

**SITEBSi srl**  
**Rassegna  
del bitume**

**RIVISTA DEL SITEB-ASSOCIAZIONE ITALIANA BITUME ASFALTO STRADE**

ESTRATTO DAL N° **17/91**

**Nuovi metodi per la valutazione delle pavimentazioni stradali  
mediante tecnologia laser**

*Gianfranco Battiato*  
*Presidente Soc. RO.DE.CO*

*Edmondo Amè*  
*Direttore Tecnico Soc. RO.DE.CO*

# Nuovi metodi per la valutazione delle pavimentazioni stradali mediante tecnologia laser

Dott. Gianfranco Battiato \*  
Ing. Edmondo Amé \*\*

## INTRODUZIONE

È di fondamentale importanza, per una corretta impostazione di un qualsiasi studio di pianificazione degli interventi di manutenzione stradale, ricavare le informazioni più precise possibili, sulle condizioni funzionali e strutturali delle pavimentazioni esistenti.

Mentre le condizioni strutturali di una pavimentazione sono funzione delle caratteristiche di portanza della pavimentazione, le condizioni funzionali dipendono in grande misura dall'irregolarità, dall'aderenza e dai diversi fenomeni di ammaloramento superficiale.

La regolarità è un parametro molto importante, non solamente sotto il profilo di confort dell'utente, in quanto una strada non perfettamente regolare induce delle sollecitazioni dinamiche.

Così ad esempio un asse da 12 t., su una strada irregolare può comportare effetti dinamici equivalenti ad assi da 16 a 18 t. con fenomeni di deterioramento a fatica molto più consistenti.

La misura di regolarità veniva fatta in passato mediante valutazioni strumentali piuttosto soggettive e di difficile replicazione: il rolling straightedge, il rugosimetro Bureau of Public Roads (BPR), o Chloe appartengono a questo genere di strumenti.

Le apparecchiature della seconda generazione ancora oggi utilizzate sono essenzialmente di due tipi: road meters e profilometri.

I road meters misurano la risposta dinamica di un veicolo soggetto all'irregolarità del profilo stradale e quindi intuitivamente legano un indice numerico di regolarità al livello medio di vibrazioni prodotte da un veicolo in prova. Questo tipo di osservazione è anche chiamato RTRRMS (Response Type Road Roughness Measurement System) ed esistono numerosi indici di misura della regolarità derivati da questa tecnica: P.S.R. (mediante apparecchiature R.D.M.) R.C.I. (mediante ARAN) I sistemi della Terza generazione, basati su tecnologia laser, consentono il rilievo diretto del profilo e della regolarità della pavimentazione con precisione molto superiore rispetto ai precedenti. Il profilo rilevato viene in seguito, via software, utilizzato al fine di simulare la risposta di un veicolo di riferimento, schematizzato con un modello matematico-meccanico, alle sollecitazioni, indotte da una strada avente il profilo longitudinale misurato.

Questo tipo di approccio gode evidentemente di numerose qualità, rispetto agli altri sistemi proposti:

- minor soggettività della misura
- maggior affidabilità nel caso di ripetizione della misura
- indipendenza dalla velocità del veicolo che rileva la misura.

Come si vedrà in seguito oltre ai vantaggi descritti, l'uso di un profilometro ad alta precisione qual è il Profilometro Laser, consente di rilevare altre numerose e importanti misure quali: il profilo trasversale, la simulazione APL (onde corte e medie), il raggio di curvatura, l'altezza delle ormaie ecc. - Tra i profilometri attualmente disponibili in commercio, il Class 1+ Laser Profilometer rappresenta attualmente il sistema più avanzato in termini di precisione di misura e quantità di informazioni disponibile oggi in campo mondiale per la determinazione dei profili longitudinali e trasversali delle pavimentazioni stradali.

Agli inizi degli anni '60 la General Motors Research sviluppò un prototipo di profilometro in grado di misurare gli effetti dinamici dovuti al profilo longitudinale della strada.

