

CAPITOLO 3

TEORIE E TECNICHE PER IL RILIEVO E LA MISURA DELLE PERFORMANCE DEL PIANO DI ROTOLAMENTO

3.1 ASPETTI GENERALI

In un regime di risorse limitate, sovente caratteristico degli Enti esercenti la gestione e la realizzazione delle infrastrutture dedicate al trasporto pubblico viario, ha una importanza strategica individuare, tra i numerosissimi indicatori prestazionali offerti in letteratura, gli indici che meglio si prestano per un rapido controllo dei requisiti tecnici delle pavimentazioni stradali, ed in particolar modo delle loro caratteristiche di affidabilità fisico-meccanica e del loro livello di funzionalità anche nel tempo. L'adozione di un qualsivoglia indicatore necessita, a monte, di una idonea scelta preliminare della tecnica con la quale acquisire le informazioni da esso offerte. Esistono, oggi, numerose procedure e strumentazioni in grado di soddisfare tali articolate esigenze che consentono, inoltre, di giungere a risultati di notevole affidabilità. Alcune di esse, in particolare quelle ispirate al trattamento analitico del rilievo prettamente geometrico, ad esempio, profilometrico della tessitura, si distinguono per la notevole rapidità di acquisizione ed elaborazione dei dati e si candidano ad essere impiegate sempre più diffusamente per informare gli archivi storici istituiti dagli Enti esercenti come previsto dall'art.13, comma 6, del Nuovo Codice della Strada. Altre, pur se diffusamente impiegate, manifestano limiti intrinseci non sempre agevolmente superabili [01].

Caratterizzare una superficie stradale, sia in termini di aderenza, piuttosto che di tessitura superficiale etc., è un obiettivo imprescindibile nell'ottica dell'ottimizzazione delle performance delle pavimentazioni stradali. Il rilievo di tali caratteristiche si articola in numerose metodiche e procedure standardizzate che trovano applicazione mediante appositi dispositivi strumentali di acquisizione e post-elaborazione dati indispensabili per la determinazione di Indicatori di performance (*Fig.3.1*) [02], [03].

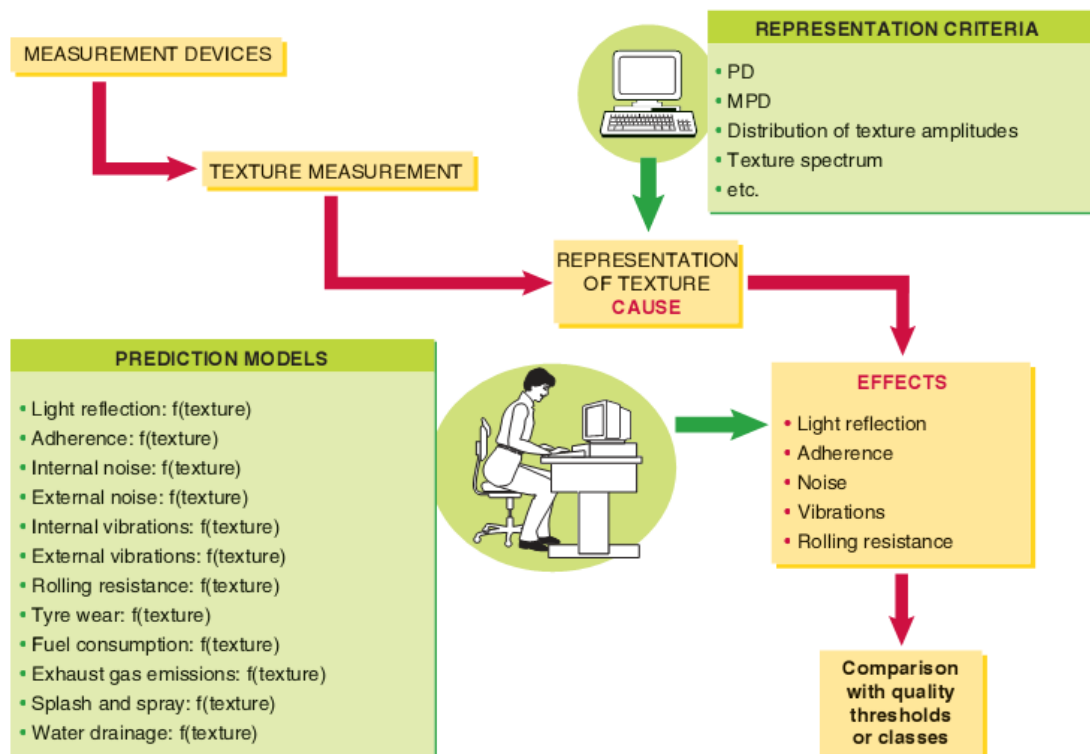


Fig.3.1 - Problematiche connesse al rilievo della tessitura superficiale [02]

Tuttavia, è opportuno evidenziare che i rilievi effettuati sia in situ che in laboratorio per la caratterizzazione geometrica della superficie, una volta soggetti ai processi di analisi, non coincidono mai perfettamente con l'andamento reale della pavimentazione: si tratta in effetti di una successione di altezze che approssimano *discretamente* la superficie reale. L'approssimazione risulta essere tanto più corretta quanto più vengono rispettate alcune condizioni basilari proprie dell'analisi dati, ed in particolare:

- *Rappresentatività del campione*: la porzione di profilo scelta come campione deve rendere possibile la determinazione di una statistica efficiente e completa delle ampiezze (e, se possibile, delle frequenze) relative alle deviazioni dalla planarità;
- *Dimensioni adeguate del campione*: devono essere scelte in funzione della lunghezza base con riferimento alla quale vengono calcolati gli indicatori che caratterizzano la tessitura. Negli studi sulla micro e macro-tessitura, l'AIPCR, per il calcolo dei relativi indicatori, fa riferimento a dimensioni dello stesso ordine di grandezza dell'area di contatto pneumatico-pavimentazione. Tali dimensioni vanno inoltre, proporzionate alla lunghezza d'onda oggetto dell'analisi;

- *Controllo della tecnica di restituzione*: la qualità della rappresentazione dipende infatti dall'idoneità delle tecniche di rilevamento e dalle caratteristiche degli strumenti impiegati. Anche utilizzando strumentazioni tecnologicamente avanzate, infatti, come i dispositivi laser, è sempre e comunque necessario procedere ad una valida post elaborazione attraverso procedure di filtraggio, raddrizzamento, ricostruzione del profilo.

A tal fine risulta sicuramente utile imporre per la funzione “profilo” rappresentativa della tessitura superficiale (interpretata, ad esempio, come insieme di n coppie x - z) condizioni di stazionarietà ed ergodicità¹, essenziali per definire ed utilizzare alcuni indicatori di seguito descritti in maniera più dettagliata. Le metodologie di caratterizzazione della tessitura superficiale attraverso Indicatori sono organizzabili in due distinte classi [02], [03], [04], [05] (Fig.3.2):

1. Criteri di **tipo intrinseco** (Ti), ovvero diretti o geometrici, legati al rilievo ed alla rappresentazione dell'andamento geometrico superficiale proprio di una porzione del piano di via, espresso quindi attraverso funzioni discrete del tipo $z=f(x,y)$ (della superficie) e/o $z=f(x)$ (del profilo), in relazione alla strumentazione adoperata per il rilievo. Essi consentono quindi di individuare, a seguito di elaborazioni numeriche più o meno articolate delle $z=f(x,y)$ e/o $z=f(x)$, indicatori (o descrittori) della grandezza “tessitura” superficiale quale “ente” prettamente geometrico. Tali criteri comprendono anche, ad esempio, l'analisi delle immagini.
2. Criteri di **tipo estrinseco** (Te), ovvero indiretti, cioè finalizzati all'analisi della tessitura superficiale tramite indicatori ad essa correlabili. In tal caso vengono valutate proprietà conseguenti al possesso di determinate caratteristiche geometriche superficiali. Tra questi possono sicuramente annoverarsi il metodo del drenaggio con permeametro [06] e il metodo di misura dell'attrito radente con apparecchio a pendolo [07], tra i più diffusi, etc.

La dicotomia di tali classi non è tassativa ma potrebbero sussistere anche domini di interferenza nella caratterizzazione della tessitura [02]. La schematizzazione delle macrofamiglie di indicatori di tessitura è riportata in Fig. 3.2.

¹ Attitudine di sistema o processo i cui valori medi calcolati nel tempo coincidono statisticamente con i valori medi calcolati su un grande numero di sistemi o processi uguali.

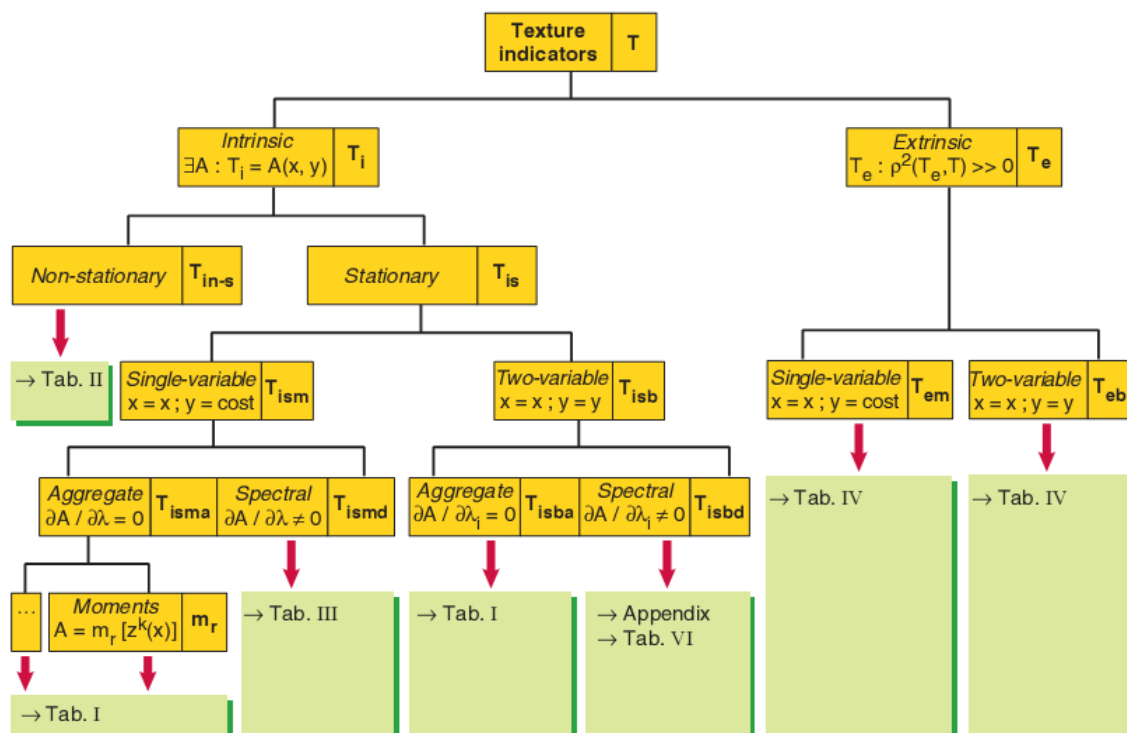


Fig. 3.2 - Codifica degli indicatori di tessitura superficiale del piano di rotolamento [02]

Lo schema di Fig.3.2 mostra la complessità nella definizione di criteri di rappresentazione della tessitura superficiale. In particolare in questo capitolo verranno fornite le indicazioni di carattere teorico-matematico alla base di ciascuna classe di indicatori precedentemente descritta.

3.2 I CRITERI INTRINSECI PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL PIANO DI VIA

È plausibile classificare gli indicatori intrinseci principalmente in indicatori stazionari e non stazionari; ciascuno di essi, poi, si articola nei due seguenti insiemi: *descrittori aggregati* e *descrittori spazio-frequenziali* (o *disaggregati*) [01], [02], [03], [04], [05].

I numerosi parametri che vengono descritti nell'analisi della tessitura superficiale sono teoricamente tutti utili al fine di caratterizzare globalmente lo stato di una superficie stradale; in particolare, essi quantificano le grandezze che giocano un ruolo fondamentale nell'influencare le risposte prestazionali della pavimentazione afferenti a diversi descrittori di performance: aderenza (A), rumore (N) e comfort vibratorio (C).

3.2.1 Descrittori aggregati (riferiti al profilo)

Per tali indicatori l'informazione fornita non è riferita alla singola classe di frequenze spaziali ma, piuttosto, all'effetto che il complesso delle lunghezze d'onda e delle relative ampiezze, in una parola la superficie, sortisce in termini del singolo indicatore di volta in volta considerato. A tale insieme appartengono le grandezze non intenzionalmente né rigorosamente riferenziate a particolari classi di lunghezza d'onda, ammettendo tuttavia che ciascuna di tali grandezze può di fatto risultare pertinente non a tutto il dominio delle lunghezze d'onda ma ad una sola porzione dello stesso. Fra questi indicatori si distinguono quelli riferiti essenzialmente al profilo e quelli relativi alla superficie [02].

Nel primo caso le grandezze in questione sono determinabili attraverso semplici operazioni effettuate sulla matrice dei dati rappresentativi del profilo (distanze x ed altezze z). Per il calcolo di tali indicatori è utile introdurre la classe degli operatori matematici di riferimento, ossia i "momenti". Infatti, i descrittori di tessitura possono catalogarsi con riferimento ai momenti $m_r[z^k(x)]$ di ordine r delle derivate k -esime della $z^k(x)$. L'espressione di tali momenti può scriversi come:

$$m_r \left[z^k(x) \right] = \frac{1}{L} \int_0^L (z - \bar{z})^r dx, \quad \text{nel continuo } [L^r]$$

$$m_r \left[z^k(x) \right] = \frac{1}{L} \sum (z - \bar{z})^r \cdot \Delta x, \quad \text{nel discreto } [L^r]$$

In generale in termini dimensionali $m_r[z^k(x)]$ ha dimensioni pari a $[L^{r-rk}]$

Nell'elaborazione statistica dei dati rilevati può risultare adatto l'utilizzo della *Abbot Bearing Curve*, $A(z)$, definita nel discreto come rapporto tra la somma delle misure dei segmenti di intersezione tra una retta generica di ordinata z e la lunghezza complessiva L del campione considerato [02]:

$$A(z) = \frac{\sum_{i=1}^n l_i(z)}{L}$$

La $A(z)$ esprime la percentuale della popolazione delle altezze del profilo maggiori di un dato valore z . Diversi sono i descrittori aggregati che, nel tempo, sono stati proposti per sintetizzare le caratteristiche di un profilo, alcuni dei quali hanno trovato anche una collocazione in

specifiche normative. In *Tabella 3.1* vengono elencati i descrittori maggiormente utilizzati e univocamente definiti in apposite normative di riferimento.

N°	Indicatore	U. M.	Descrizione indicatore
01	n/L	$[L^{-1}]$	Average asperity density
02	R_{max}	$[L]$	Maximum peak-to-valley height
03	R_t	$[L]$	Peak-to-valley height
04	R_z	$[L]$	Average peak-to-valley height
05	$MAA, (\Sigma h/n)$	$[L]$	Mean Apparent Amplitude or AAD=Average Asperity Density
06	$AAH (\Sigma h/n)$	$[L]$	Average Asperity height
07	$ASF (\Sigma h/n)/(L/n)$	$[L^0]$	Average shape factor
08	\bar{z}	$[L]$	$z_{media} = \Sigma_i z_i p(z_i)$. Mean line, arithmetic mean
09	R_a	$[L]$	$R_a = \Sigma_i z_i - z_{media} \cdot p(z_i)$. Average Roughness or Centre-line average
10	R_u	$[L]$	$z_{max} - z_{media}$. Levelling Depth,
11	R_m	$[L]$	Mean Depth. The RMD Rut Mean Depth as defined in E1703-E1703M-95 ASTM can be related to this parameter.
12	R_p	$[L]$	$R_p = \Sigma_i (z_{max} - z_i) \cdot p(z_i)$. Depth of surface roughness
13	PD;	$[L]$	Profile Depth;
14a	MPD (MPD Short)		Mean Profile Depth measured for wavelengths of between 2.5 and 100 mm). The parameter MPD Short (measured, for example, with a Texture Meter mounted on a SCRIM) is however measured for wavelengths of between 2.5 and 10 mm.
14b	ETD		Estimated Texture Depth
15	z_4	$[L^0]$	$z_4 = [\Sigma (\Delta x_i)_+ - \Sigma (\Delta x_i)_-] / L$. Parameter involving the number of profile segments with a positive difference in elevation
16	R_q	$[L]$	$R_q \approx \sigma \approx z_1 \approx [\Sigma (z - z_{media})^2 p(z)]^{0.5}$. Root-mean-square roughness RMS;
17	z_1		Standard Root-mean-square
18	SD;		Standard Deviation;
19	SMTD;		Sensor Measured Texture Depth
20	CSMTD		Corrected SMTD;
21	TDMA	$[L]$	$\rightarrow \sigma$. Texture depth of macrotexture
22	S_k	$[L^0]$	$S_k = \sigma^{-3} \cdot \Sigma (z - z_{media})^3 \cdot p(z)$. Skewness
23	K	$[L]$	$S_k = \sigma^{-4} \cdot \Sigma (z - z_{media})^4 \cdot p(z)$. Kurtosis
24	z_2	$[L^0]$	$z_2 = [\Sigma z'^2 p(z)]^{0.5}$. RMS difference in elevation
25	z_3	$[L^{-1}]$	$z_3 = [\Sigma z''^2 p(z)]^{0.5}$. RMS value of second derivative
26	r_e	$[L]$	$r_e = r \cdot N_k$. Effective radius
27	D_f	$[L_0]$	$\rightarrow I = k \cdot u^{1-D_f}$. Fractal dimension D_f
28	W	$[L]$	Mean groove width
29	D	$[L]$	Mean groove depth
30	S	$[L]$	Span (pitch)
31	VarW	$[L^2]$	Variance in width W
32	VarD	$[L^2]$	Variance in depth D
33	VarS	$[L^2]$	Variance in span

Tabella 3.1 – Descrittori intrinseci aggregati, parte A [03]

Alcuni degli indicatori elencati in *Tabella 3.1* sono stati oggetto di studio nella fase sperimentale sviluppata nella presente tesi. Pertanto si ritiene opportuno fornire indicazioni di dettaglio in merito al significato specifico di ciascun indicatore al quale si farà in seguito riferimento e descrivere, allo stesso tempo, le formulazioni matematiche di base attraverso le quali tali indicatori vengono determinati [03], [08].

