

TESSITURA SUPERFICIALE DI MANTI STRADALI: INDICATORI DERIVATI DA ACQUISIZIONE PROFILOMETRICA CON METODO NON-CONTACT

G. Boscaino* - M. S. Giunta** - R. Vaiana***

PREMESSA

Nell'ultimo trentennio il trasporto "su gomma", pesante e leggero, non solo ha subito una evoluzione sproporzionata all'offerta infrastrutturale ma si è anche caratterizzato per una richiesta prestazionale, nei confronti del piano stradale, sempre più condizionata dall'esigenza di garantire una circolazione "sicura" e compatibile con adeguati livelli di servizio.

Così oggi, accanto ai tradizionali requisiti di portanza, regolarità e aderenza, si cerca di soddisfare istanze di "ecocompatibilità" del modo di trasporto, quali ad esempio l'abbattimento del rumore e delle vibrazioni indotte dal rotolamento, nonché la riduzione dei consumi energetici (carburante, pneumatici etc.), istanze queste riconducibili, per alcuni aspetti, alla fenomenologia del moto relativo fra piano di via e pneumatico.

In letteratura scientifica, gli studi sulla interazione dinamica pneumatico-pavimentazione portano ad individuare nella "tessitura" della superficie di

rotolamento uno degli elementi "causa primaria" del fenomeno e pertanto tale caratteristica acquista un ruolo strategico nella definizione dei campi di risposta alla richiesta prestazionale dell'utente.

L'esplicitazione e la codificazione dei legami funzionali fra la causa "tessitura" e gli "effetti" generati trovano una pratica ed evidente rappresentazione in "indicatori" del piano di via, sia di tipo estrinseco che intrinseco, questi ultimi derivati attraverso rilievo ed analisi dei profili $z(x)$ della superficie stradale [8][9][12][17].

Per il rilievo dei profili si ricorre a strumenti detti "profilometri", classificati dalle Norme ISO [10], principalmente in relazione alla natura del contatto tra strumento e superficie da testare, in *dispositivi a contatto* e *dispositivi non a contatto* [1][2][3][4][5][7][15][18] (cfr. fig.1).

Lo sviluppo della tecnologia laser, in termini di precisione e di integrazione con sistemi software di gestione,

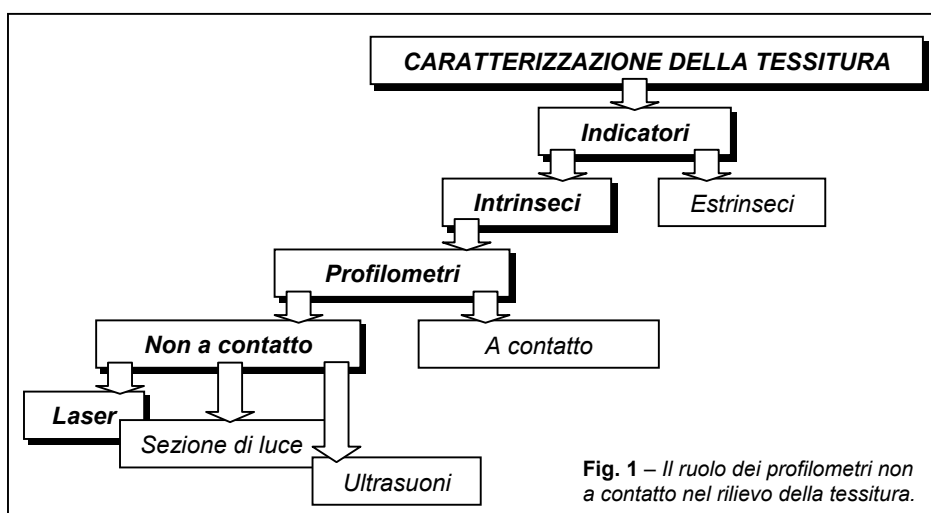


Fig. 1 – Il ruolo dei profilometri non a contatto nel rilievo della tessitura.

*Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie – Università degli Studi di Palermo (Ricerca finanziata con fondi R.S. ex 60% 2000 dell'Università degli Studi di Palermo: "Indagine sperimentale sulle caratteristiche di superficie di un manto stradale".

**Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie, Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie – Università degli Studi di Palermo.

***Dottorando di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie, Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie – Università degli Studi di Palermo.

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.

1. I PROFILOMETRI LASER

I sistemi laser di "bassa potenza" si sono diffusi nel campo della metrologia applicata al rilievo della geometria della superficie del piano di via in virtù delle proprietà intrinseche del raggio laser:

- Monocromaticità (insieme di onde elettromagnetiche emesse con una sola frequenza);
- Coerenza (unicità della fase nel corso di una stessa pulsazione) [3].

La prima proprietà (monocromaticità) permette, grazie ad un appropriato filtraggio, di distinguere con eccellente contrasto la luce laser da quella dell'ambiente; la seconda (coerenza) implica spiccate caratteristiche di "collimazione o monodirezionalità" in quanto il fascio si propaga con un divergenza angolare determinata soltanto da debolissimi fenomeni di diffrazione (dell'ordine del 1/10 di milliradiani). Ciò consente raggi di sezione sottile dell'ordine del 1/100 di mm² con una conseguente limitata dispersione del segnale luminoso, a vantaggio della precisione complessiva del sistema di misura.

Considerazioni di carattere generale portano a distinguere due parti fondamentali in un dispositivo di rilievo della tessitura che utilizza il laser:

- 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. 2; il captatore (rappresentato da un semiconduttore foto-sensibile) negli strumenti di prima generazione è posto inclinato rispetto alla direzione del raggio emesso, e 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.

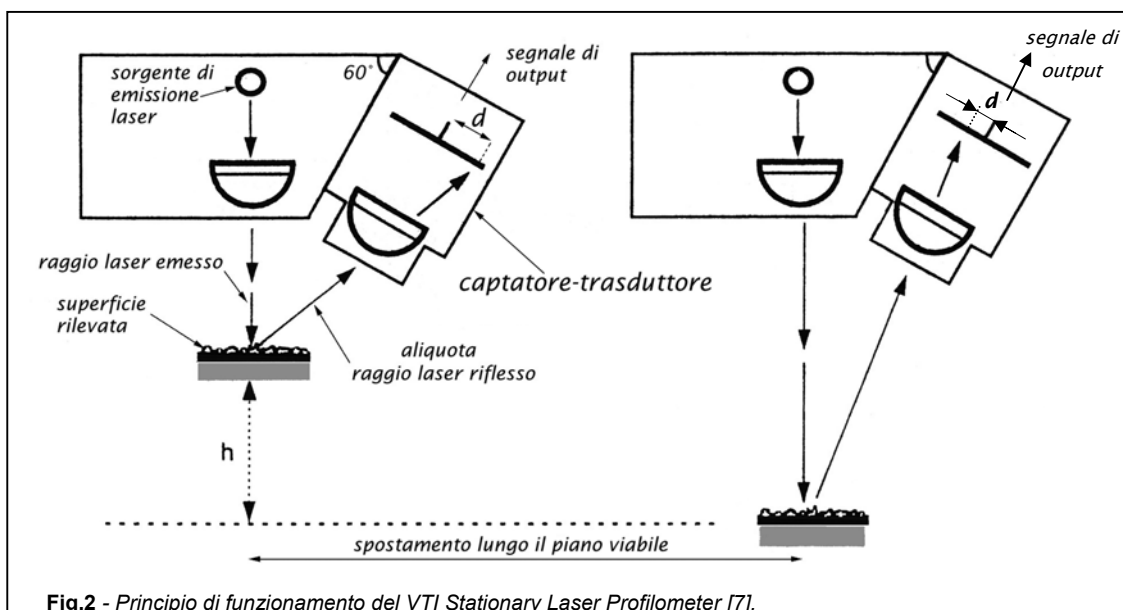


Fig.2 - Principio di funzionamento del VTI Stationary Laser Profilometer [7].

Si ottiene di conseguenza un insieme di coppie di valori altezza-posizione costituente un profilo $z(x)$ discretizzato (generalmente lo spostamento lungo x viene effettuato per incrementi discreti costanti; tale valore viene indicato con il termine "step") [7].