Negli anni successivi, furono sviluppati molti altri sistemi di misura, sempre più sofisticati, che utilizzavano sensori di misura acustici od ottici senza bisogno di contatto con la pavimentazione stradale.

\* *Presidente Gruppo RO.DE.CO.*

\*\* *Direttore Tecnico RO.DE.CO.*

L'esigenza di correlare i risultati ottenuti dai diversi tipi di strumentazione usate nonché la mancanza di un unico sistema di riferimento per la taratura dei vari sistemi e di un indice standard di riferimento per la misura della regolarità, fu risolta al termine dell'International Road Roughness Experiment (IRRE), tenuto nel 1982 a Brasilia, con la definizione di una metodologia standard di correlazione e calibrazione delle misure ottenute (World Bank Technical Paper N° 45).

Nel report prodotto i sistemi di misura della rugosità

## 1. DESCRIZIONE DEL NUOVO SISTEMA CLASS 1 + LASER PROFILOMETER (CLP)

Nel 1988 iniziava un progetto di ricerca finanziato dal Ministero dell'Industria della Danimarca, per la realizzazione di un primo prototipo di un nuovo sistema di rilevamento del profilo longitudinale mediante sensori Laser ad alta precisione.

Lo sviluppo del nuovo sistema chiamato Class 1+ Laser Profilometer fu completato dal Gruppo RO.DE.CO. nel 1990 e permette un controllo estremamente accurato della rugosità della pavimentazione mediante l'utilizzo di tre accelerometri e due giroscopi di altissima precisione in grado di controllare 6 gradi di libertà nell'interazione veicolo-profilo stradale.

Tutto il sistema di misura è montato su una macchina appositamente attrezzata (**vedi figure 1 - 2**).

delle pavimentazioni stradali venivano divisi in quattro gruppi. I primi due comprendevano i sistemi di misura ad elevata precisione del profilo longitudinale (al quale appartiene il Class 1+ Laser Profilometer).

Gli altri gruppi invece comprendevano sistemi di misura più semplici e tradizionali, ma di soggettiva valutazione.

Fu definita una nuova scala di riferimento del valore della rugosità: l'International Roughness Index (IRI) a cui tutti i tipi di sistemi di misura possono essere rapportati.

In figura 3 è riportato un disegno schematico della apparecchiatura e delle sue parti principali.

Il sistema è stato progettato per consentire il rilievo del profilo reale sia nel campo stradale che in quello aeroportuale e permette di analizzare:

### Ampio spettro di lunghezza d'onda

Il profilo longitudinale della strada è composto da un insieme continuo di spettri d'onda e con il Class 1+ Profilometer è possibile misurare lunghezze d'onda da un minimo di 0,01 m ad oltre 100 metri.

L'analisi del profilo filtrato per piccole e medie lunghezze d'onda permette di evidenziare fenomeni anomali dovuti a imperfezioni della superficie stradale (per cattiva stesa o per presenza di buche, ormaie, ecc.), mentre i dati filtrati per lunghezze d'onda superiori a