03 - Rt (Distanza massima sommità-incavo). Definita dalla norma DIN 4762 come la distanza tra il punto più alto e quello più basso del profilo nella sezione di misura. Tale indicatore non è affetto dalla forma dell'onda e cresce se vi è un incremento di numero ed altezza delle asperità.

05 - AAD (Densità media delle asperità). Ricade nel campo della microtessitura, è pari al rapporto tra il numero n delle sommità e la lunghezza L del campione. Tale parametro fornisce una valutazione reciproca della distanza media tra le asperità, non risentendo però della variazioni di scala dell'asse z (cfr Fig.3.3). L'adesione tra pneumatico e strada risulta tanto più elevata quanto maggiore n/L risulta.

06 - AAH (Altezza media delle asperità). Media delle ampiezze sommità-concavità (h_i), con riferimento alla microtessitura (cfr Fig.3.3):

$$AAH = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

07 - ASF (Fattore medio di forma). Rapporto tra l'altezza media delle asperità (h_i) e la average width (pari alla lunghezza del campione L sul numero n di asperità corrispondenti), con riferimento alla microtessitura (cfr Fig.3.3):

$$ASF = \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \right) \cdot \left(\frac{L}{n} \right)^{-1}$$

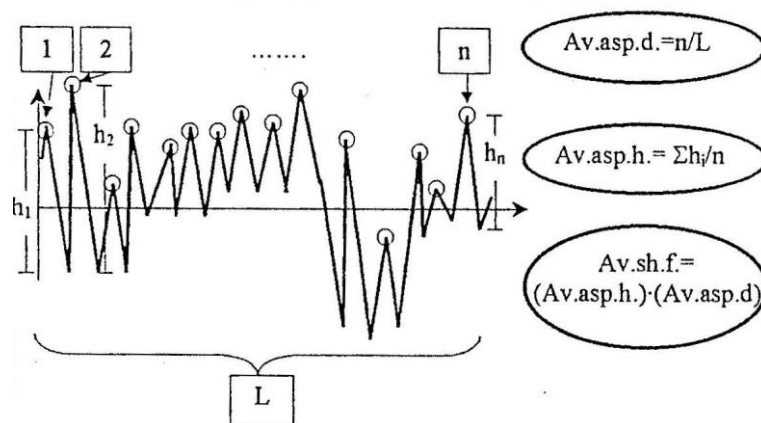


Fig. 3.3 - Rappresentazione dei parametri AAD, AAH, ASF [03]

09 - Ra (Rugosità media): rappresenta il valor medio delle deviazioni (assolute), riferite alla cosiddetta linea media (cfr Fig.3.4). Su Ra influisce la forma dell'onda: assume valori massimi per un'onda quadra e ridotti per una triangolare; per un ideale profilo sinusoidale essa cresce linearmente con l'ampiezza, rimanendo tuttavia invariata per variazioni della lunghezza d'onda.

Nel discreto la valutazione di Ra può effettuarsi tramite la:

$$R_a = \sum_i |z_i - \bar{z}| \cdot p(z_i)$$

con $p(z)$ funzione di densità di probabilità.

10 - Ru (profondità di livellamento): Distanza tra la linea media ed una retta parallela tangente ai punti più alti del profilo (cfr Fig.3.4):

$$R_u = z_{\max} - \bar{z}$$

Costante al variare della forma di un'ideale senoide esso risulta incrementato al crescere dell'ampiezza.

11 - Rm (Massima distanza linea media-concavità): Distanza tra la linea media ed una retta parallela tangente alle concavità più accentuate (punti più in basso) (DIN 4768) (cfr Fig.3.4). Attinge valori tanto più elevati quanto maggiore è il rapporto tra la larghezza delle asperità e quella delle concavità.

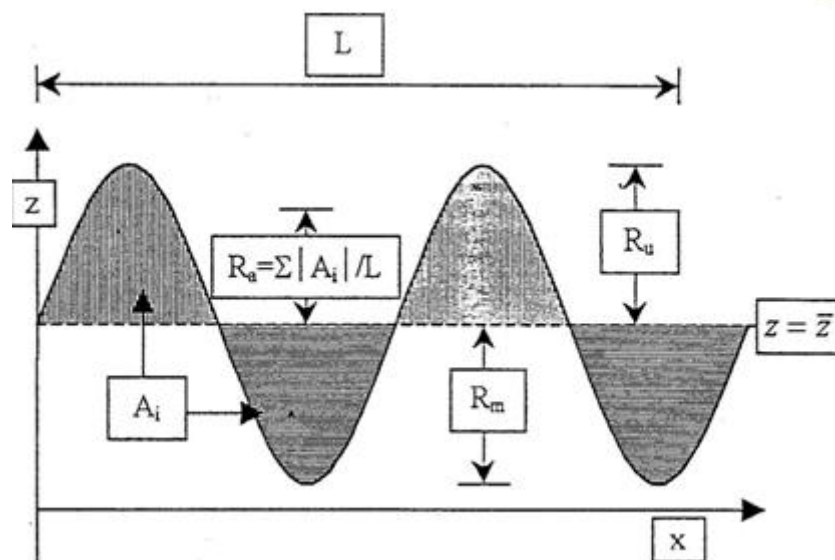


Fig. 3.4 - Rappresentazione dei parametri Ra, Ru, Rm [03]

12-Rp (Profondità delle asperità superficiali): è esprimibile attraverso la:

$$R_a = \sum_i |z_{\max} - z_i| \cdot p(z_i)$$

con $p(z)$ funzione di densità di probabilità.

È da notare come risulti $R_p \approx MPD \approx R_u$. Per questi indicatori risulta determinante la superficie (vuota) tra le asperità contigue: all'aumentare della stessa MPD diviene più elevato.

14a - MPD_{aipcr} (Profondità media di tessitura). E' un valore medio della profondità del profilo su una distanza di riferimento (cfr Fig.3.5). Si introduce il concetto di profondità media definita come distanza media fra i punti del profilo ed una retta tangente la sommità della particella più alta contenuta nel campione analizzato.



Fig. 3.5 – Definizione AIPCR della profondità media di profilo [03]

14a- MPD_{iso} : è definito in maniera leggermente diversa rispetto all' MPD_{aipcr} :

$$MPD = \frac{1^{\circ} \text{picco} + 2^{\circ} \text{picco}}{2} - \text{livello}_{medio}$$

Suddivisa la lunghezza in due parti uguali in ciascuna si identifica un livello di picco diverso; l'indicatore è quindi calcolato mediando i due valori di picco e sottraendo al valore ottenuto il livello medio del profilo (cfr. Fig.3.6).

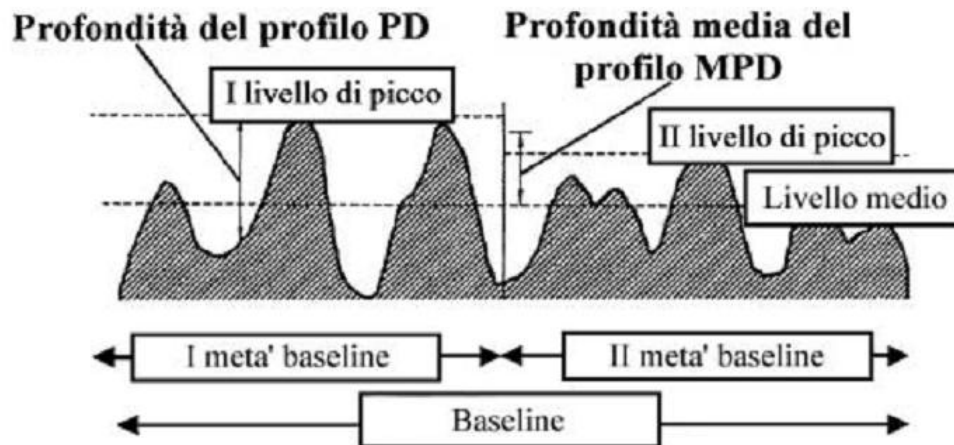


Fig. 3.6 – Definizione ISO della profondità media di profilo [03]

14b- ETD_{aipcr} (Profondità di tessitura stimata): quando ci si serve di MPD per stimare la profondità media di tessitura (MTD), applicando un'equazione di trasformazione si utilizza la sigla ETD per indicare che si tratta di una misura indiretta.

14b- ETD_{iso}: è definito come l'ETDaipcr con la data equazione di trasformazione:

$$ETD = 0,2 \text{ mm} + 0,8 \text{ MPD}$$

dove ETD e MPD sono espressi in millimetri (ISO 13473)

16 - RMS (Rugosità quale radice quadratica media): si stima nel continuo tramite la:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L (z - \bar{z})^2 dx}$$

3.2.2 Descrittori aggregati (riferiti alla superficie)

Le metodiche di rilievo della superficie $z(x,y)$, molto vicine a quelle utilizzate per il profilo, rendono possibile la descrizione di alcuni parametri caratterizzanti la superficie del piano viabile. I metodi maggiormente utilizzati sono i cosiddetti metodi volumetrici. In *Tabella 3.2* viene riportato un elenco di tutti gli indicatori afferenti a questa classe; di seguito alcuni di questi indicatori verranno più in dettaglio analizzati.

N°	Indicatore	U. M.	Descrizione indicatore
34	NumGRV	[L ⁰]	Number of grooves
35	NumGRVD≤(x _i)	[L ⁰]	Number of grooves with depth D less than or equal to x _i ''; x _i is generally expressed in inches
36			
37	NumGRV W≤(1/8)	[L ⁰]	Number of grooves in the section of profile with width W less than or equal to 1/8'' (3.175 mm)
38	NumGRV G≤(1/8)	[L ⁰]	Number of grooves with width W or Depth D less than or equal to 1/8''
39	TAWRG	[L ⁰]	Total area within the 10 foot segments with recognizable grooves
40	MPDwG	[L]	Mean profile depth (MPD) with grooves;
41	MPDnoG	[L]	Mean profile depth (MPD) with no grooves
42	A _r	[L]	A _r =n ⁻¹ ·(Σa _{ri}). Roughness width (Mean distance between the peaks n in the profile)
43	A _w	[L]	A _w =n ⁻¹ ·(Σa _{wi}). Mean waviness width (Mean distance between the peaks n in the profile)
44	I _t (c)	[L]	I _t (c)=ΣI _i (c). Bearing length at height c from mean line
45	λ _a	[L]	λ=2πR _a /(mean slope). Average wavelength
46	MTD	[L]	Mean Texture Depth; Hauteur de sable; NASA Grease Smear Parameter. These are two-variable intrinsic indicators experimental analysis of which can provide an estimate of the ratio between $\int z(x, y) dx dy$ and $\int dx dy$, a first order moment I. For maintenance, the MTD can be calculated by the formula MTD=0,2 mm+MPD. Many other acronyms designate indicators measured with different devices (often high-speed) which are similar to the parameter HS.
47	HS		
48	NASA G.S.P.		
49 - 54	A, B, C, D, E, F		Qualitative and quantitative parameters, essentially concerning macrotexture and microtexture defined in ASTM E770; initially, they can be considered to relate to all the intrinsic two-variable aggregate indicators.

Tabella 3.2 – Descrittori intrinseci aggregati, parte B [03]

47-HS (altezza in sabbia): metodo volumetrico per la stima della profondità di tessitura (cfr Par. 3.4.2).

49- Parametri A÷F

Parametro A: altezza media delle microasperità misurata rispetto al piano di riferimento. Tale parametro viene determinato attraverso apparecchiatura stereofotografica.

Parametro B: minima dimensione in orizzontale delle macroasperità valutata nel piano di riferimento sulla figura piana generata dall'intersezione macroasperità-piano di riferimento.

Parametro C: grado di angolosità di una macroasperità; si distinguono tre parametri: C1 - Rotondeggiante, C2 - Subangoloso, C3 - Angoloso. Anche questo parametro viene determinato attraverso apparecchiatura stereofotografica.

Parametro D: densità delle microasperità in termini di percentuale dell'area totale che le microasperità occupano.

Parametro E: giudizio sulla rugosità superficiale in termini di altezza ed angolarità delle microasperità (grani posti al di sopra degli incavi di drenaggio e di larghezza minore di 2 mm). Le categorie in cui tale parametro può collocarsi sono le seguenti: E1 - levigato, E2 - piuttosto levigato, E3 - a grana molto fina, E4 - a grana fina, E5 - sub angolare a grana media, E6 - sub angolare a grana media con microasperità appuntite in sommità ed elevazioni al profilo del grano maggiori o uguali a 0.5mm.

Parametro F: giudizio in merito alla rugosità superficiale tra le macroasperità in termini di altezza ed angolarità delle microasperità. Sette sono i livelli di giudizio esprimibili attraverso tale parametro: F0 - cavità, F1 - levigata, F2 - piuttosto levigata, F3 - a grana molto fina, F4 - a grana fina, F5 - a grana grossa, F6 - a grana grossa con carattere appuntito.

Una schematizzazione dei parametri in precedenza descritti è riportata in Fig.3.7.

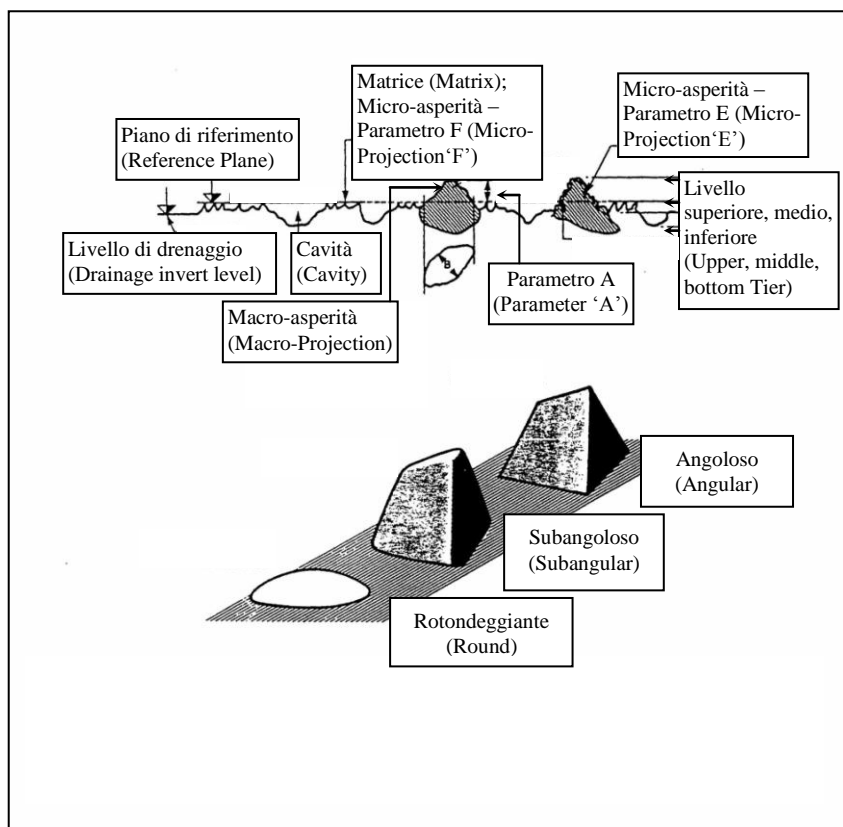


Fig. 3.7 – Descrittori intrinseci aggregati: parametri A - F [03]

3.2.1.1 Procedura di calcolo degli indicatori MPD_{iso} ed ETD_{iso}

In accordo con quanto previsto dalla normativa di riferimento [01] il profilo della superficie stradale deve essere opportunamente elaborato ai fini del calcolo della profondità di tessitura espressa attraverso gli indicatori MPD_{iso} ed ETD_{iso} , secondo le seguenti fasi (cfr. Fig.3.8):

1. Calibrazione e misura del profilo;
2. Correzione dei punti non validi;
3. Filtro passa banda alta;
4. Filtro passa banda bassa;
5. Limitazione della baseline;
6. Soppressione della pendenza;
7. Individuazione dei picchi;
8. Calcolo del MPD;
9. Calcolo di ETD;
10. Media dei valori di MPD e ETD.