È evidente come al diminuire dell'entità del passo di scansione (da S_1 a S_2 , cfr. fig.3) aumenti la "qualità percettiva" dello strumento e quindi la precisione del rilievo: il profilo restituito si approssima al profilo reale analizzato¹.

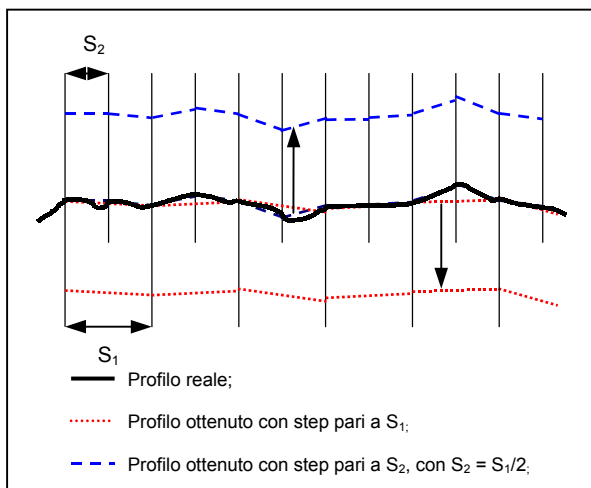


Fig. 3 – Passo di scansione: esempio di restituzione profilometrica a due differenti step.

Nel comune impiego di profilometri laser è possibile che si verifichino, in circostanze che verranno appresso descritte, che per alcuni valori della coordinata x non vengono associati valori alla z .

Si è in presenza di "perdita del segnale-profilo" più adeguatamente indicata con il termine dropout.

In linea del tutto generale, in questi casi 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 (cfr. fig. 5) [3][4]. Nei casi di segnale non valido si pone il problema di ristabilire una continuità del profilo rilevato; in altri termini si tratta di assegnare dei valori di altezza a quei punti del profilo per i quali si è riscontrata un'anomalia.

Tra le metodologie più utilizzate per il ripristino della continuità del profilo [3] possiamo indicare:

- l'interpolazione lineare;

¹ Con un passo di scansione costante si ottiene non solo una migliore ottimizzazione della gestione del rilievo profilometrico in termini di "snellezza" del software di interfaccia dello strumento, ma altresì una notevole semplificazione nello sviluppo degli algoritmi di calcolo degli indicatori estrinseci della tessitura, siano essi di tipo aggregato che disaggregato.

- l'impiego di valori minimi.

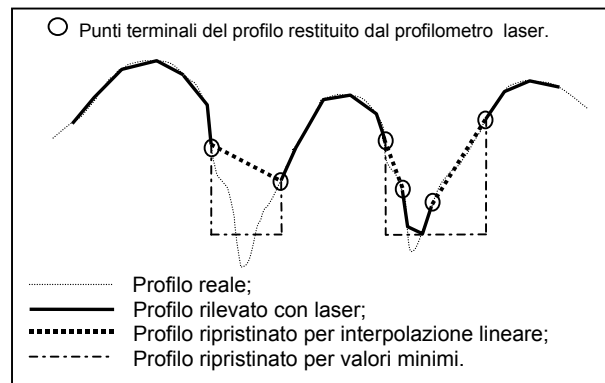


Fig.4 - Schemi teorici di ripristino dei tratti di dropout [3].

Quest'ultimo metodo è utilizzato principalmente nei casi di ripristino di tratti di profilo appartenenti a "valli profonde", quindi in corrispondenza di occultazione del segnale (cfr. caso © fig.5).

Ovviamente nessun metodo di ripristino del profilo è perfetto. La scelta del criterio da adottare va riferita al carattere "morfologico" della superficie rilevata, alla precisione dello strumento di misura e alle applicazioni alle quali i dati profilometrici sono destinati.

La normativa ISO [10] indica la percentuale massima di dropout accettabile in un profilo; tale valore è funzione del tipo di algoritmo utilizzato per il ripristino della continuità del profilo stesso², come indicato in tab.1:

max (%) di dropout	Algoritmo per il ripristino dei punti di dropout
10	Interpolazione lineare
5	Altri algoritmi

Tab.1 – Percentuali massime di punti dropout accettabili in un profilo [10].

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 (cfr. caso © fig.5).

Diverse sono oggi le tipologie di profilometri laser che presentano tale singolare caratteristica pur se con differente principio fisico di base (focalizzazione dinamica, etc. [1][5][13]).

² Ad esempio, nell'analisi di un profilo rilevato con baseline di 125mm, un passo di scansione di 20µm e per il quale si prevede un eventuale ripristino dei punti di dropout a mezzo di interpolazione lineare, è possibile ammettere non più di 625 punti di segnale non valido.

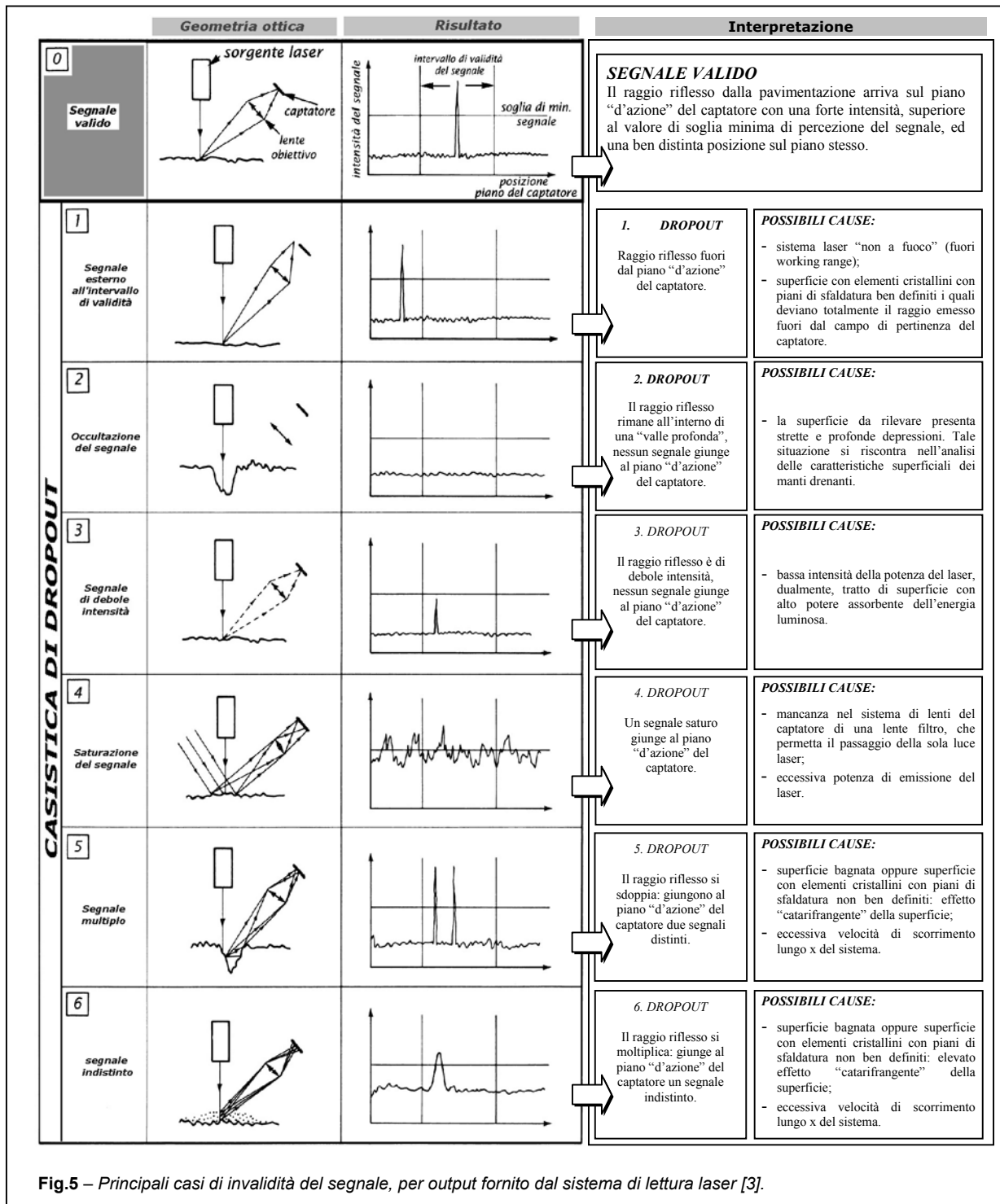
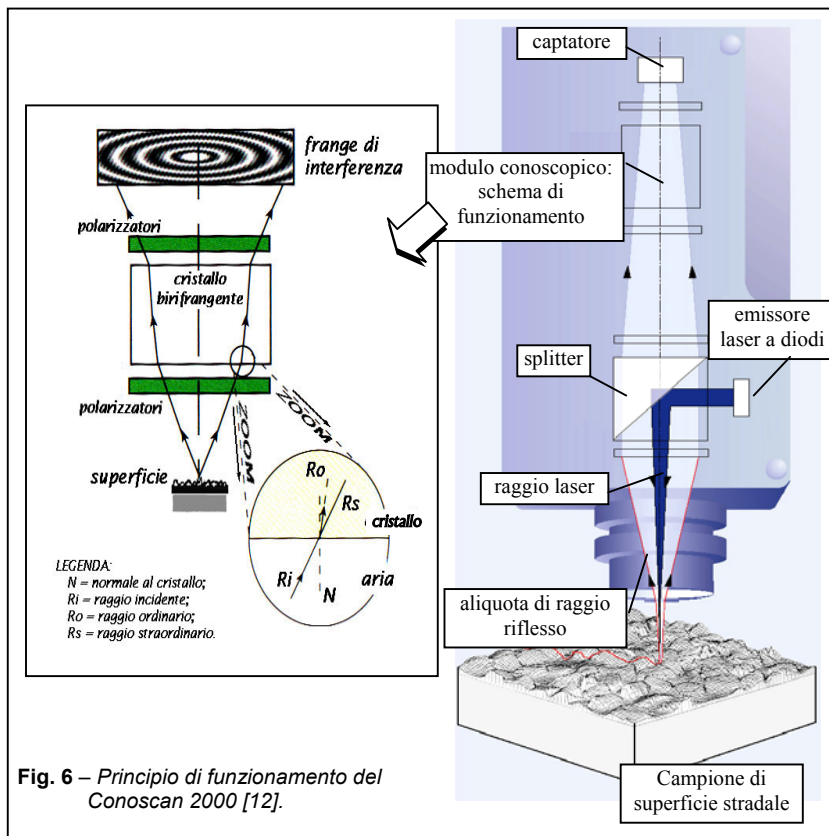


