - 0,01 \times \sqrt{C + P}$$

dove:

- SV è la varianza della pendenza media ricavata da un profilo di regolarità lungo le traiettorie delle ruote.
- RD è la profondità media delle ormaie, misurata su una distanza trasversale di 2 ft rispetto al centro delle traiettorie delle ruote.
- C e P sono due tipiche situazioni di degrado per le pavimentazioni flessibili (fessurazioni e buche) misurate rispettivamente in unità di lunghezza (ft) e superficie (ft²) per 1000 ft² di superficie della pavimentazione.

$$SV = \frac{\sum (S - S_m)^2}{n - 1}$$

Dove:

S è la misura della pendenza del profilo misurata su una base di 1ft

n è il numero delle misure

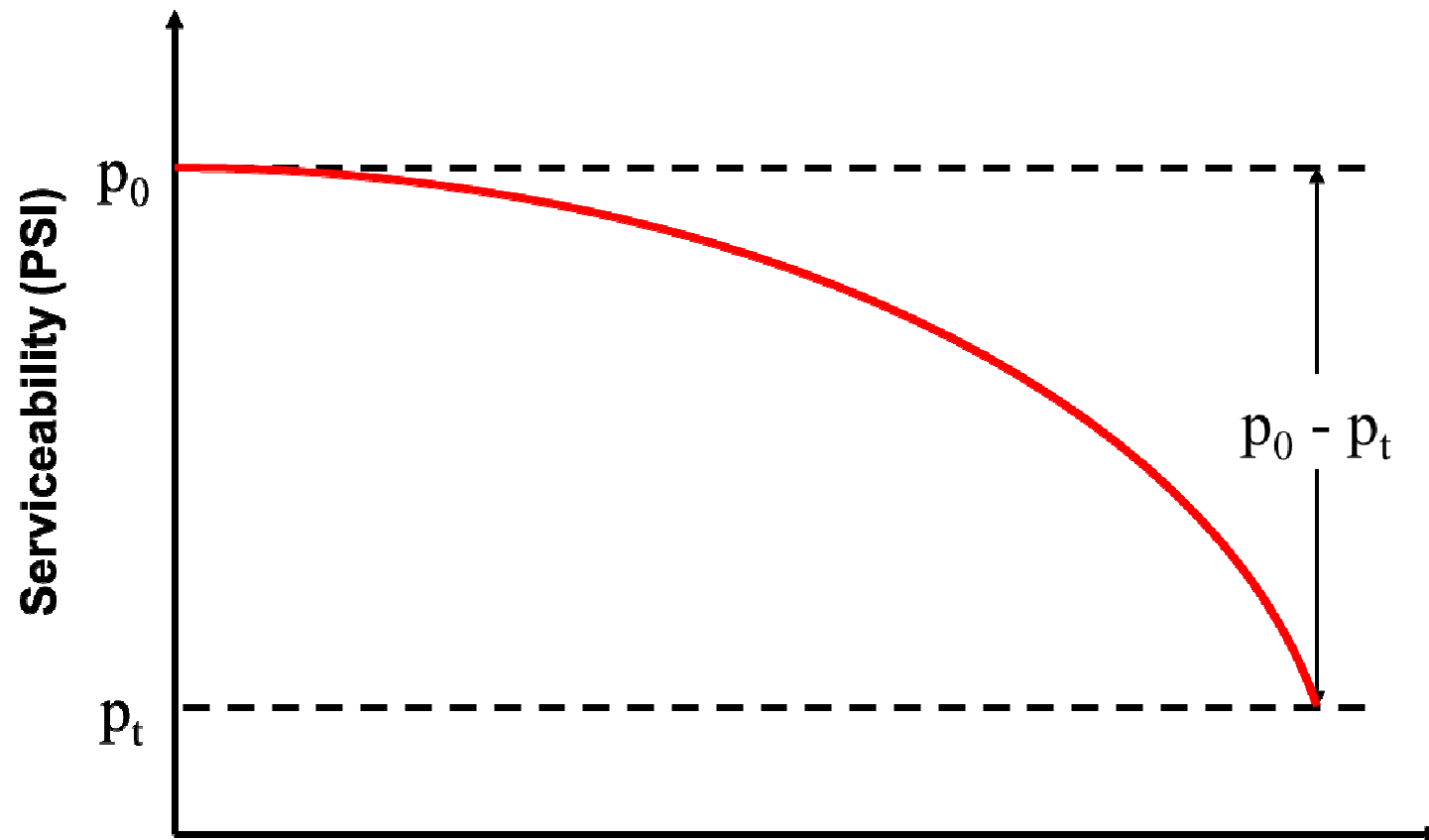
S_m è la media di tutte le misure lungo il profilo di una wheel path

Per le pavimentazioni rigide l'AASHTO ha proposto una espressione simile. Ovviamente in questo caso non compare come elemento di degrado la formazione delle ormaie.

$$PSI = 5,41 - 1,71 \times \log(1 + SV) - 0,09 \times \sqrt{C + P}$$

La regolarità superficiale

Present Serviceability Index (PSI)



La regolarità superficiale

Due sono le relazioni che legano il PSI all'IRI. La prima è un'equazione proposta da Paterson (1987):

$$\text{IRI} = 5,5 \cdot \ln(5/\text{PSI})$$

La seconda è stata data da Bertrand, Harrison e Mc Cullough (1990):

$$\text{IRI} = 577,42 - 222,17 \cdot \text{PSI} + 25,664 \cdot \text{PSI}^2 \quad (R^2=0,997)$$