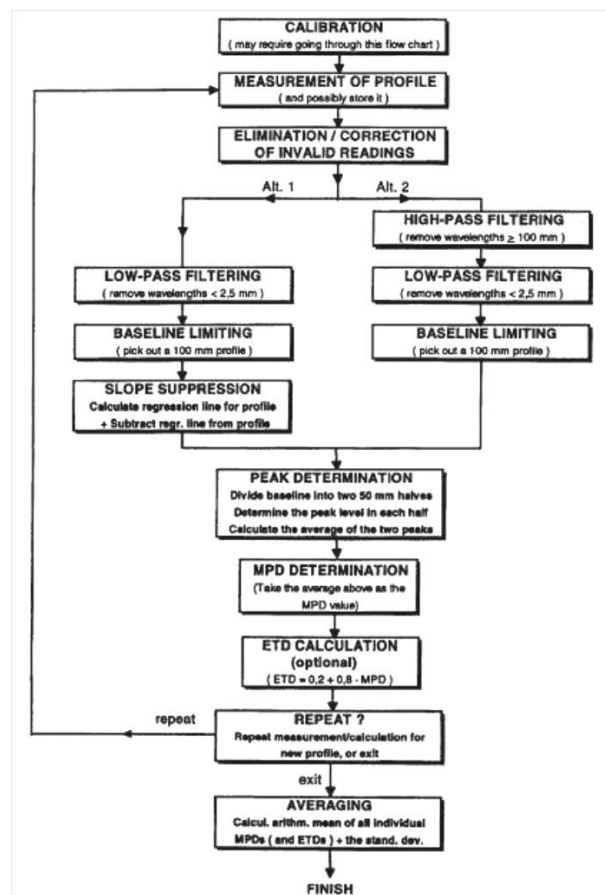


Fig.3.8 - Procedura di calcolo dell'MPD secondo norma ISO 13473 [08]

La procedura di calibrazione deve essere eseguita utilizzando un profilo superficiale noto; secondo quanto previsto dalla norma la massima deviazione verticale del valore registrato con l'apparecchiatura di misura rispetto al valore teorico non deve superare la soglia di 0,05mm.

Per tale procedura, nella fase sperimentale del presente progetto di ricerca, è stata impiegata una superficie di calibrazione (superficie TEST) la cui tessitura, anisotropa e geometricamente nota, presenta un profilo ad onde “quadre” con andamento periodico regolare: lunghezza d’onda 4mm, ampiezza picco-valle 1mm, come mostrato in Fig.3.9

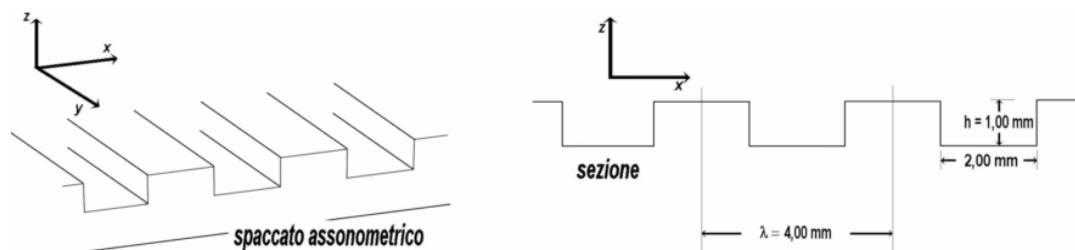


Fig.3.9 - Caratteristiche della superficie di calibrazione

La procedura di calibrazione ha comportato il rilievo e la restituzione della matrice $z(x)$ di un profilo campione di lunghezza pari a 320mm individuato sulla superficie TEST. Il rilievo e la restituzione del profilo campione sono stati effettuati per un numero di 25 letture, effettuate su punti diversi della superficie da parte di uno stesso operatore. Il processo di filtraggio del profilo consente in questo caso di rimuovere tutte le frequenze spaziali che risultano essere minori di una certa soglia fissata a 10 m^{-1} , corrispondenti a lunghezze d’onda λ di 100 mm. Tale filtro viene indicato come filtro passa banda alta (highpass filter) ed il profilo che se ne ottiene viene detto anti-smussato (anti-smoothing). Allo scopo di poter eliminare il cosiddetto “rumore di fondo” del profilo è necessario un filtro che rimuova le componenti di alta frequenza. Il processo di filtro passa banda bassa rimuove le frequenze spaziali minori di 400 m^{-1} , corrispondenti ad una lunghezza d’onda di 5 mm. Un filtro del genere si dice filtro passa banda bassa (low-pass filter), e poiché dal filtraggio vengono eliminate le cuspidi ad alta frequenza il profilo che se ne ottiene si dice smussato, come evidenziato in Fig.3.10.

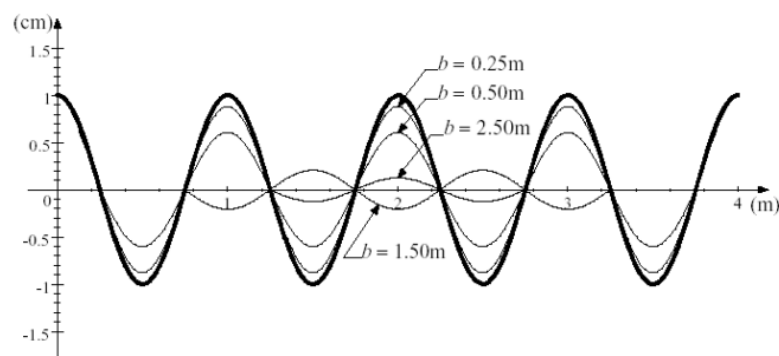


Fig.3.10 - Low-pass filter per un profilo sinusoidale

Ciascun profilo, per il quale devono essere calcolati gli indicatori di tessitura, deve essere, poi, limitato utilizzando una baseline di $100\text{mm} \pm 10\text{ mm}$. Dopo aver proceduto alla manipolazione del profilo con un filtro del tipo passa banda alto il profilo deve subire un'operazione di soppressione della pendenza attraverso il calcolo della regressione lineare.

Una volta eseguite tutte le operazioni precedentemente descritte si procede al calcolo degli indicatori di profondità di tessitura come previsto dalla norma e dettagliatamente descritto nel precedente paragrafo.

3.2.3 Descrittori spazio-frequenziali (o disaggregati)

Tali indicatori sono fondati sulla scomposizione del profilo in componenti elementari (armoniche), a ciascuna delle quali corrisponde una data lunghezza d'onda rappresentativa λ ed una corrispettiva frequenza spaziale $1/\lambda$; per tali parametri la descrizione della superficie o del profilo è sempre riferibile ad una classe di lunghezze d'onda.

Questa classe di indicatori comprende sia quelli con unica variabile (Tismd) che quelli a due variabili (Tisbd) (cfr. Fig.3.11).

La determinazione di tali indicatori è resa possibile dall'esistenza di specifiche tecnologie dedicate al rilievo delle ampiezze di tessitura che restituiscono rappresentazioni bidimensionali del profilo da cui possono essere dedotti i livelli di tessitura $L_T(\lambda)$ ed i diagrammi degli spettri di potenza delle ampiezze. Il generico campione di dati rilevati dallo strumento costituisce un insieme non deterministico; in linea di principio è plausibile ritenere che il profilo costituisca un segnale *random*.

Tali segnali vengono tradizionalmente distinti in stazionari e non stazionari. La stazionarietà è associata alla sostanziale invarianza delle proprietà caratteristiche del segnale al mutare dell'ascissa iniziale di monitoraggio del campione. Rilevato il profilo cui è possibile, in via presuntiva, attribuire proprietà di normalità, omogeneità, isotropia, stazionarietà ed ergodicità, ad una descrizione approfondita della tessitura delle pavimentazioni si perviene considerando la $z(x)$ come risultante di un insieme (a rigore infinito) di componenti elementari (armoniche), nello spazio delle distanze x . Per arrivare alla formulazione di tali indicatori è necessario che si passi da un dominio riferito allo spazio a un dominio riferito alle frequenze spaziali. Per un profilo stradale le condizioni per la sviluppabilità in serie di Fourier di una $z(x)$ risultano usualmente verificate. Operato lo sviluppo in serie è possibile in maniera semplice

pervenire ad una rappresentazione delle ampiezze c_k delle armoniche in funzione delle relative frequenze f_{sk} , denominabile *spettro discreto* o *spettrogramma* [02], [03].

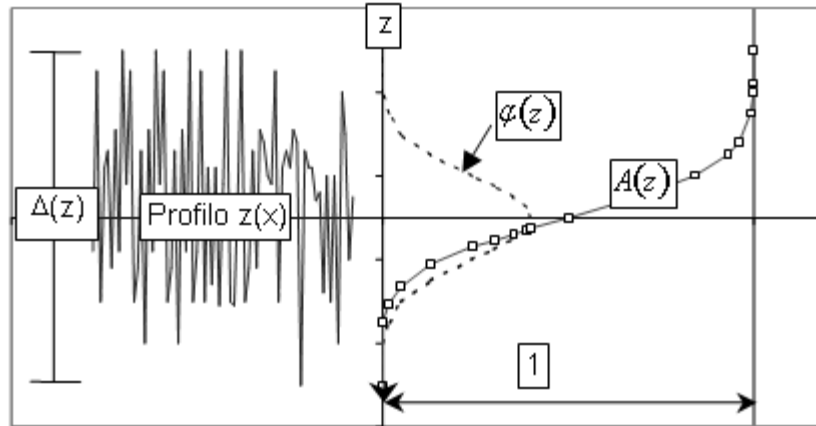


Fig. 3.11 – Esempio ideale di profilo rilevato (a) e relative spettrogramma (b) [03]

Tuttavia, non essendo a conoscenza dell'espressione analitica di $z(x)$, ma disponendo delle sole coppie (x, z) e/o della relativa rappresentazione grafica si opera uno sviluppo in serie di Fourier della $z(x)$ per poter ottenere lo spettrogramma delle c_k .

È immediato realizzare come tale rappresentazione spettrale fornisca un prezioso e cospicuo contenuto informativo non deducibile tramite la lettura del profilo *sic et simpliciter*; i processi di trasformazione da (x) a (fs) discendono dalla consapevolezza della differenza qualitativa tra le diverse classi di lunghezza d'onda (per $\lambda \approx 2$ mm si fa riferimento all'assortimento e alla geometria dei grani in superficie, per $\lambda \approx 20$ m ci si riferisce alla precisione dei processi di stesa e di costipamento o a processi di degradazione strutturale) e fanno insorgere l'esigenza di indicatori disaggregati [03].

La determinazione delle ampiezze c_k tramite lo sviluppo in serie di Fourier risulta onerosa in termini di calcolo (nell'ordine di N^2 operazioni, essendo N il numero dei punti monitorati); meno oneroso risulta invece l'utilizzo delle *Trasformate veloci di Fourier* (nell'ordine di N operazioni). Riferendoci alla *Trasformata Discreta di Fourier* $Z(k)$, utilizzabile nel rilievo stradale in cui la trasformata nel continuo $Z(\Omega)$ non è definita, essa ha modulo $|Z(k)|$ di dimensione $[L]$ e espressione in funzione della k -esima frequenza:

$$Z(k) = \sum_{n=1}^N z(n) \cdot \exp \left[\frac{-i \cdot (k-1) \cdot 2\pi \cdot (n-1)}{N} \right]$$

con $k = [1, N]$

Il ricercato legame relazionale, poi, tra la $Z(k)$ (grandezza complessa) e la c_k (modulo di una data grandezza complessa di componenti proporzionali ad a_k e b_k ed espressiva del contenuto in ampiezze presso la k -esima frequenza risulta “lineare”:

$$a_0 = \frac{2 \cdot Z(1)}{N}$$

$$a(k) = \frac{2 \cdot \text{real} [Z(k+1)]}{N}$$

$$b(k) = \frac{2 \cdot \text{imag} [Z(k+1)]}{N}$$

ove con $\text{real} []$ si intende la parte reale della grandezza complessa entro parentesi quadra e con $\text{imag} []$ si intende il coefficiente della parte immaginaria della grandezza complessa contenuta in parentesi quadra.

Un indicatore disaggregato concernente le ampiezze può concretizzarsi in forme qualitativamente e quantitativamente assai differenti, ciascuna delle quali diversamente espressiva delle peculiarità del profilo [03]. Il livello di tessitura in funzione di una determinata lunghezza d’onda è il livello delle ampiezze della tessitura, per quella lunghezza d’onda, riferito, per esempio, ad un micrometro al quadrato:

$$L_T(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{\tilde{h}^2}{h_0^2}$$

con $h_0 = 10^{-6}$ m.

Il numeratore dell’argomento è funzione delle ampiezze osservate per la data lunghezza d’onda λ (operativamente a tale scopo filtrate in un range che contiene λ): $\tilde{h} = \text{RMS}(z)$. La L_T si può stimare tramite la:

$$L_T(\lambda_k) = 10 \cdot \log \frac{c_k^2}{h^2}$$

in cui:

$$c_k = \frac{2}{N} \cdot \left[\text{real} [Z(k+1)]^2 + \text{imag} [Z(k+1)]^2 \right]$$

I principali indicatori disaggregati intrinseci della tessitura vengono elencati in *Tabella 3.3*.

N°	Indicatore	U. M.	Descrizione indicatore
55	PSD;	$[L^{-3}] [L^{-2}]$	Power Spectral Density (PSD);
56	PS;	$[L^0]$	Power Spectrum (PS);
57	c_k, L_T	$[L]$	Texture amplitudes (c_k), Texture Level (L_T);
58	a_5, a_{mega}		Texture amplitude for the wavelength of 5mm (a_5 , established with reference to the band centres of 4mm, 5mm and 6.3mm) or 25mm (a_{mega} , based on the amplitudes for 20mm, 25mm and 31mm);
59	H_{APL}	$[L]$	Amplitude of the irregularities for a zone with a specified wavelength (H_{APL});
60	I_{NBO}	$[L^0]$	Class of indicators that are determined by associated a scalar quantity of between 0 and 10 to short, medium and long waves (I_{NBO} , Notation par Bandes d'Onde - NBO – Wave Band Rating). By extension, with reference to the transverse profile of the pavement surface the RMD (Rut Mean Depth) also be linked to the parameter H_{APL} according to E1703-E1703M-95 ASTM.

Tabella 3.3 – Descrittori intrinseci disaggregati [03]

Infine, nella classe degli indicatori intrinseci è possibile includere anche quelli non stazionari, ossia indicatori intrinseci riferiti ad eventi random, utili al fine di quantificare ed attestare la severità del processo di decadimento della pavimentazione stradale (Tabella 3.4).

N°	Indicatore	U. M.	Descrizione indicatore
61	ACA	$[L^0]$	Area of cracking ACA (the ratio between the area affected by cracking and the total area of the surfacing; the zone of cracking is defined as the sum of the areas of the rectangles containing cracks);
62	NTP		Number of standard potholing NTP (defined as the number of holes with a radius of more than 150 mm and a depth of more 25 mm on 1 km of road);
63	ARV		Ravelled area ARV (describes ravelling of the surface layers; equal to the percentage of the surface affected by stripping);
64	MAS		The descriptor MAS (Mean Absolute Slope), measured using ARAN devices for example, relates to the regularity of the pavement surface, particularly in the case of concrete pavements where the upper limit for a new surfacing is 3 mm/m
65	PSI	$[L^0]$	The PSI (Present Serviceability Index), used by AASHTO for the design of surfacings, represents the deterioration of the surfacing. It is determined with reference to the mean differences in level along the longitudinal profile, the length of visible damage, the surface of holes and patches and rut depth.
66	PCI		The PCI (Pavement Condition Index), used in FAA (Federal Aviation Administration) standards, is an adimensional indicator with values of between 0 and 100 (optimum) that represents deterioration of the surfacing (generally used for airport pavements).
67	DS (Amm)		The Deterioration index DS (Distress), often referred to as Amm equal to $\sum SD_{ik}$, where D_{ik} is the degree of severity (equal to 0, 1, ..., 3) for the type of deterioration (= 1, ..., 7), for the k-th subsection of pavement. DS refers to a zone with a length of 1 kilometre, which is broken down into n subsections with the index k.

Tabella 3.4 – Descrittori intrinseci non stazionari [03]

3.3. I CRITERI ESTRINSECI PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL PIANO DI VIA

Tali criteri sono finalizzati all'analisi della tessitura tramite indicatori ad essa correlabili. Uno dei criteri più diffusi è il cosiddetto *Metodo del Drenaggio*: la prova consiste nel valutare il tempo di deflusso di un volume noto di fluido attraverso la pavimentazione in oggetto [10]. In

linea di principio tale tempo risulta correlato con le caratteristiche geometriche della sezione di deflusso, per cui è possibile ottenere informazioni indirette e sui parametri di porosità (superficiale e non, con riferimento a vuoti comunicanti ma anche non comunicanti, al crescere dei quali il tempo di deflusso risulterà minore) e sul profilo (al crescere della superficie posta tra il bordo dell'involucro contenente il fluido ed il profilo sottostante il tempo di deflusso risulterà, in generale, diminuito). Per una pavimentazione idealmente piana ed impermeabile il tempo di deflusso tenderà ad assumere un valore infinito. L'indicatore estrinseco associato a tale metodo (talvolta denominato capacità drenante o drenabilità) può essere costituito dal reciproco del tempo di drenaggio ($[T^{-1}]$, min^{-1}), per dato volume, o dal rapporto tra il volume defluito ed il relativo tempo ($[L^3T^{-1}]$, dm^3/min). Un altro indicatore estrinseco è il *British Portable Tester Number* (BPN). In tal caso, attraverso l'apparecchio a pendolo è possibile determinare un indicatore di resistenza all'attrito radente, positivamente correlato all'energia dissipata dal pendolo per attrito. Tale energia dipende certamente anche dalla tessitura della superficie di via esposta all'azione del pattino, ed in particolare dalle componenti nella regione della micro (a tal fine tendenzialmente più rilevanti) e della macro (in misura ritenuta usualmente minore). Numerose sperimentazioni confermano la correlazione positiva tra gli indicatori di tessitura e le valutazioni con apparecchio a pendolo [07]. Le procedure normate e comunemente utilizzate per la determinazione di tali indicatori verranno descritte dettagliatamente nel *Par.3.4* del presente Capitolo. In *Tabella 3.5* vengono elencati tutti i principali indicatori estrinseci di maggior impiego nella caratterizzazione delle superfici stradali.