Fig.5 – Principali casi di invalidità del segnale, per output fornito dal sistema di lettura laser [3].

Tra i più innovativi possono riconoscersi sicuramente i sistemi laser che utilizzano l'olografia conoscopica [18], 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.6.

Nell'olografia conoscopica, la sorgente di luce laser non è coerente³. Il raggio laser, monocromatico incoerente, viene generato da un emmissore a diodi (cfr. fig.6) ed è

³ La conseguente divergenza angolare del raggio viene minimizzata dalla scelta ottimale della lente di scansione che ristabilisce pseudo-proprietà di "monodirezionalità" al raggio per un preciso intervallo Δz chiamato Working Range. L'incoerenza del fascio consente di avere un sistema di rilievo robusto, stabile e quindi meno sensibile alle vibrazioni, alla luce esterna, ed alle variazioni di temperatura (cfr. casi ④, ⑤ e ⑥ fig.5) [18].



totalmente riflesso da uno *splitter*, un deviatore di fascio che riflette totalmente la sorgente luminosa senza polarizzarla, deviandola di 90° gradi; lo *splitter*, 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.

2. PROFILOMETRO LASER CONOSCOPICO DA LABORATORIO

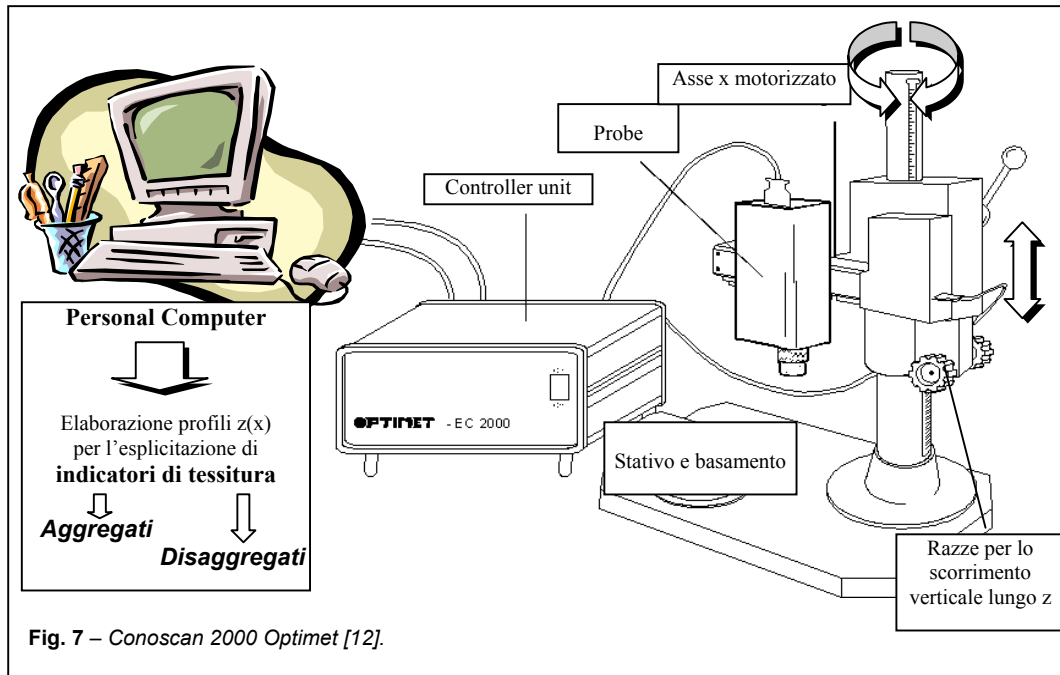
2.1 Generalità

Nel seguito si riportano alcune applicazioni di laboratorio effettuate su manti stradali con profilometro laser conoscopico, Conoscan2000® della Optimet®⁴, in dotazione al Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie dell'Università di Palermo.

Schematicamente, Conoscan 2000 è composto da (cfr. fig. 7):

- un emittente-ricettore laser, di seguito indicato con il termine *probe*, equipaggiato con un set di 5 lenti intercambiabili dal quale dipendono la precisione e le "potenzialità investigative" dello strumento;
- un asse motorizzato, che consente lo spostamento del probe lungo una direzione orizzontale sopra il campione da analizzare per un'escursione massima di 125mm;
- uno stativo, che ospita il sistema probe-asse motorizzato e ne consente la rotazione per 360° e lo scorrimento attorno e lungo ad un asse verticale;

⁴ Casa produttrice dello strumento con sede in Israele; la commercializzazione dei prodotti è affidata a diverse società tra le quali in Italia la Pertel® di Torino.



- un *controller unit* che trasforma i “segnali” provenienti dal probe e dall’asse motorizzato in output per il software di interfaccia e gestione;
- un software di interfaccia per la gestione e l’ottimizzazione delle operazioni di rilievo e correzione del dropout.

In linea del tutto generale i principali parametri di gestione del rilievo si possono suddividere in due classi, distinguendo quelli di tipo qualitativo, quali *working range* (intervallo di lavoro), *standoff* e *potenza* del laser, da quelli di tipo quantitativo, quali *baseline* e *step* di scansione⁵ [13].

2.2 Test su superfici di calibrazione

2.2.1 Ripetibilità del working range

È necessario premettere che la versatilità del software di gestione del Conoscan 2000 consente di individuare i limiti superiore ed inferiore del working range⁶.

Si è voluto verificare, per la lente da 50mm, la ripetibilità della procedura che consente di individuare i punti caratteristici del working range (di seguito indicato con WR), nella fattispecie i limiti superiore ed inferiore, e

quindi l’ampiezza Δz dello stesso, nonché il suo punto medio.