N°	Indicatore	U. M.	Descrizione indicatore
68	a, a_0 ;	$[L^0]$	a: sound absorption coefficient (\rightarrow noise nuisance); a_0 : sound absorption coefficient in normal incidence (\rightarrow noise nuisance);
69	BPN;	$[L^0]$	British Portable Tester Number (BPN, \rightarrow pendulum friction measurement);
70	SFC [CAT];	$[L^0]$	Sideway force coefficient - SFC (measured, for example, by SCRIM);
71	GN;	$[L^0]$	Grip number GN (device: Grip Tester)
72	Drainability;	$[L^3/T]$	Drainability;
73	IRI;	$[L^0]$	International Roughness Index (\rightarrow Comfort);
74	RCI;	$[L^0]$	Riding Comfort Index (\rightarrow Comfort);
75	IFI;		International Friction Index.

Tabella 3.5 – Descrittori intrinseci non stazionari

3.4 PRINCIPALI STRUMENTAZIONI DI MISURA DELL'ADERENZA

La misura dell'aderenza del piano di via può essere valutata attraverso numerose strumentazioni (solitamente ad alto rendimento), codificate nella quasi totalità da standards normativi, in ambito nazionale e/o internazionale.

Per la misura dell'aderenza, in particolare, possono essere definite quattro macrofamiglie di dispositivi di misura, all'interno di due principali classi di dispositivi di rilievo, in funzione del principio di misura al quale il sistema fa riferimento (*Tabella 3.6*) [01], [11], [12], [13], [14], [15]:

HIGH SPEED FRICTION DEVICES (<i>Strumentazioni ad alta velocità</i>)	LOW SPEED FRICTION DEVICES (<i>Strumentazioni a bassa velocità</i>)
1 – DISPOSITIVI A RUOTA BLOCCATA (<i>Locked Wheel devices</i>)	5 – STRUMENTI DI MISURA DELLA DISTANZA DI ARRESTO (<i>Stopping distance measurement</i>)
2 – DISPOSITIVI A SCORRIMENTO FISSATO (<i>Fixed Slip devices</i>)	
3 – DISPOSITIVI A SCORRIMENTO VARIABILE (<i>Variable Slip devices</i>)	6 – STRUMENTI DI MISURA DELLA DECELERAZIONE (<i>Deceleration rate Measurement</i>)
4 – DISPOSITIVI AD ANGOLO DI DERIVA IMPOSTO (<i>Side-Force devices</i>)	7 – APPARECCHI DI MISURA PORTATILI (<i>Portable Tester</i>)

Tabella 3.6 – Principali strumenti di misura dell'aderenza

1) Dispositivi a ruota bloccata

Apparecchiature utilizzate per misurare il coefficiente di aderenza longitudinale a velocità elevate; impiegate, nella pratica, per lo più per prove su singoli tratti a causa di un rapido logorio del pneumatico. Per tali dispositivi di misura, la velocità relativa S tra il pneumatico e la superficie della pavimentazione è uguale alla velocità del veicolo ($S = V$).

Si applica un'azione frenante e si determina la conseguente forza che si genera al contatto, effettuando, poi, una media dei valori registrati dopo un secondo di completo bloccaggio delle ruote. Strumentazioni di questo tipo sono diffusissime negli Stati Uniti in cui vengono impiegate in più di 40 stati diversi principalmente grazie alla semplicità di utilizzo e la velocità di acquisizione dati.

Rientrano in questa categoria le strumentazioni elencate in *Tabella 3.7*. Nella medesima tabella vengono descritte le procedure di prova standardizzate comuni a tutte le strumentazioni elencate, nonché gli indicatori di aderenza derivanti dalle medesime prove.

2) Apparecchiature a scorrimento fissato

I dispositivi a scorrimento fissato rappresentano una metodica di rilievo dell'aderenza superficiale sicuramente più datata e largamente diffusa in ambito aeroportuale. Con tali apparecchiature, inoltre, è possibile un rilievo in continuo dell'aderenza. Appartengono a tale macrofamiglia le apparecchiature elencate in *Tabella 3.8*. Tutti i dispositivi elencati pur differenziandosi nel design e, in alcuni casi, nella tipologia di strumentazione impiegata operano con principi di base comuni:

- utilizzo di una ruota di misura standardizzata;
- limitare la libertà di rotazione della ruota ad una velocità che è un'aliquota di quella del veicolo di prova.

Il carico agente sulla ruota test è costante e di entità fissata. In genere, i dispositivi di questo tipo operano con scorrimenti s che variano dal 10% al 20%, mentre le misure vengono eseguite a velocità S , variabili a seconda della strumentazione utilizzata, pari a $V*s/100$.

La differenza di velocità indotta tra il pneumatico e la superficie di misura, che è una percentuale costante della velocità di avanzamento del veicolo, genera forze di attrito che vengono misurate ai fini del calcolo del coefficiente di aderenza ruota-superficie.

I dispositivi a scorrimento fisso possono catalogarsi in [12]:

- dispositivi di tipo meccanico: impiegano un pignone e una catena od una cinghia e una puleggia sull'asse posteriore del veicolo di prova o sull'asse di carico di un rimorchio attraverso cui indurre una percentuale costante di slittamento al pneumatico di misura, variabile in funzione delle diverse dimensioni delle ruote dentate o pulegge (*Fig.3.12*);
- dispositivi di tipo idraulico: sfruttano l'azione di un'elevata pressione idraulica all'interno di un circuito idraulico chiuso che determina uno slittamento controllato e costante della ruota di misura. Una pompa o un motore idraulico ad alta pressione è di solito collegato al perno della ruota di misura (*Fig.3.13*).

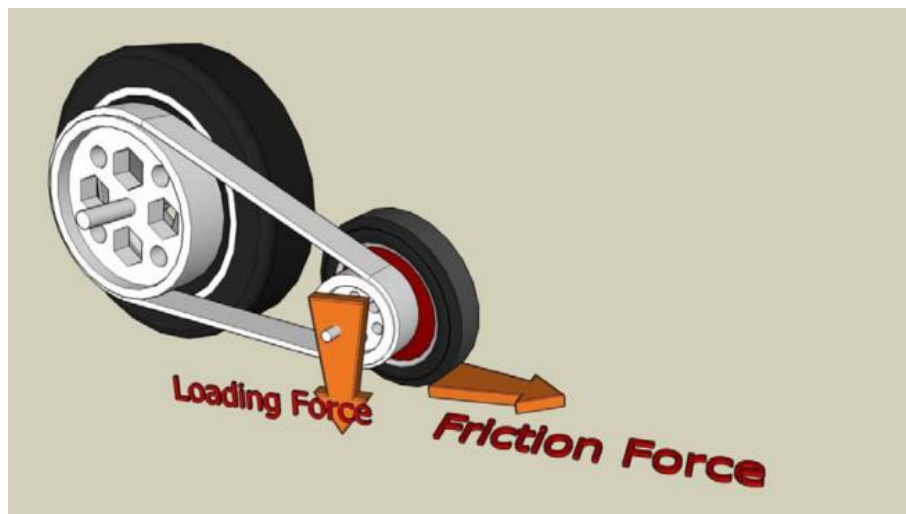


Fig. 3.12 – Schematizzazione dei dispositivi a scorrimento fissato di tipo meccanico [12]

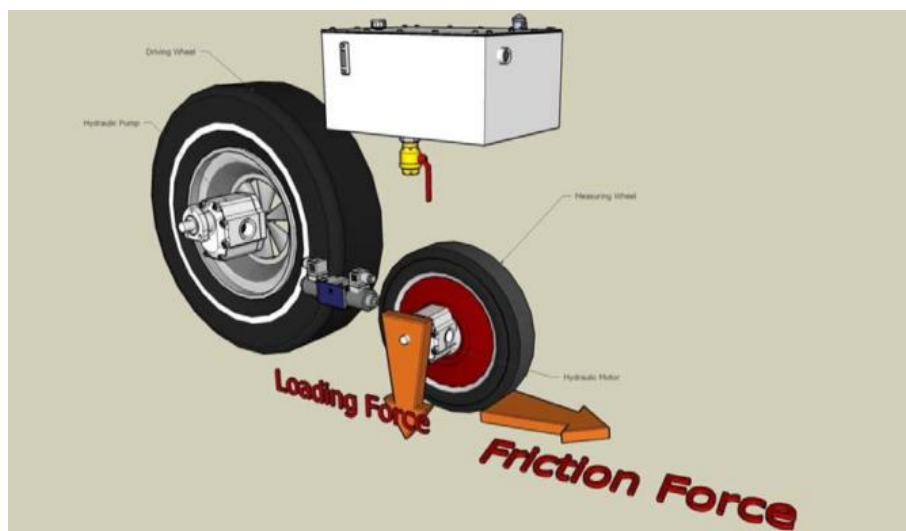


Fig. 3.13 – Schematizzazione dei dispositivi a scorrimento fissato di tipo idraulico [12]

3) Apparecchiature a scorrimento variabile

Tali dispositivi permettono di effettuare misure con scorrimento della ruota di prova variabile in funzione delle caratteristiche delle pavimentazioni soggette a test. Le apparecchiature afferenti a tale classe (*Tabella 3.9*), in genere, risultano alquanto complesse e necessitano di elevati costi di manutenzione nonché di articolate procedure finalizzate all'elaborazione dei dati registrati. Presuppongono, infine, l'utilizzo di grandi quantitativi d'acqua da distribuire in continuo sulla superficie stradale al fine di poter effettuare le prove in condizioni di superficie bagnata.

4) Dispositivi ad angolo di deriva imposto

I dispositivi di misura del coefficiente di aderenza trasversale sono stati utilizzati per misure di aderenza per molti anni e sono stati introdotti nell'ambito del rilievo delle caratteristiche superficiali delle piste aeroportuali insieme ai dispositivi a scorrimento fisso. Attualmente vengono impiegati, in una serie di varianti, per il monitoraggio dell'aderenza su strade e autostrade.

In tali strumentazioni la ruota-test è inclinata di un angolo α rispetto alla direzione del moto e misura la forza laterale (coefficiente di aderenza trasversale), perpendicolare al piano di rotazione, che si genera. Il rotolamento è assicurato dalla presenza di un carico statico agente perpendicolarmente al piano medio della ruota, che produce un angolo di deriva di entità pari ad α , ma di segno opposto (Fig.3.14). In apparecchiature di questo tipo si fa maggiormente sentire il problema della possibile interazione fra la ruota test e le ruote del veicolo di prova in quanto, in questo caso, per effetto della forza laterale agente sul pneumatico, possono insorgere cambiamenti negli angoli di sterzata, caso questo in cui non sarebbe più garantito il valore dell'angolo di deriva imposto. Per ovviare a questo inconveniente una possibile soluzione è dotare lo strumento di due ruote di prova aventi angoli di deriva opposti. In questo modo le forze agenti sulle due ruote tenderebbero a compensarsi annullando la tendenza a curvare di cui si è accennato. Tali strumentazioni (Tabella 3.10) sono utilizzate per lo più nei paesi Europei e risultano maggiormente sensibili, rispetto alle altre apparecchiature finora descritte, alle irregolarità della superficie viabile.

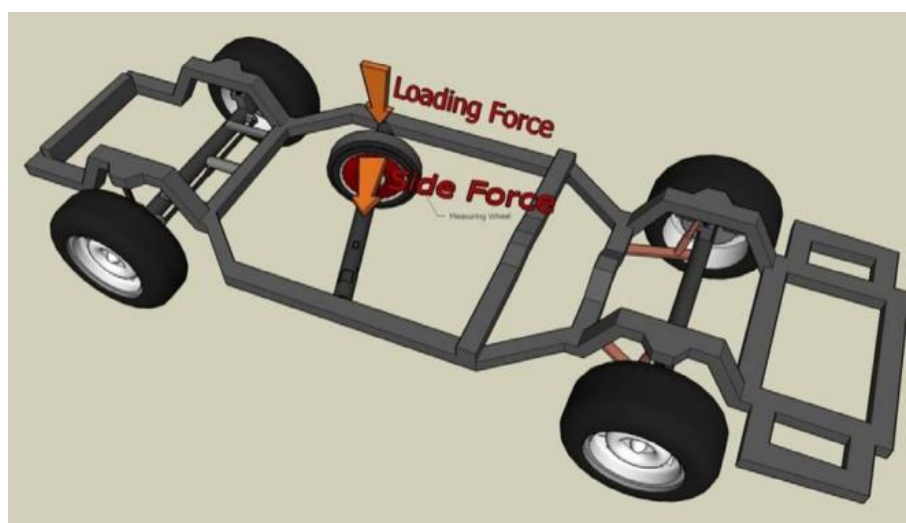


Fig. 3.14– Schematizzazione dei dispositivi ad angolo di deriva imposto [12]



DISPOSITIVI A RUOTA BLOCCATA		
Norma di riferimento	Descrizione della procedura di rilievo	Indicatori di aderenza ricavati
ASTM E 274 [20]	<p>Utilizzato per prove su pavimentazione bagnata, è dotato di un sistema in grado di formare un velo idrico dello spessore di 1 mm. Il campo di velocità all'interno del quale viene impiegato va da 40 ai 120 km/h; le misurazioni vengono di solito eseguite su tratti di 20 m. L'apparecchiatura viene portata alla velocità desiderata, si passa quindi ad attivare il sistema per la formazione del velo idrico superficiale. A questo punto viene attuato il bloccaggio della ruota di misura e si procede alla misurazione della forza longitudinale che questa scambia con la pavimentazione. La ruota di misura può essere di due tipi:</p> <ul style="list-style-type: none">• pneumatico "scanalato" (ribbed tire) – ASTM E501;• pneumatico liscio (smooth tire) – ASTM E 524	<p>Generalmente i risultati ottenuti con le prove a ruota bloccata vengono espressi in termini di skid number (SN) in funzione della velocità di avanzamento vx; SN è definito come il rapporto tra la forza di trazione applicata alla ruota ed il carico agente in direzione verticale sul pneumatico:</p> <p>• —</p> <p>Parametri equivalenti sono il Friction Number (FN) oppure il Braking Force Coefficient (BFC). Secondo le norme la registrazione dei dati deve partire almeno 0.2 secondi dopo il bloccaggio della ruota (tin) e continuare per un intervallo di tempo fra 1 e 3 secondi (tfin). I valori vengono mediati dal sistema il quale fornisce FN come:</p> <p>• — —</p>
Strumentazioni di misura afferenti a tale classe	<p>Dynatest and E274 skid trailers- USA</p> <p>Stuttgart Reibung Messer (SRM, Brake Force Coefficient BFC, with locked wheel, constant sleep or ABS method) – Germania, Svizzera, Austria</p> <p>ADHERA (Brake Force Coefficient BFC, Friction Force) – Francia</p>	
<div><div><p>ADHERA</p></div><div><p>Stuttgart Reibung Messer</p></div><div><p>Dynatest</p></div></div>		

Tabella 3.7 - Caratteristiche principali dei dispositivi a ruota bloccata

DISPOSITIVI A SCORRIMENTO FISSATO		
Norma di riferimento	Descrizione della procedura di rilievo	Indicatori di aderenza ricavati
ASTM E274 [20]	La prova viene eseguita in condizioni di superficie bagnata con spessore del velo idrico di 0,5mm. Il pneumatico liscio a scomparsa è montato su un rimorchio o un veicolo che si muove a velocità prossime ai 64 km/h. La velocità di rotazione del pneumatico di prova è limitata ad un'aliquota della velocità del veicolo attraverso una catena od un meccanismo a cinghia ovvero attraverso un dispositivo frenante di tipo idraulico. I carichi sulla ruota e le forze di attrito vengono misurati con trasduttori di forza o di tensione ovvero attraverso dispositivi di misura della coppia. I dati sono tipicamente registrati su intervalli variabili da 25 a 125 mm e mediati su lunghezze di 1 m.	<ul style="list-style-type: none">Friction Number (FN) o Braking Force Coefficient (BFC). Secondo le norme la registrazione dei dati deve partire almeno 0.2 secondi dopo il bloccaggio della ruota (tin) e continuare per un intervallo di tempo fra 1 e 3 secondi (tfin). I valori vengono mediati dal sistema il quale fornisce FN come: <div></div>
Strumentazioni di misura afferenti a tale classe	Roadway and Runway Friction Testers (RFTs), Airport Surface Friction Tester (ASFT) Saab Friction Tester (SFT); Road Analyzer and Recorder (ROAR) Griptester (Skid resistance with 14.5% constant slip) BV11, BV12 (variable slip 3%÷53%), BV8 (constant sleep of 15%)	



RFTs



ASFT



SFT



ROAR




Griptester


Tabella 3.8 - Principali caratteristiche dei dispositivi a scorrimento fissato

DISPOSITIVI A SCORRIMENTO VARIABILE		
Norma di riferimento	Descrizione della procedura di rilievo	Indicatori di aderenza ricavati
ASTM E1859 [21]	L'aderenza viene misurata in funzione di uno scorrimento fra ruota e superficie variabile da 0% a 100%. La prova viene effettuata in condizioni di pavimentazione bagnata con spessore del velo idrico medio di 0,5 mm. Il dispositivo è costituito da un pneumatico libero di ruotare con velocità via via decrescenti. Il carico agente sulla ruota nonché la forza di attrito che si esplica al contatto vengono registrati a intervalli uguali o inferiori a 2,5mm.	<ul style="list-style-type: none">• Percentuale di scorrimento calcolata come: <div>$\frac{V - \omega r}{V}$con V: velocità esecuzione test; r: raggio della ruota di prova; ω: velocità angolare della ruota.</div>• Coeff. di aderenza longitudinale• Friction number a scorrimento massimo• Slip to skid friction number• Rado shape factor
Strumentazioni di misura afferenti a tale classe	French IMAG– Skid Trailer (Automatic Skid Trailer Equipment); Norwegian Norsemeter RUNAR SALTAR systems.	