A tal proposito si è utilizzato un piano inclinato la cui superficie è stata preventivamente trattata con polvere opaca al fine di eliminare eventuali anomale riflessioni del raggio incidente (cfr. casi ①, ③, ⑤ e ⑥ fig.5). Ciò ha permesso di avere, per tutti quei punti del profilo ricadenti all’interno del WR, un valore medio di SNR pari a 80% circa.

Il rilievo del profilo campione sul piano inclinato, condotto per un numero statisticamente congruo di ripetizioni, è stato effettuato in modo tale che al crescere della x (spostamento del probe lungo l’asse motorizzato), la z diminuisse imponendo inoltre che il punto di ascissa $x_0=0$ (start scansione) appartenesse ai punti di dropout (indicati dal software “bad point”) esterni al limite superiore del WR (SNR= 0%). Tale accorgimento ha permesso, durante l’acquisizione del profilo, che lo stesso avesse un tratto ricadente all’interno del WR (SNR \cong 80%); x_{sup} indica l’ascissa di inizio profilo “percepito”.

Oltrepassando il limite inferiore del WR, corrispondente all’ascissa x_{inf} , il profilo esce dal campo di lavoro della lente, ricadendo nuovamente in una zona di bad point (SNR= 0%) con conseguente dropout del segnale (cfr fig.8).

L’analisi dei profili ha consentito l’individuazione delle ascisse corrispondenti agli estremi del WR (x_{inf} , x_{sup}) e al punto medio dello stesso (x_m); dalla matrice $z(x)$ si è risalito alle ordinate z corrispondenti e quindi

⁵ In appendice tali parametri vengono definiti e si riferisce altresì, sui criteri della loro ottimizzazione in fase di rilievo.

⁶ Visivamente, sul PC, un cursore si muove all’interno di una scala metrica in cui risultano evidenziati tali estremi ed il punto di mezzo del working range (l’“aggiustamento” si ottiene effettuando lo scorrimento lungo l’asse verticale dello stativo del sistema laser a mezzo di una apposita razza). La schermata di interfaccia consente altresì di individuare la posizione del punto collimato rispetto al working range della lente installata segnalando la presenza di eventuale dropout (punti indicati dal programma con “bad point”)[13], cfr. caso ① fig.5.

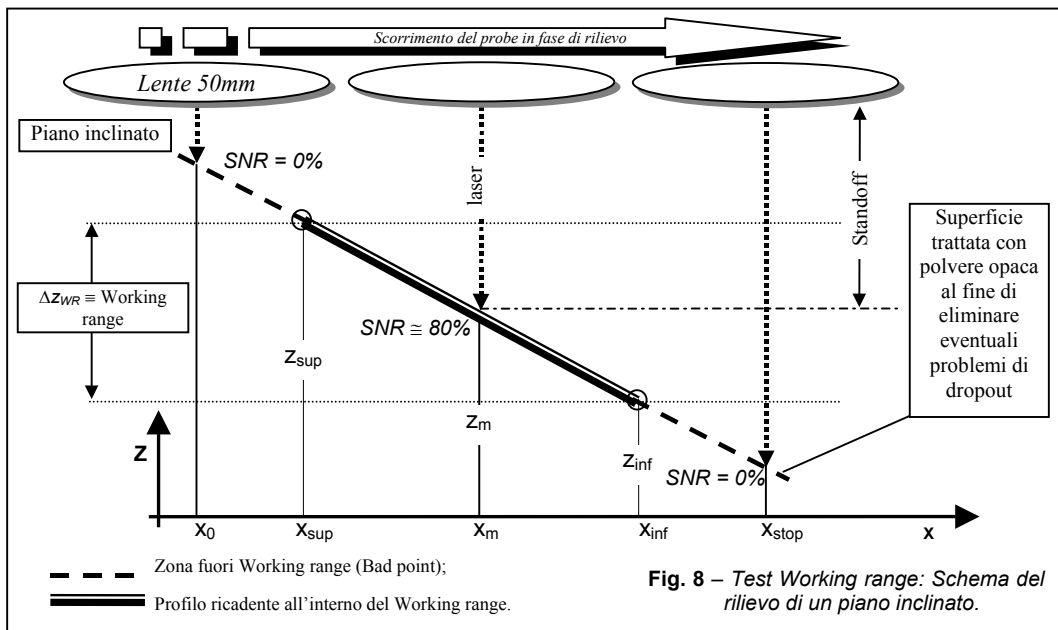


Fig. 8 – Test Working range: Schema del rilievo di un piano inclinato.

all'ampiezza $\Delta z_{WR} = z_{sup} - z_{inf}$ del WR ed all'ordinata z_m del suo punto medio. L'applicazione del test di Shapiro-Wilk ha consentito una prima verifica di normalità degli errori commessi durante lo svolgimento dell'intera procedura testé descritta per i due parametri Δz_{WR} e z_m . Scelto un livello di confidenza pari al 5%, cui corrisponde un coefficiente $W_{teor} = 0.927$, si è accertato che il coefficiente W_{calc} fosse maggiore, come è possibile constatare in tab.2, determinando altresì i parametri di ripetibilità (cfr. tab.2):

	W_{calc}	$\sigma_r^2 = \frac{\sum(V_i - r_{medio})^2}{n-1}$	$r = 1.96 \sqrt{2\sigma_r^2}$	$R_0 = 100 \frac{r}{V_{medio}}$
Δz_{WR}	0.9636	4.19×10^{-4}	1.61×10^{-3}	1.44×10^{-2}
z_m	0.9696	5.77×10^{-3}	1.60×10^{-2}	4.16×10^{-1}

Tab. 2 – Schema riassuntivo test di Shapiro-Wilk e parametri di ripetibilità.

2.2.2 Ripetibilità della procedura di esplicitazione indicatori aggregati

La ripetibilità dell'articolata procedura che consente, a partire dal rilievo profilometrico, l'esplicitazione di indicatori di tessitura di tipo aggregato, è stata verificata utilizzando una superficie di calibrazione di tessitura nota. Trattasi di una superficie metallica anisotropa il cui profilo è rappresentato da "onde quadre" di lunghezza d'onda $\lambda \cong 4\text{mm}$ ed ampiezza picco-valle pari circa a 1mm, (cfr. fig. 9).

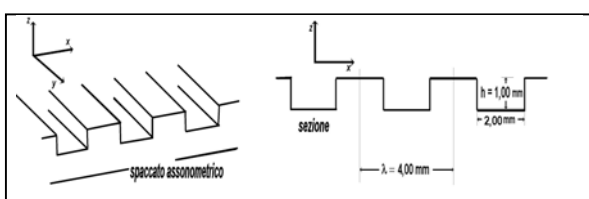


Fig. 9 - Geometria superficie test [15].

La non perfetta accuratezza sul valore delle dimensioni di tessitura della superficie di calibrazione si deve far risalire alla precisione offerta della macchina fresatrice da banco utilizzata per la realizzazione della stessa.

È descritta di seguito un'applicazione effettuata con Conoscan2000 equipaggiato con lente da 50mm. In tab.3 sono riassunti i parametri di scansione impostati per l'acquisizione profilometrica.

Baseline	Step	Matrice [x, z]	Lente 50 mm		Potenza laser
			Working range	Standoff	
125 mm	20 μm	2 x 6250	8 mm	35 mm	10

Tab. 3 - Parametri del rilievo adottati per la stima di ripetibilità.

Da parte di un medesimo operatore con la stessa apparecchiatura, per un numero di volte statisticamente rappresentativo, è stato rilevato un prefissato profilo della superficie test. Una post-elaborazione delle matrici $z(x)$ con l'ausilio di algoritmi dedicati ha permesso di calcolare un serie di indicatori aggregati della tessitura [12][17]. Un quadro riepilogativo è rappresentato in tab.4 che raccoglie undici indicatori aggregati per ogni ripetizione del profilo campione; ad ogni indicatore è associato il suo valore medio, lo scarto quadratico da tale valore medio e la varianza, calcolate sulla base di trenta determinazioni. Per gli indicatori MPD_{iso} , Ra, VAR, ed Sk si è verificata l'ipotesi di normalità degli errori compiuti nell'eseguire l'intera procedura adottando il test di Shapiro-Wilk verificando che, per il livello di confidenza 5%, i coefficienti W_{calc} calcolati, risultino maggiori del valore teorico $W_{teor} = 0.927$ come è possibile constatare in tab.5, in unione ai parametri di ripetibilità.