Skid Trailer



SALTAR



RUNAR




Tabella 3.9 - Principali caratteristiche dei dispositivi a scorrimento variabile

DISPOSITIVI AD ANGOLO DI DERIVA IMPOSTO		
Norma di riferimento	Descrizione della procedura di rilievo	Indicatori di aderenza ricavati
ASTM E670 [22]	La velocità relativa S tra il pneumatico e la superficie della pavimentazione è pari alla velocità del veicolo V moltiplicata per $\sin \alpha$ (essendo α l'angolo di imbardata). La prova viene eseguita in condizioni di superficie bagnata con getto d'acqua di 1.2L/mentre due ruote con angolo di deriva analogo o diverso vengono fatte scorrere sulla superficie tipicamente alla velocità di 64 Km/h. I dati sono tipicamente registrati su intervalli variabili da 25 a 125 mm e mediati su lunghezze di 1 m.	<ul style="list-style-type: none">• Mu Number, MuN• Side-force friction coefficient, SFC. <p style="text-align: center;">—</p> <p>con V: velocità ruota di prova; α: angolo di deriva</p> <p>Fs: forza perpendicolare al piano di rotazione; W: carico vertical applicato alla ruota.</p>
Strumentazioni di misura afferenti a tale classe	British Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM) Mu-meter MK3 and MK4	

SCRIM





Mu-meter



Tabella 3.10 - Principali caratteristiche dei dispositivi ad angolo di deriva imposto

5) Strumenti di misura della distanza di arresto (ASTM E 445)

La prova consiste nel determinare la distanza che un veicolo, in moto a velocità costante sulla superficie stradale (64 Km/h), percorre prima di arrivare all'arresto. La superficie della pavimentazione stradale viene bagnata in maniera continua fino al raggiungimento della completa saturazione; le ruote del veicolo di prova sono bloccate.

Si determina, quindi, il coefficiente di aderenza (μ) (noto anche, in questo caso come Stopping distance number SDN) attraverso l'espressione:

in cui μ rappresenta il coefficiente di aderenza, v è la velocità di bloccaggio delle ruote (m/s), g è l'accelerazione di gravità (m/s^2), mentre d rappresenta la distanza di arresto (m).

Tali metodi di misura dell'aderenza sono molto utili negli studi di incidentalità in particolari condizioni della superficie stradale.

6) Strumenti di misura della decelerazione (ASTM E2101)

I test previsti dalla norma di riferimento vengono effettuati per lo più in condizioni climatiche particolari (inverno) e per superfici con presenza di sostanze contaminanti che si interpongono fra ruota e pavimentazione. La velocità di esecuzione della prova è variabile da 32 a 48 Km/h.

Le ruote del veicolo di prova vengono soggette ad un'azione frenate fino al completo bloccaggio delle stesse e si registra l'aliquota di decelerazione subita dal veicolo. Tale dato viene successivamente utilizzato nel calcolo del coefficiente di aderenza

in cui μ rappresenta il coefficiente di aderenza e g è l'accelerazione di gravità (m/s^2). Anche questa modalità di misura dell'aderenza risulta essere ricorrente nelle indagini di incidentalità delle infrastrutture stradali.

7) Apparecchiature portatili

Particolare attenzione è rivolta al *British Portable Tester Number (BPN)* o *British Portable Skid Resistance Tester*, strumento non ad alto rendimento, ma che presenta una elevata versatilità d'uso e diffusione planetaria. In particolare, tale strumento è stato utilizzato per le misure di aderenza nell'esperienza sperimentale presentata nel presente lavoro.

L'indice BPN viene determinato attraverso il metodo di prova catalogato nelle norme CNR, B.U. n°105/85 – EN 13036-4 [07]. La prova consente di stimare la microtessitura fornendo un parametro, noto sotto il nome di British Pendulum Number, che è indicatore della resistenza all'attrito radente offerto dal manto superficiale della pavimentazione. Tale resistenza è valutata attraverso la misura che fornisce il dispositivo di prova "Apparecchio portatile a pendolo" (Skid Tester), il quale per effetto dello "strisciamento" un pattino di gomma (di caratteristiche standard) fissato alla estremità del braccio rigido di un pendolo, lasciato cadere da altezza standard sul piano stradale debitamente bagnato, restituisce un valore di "energia" dissipata a causa dell'attrito radente.

La prova si basa sulla rilevazione della posizione di un indice trascinato dal pendolo che verrà portato ad altezza diversa, in funzione della maggiore o minore perdita di energia dovuta a fenomeni di attrito del pattino sulla superficie (Fig.3.15).

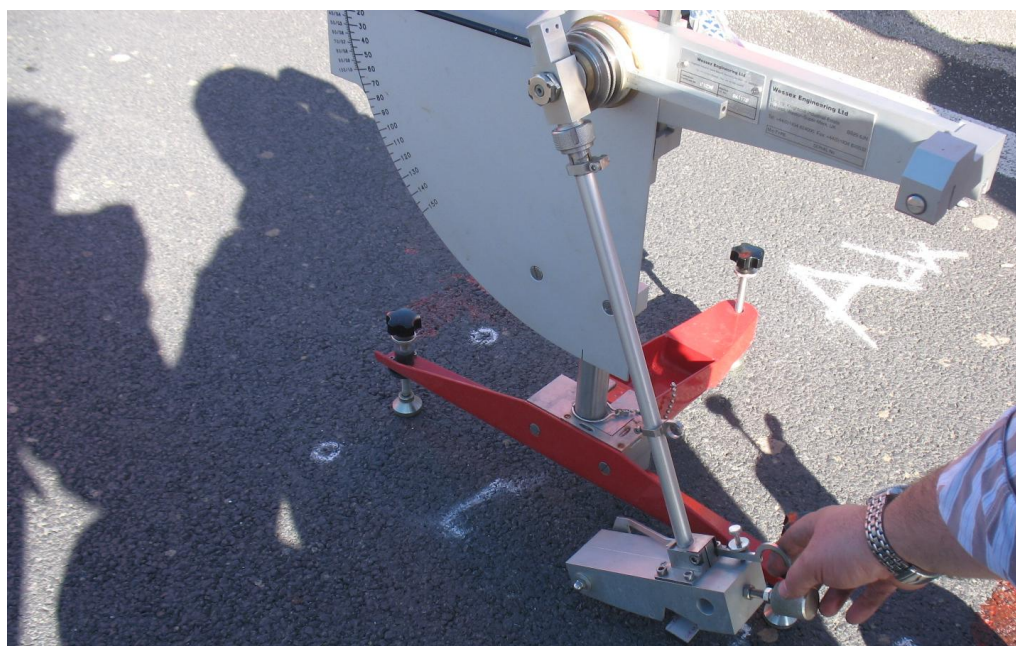


Figura 3.15 – Skid Tester per la misura dell'indice BPN

Per ogni carreggiata si scelgono almeno tre tratti per chilometro, nelle zone maggiormente sollecitate dal traffico. Per ciascun tratto si eseguono le misure in 5 punti ubicati su un allineamento centrato sulla striscia longitudinale più utilizzata (traccia delle ruote). Il valore numerico fornito è riferito ad una unità BPN [07].

L'apparecchio a pendolo si caratterizza per la semplicità di impiego e la facilità di trasporto, per l'utilizzo sia in sito che in laboratorio, per costi di acquisto e manutenzione contenuti; presenta

tuttavia alcuni aspetti negativi come la scarsa efficacia in campagne di indagine su larga scala a causa della lentezza, e dunque dell'onerosità, dell'esecuzione di un numero di prove che abbiano significatività statistica. Inoltre rende necessaria la chiusura al traffico di una corsia del tratto oggetto di indagine ed espone l'operatore a rischi derivanti dalla vicinanza di veicoli in transito sull'altra corsia.

Descrizione dell'attrezzatura:

Apparecchio portatile - L'apparecchio consiste in un pendolo alla cui estremità è montato, attraverso apposito supporto, un pattino. Ogni componente ha dimensioni e peso normalizzato. L'apparecchio è fornito di opportuni strumenti di regolazione dell'assetto in modo da assicurare la corretta traiettoria e superficie di contatto del pattino.

Pattino - Il pattino, avente dimensioni normalizzate, consiste in un supporto in alluminio al quale è fissata una striscia di gomma con specifiche caratteristiche meccanico-compositive.

Regolo - Un regolo viene utilizzato per la misura della lunghezza di strisciamento del pattino sulla pavimentazione.

Strumentazione termometrica - La temperatura della superficie della pavimentazione stradale viene misurata mediante un termometro digitale con precisione $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ e risoluzione di $0,1^{\circ}\text{C}$.

3.5 PROBLEMI DI STANDARDIZZAZIONE DELLE PROCEDURE DI MISURA: L'IFI

Da quanto è possibile evincere dall'indagine sulle principali strumentazioni di misura dell'aderenza condotta al *Par. 3.4* del presente Capitolo, il monitoraggio delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento prevede l'impiego di numerose strumentazioni e protocolli di prova standardizzati a livello nazionale e/o internazionale. Il rilievo della tessitura superficiale, ed in particolare del fenomeno aderenza ad essa correlata, prevede l'impiego di dispositivi caratterizzati non solo da differenze sostanziali in termini di modalità operative, ma anche relativamente alle condizioni di esecuzione della prova ed interpretazione dei risultati ottenuti. Le differenze fra i diversi dispositivi sono riscontrabili a partire dalla vasta classificazione delle strumentazioni di misura (a ruota totalmente o parzialmente bloccata, a scorrimento prefissato, a scorrimento variabile, ecc.) e riguardano lo spessore del velo idrico imposto, la velocità di esecuzione della prova, il tipo di pneumatico utilizzato (dimensioni, pressione, rigidità) [01].

La natura della gomma del pneumatico, ad esempio, esercita un'influenza considerevole nel determinare l'entità delle perdite energetiche dovute al fenomeno di isteresi che si verifica durante il moto dello stesso pneumatico sulla superficie stradale e, conseguentemente, determina differenze nei valori di aderenza registrati [16].

Le dimensioni del pneumatico rivestono un'importanza altrettanto rilevante poiché determinano diverse distribuzioni delle pressioni verticali sulla pavimentazione, nonché diverse dimensioni dell'area di contatto, con evidenti ripercussioni sulla stima dell'aderenza. I carichi esercitati dai pneumatici delle diverse strumentazioni risultano, in alcuni casi, sostanzialmente diversi passando da un valore minimo del Grip Tester di 19 daN fino ad un massimo con l'apparecchio SCRIM di 200 daN [16], [17].

Infine, anche la velocità di scorrimento, calcolata come prodotto della velocità di avanzamento del mezzo e della percentuale di scorrimento imposto (seno dell'angolo di deriva), è sostanzialmente diversa da strumentazione a strumentazione. Per lo Skid Tester, ad esempio, poiché l'angolo di deriva imposto è nullo, tale velocità coincide con la velocità di movimentazione del pendolo di 10 Km/h; per lo SCRIM, invece, è pari a 20.4 Km/h (angolo di deriva 20° e supponendo una velocità di 60 Km/h) [17] (Fig.3.16).

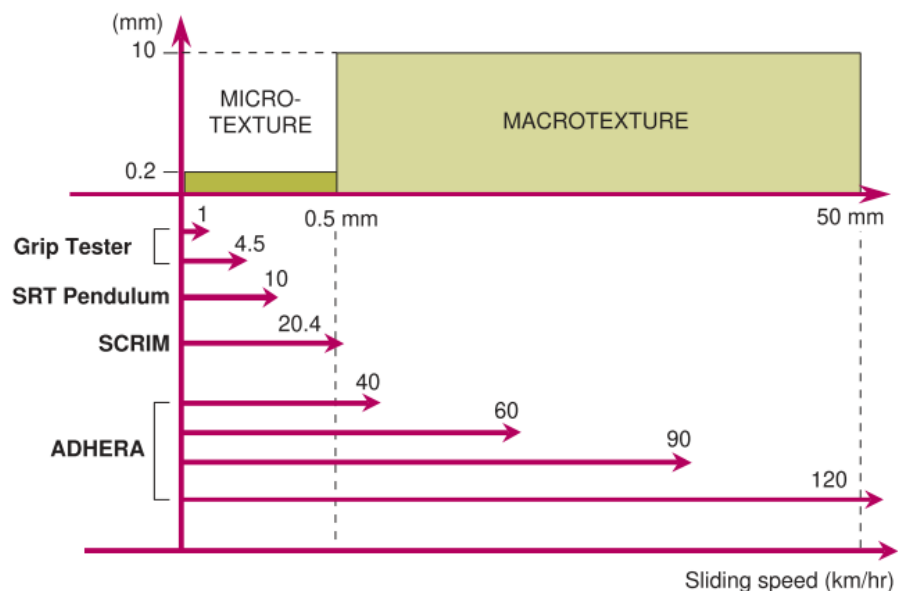


Figura 3.16 – Velocità di scorrimento per i diversi dispositivi di misura [17]

Fatto ne sia che nel 1992, a livello internazionale, è stata avviata una procedura di armonizzazione dei risultati forniti dalle diverse metodiche di rilievo delle caratteristiche superficiali della pavimentazioni in un'unica unità di misura, utile al fine di tradurre i molteplici

dati esistenti in un indice generalizzato [19]. La ricerca fu condotta con l'impiego di ben 37 dispositivi diversi operanti su 54 tipologie di pavimentazioni (28 in Belgio e 26 in Spagna) a tre velocità di rilievo (30, 60 e 90 Km/h) [18].

I risultati sperimentali, pubblicati nel 2005, portarono all'individuazione di correlazioni importanti fra i diversi dispositivi/modalità di misura, nonché alla definizione di un indice internazionale di aderenza IFI (International Friction Index) a cui poter ricondurre tutte le misure di aderenza e macrotestitura effettuate con le diverse strumentazioni utilizzate nell'esperimento [20].

L'approccio seguito fu fondato su tre concetti fondamentali:

- l'uso di un fattore di correzione della velocità basato sul Penn State Model;
- l'introduzione di un fattore di correzione empirico per la macrotestitura in funzione della strumentazione utilizzata sia per il rilievo della macrotestitura superficiale che per il monitoraggio dell'aderenza;
- velocità di scorrimento pari a 60 Km/h.

L'equazione analitica per il calcolo dell'IFI (o F60) è la seguente:

$$IFI = \frac{S}{TX} \left(\frac{FRS}{A} \right)^B \left(\frac{C}{a} \right)^b$$

in cui S è la velocità di scorrimento, TX è la misura di macrotestitura (espressa in termini di MTD o MPD), FRS è la misura di aderenza effettuata con lo strumento utilizzato, i parametri A, B, C e a, b sono costanti che dipendono dalla strumentazione impiegata e sono rintracciabili in apposite tabelle nella norma di riferimento E1960 [24].

In realtà, studi successivi [25] rivelarono alcune limitazioni proprie della metodologia implementata nell'esperimento internazionale. In particolare, furono osservate discrepanze anche consistenti nell'applicazione e nell'utilizzo dell'indice che determinarono successive perplessità sulla possibilità di quantificare l'aderenza secondo quanto previsto dal PIARC. Lo studio in questione, richiesto dal Forum of European National Highway Laboratories, tuttavia, non riuscì a fornire indicazioni valide sulla possibilità di colmare le lacune del metodo di calcolo dell'IFI, dovute principalmente al fatto che la correzione della velocità di scorrimento non è sufficiente alla omogeneizzazione delle modalità di rilievo dell'aderenza. La ricerca condotta dal PIARC, però, portò alla definizione di una relazione fra aderenza (espressa attraverso l'indice F60) e profondità di tessitura attraverso la quale è possibile individuare range di valori ottimali delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento (*Fig.3.17*).

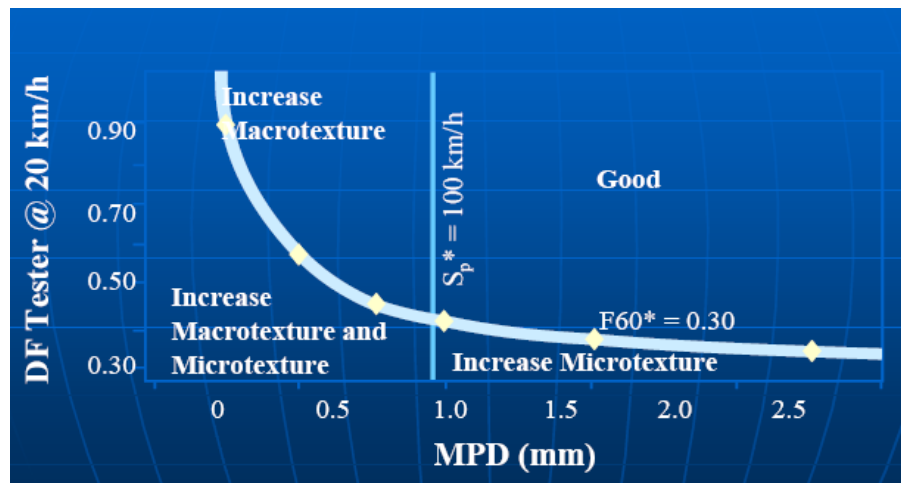


Fig 3.17 – International Friction Index - (IFI)

A seconda del valore assunto dalla velocità di slittamento (Sliding Speed, S_p) e dall'indicatore F_{60} , vengono definiti quattro possibili casi:

- Se $F_{60} < F_{60}^*$ e $S_p < S_p^*$, occorre migliorare le caratteristiche di micro e macrotestitura superficiali;
- Se $F_{60} < F_{60}^*$ e $S_p > S_p^*$, la microtestitura della superficie di rotolamento non è in grado di fornire adeguati valori di aderenza superficiale;
- Se $F_{60} > F_{60}^*$ e $S_p < S_p^*$, occorre migliorare le caratteristiche superficiali in termini di macrotestitura;
- Se $F_{60} > F_{60}^*$ e $S_p > S_p^*$, le condizioni superficiali del piano di rotolamento risultano adeguate.