	MPD_{aiocr}	MPD_{iso}	R_t	R_a	R_u	R_m	R_p	VAR	RMS	S_k	K	
Valore teorico	0.5000	0.5000	1.000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.2500	0.5000	0.0000	1.0000	
sperimentale	Valore medio	0.6402	0.5950	1.3445	0.5158	0.6402	0.6651	0.6402	0.2689	0.5186	0.0784	1.0378
	Varianza	8.10×10^{-5}	8.59×10^{-4}	7.23×10^{-3}	7.60×10^{-8}	8.1×10^{-5}	6.63×10^{-4}	8.10×10^{-5}	1.47×10^{-7}	1.33×10^{-7}	2.85×10^{-6}	9.04×10^{-6}
	RMS	0.0090	0.0029	0.0850	0.0003	0.0090	0.0257	0.0090	0.0004	0.0004	0.0017	0.0030

Tab. 4 – Quadro riepilogativo indicatori aggregati.

indicatore	W_{calc}	σ_r^2	r	$R\%$
MPD_{iso}	0.9801	8.58×10^{-6}	2.38×10^{-5}	4.00×10^{-3}
R_a	0.9574	7.60×10^{-8}	2.11×10^{-7}	4.08×10^{-5}
VAR	0.9358	1.47×10^{-7}	4.06×10^{-7}	1.51×10^{-4}
S_k	0.9505	2.85×10^{-6}	7.91×10^{-6}	1.01×10^{-2}

Tab. 5 – Schema riassuntivo test di Shapiro-Wilk e dei parametri di ripetibilità

3. APPLICAZIONI IN AMBITO STRADALE

3.1 Caratterizzazione della tessitura di superfici in conglomerato bituminoso

Per verificare l'affidabilità del metodo "non-contact" nel rilievo di superfici stradali, sono stati approntati due piastre di pavimentazione, una estratta in situ da un manto d'usura autostradale in dismissione e l'altra confezionata in laboratorio per compattazione statica, ed assimilabile, per l'assortimento granulometrico utilizzato, ad un drenante.

Per caratterizzare la geometria superficiale si è ritenuto opportuno rilevare n°10 profili paralleli [8], per ognuno dei quali sono stati esplicitati n°8 indicatori di tipo aggregato. All'intera piastra è stata quindi attribuita una n-pla di 8

parametri di tessitura [12][17], ottenuti dalla media delle 10 determinazioni.

In tab.6 si riporta un quadro riepilogativo di tali valori medi per le due tipologie di strato d'usura contemplate, nonché il range di oscillazione all'interno del quale il singolo indicatore può attestarsi, stimato sulla base di precedenti esperienze sperimentali [14][16] e di quanto rinvenibile in letteratura scientifica [7][11].

La rappresentazione grafica degli andamenti dello spettro di potenza delle ampiezza relativo a due profili di fig.10 pone in evidenza la diversità tipologica dei due strati al variare della frequenza spaziale $f_s=1/\lambda$ come è possibile constatare in fig.11.

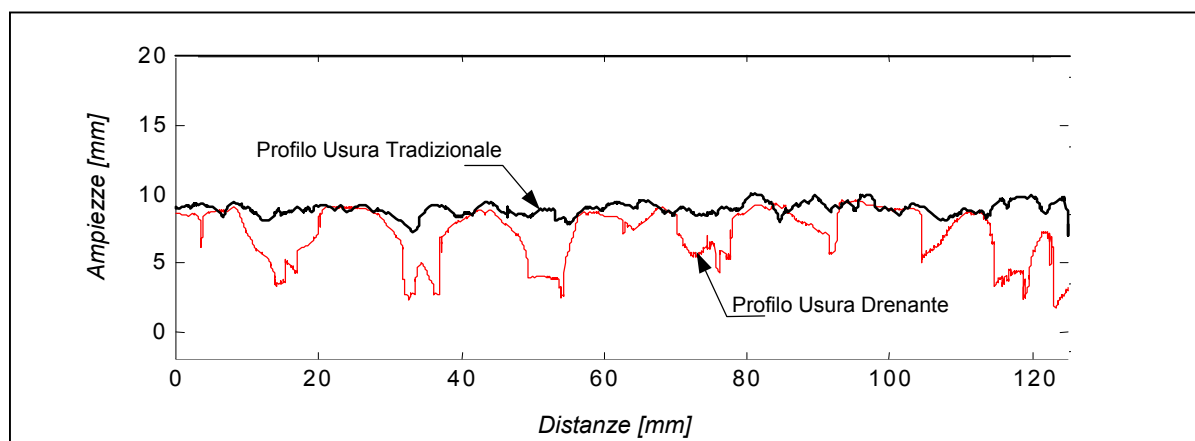


Fig.10 – Confronto dei profili di due distinte tipologie di manto d'usura.

Indicatore	Media su 10 profili		Campi di variabilità	
	Tradizionale	Drenante	Tradizionale	Drenante
MPDa_{per} (Mean Profile Depth – Profondità media del profilo) [mm]	1.07	2.02	0.3÷2.0	1.5÷4.0
MPDiso (Mean Profile Depth – Profondità media del profilo) [mm]	0.84	1.82	0.3÷2.0	2.0÷4.0
Rt (Peak-to-peak height – Distanza massima sommità-incavo) [mm]	2.72	7.65	1.5÷3.0	6.0÷12
Ra (Average roughness – Rugosità media) [mm]	0.41	1.25	0.20÷0.50	1.0÷2.0
Ru (Levelling depth – Profondità di livellamento) [mm]	1.07	2.02	0.3÷2.0	2.0÷4.0
Rm (Mean depth – Massima distanza linea media- concavità) [mm]	1.61	5.63	1.0÷1.8	5.0÷7.0
Rp (Depth of surface smoothness – Profondità delle asperità superficiali) [mm]	1.07	2.02	0.3÷2.0	2.0÷4.0
RMS (Root mean square roughness – Rugosità quale radice quadratica media) [mm]	0.52	1.58	0.2÷0.8	1.5÷2.0

Tab.6 – Indicatori aggregati per le due tipologie di pavimentazione.

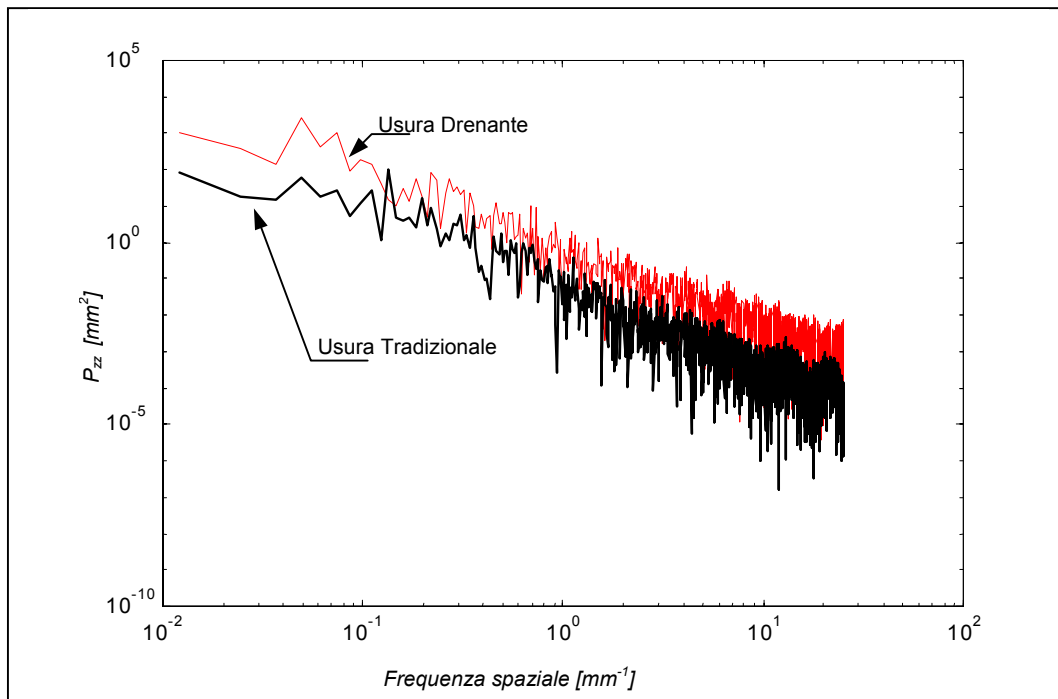


Fig.11 – Spettri di potenza a confronto tra due distinte tipologie di manto d'usura.