3.4 PRINCIPALI STRUMENTAZIONI DI MISURA DELLA TESSITURA

Le misure di tessitura superficiale possono essere classificate in tre grandi macrofamiglie:

- misure profilometriche;
- misure volumetriche ;
- misure di drenabilità.

Esistono, infine, tecniche più recenti di rilievo della tessitura del piano di rotolamento che consistono nell'analisi di immagini delle superfici attraverso rappresentazioni tridimensionali della pavimentazione. Tali tecniche consentono indagini mirate grazie alla visualizzazione di tutte le caratteristiche delle superfici misurate, alla possibilità di effettuare misure di distanze, angoli, altezze e di calcolare i parametri di tessitura correlati [26], [27], [28], [29], [30].

Alcune delle strumentazioni maggiormente impiegate per il rilievo delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali verranno di seguito descritte in maggior dettaglio; in particolare, si procederà alla descrizione del profilometro in dotazione presso il Laboratorio di Ingegneria dei Materiali Stradali utilizzato durante la campagna di acquisizione dati in situ oggetto del presente progetto di ricerca.

3.4.1 Rilievo della tessitura superficiale mediante profilometri.

I profilometri sono apparecchiature capaci di fornire un profilo digitale della tessitura di tipo bidimensionale (macrotessitura). I profilometri stanno ormai soppiantando le apparecchiature di rilievo in continuo (RTRRMS) perché sono in grado di fornire una misura più oggettiva e stabile della tessitura superficiale. Infatti, le misure ottenute da rilievi in continuo sono sensibilmente influenzate dalle caratteristiche inerziali e meccaniche degli autoveicoli su cui sono montate. Lo sviluppo della tecnologia laser, in termini di precisione e di integrazione con sistemi software di gestione nonché di accessibilità sul mercato, pone tali dispositivi in condizioni di fornire rilevanti contributi nella caratterizzazione della tessitura superficiale dei manti stradali, in special modo nell'ambito delle componenti micro e macro. Di contro, bisogna far osservare che anche la misura resa dai profilometri rappresenta un'approssimazione del profilo reale della pavimentazione ed esistono talvolta apprezzabili differenze tra i profili rilevati da due profilometri diversi [31].

La Norma ISO [08], [24] individua le seguenti quattro proprietà fondamentali per classificare tali dispositivi profilometrici:

1. *Mobilità dello strumento.* E' possibile distinguere quattro tipologie di profilometri in base alla mobilità: mobile, ad alta velocità (velocità di prova del veicolo su cui è installato lo strumento maggiore o uguale a 60 km/h); mobile, a bassa velocità (profilometri che effettuano i rilievi ad una velocità di percorrenza inferiore a 60 km/h); Stazionario in presenza di traffico (posizionati direttamente sulla pavimentazione); Stazionario in assenza di traffico (apparecchiature difficilmente movimentabili).
2. *Intervallo di lunghezza d'onda rilevabile.* In merito a questa proprietà dello strumento, vengono indicati cinque range di variabilità contraddistinti da una lettera come riassunto in *Tabella 3.11*:

Classe di lunghezza d'onda	Range di lunghezza d'onda della tessitura coperto (mm)	Bande di lunghezza d'onda in centri d'ottavi coperti (mm)
A	0,05 – 0,16	0,05 – 0,063 – 0,08 – 0,10 – 0,125 – 0,16
B	0,20 – 0,50	0,20 – 0,25 – 0,315 – 0,40 – 0,50
C	0,63 – 2,0	0,63 – 0,80 – 1,0 – 1,25 – 1,6 – 2,0
D	2,5 – 50	2,5 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50
E	63 – 200	63 – 80 – 100 – 125 – 160 – 200
F	250 – 500	250 – 315 – 400 – 500

Tabella 3.11 - Intervalli di lunghezze d'onda rilevabili

3. *Natura del contatto strumento-pavimentazione rilevabile*: Dispositivi di contatto: in tali dispositivi il sensore che esegue la lettura della tessitura, durante le operazioni di prova, instaura un vero e proprio contatto fisico con la superficie indagata. Dispositivi di non contatto (contactless device): in cui il sensore che esegue la lettura, durante le operazioni di rilievo, non ha un contatto fisico con la superficie, pertanto rilevano la quota di un punto della pavimentazione tramite la proiezione, su tale punto, di un'onda acustica o elettromagnetica [31]. Alla famiglia dei profilometri a contatto appartengono la semplice asta rigida (rod and level), rispetto alla quale computare il profilo per punti ed il Dipstick [32] che rappresenta una versione evoluta di un inclinometro.
4. *Principio di funzionamento del dispositivo di rilievo*: in base alla tipologia di rilievo è possibile, poi, individuare quattro classi di profilometri [33], [34], [35]:
 - Profilometri a contatto d'ago (Stilus Profilometer): tali strumentazioni a contatto utilizzano uno stilo che tocca la pavimentazione e che è connesso meccanicamente ad un risolutore. Quest'ultimo può essere basato su diversi principi, dai potenziometri lineari (i più comuni) ai trasformatori differenziali. Il sensore è mosso lungo la superficie da un misuratore, emettendo un segnale acustico di output proporzionale all'altezza del punto di contatto sulla superficie, in funzione della distanza.
 - Strumenti a sezionamento di luce (Light Sectioning Profilometer): strumentazioni non-contact che utilizzano un raggio luminoso (corto od esteso), creando sulla pavimentazione una sottile linea o una banda fortemente illuminata con una punta luminosa accentuata. La luce può essere emessa ad intervalli o in modo continuo. Una

video camera monitora questa linea luminosa da un'angolazione scelta in funzione del raggio luminoso emesso.

- Profilometri ad ultrasuoni (Ultrasonic Profilometer): strumenti che utilizzano un sensore elettro-acustico nel quale un raggio di ultrasuoni viene trasmesso sulla pavimentazione e da essa riflesso. Un microfono capta il suono riflesso e viene così determinato il tempo che intercorre fra il suono trasmesso e quello ricevuto; tale valore viene trasformato nella distanza corrispondente. Il sensore è mosso sulla superficie, fornendo così un segnale di output proporzionale all'altezza dell'emissore dell'ultrasuono sulla superficie in funzione della distanza.
- Dispositivi a funzionamento laser (Laser Profilometer): in tal caso queste apparecchiature utilizzano un sensore elettronico-ottico in cui il raggio laser colpisce la pavimentazione; considerazioni di carattere generale portano a distinguere due parti fondamentali in tali dispositivi:
 - una sorgente di emissione;
 - un captatore-trasduttore.

La concezione dei più comuni profilometri laser si fonda sul principio ottico della triangolazione: la sorgente di emissione genera un raggio formante un certo angolo di incidenza con la pavimentazione, generalmente 90°, come mostrato in *Fig.3.18*; il captatore (rappresentato da un semiconduttore foto sensibile) raccoglie un'aliquota di raggio riflesso dalla pavimentazione trasmettendola, previo filtraggio attraverso una lente, al trasduttore per la trasformazione del segnale luminoso. L'insieme sorgente-captatore-trasduttore restituisce, come dato di output, la distanza d sul captatore, avente un legame funzionale con l'altezza h tra il punto d'incidenza del laser sulla pavimentazione e un sistema di riferimento solidale allo strumento stesso:

$$d = f(K_1, \dots, K_n, h);$$

dove:

d = segnale di output del trasduttore;

K_1, \dots, K_n = costanti riferite al sistema di lenti installate ed all'ottica geometrica del sistema;

h = distanza fra superficie da rilevare ed emmissore.

Lo spostamento dell'intero complesso di emissione raccolta del raggio laser lungo una direzione parallela alla superficie stradale, ad esempio a mezzo di un veicolo o di un binario di

scorrimento, consente di associare, con l'ausilio di una centralina di controllo e/o un software di gestione, ad ognuna di queste altezze (h) una coordinata (x) rappresentativa della posizione del punto rilevato.

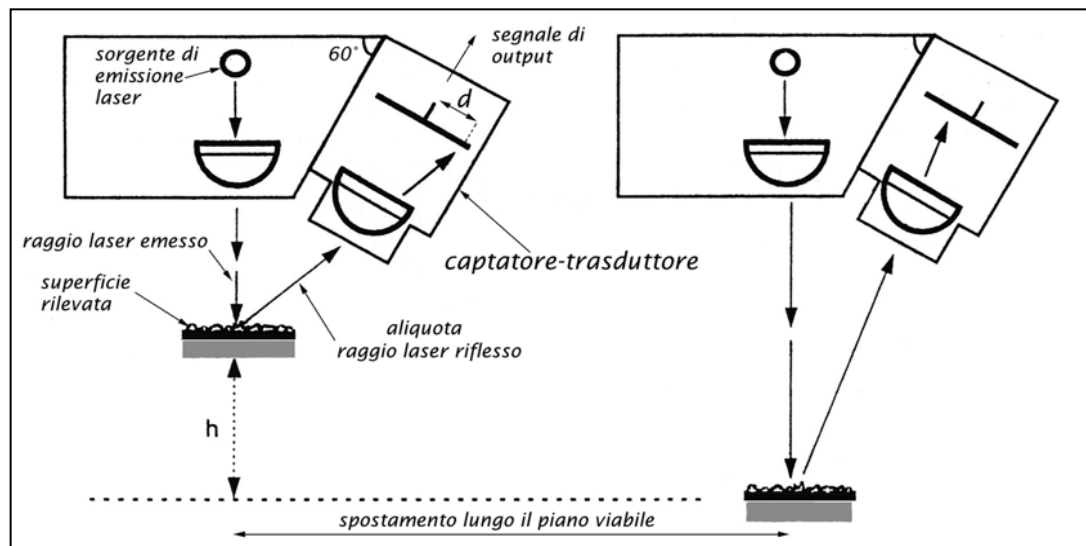


Fig. 3.18 – Principio di funzionamento di un profilometro laser classico

Nel comune impiego di profilometri laser è possibile il verificarsi che per alcuni valori della coordinata x non vengano associati valori alla z . Si è in presenza di “perdita del segnale-profilo” (*dropout*) quando il raggio riflesso dalla pavimentazione non giunge al piano del captatore oppure, pur pervenendo al piano foto-sensibile, il trasduttore non è in grado di “decodificarlo” univocamente. Nei casi di segnale non valido si pone il problema di ristabilire una continuità del profilo rilevato. Negli strumenti laser di nuova generazione, sono state affinate le tecniche di rilievo nella prospettiva di minimizzare i problemi di dropout. La vera “rivoluzione” è stata segnata dalla modifica sostanziale della geometria del sistema ottico: la coassialità tra raggio emesso e l'aliquota di raggio riflesso e captato; ciò permette di minimizzare i fenomeni di dropout per occultazione del segnale. Tra i più innovativi possono riconoscersi sicuramente i sistemi laser che utilizzano l'olografia conoscopica, basati cioè sull'interferenza ottica prodotta da cristalli birifrangenti illuminati con raggi convergenti di luce polarizzata ed il cui schema di funzionamento è rappresentato in Fig.3.19.

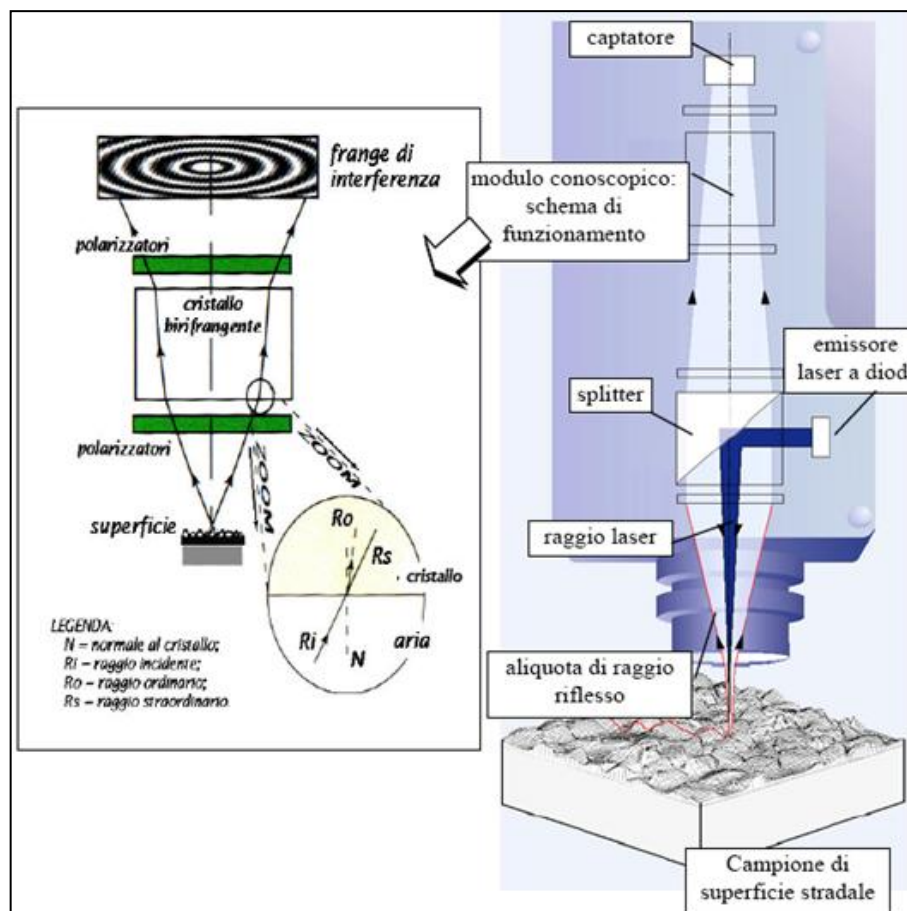


Fig. 3.19 – Principio di funzionamento di un profilometro laser conoscopico

Il raggio laser, monocromatico incoerente, viene generato da un emittore a diodi ed è totalmente riflesso e deviato di 90° gradi da uno *splitter*, questo, se percorso in un senso opposto dal fascio, si lascia invece attraversare. Il raggio, giungendo sul campione da rilevare, viene riflesso ed una sua aliquota si muove nuovamente verso lo *splitter* passando per il modulo conoscopico, costituito da un cristallo monoassiale birifrangente. All'interno del cristallo il fascio si sdoppia in un raggio ordinario isotropo ed in uno straordinario anisotropo, i quali, pur avendo velocità di propagazione differenti, muovono lungo percorsi geometrici che possono intendersi identici. L'angolo d'incidenza con cui il singolo raggio, ordinario o straordinario, emerge dal cristallo governa l'entità degli angoli di polarizzazione e di fase del medesimo fronte d'onda. Infine, filtri polarizzatori consentono di combinare i due raggi generando una immagine della frangia di interferenza (Gabor Zone Lens) che si proietta sul captatore, composto da un piano di pixel fotosensibili. La distanza tra le diverse frange di

interferenza risulta proporzionale all'altezza del punto di riflessione sul campione rispetto al sistema.

Il profilometro in dotazione presso il Laboratorio di Ingegneria dei Materiali Stradali del Dipartimento di Pianificazione Territoriale e utilizzato nella campagna di rilievo oggetto della fase sperimentale della presente tesi, è un profilometro laser ad olografia conoscopica, *ConoProbe MKIII®* della *Optimet®*, raffigurato in *Fig. 3.20*.

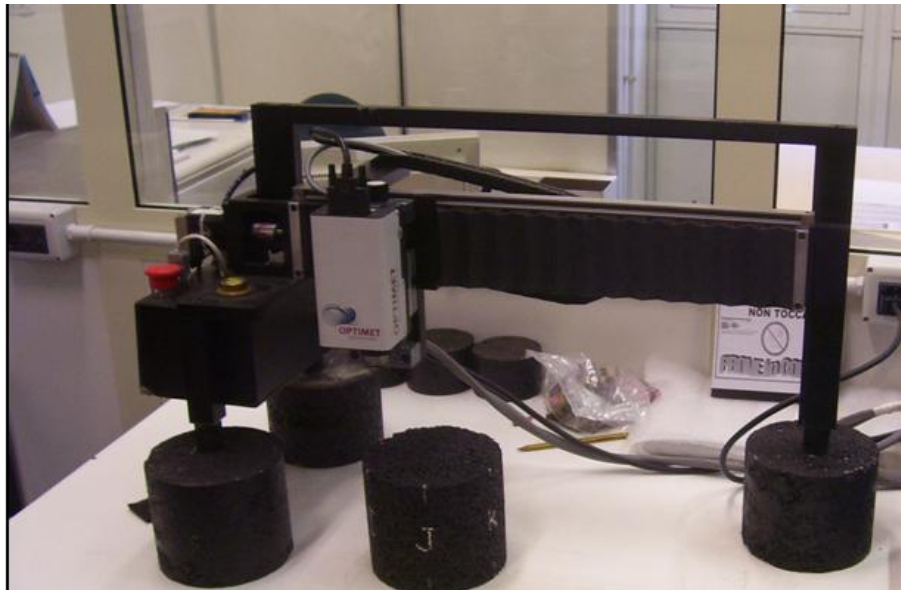


Figura 3.20 – Profilometro Cono ProbeMark III della Optimet

Il profilometro Cono Probe Mark III (MKIII) fa parte nella nuova generazione di profilometri con sensori ottici no contact sviluppati dalla Optimet. L'MKIII è basato sulla tecnologia olografica conoscopica. Le caratteristiche del profilometro in esame sono:

- Misurazioni ottimali sopra i 3000 Hz con la versione estesa di MKIII;
- Peso leggero (720 grammi);
- Compattezza;
- Setup modulari con lenti obiettivo intercambiabili che permettono di modificare il working range (intervallo di lavoro) utilizzando sempre il medesimo sensore;
- Precisione al micron con lente focale;
- Misurazione simultanea su superfici altamente riflettenti e diffusive;
- Copertura angolare di più di 170° di ampiezza;
- Misurazione di caratteristiche geometriche, di ampie scanalature e angoli.