3.2 Caratterizzazione di inerti lapidei per miscele bituminose per impieghi stradali

Si riporta di seguito un'applicazione del rilievo laser riguardante il decadimento delle proprietà geometriche superficiali degli inerti condotta su elementi lapidei basaltici provenienti da prova di levigabilità accelerata [CNR n°140/92].

L'indagine è stata realizzata con una lente a focale ridotta, 16mm, per aumentare le potenzialità percettive del rilievo stesso (cfr. tab. 7).

Baseline	Step	Matrice [x, z]	Lente 50 mm		Potenza laser
			Working range	Standoff	
7 mm	5µm	2 x 1400	0.5 mm	9 mm	10

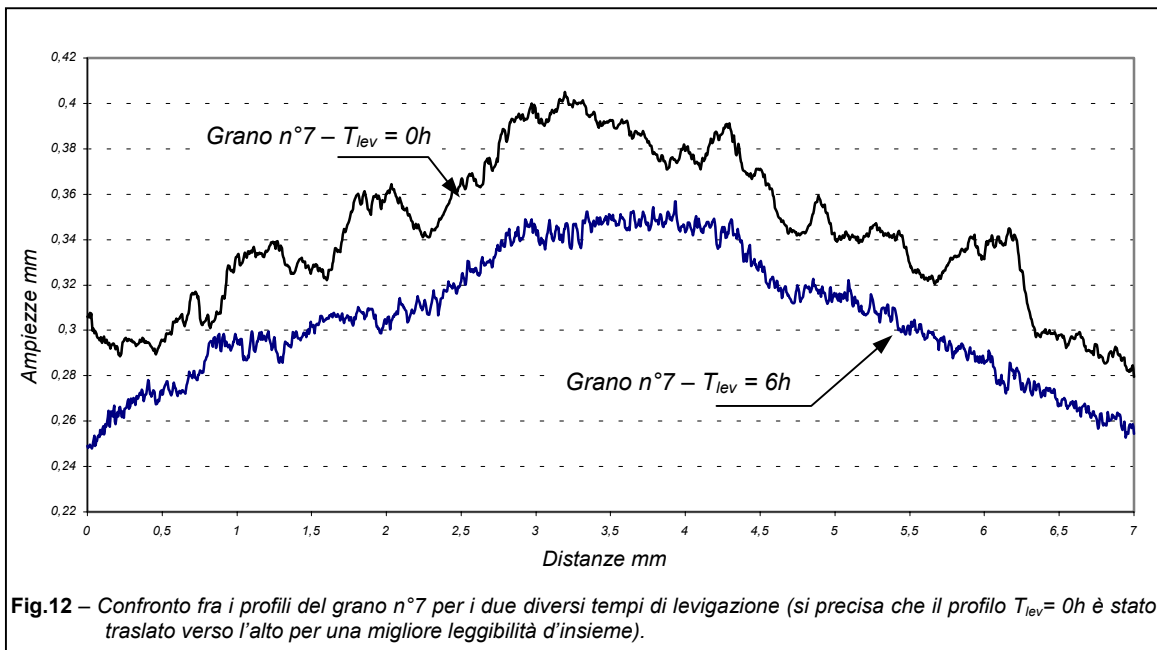
Tab. 7 - Parametri del rilievo adottati per la stima di ripetibilità.

In tab. 8 sono evidenziati i valori più rappresentativi di alcuni indicatori di tessitura esplicitati a partire da rilievi profilometrici praticati sui singoli grani per due distinti

tempi di levigazione, $T_{lev}=0h$ e $T_{lev}=6h$, con cambio di abrasivo a $T_{lev}=3h$ come prescritto dalla norma. Qualitativamente l'effetto della levigazione, e quindi il decadimento subito dal rivestimento superficiale dell'aggregato, è ravvisabile in fig. 12 dove trovano rappresentazione i profili relativi ad uno stesso grano per i due tempi di levigazione

Indicatori Grani	Tempo di levigazione = 0h			Tempo di levigazione = 6h		
	Ra [µm]	RMS [µm]	AAD	Ra [µm]	RMS [µm]	AAD
1	36.5	44.6	36.59	18.0	23.3	48.20
2	73.6	92.4	30.71	28.2	35.1	41.69
3	99.8	117.1	28.51	79.4	99.9	39.39
4	82.3	95.8	32.18	54.1	60.1	41.88
5	26.5	32.3	39.68	22.8	27.2	43.64
6	32.4	37.3	39.82	29.8	35.8	45.99
7	48.1	60.2	31.74	20.4	23.1	44.67
8	30.9	42.8	36.00	12.5	17.3	44.79

Tab.8 – Quadro degli indicatori aggregati relativi ai grani di un provino proveniente da prova di C.L.A..



3.3 Correlazioni tra indicatori intrinseci (aggregati) e indicatori “tradizionali” di tessitura

Infine si riportano alcuni risultati di una ricerca sui legami correlativi tra indicatori intrinseci di tipo aggregato (quali MPD_{aipcr} , MPD_{iso} ed AAD) ed indicatori tradizionali di tessitura (quali BPN [CNR n°105/85], ed HS [CNR n°94/83]) [16], con riferimento ai manti di usura tradizionale.

Il valor medio di ogni indicatore intrinseco di tessitura esaminato è rappresentato dalla media delle post-elaborazioni di profili $z(x)$ paralleli ad una direzione prescelta sulla piastra (cfr. Tab.10). Ciascun profilo è stato rilevato con due distinti passi di scansione ($step_1=5mm$ e $step_2=20mm$) ricavando quindi due classi

di indicatori appartenenti rispettivamente alle distinte impostazioni dell'apparecchiatura di rilievo, appresso indicate con “assetto-micro” ed “assetto-macro” (cfr. Tab.9).

Assetto	Baseline	Step	Matrice[x,z]	Lente	Potenza laser
<i>Micro</i>	35mm	5 μ m	2x7000	50 mm	15
<i>Macro</i>	125mm	20 μ m	2x6250	50 mm	15

Tab.9 – Parametri del rilievo per gli assetti micro e macro.

I risultati dell'analisi correlativa sono riportati nelle figg.13, 14, 15, 16.

Indicatori Piastra	Intrinseci				Tradizionali	
	Assetto micro			Assetto macro	BPN	HS
	MPD_{aipcr}^* [mm]	AAD	$MPD_{aipcr}^* \times AAD$	MPD_{iso} [mm]		
1	0.89	19.74	17.52	0.97	68	0.93
2	0.86	19.17	16.44	0.92	69	0.91
3	0.92	19.17	17.62	1.02	68	0.96
4	0.75	18.38	13.77	0.91	64	0.91
5	0.78	19.52	15.20	0.93	66	0.93
6	0.81	18.81	15.27	0.93	66	0.93
7	0.77	18.03	13.91	0.96	64	0.93
8	0.71	20.13	14.33	0.94	66	0.93

Tab.10 – Quadro riepilogativo indicatori di tessitura. (*) Calcolato con algoritmo AIPCR per una baseline di 35mm anziché 138mm.