Il Profilometro Cono Probe MarkIII consta schematicamente di:

- Cono Probe MarkIII : è un sensore ottico del tipo non-contact. Usando la tecnologia olografica conoscopica, il laser restituisce la superficie analizzata muovendosi lungo un'asta per una distanza fissata. La superficie viene restituita per mezzo di algoritmi matematici.
- Scatola di comunicazione: è il centro di distribuzione del segnale. Permette la connessione del profilometro ad un personal computer per mezzo di un cavo ethernet.
- Lenti: all'utente è messa a disposizione una varietà di lenti a seconda delle necessità di misurazione. Ciascuna lente è calibrata per uno specifico sensore in modo da avere la migliore performance richiesta.

Indicazioni in merito alle dimensioni del profilometro Cono Probe MarkIII sono riportate in Fig.3.21:

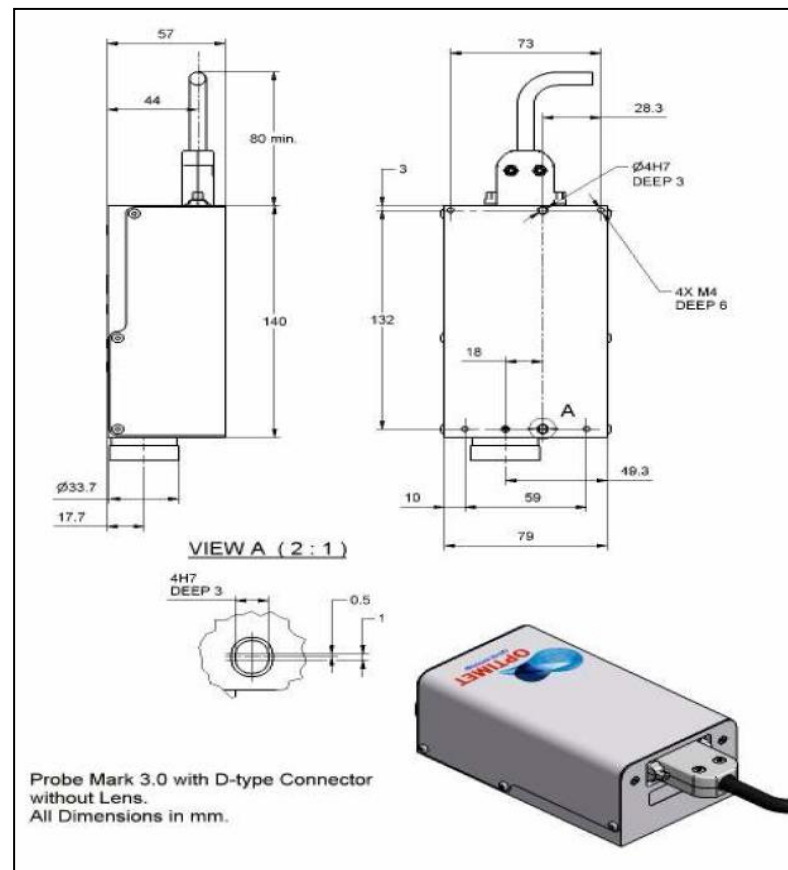


Fig. 3.21 – Dimensioni del Cono Probe Mark III

I dati acquisiti tramite il sensore Conoprobe vengono restituiti dal programma in formato file di testo .txt, sotto forma di matrici a tre colonne (ascissa, ordinata del punto e percentuale di segnale laser riflesso dalla superficie durante il rilievo SNR) e numero di righe pari alla

dimensione del campione rilevato (Lunghezza di campionamento/intervallo di campionamento). L'extrapolazione dei dati relativi a ciascun profilo sotto forma di foglio di testo viene effettuata utilizzando il software di acquisizione dati del profilometro laser utilizzato nella sperimentazione e denominato Eprofile. Il profilo acquisito viene visualizzato sotto forma di file .job, come mostrato in Fig.3.22.

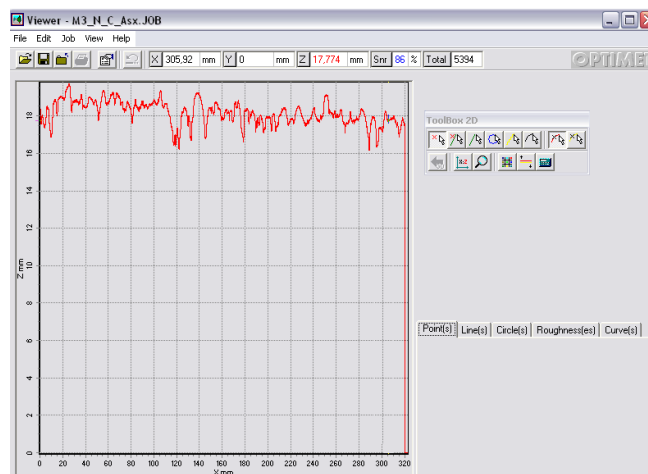


Fig. 3.22 - Interfaccia grafica file .job con rappresentazione del profilo

Attraverso una procedura di esportazione dati consentita dallo stesso Eprofile è possibile estrapolare dalla schermata di Fig.3.23 il file di testo necessario alle successive fasi dell'elaborazione.

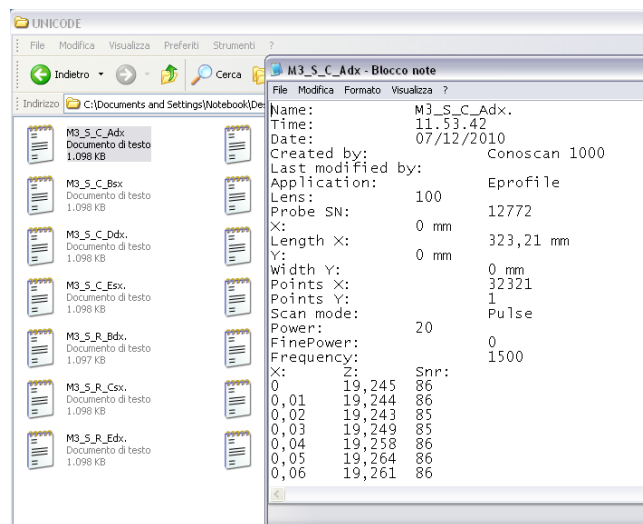


Fig. 3.23 - Interfaccia grafica estrapolazione del file di testo contenente i dati del profilo

Il profilo, dunque, viene elaborato attraverso procedure di “signal processing” cioè di elaborazione algoritmica della matrice x-z, al fine di determinare gli indicatori di micro e macro

tessitura aggregati e disaggregati elencati al *Par.3.2*. I profili acquisiti in situ vengono, dunque, processati attraverso l'impiego di una procedura che vede l'utilizzo di software comunemente destinati alle applicazioni matematiche, in particolare fogli elettronici (Tipo *Microsoft Excel*[®]) e software di Calcolo Matriciale e Trasformate di Fourier (tipo *MatLab*[®]). Mentre il software di calcolo consente una rapida elaborazione delle funzioni matematiche necessarie alla determinazione dei parametri di tessitura, Excel consente di sfruttare un'interfaccia grafica di semplice utilizzo per l'operatore (*cf. Fig. 3.24*) [37].

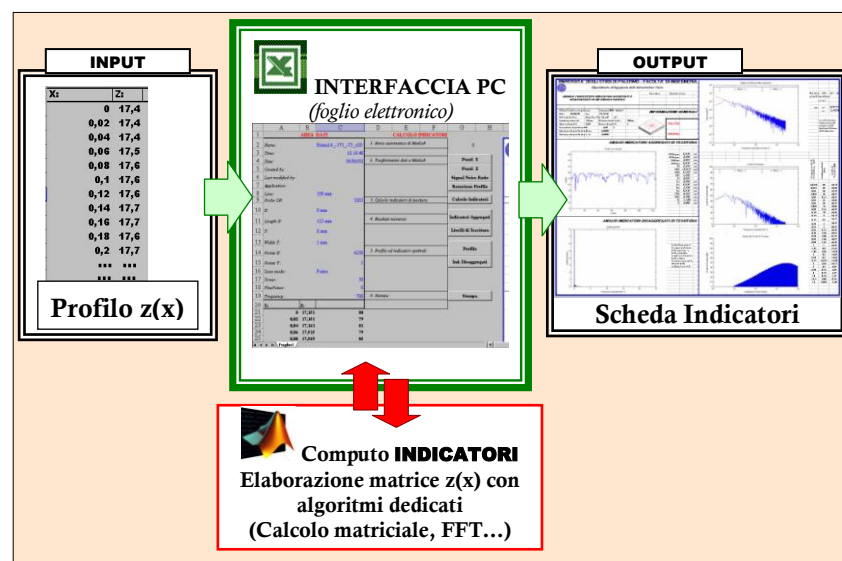


Fig. 3.24 – Procedura di elaborazione dei dati di profilo

L'elaborazione dei dati di profilo, dunque, vede l'esecuzione di fasi successive di seguito elencate;

- I. estrapolazione del file di testo filename.txt contenente le n coppie di valori x - z caratteristiche del profilo rilevato;
- II. importazione del medesimo file di testo nella scheda di lavoro precedentemente predisposta in formato excel (filename.xls);
- III. processo dei dati importati in excel attraverso software Matlab con l'utilizzo di apposite macro di interscambio fra i due software;
- IV. elaborazione e successiva archiviazione degli indicatori determinati, elencati in *Tabella 3.12*.

DESCRITTORI			
Aggregati		Disaggregati	
MPDaipcr	[mm]	Spettrogramma delle ampiezze C_k	Ampiezze $=f(1/\lambda_i)$ [mm]
MPDiso	[mm]		
ETDiso	[mm]		
Rt	[mm]		
AAD	[mm ⁻¹]		
AAH	[mm]		
ASF	-	Spettro di potenza delle ampiezze P_{zz}	$P_{zz} = f(1/\lambda_i)$ [mm ²]
Z4	-		
Ra	[mm]		
Rm	[mm]		
VAR	[mm ²]	Livello di tessitura L_t	$L_t = f(1/\lambda_i)$ [dB] (λ_i centri di terzi di ottava)
RMS	[mm]		
Sk	-		
K	-		

Tabella 3.12 – Descrittori di tessitura implementati e restituiti dal processo di elaborazione

Procedura Operativa: fase I

Operazione preliminare all'esecuzione di tale fase consiste nel collocare il file '*Indicatori.m*' nella cartella 'Work' di MatLab. Tale file è il programma in codice '.m' predisposto per il calcolo degli indicatori di tessitura.

Quindi si procede all'apertura del file excel denominato *ModelloProfili.xlt*, a sua volta correlato alla sessione di *MatLab®*, lanciata in contemporanea e automaticamente, per il calcolo degli indicatori di tessitura del profilo grazie alla funzione di Excel Link.

Procedura Operativa: fase II

Nell'area dati individuata nel foglio excel è possibile caricare il file di testo ottenuto dal software di acquisizione del profilo e avviare il processo di trasferimento dei dati al software di calcolo tramite una serie di pulsanti "attivi" che, attraverso macro predisposte, consentono di inviare i dati profilo al Matlab per la successiva elaborazione degli indicatori (*Fig.3.25*)

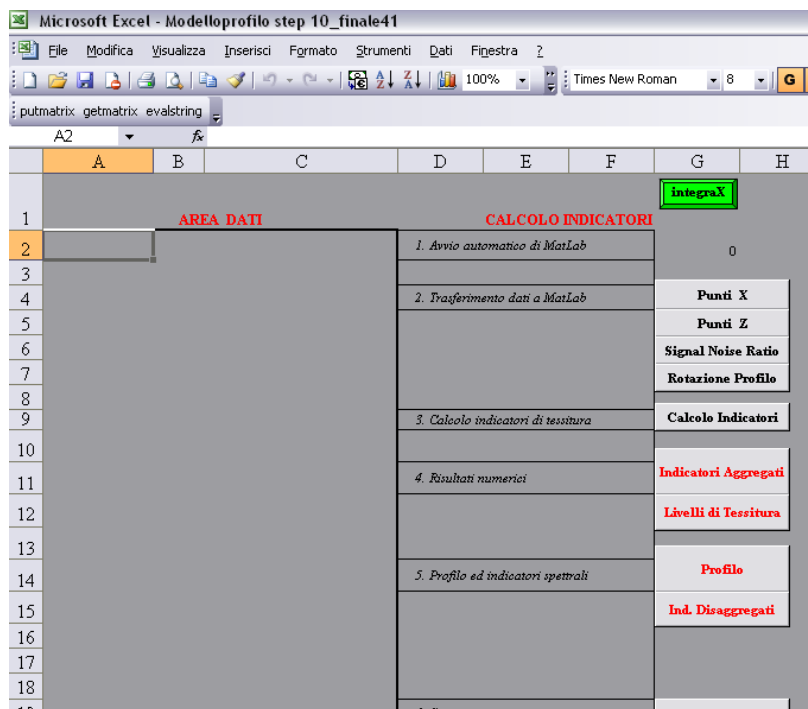


Fig. 3.25 – Interfaccia grafica file di excel di gestione dati

Procedura Operativa: fase III

L'elaborazione del profilo avviene in ulteriori due fasi:

nella prima fase vengono inviati i dati del rilievo al programma *INDICATORI.m*. Questa fase si conclude dopo aver pigiato i primi quattro tasti del menù in Fig.3.26.

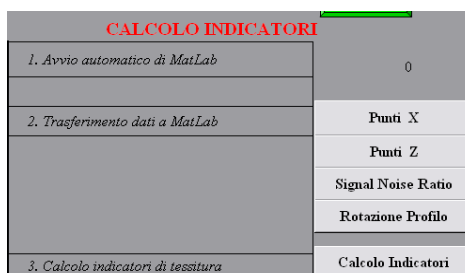


Fig. 3.26 – Procedura operativa: invio dei dati di profilo al software Matlab tramite apposite macro.

La pressione del primo pulsante comporta la creazione in *MatLab* di un *workspace* di nome *x* contenente i valori numerici delle ascisse rilevate. Analogamente per il secondo ed il terzo pulsante che comportano la creazione dei *workspace* *z* ed *SNR*; quest'ultimo rappresenta la percentuale di segnale laser riflesso dalla superficie durante il rilievo.

Il pulsante "Rotazione Profilo" crea il *workspace* 'm' contenente il coefficiente angolare della retta di regressione del profilo. Questo valore è inteso come la rotazione del profilo che deve

essere operata prima che vengano elaborati gli indicatori. L'entità di questa rotazione risulta solitamente minima.

La seconda fase consiste nel calcolo degli indicatori aggregati e spettrali del profilo tramite il pulsante 'Calcolo Indicatori' del menù. I grafici del profilo e degli indicatori spettrali vengono invece registrati in alcuni file di immagine (formato *.bmp*). Queste immagini vengono poi richiamate nel foglio di lavoro Excel per completare la scheda-profilo.

Procedura Operativa: fase IV

L'ultima fase di elaborazione consiste nella compilazione della scheda-profilo, riportando in essa tutti i risultati numerici e grafici ricavati dal programma Indicatori.m. Per completare questa quarta fase è sufficiente la pressione degli ultimi pulsanti del menù (*Fig.3.27*).

4. Risultati numerici	Indicatori Aggregati
	Livelli di Tessitura
5. Profilo ed indicatori spettrali	Profilo
	Ind. Disaggregati

Fig. 3.27 – Procedura operativa: restituzione dei dati processati da MatLab ad Excel

Completata la scheda-profilo, essa può essere stampata e/o salvata su disco. Sulla scheda-profilo è possibile distinguere n° 5 diverse aree dati:

- I. Informazioni generali sul profilo rilevato (cfr. Fig.3.28).
 - data ed ora del rilievo profilometrico;
 - nome del file di riferimento;
 - lente installata su Conoscan2000;
 - lunghezza baseline di campionamento;
 - percentuale punti invalidi (dropout);
 - coeff. angolare retta di rotazione del profilo sull'orizzontale.