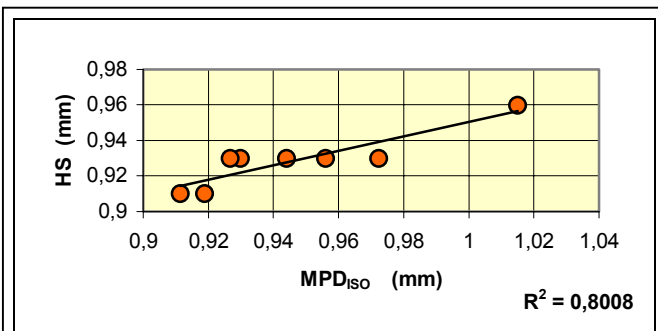


Fig. 13 – Legame correlativo tra HS e MPD_{ISO}

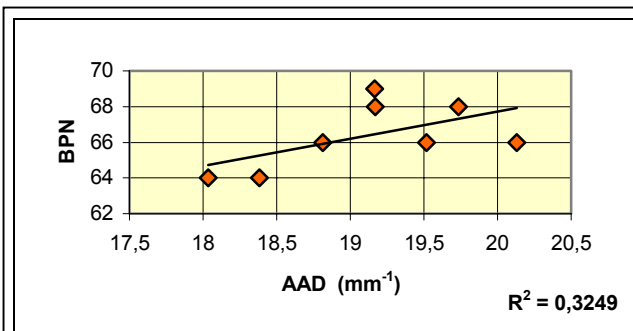


Fig. 14 – Legame correlativo tra BPN e AAD

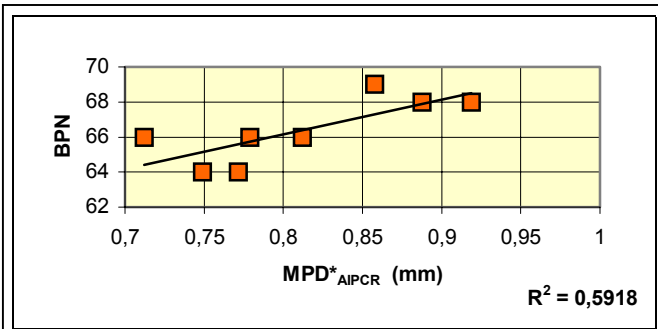


Fig.15 -Legame correlativo tra BPN e MPD*_{AIPCR}.

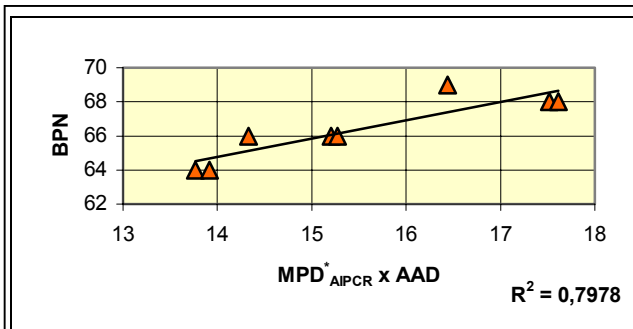


Fig. 16 – Legame correlativo tra BPN e MPD*_{AIPCR} x AAD

4. CONCLUSIONI

Il quadro di applicazioni sperimentali testé tracciato, nonché le innumerevoli testimonianze riscontrabili in letteratura scientifica [1][3][4][5][7][11][16], consentono di considerare l'impiego degli strumenti laser nella pratica della caratterizzazione della tessitura superficiale in ambito stradale la nuova frontiera di indagine dei micro e macro requisiti geometrici del piano di via.

Oggi, in questa direzione, si muovono anche le norme tecniche di tipo prestazionale per capitolati d'appalto di alcuni Enti Gestori di strade che contemplano, tra i requisiti di accettazione, ad esempio la misura della profondità media di tessitura (HS) attraverso l'uso di un particolare strumento laser (Mini Tester Meter).

Lo scenario così delineato suggerisce, sempre più, la necessità reale di intraprendere campagne sperimentali dirette, da un lato, all'affinamento delle tecniche di rappresentazione della grandezza "tessitura", e dall'altro alla elaborazione delle migliori scelte di mix-design e di posa in opera dei conglomerati bituminosi per strati superficiali in modo da consentire l'esatta identificazione e formulazione di indicatori prestazionali che siano i più aderenti e congrui alle esigenze avanzate dall'utente.

Al riguardo è al lavoro un gruppo di ricerca, cofinanziato dal MIUR (PRIN '01), indirizzato alla istituzione di un catalogo prestazionale dei rivestimenti bituminosi

stradali; ad esso afferiscono U.O. dell'Università di Palermo, dell'Università di Bologna e dell'Università della Basilicata.

APPENDICE

Criteria generali di ottimizzazione dei parametri del rilievo con Conoscan2000

Una corretta impostazione del working range, dello standoff e della potenza del laser inizia con un'attenta analisi della superficie da testare, con riferimento alle caratteristiche "morfologiche", cromatiche e riflettenti del campione da sottoporre a scansione [13].

Working range

L'accuratezza del rilievo è strettamente legata al tipo di lente installata, e quindi alla distanza focale della stessa. È infatti esattamente da quest'ultima che dipende l'entità massima di "depressione picco-valle" che lo strumento è in grado di "percepire" e misurare con precisione. Tale valore massimo di "depressione percepibile" è indicato con il termine working range e rappresenta una caratteristica intrinseca di ogni lente di corredo allo strumento (cfr. fig.1).

Standoff

Ogni lente possiede una distanza di rilievo ben definita, detta standoff, che rappresenta l'altezza che intercorre tra il livello medio interno al working range ed il piano della lente installata (cfr. fig.1); essa è la distanza media alla quale porre il campione per rientrare nel campo di validità del segnale profilo z(x), cioè nel working range della lente presa in considerazione.

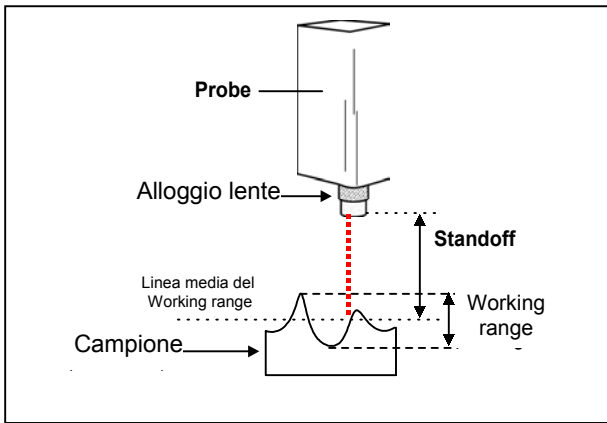


Fig. I – Conoscan 2000 Optimet: working range e standoff [12].

La scelta della lente va indirizzata su quella che possiede un working range superiore alla massima “depressione picco-valle” del campione da testare, quest’ultima stimata dall’operatore addetto al rilievo. Lo standoff, variabile dai 10mm ai 100mm circa a seconda della lente considerata, in genere non risulta essere il parametro discriminante, ma è subordinato alla valutazione della massima depressione picco-valle. Infatti, il compito primario dell’operatore è quello di fare in modo che, durante lo scorrimento del probe lungo x, il profilo reale della superficie si mantenga all’interno del working range della lente. Scelta la lente, working range e standoff rappresentano due parametri costanti del rilievo.

Prima della scansione, il software di interfaccia e gestione consente, previa scorrimento lungo x del probe, di analizzare l’andamento “orografico” del profilo ed ottimizzare sia la scelta della lente (working range) che la posizione verticale dell’emissore laser (standoff).

In fase di restituzione del rilievo, nel caso in cui il working range della lente sia maggiore della massima “depressione picco-valle” (cfr. Lente A, fig.II), a parità di impostazione ottimale dei rimanenti parametri del rilievo, il profilo $z(x)$ restituito si presenta continuo cioè senza nessuna perdita di segnale.

Quando invece il working range risulta minore della massima “depressione picco-valle”, o dualmente il profilo è costituito da una successione di picchi e valli la cui oscillazione massima

supera il valore del working range, a parità di impostazione ottimale degli altri parametri di rilievo, il profilo $z(x)$ restituito si presenta discontinuo. In questa circostanza si verifica un problema di dropout, ed in particolare il profilo “perde” tutti quei valori della z appartenenti ai “picchi” più alti e alle “valli” più basse che ricadono fuori il working range (cfr. Lente B, fig.II; caso ① fig.5).