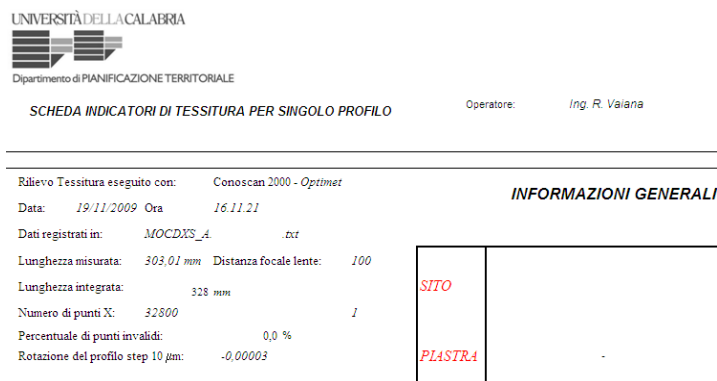


Fig. 3.28- Scheda profilo: Informazioni generali sul profilo rilevato

II. Indicatori aggregati e rappresentazione grafica profilo $z(x)$ (cfr. Fig. 3.29).

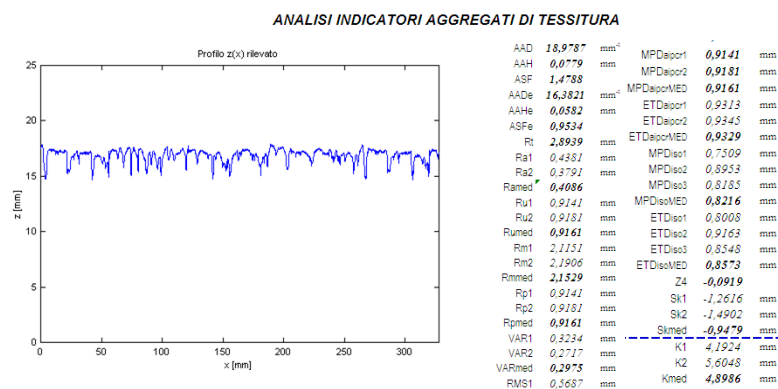


Fig. 3.29 - Scheda profilo: Indicatori aggregati e rappresentazione grafica profilo $z(x)$

I. Indicatori disaggregati (cfr. Fig. 3.30)

- Spettrogramma delle ampiezze C_k ;

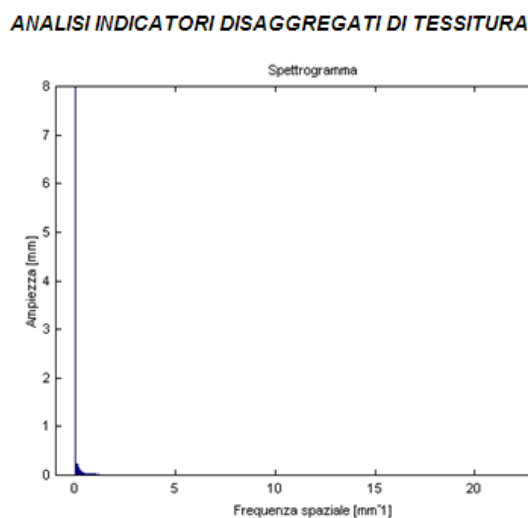


Fig. 3.30- Scheda profilo: Indicatori disaggregati – Spettrogramma delle ampiezze

II. Indicatori disaggregati (cfr. Fig. 3.31)

- Spettro di potenza delle ampiezze P_{zz} .
- Equazione retta di regressione delle P_{zz} sul piano bi-logartmico.

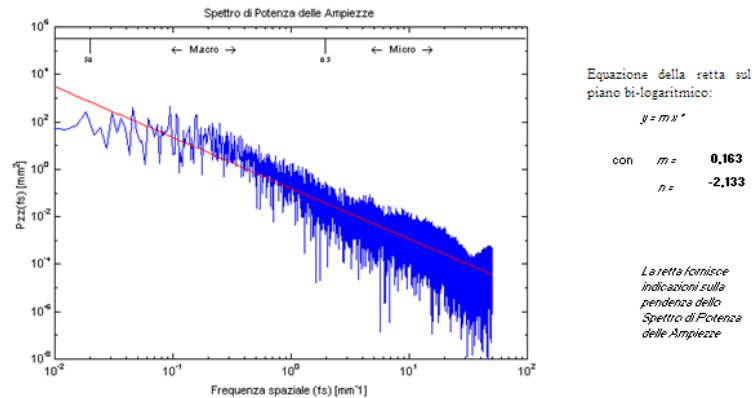
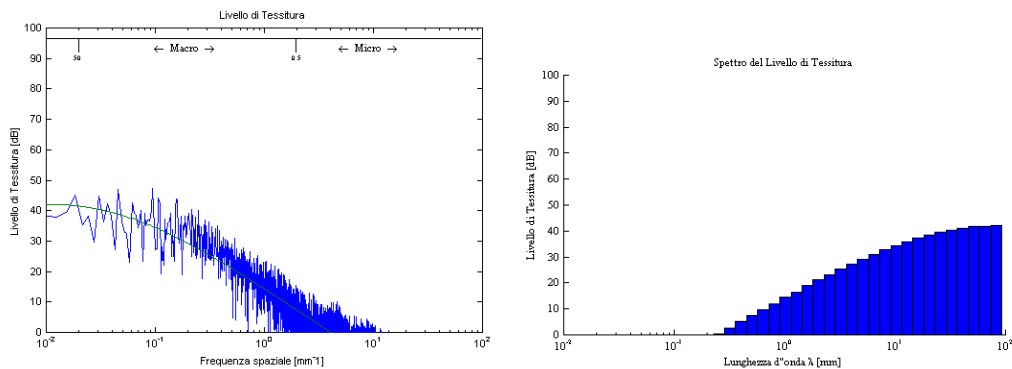


Fig. 3.31- Scheda profilo: Indicatori disaggregati – Spettro di potenza delle ampiezze

III. Indicatori disaggregati (cfr. Fig. 3.32)

- Livello di Tessitura L_t in funzione della frequenza spaziale;
- Livello di Tessitura² L_t , in corrispondenza dei valori di lunghezze d'onda prese secondo serie di terzi d'ottava diagramma a barre e valori numerici.

Fig. 3.32- Scheda profilo: Livelli di tessitura in funzione della frequenza (sx) e delle lunghezze d'onda (dx)

² I livelli di tessitura, in particolare, vengono stimati facendo uso di una curva (polinomiale di 3° grado) che interpola i punti dello spettro dei livelli di tessitura.

3.4.1.1 Circular Texture Meter (ASTM E2157)

Il dispositivo (Fig.3.33) consente di misurare la profondità della tessitura superficiale attraverso un sensore laser (CCD, Charge Coupled Device) montato su un braccio posto ad un'altezza di 80mm al di sopra della superficie che ruota descrivendo una traccia circolare con raggio di 142mm. Un motore ad una velocità tangenziale di 6 mm / min guida il braccio. Il laser CCD rileva 1024 campioni della superficie in un giro con step di 0,87 mm di distanza. I dati vengono convertiti in formato digitale e archiviati nella memoria di un computer portatile. Per calcolare la profondità media di tessitura, i dati vengono rilevati su otto archi di uguali estensione (111,5 mm) [36].



Fig. 3.33 – CT Meter [36]

3.4.2 Misure volumetriche

Fra le misure di tipo volumetriche per il rilievo della tessitura del piano di rotolamento, di larga diffusione è il metodo dell'altezza in sabbia. Il metodo di prova per la misura della macrorugosità superficiale con il sistema dell'altezza in sabbia è riportato nella orma CNR, B.U. n°94/83 [23]. Il sistema permette di stimare le caratteristiche di aderenza delle pavimentazioni mediante misure di macrotesitura ovvero di rugosità. Il valore della macrotesitura superficiale viene valutato attraverso un metodo che appartiene alla classe dei metodi volumetrici e consente di risalire ad un valore di profondità media delle asperità della superficie. Il metodo dell'altezza in sabbia consiste nel distendere con un apposito tampone un

volume noto di sabbia, con caratteristiche granulometriche prestabilite, sulla superficie da analizzare, in modo da dar vita ad una “macchia” pseudo circolare (*cf.* Fig. 3.34). Tale stesa si protrae fino a che, dalla macchia, non emergano i “macro picchi” della superficie stradale. L’operazione standardizzata permette la misura dell’area della superficie circolare che è possibile ricoprire in ragione delle depressioni e degli interstizi fra le asperità degli inerti con il volume di sabbia in dotazione. Maggiori sono le asperità minore è l’area ricoperta (*Fig.3.34*). Misurando il diametro dello pseudo-cerchio e, quindi, l’area dello stesso, dal rapporto tra il volume (noto) della sabbia e la superficie appena calcolata si risale ad una altezza media della tessitura. I valori misurati vengono espressi in HS [mm].



Fig. 3.34 – Metodo dell’altezza in sabbia

Le misure si effettuano in 5 punti su un allineamento trasversale in zone distanti almeno 50 cm fra loro e dal boro della pavimentazione e in altri 5 punti su un ulteriore allineamento trasversale che dista almeno 20 metri dal primo. La media generale dei risultati ottenuti è il valore medio dell’altezza in sabbia HS della pavimentazione nel tratto considerato [32].

Descrizione dell’attrezzatura di prova:

Parabrezza portatile – Strumento idoneo da posizionare sulla superficie della pavimentazione per proteggere l’area di prova dal vento e dalle turbolenze prodotte dal traffico.

Strumento per la distribuzione del materiale – Disco rigido con dimensioni e caratteristiche normalizzate utilizzato per distribuire le sferette di vetro.

Spazzola – La superficie della pavimentazione deve essere pulita accuratamente prima dell’esecuzione della prova con una spazzola.

Contenitore – Un contenitore cilindrico, di volume noto, è utilizzato per valutare il volume di sabbia distribuito sulla pavimentazione.

Riga – Una riga viene utilizzata per determinare i diametri dell'impronta.

3.4.3 Misure di drenabilità con Drenometro Belga a carico variabile

Lo strumento utilizzato per le misure di drenabilità superficiale, comunemente noto come Drenometro belga, nasce come strumento per applicazioni su pavimentazioni prettamente drenanti. Le misure di drenabilità effettuate sui tronchi sperimentali, pur trattandosi di una pavimentazione chiusa (usura di tipo tradizionale) consentono di stimare l'attitudine del piano stradale in esame a smaltire le acque superficiali attraverso i macro "vuoti" della tessitura presenti in superficie. Tale capacità è di fatto correlabile al "fenomeno idraulico" che si manifesta al contatto tra pneumatico e pavimentazione in condizioni di strada bagnata. Nelle prove di drenabilità a carico variabile viene misurato il tempo Δt relativo al deflusso di un fissato volume di acqua V compreso fra le due linee di fede dello strumento [10] (cfr. Fig.3.35).

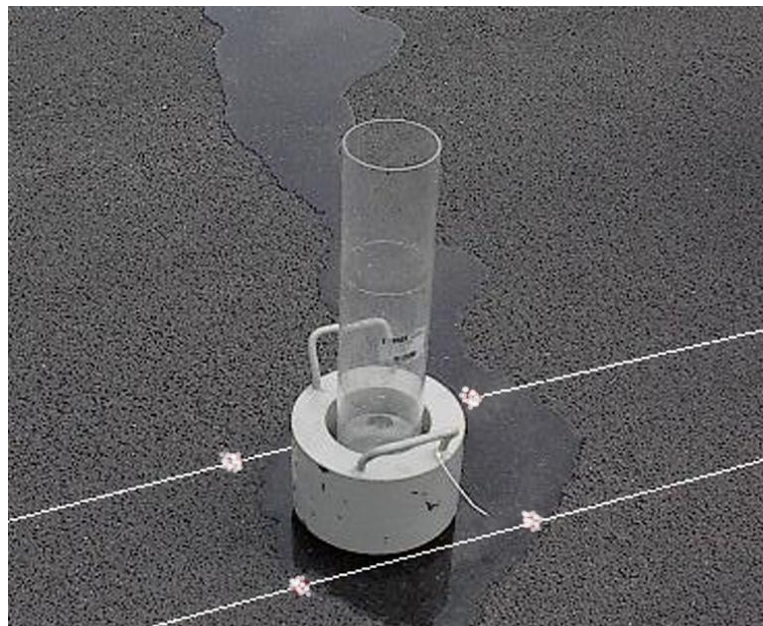


Fig. 3.35 – Drenometro belga a carico variabile

3.5 BIBLIOGRAFIA SPECIFICA CAPITOLO 3

- [01] Lo Bianco A., Madonia G., Nigrelli J.- *Un modello analitico per la simulazione del processo di levigazione degli elementi lapidei del rivestimento stradale* - X Convegno Nazionale S.I.I.V., Parma 2002.
- [02] Gabriele Boscaino, Filippo G. Praticò – *A classification and inventory of pavement surfacing texture indicators* - Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 2001.
- [03] Boscaino G., Praticò F.G. - *La tessitura superficiale delle pavimentazioni stradali – Parte I*, Progetto di ricerca di rilevante interesse Nazionale -1998, Palermo - Ottobre 1999.
- [04] Boscaino G., Minnella I., Praticò F.G., Vaiana R. - *L'analisi della tessitura stradale attraverso il sistema S.I.R.A.T.* – X Convegno Nazionale SIIV, Acireale, Catania, 2000.
- [05] Boscaino G., Praticò F.G., Vaiana R. - *Descrittori della tessitura superficiale di miscele bituminose “smooth” e “rough”* - X Convegno Nazionale S.I.I.V., Parma 2002.
- [06] Bocci M. – *La permeabilità nei conglomerati bituminosi drenanti. Osservazioni su un tronco sperimentale* – XXI Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Trieste, Giugno 1990;
- [07] CNR B.U. n° 105/1985 - *Norme per la misura delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni. Metodo di prova per la misura della resistenza di attrito radente con apparecchio portatile a pendolo.*
- [08] ISO 13473-1 – *Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Determination of Mean Profile Depth* – Settembre 1997.
- [09] *PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, International PIARC Experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements*, 1995.
- [10] A-169-86/04000 – *Belgian Ministry of Public Works*
- [11] Hall J.W., Smith K.L., Titus-Glover L., Wambold J.C., Yager T.J., Rado Z. - *Guide for Pavement Friction* - Final Report for NCHRP Project 01-43, February 2009.
- [12] European Aviation Safety Agency - *Runway friction characteristics measurement and aircraft braking (rufab) final report volume 3 – Functional Friction* - Research Project EASA 4/2008.
- [13] Canale S., Leonardi S., Nicosia F. - *Analisi critica del fenomeno dell'aderenza in campo stradale e ferroviario* - Università degli studi di Catania, Istituto Strade Ferrovie
- [14] Artista A.- *Studio dell'interazione fra ruota con pneumatico e pavimentazione stradale* - Tesi di Laurea, Facoltà di Ingegneria, Corso di laurea in Ingegneria Meccanica, Catania, 1996.

- [15] MTAG Volume II - *Rigid Pavement Preservation 2nd Edition Caltrans Division of Maintenance , Chapter 2—Surface Characteristics*, October 30, 2007
- [16] Francesca La Torre – *Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali* – Corso di Alta Formazione SIIV, 2006.
- [17] Gothie – *Skid resistance measurements of pavements and their interpretation in France* - Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Aprile, Maggio, Giugno 2005.
- [18] Kavuri Kranthi - *Investigation of the validity of the ASTM standard for computation of International Friction Index* - Theses and Dissertations. Paper 32 University of South Florida 2008.
- [19] Wambold J.C., Antle A.E., Henry J.J., Rado Z., Descornet G., Sandberg U., Gothié M., Hushek S. - *Expérience internationale AIPCR pour comparer et harmoniser les mesures de frottement et de texture (International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Skid Resistance and Texture Measurements)*, Publication AIPCR 01.04.T, Paris, 1995.
- [20] ASTM E274 / E274M - 11 *Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire*
- [21] ASTM E1859 / E1859M - 11 *Standard Test Method for Friction Coefficient Measurements Between Tire and Pavement Using a Variable Slip Technique*
- [22] ASTM E670 - 09 *Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter*
- [23] CNR B.U. n° 94/1983 - *Norme per la misura delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni. Metodo di prova per la misura della macro-rugosità superficiale con il sistema dell'altezza di sabbia*
- [24] ISO 13473-3 (Draft) – *Characterization of pavement texture by use of surface profiles. Part 3: Specifications and classification of profilometers* – 2001
- [25] E 1960 – 98 - *Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface*, 1999.
- [26] Elunai, R. Chandran, V. Gallagher, E.- *Asphalt Concrete Surfaces Macrotecture Determination From Still Images* - Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions, 2011.
- [27] El Gendy A. and Shalaby A. - *Image Requirements for Three-Dimensional Measurements of Pavement Macrotecture* - Transportation Research Record: Journal of the Transportation

Research Board, No. 2068, Transportation Research Board of the National Academies pp. 126–134., Washington, D.C., 2008.

[28] Herold M., Roberts D., Val Noronha, Smadi O. - *Imaging spectrometry and asphalt road surveys* - Elsevier Ltd., July 2007.

[29] Khoudeir M., Brochard J. - *Roughness Characterization through 3D Textured Image Analysis: Contribution to the Study of Road Wear Level* - Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 19, 93–104, 2004.

[30] Slimanea A. B., Khoudeira M., Brocharda J., Minh-Tan Do - *Characterization of road microtexture by means of image analysis* – International journal on the science and technologie of friction lubrication and wear, Volume 257, Numero 12, Elsevier - Marzo 2007

[31] Wambold J.C. – *State of the art of measurement and analysis of road evenness* - Roadsurf'98 Proceedings, Prague 1998.

[32] M.W. Sayers et S.M. Karamihas – *The little book of profile* - 1997.

[33] M.W. Sayers et S.M. Karamihas – *Interpretation of road roughness profile data* – June 1996.

[34] AIPCR - Technical Committee on Surface Characteristics (C1) – *Inventory of road surface characteristics measuring equipment* – AIPCR, 1995.

[35] A. Localzo - *Misura e caratterizzazione della regolarità in ambito urbano, ed in particolare per le pavimentazioni lapidee della città di Napoli* - Università degli studi di Napoli Federico II, Polo delle Scienze e delle Tecnologie, Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti “Luigi Tocchetti”, Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Idraulici di Trasporto e Territoriali, XXI Ciclo, Indirizzo “Infrastrutture Viarie e Sistemi di Trasporto”, A.A.

[36] Hanson Douglas I., Prowell Brian D. - *Evaluation of circular texture meter for measuring surface texture of pavements* - NCAT Report 04-05, September 2004.

[37] Vaiana R. - *Caratteristiche superficiali dei rivestimenti in conglomerato bituminoso ed il fenomeno dello sheet flow* - Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie, Università degli Studi di Palermo, Febbraio 2004.