In ogni modo, il primo profilo $z(x)$ rilevato servirà per una verifica della “relazione d’ordine” che intercorre tra il working range della lente e massima “depressione picco-valle” del campione.

Potenza del raggio laser

L’entità della potenza da impostare viene stabilita in funzione nelle caratteristiche di riflessione offerte dalla superficie da rilevare.

Con il campione da testare sotto l’azione del probe, in fase di impostazione dei parametri di rilievo del profilometro, è possibile visualizzare in tempo reale, attraverso una schermata su PC di interfaccia, la percentuale di segnale riflesso e captato dalla superficie (SNR Signal to Noise Ratio).

Si può ritenere soddisfacente un valore di SNR maggiore del 60%÷70% circa; per valori del SNR minori di tale soglia, a causa di un alto potere assorbente della superficie, basterà incrementare la potenza del laser fino a far sì che il valore di soglia venga superato e la percentuale di SNR si stabilizzi. Il valore di potenza che rende costante SNR rappresenta il valore ottimale; per ulteriori incrementi di potenza oltre tale valore SNR decresce dando vita a dropout per saturazione del segnale (cfr. caso ④ fig.5)

In linea di massima si può asserire che le superfici stradali in conglomerato bituminoso, vista la natura cromatica del componente “legante bituminoso”, possono ritenersi superfici con basso potere riflettente. È necessaria però qualche considerazione in quanto, nel caso di superfici già usurate, dove cioè gli aggregati lapidei si sono “spogliati” della pellicola di legante superficiale, la “mappa” cromatica di superficie è rappresentata anche dai grani e quindi dipende dalla natura stessa dell’aggregato (ad esempio, basalti e/o calcari etc.). Sarà l’esperienza dell’operatore addetto al rilievo a consentire una

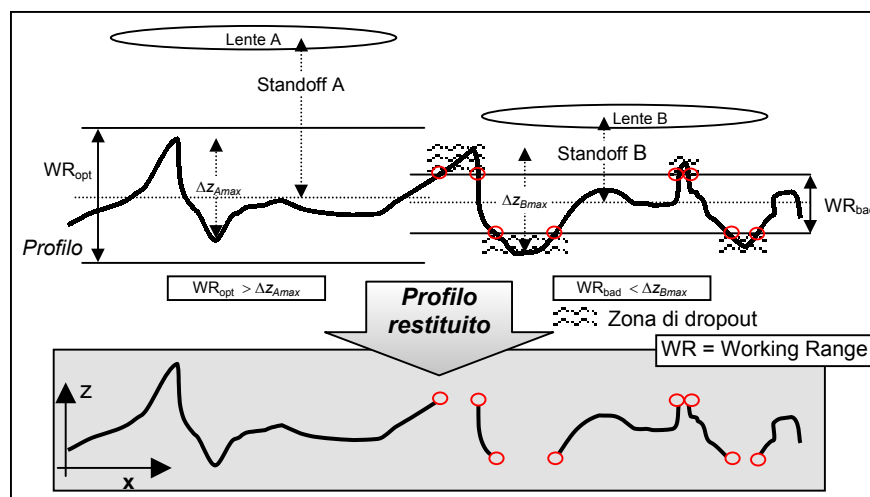


Fig. II - Corretta scelta della lente, a sinistra; errata scelta della lente a destra.

rapida convergenza al valore optimum di potenza del laser, mediandolo tra le "risposte" di SNR ottenute sui punti "cromaticamente" più rappresentativi della superficie.

In presenza di grani provenienti dalla frantumazione di rocce "impure", cioè in cui sono presenti cristalli con piani di sfaldatura, il raggio laser incidente sul campione può subire deviazioni o moltiplicarsi generando anomalie sul segnale (effetto "catarifrangente", cfr. casi ①, ⑤ e ⑥ fig.5) tali da non essere governabili dall'operatore.

Analoghe considerazioni possono farsi per superfici costituite da soli aggregati lapidei. È il caso, ad esempio, della caratterizzazione di inerti mediante prova di levigabilità accelerata [6].

Infine, i parametri di tipo quantitativo (baseline e step di scansione) vengono impostati dall'operatore di volta in volta in funzione delle dimensioni del profilo da campionare. È opportuno sottolineare che il profilometro in questione ha una escursione massima lungo x (baseline), pari a 125mm ricopribile con un numero massimo di 7000 punti, e che lo step minimo di scansione è pari a 5µm incrementabile per $\Delta s = 5\mu m$.

BIBLIOGRAFIA

1. S. Gee, W.L. King Jr., R.R. Hegmon - Pavement texture measurement by laser: a feasibility study. Surface texture versus skidding: measurements, frictional aspects, and safety features of tire-pavement interactions - ASTM STP 583, Philadelphia 1975;
2. Innchyn Her, J.J. Henry, J. C. Wambold - Development of a data acquisition method for noncontact pavement macrotexture measurement - 63° Transportation Research Board, Washington DC January 1984;
3. F. Brillet , P. Marsac - Mesure de la macrotexture des chaussées - B. L. P. C. n°140, Nov.- Déc. 1985;
4. M. Gothiè - Le Rugolaser. Trois ans de mesures à grand rendement de la macrorugosité des chaussées - B.L. P. C. n°163, Sept. - Oct. 1989;
5. J.M. Caussignac, G. Morel, J. Charrier - A new laser, noncontact method for measuring vehicle-to-pavement distance. Surface characteristics of roadways: International Research and Technologies - ASTM STP 1031, Philadelphia 1990;
6. G. Peroni, F.M. Frasceti, R. Lanucara - Studio sugli inerti impiegati nella manutenzione delle pavimentazioni. Indagine eseguita con l'uso di rugosimetro a laser - Autostrade n°3 lug.-sett. 1991;
7. U. Sandberg, P. Anund - Measurements of macrotexture by the VTI Mobile Laser Profilometer in the PIARC International Experiment 1992 - VTI Notat 1992;
8. Norma ISO 13473-1 - Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part1: Determination of Mean Profile Depth - First edition 01 september 1997;
9. Bozza di Norma ISO 13473-2 - Characterization of pavement texture by use of surface profiles- Part2: Terminology related to pavement texture profile analysis - 11 july 1997;
10. Bozza di Norma ISO 13473-3 - Characterization of pavement texture by use of surface profiles- Part3: Specifications and classification of profilometers - 11 july 1997;
11. Fracassa, F. La Torre, G. Loprencipe, G. Romeo, A. Scalamandrè - Strumentazioni ed analisi per la caratterizzazione della tessitura delle pavimentazioni - XXIII Convegno Nazionale Stradale - Verona 18/21 Maggio 1998;
12. G. Boscaino, F.G. Praticò - La tessitura superficiale delle pavimentazioni stradali - Palermo, 1999;
13. Optimet , Optical Metrology Ltd. - Conoscan 2000. Operation Manual - Version 2.0, 18 June 2000 ;
14. G. Boscaino, A.I. Minnella, F.G. Praticò, R. Vaiana - L'analisi della tessitura stradale attraverso il sistema S.I.R.A.T. - Convegno Nazionale SIIV ottobre 2000, Acireale (CT);
15. G. Boscaino, A.I. Minnella, R. Vaiana - S.I.R.A.T.: un Sistema Integrato per il Rilievo e l'Analisi della Tessitura superficiale - Convegno Nazionale SIIV, ottobre 2000, Acireale (CT);
16. G. Boscaino, F.G. Praticò, R. Vaiana - Sversamenti inquinanti su pavimentazioni stradali e rischi conseguenti al decadimento delle proprietà superficiali: indagine sperimentale - Convegno Nazionale SIIV 2001, Verona;
17. G. Boscaino, F.G. Praticò - Classification et inventaire des indicateurs de la texture superficielle des revêtements des chaussées - B.L.P.C. n° 234, 1° trimestre 2002;
18. R. Allasina et Al. - Un esempio pratico di applicazione del sistema Optimet Conoscan 3000: Un innovativo sistema dedicato alla reverse engineering per minuterie plastiche/metalliche, in grado di ricostruire la geometria tridimensionale di un oggetto fisico con risoluzioni del sub-micron. - www.pertel.it;