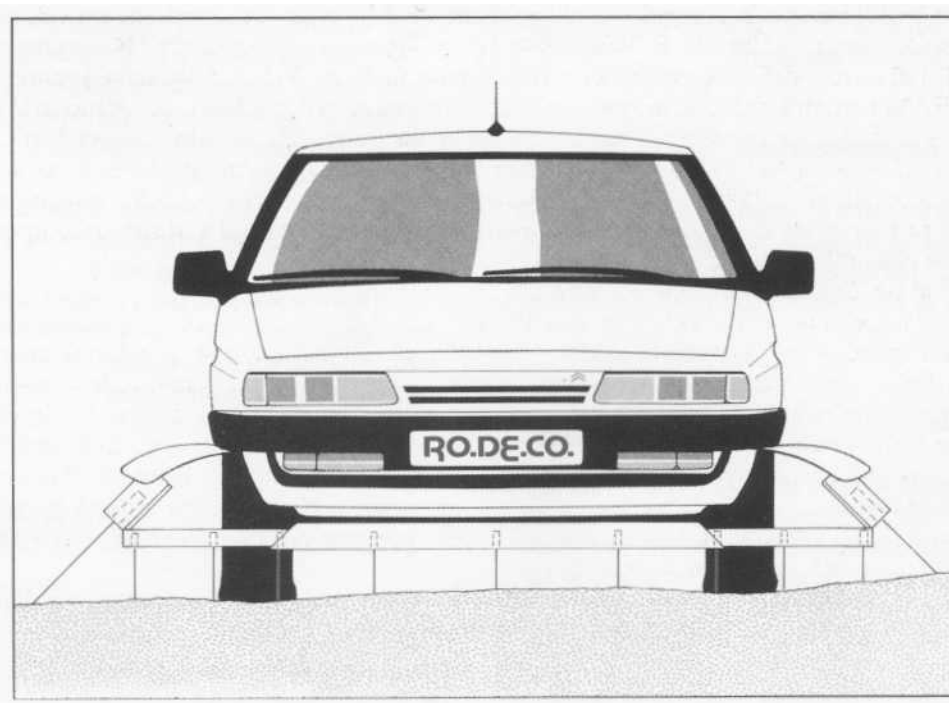


Figura 1



**Figura 2**

10-30 metri possono essere usati per controllare il corretto assestamento del sottofondo stradale (fattore molto importante nel caso degli aeroporti).

### **Irregolarità della pavimentazione**

Il Class 1+ Profilometer è lo strumento ideale per la valutazione del comfort di guida, in grado di ottenere dati accurati e stabili nel tempo, in breve tempo grazie alla elevata velocità di misurazione (da pochi km/h fino a 150 km/h).

### **Profilo trasversale**

Grazie ai numerosi sensori laser (11 nella versione attualmente disponibile), il sistema è in grado di rilevare la pendenza trasversale della pavimentazione mettendo in evidenza sia la presenza di solchi od ormaie che sezioni pericolose per il potenziale ristagno di acqua.

Il sistema base del Class 1+ Laser Profilometer comprende:

- N. 11 sensori Laser in grado di misurare la pendenza trasversale per una larghezza di circa 3 metri. Uno di questi sensori è dedicato inoltre al rilievo, lun-

go la traccia della ruota, del profilo longitudinale, con una frequenza di campionamento ogni 5 mm.

- N. 3 accelerometri e n. 2 giroscopi di altissima precisione per la correzione del profilo longitudinale rilevato dai sensori Laser, dal «rumore di fondo» dovuto ai movimenti della macchina e non imputabili direttamente alla strada.
- N. 1 computer ad elevata capacità di memorizzazione (200 Mbytes) e visualizzazione (mediante un monitor) dei dati in tempo reale.
- Software completo per l'elaborazione dei dati per la determinazione dei profili trasversali, longitudinali, I-RI, simulazioni APL (analisi dei dati filtrati in un certo range di frequenza), ecc.

## **2. MISURE DI REGOLARITÀ E DEL PROFILO LONGITUDINALE (IRI E APL)**

L'I.R.I. è un nuovo indice standardizzato che racchiude l'informazione necessaria a definire la regolarità di una superficie stradale, come definito dal World Bank Technical Paper N. 46.

L'I.R.I. può essere direttamente ottenuto, mediante elaborazioni, dalla misura del profilo longitudinale o in-

vece essere ricavato, mediante correlazioni da quei sistemi più tradizionali che usano l'RTRRMS (Response Type Road Roughness Measurement System) come i valori di PSR, RCI, ecc.

Le unità di misura dell'I.R.I. sono  $m/km = mm/metro = pendenza\ media \times 1000$  della sezione considerata.

Nei sistemi di misura della rugosità stradale tipo RTRRMS comunemente adottati, si fa riferimento all'ARS (Average Rectified Slope) definito come rapporto tra: l'accumulo dei movimenti del veicolo diviso per la lunghezza totale percorsa durante la prova.

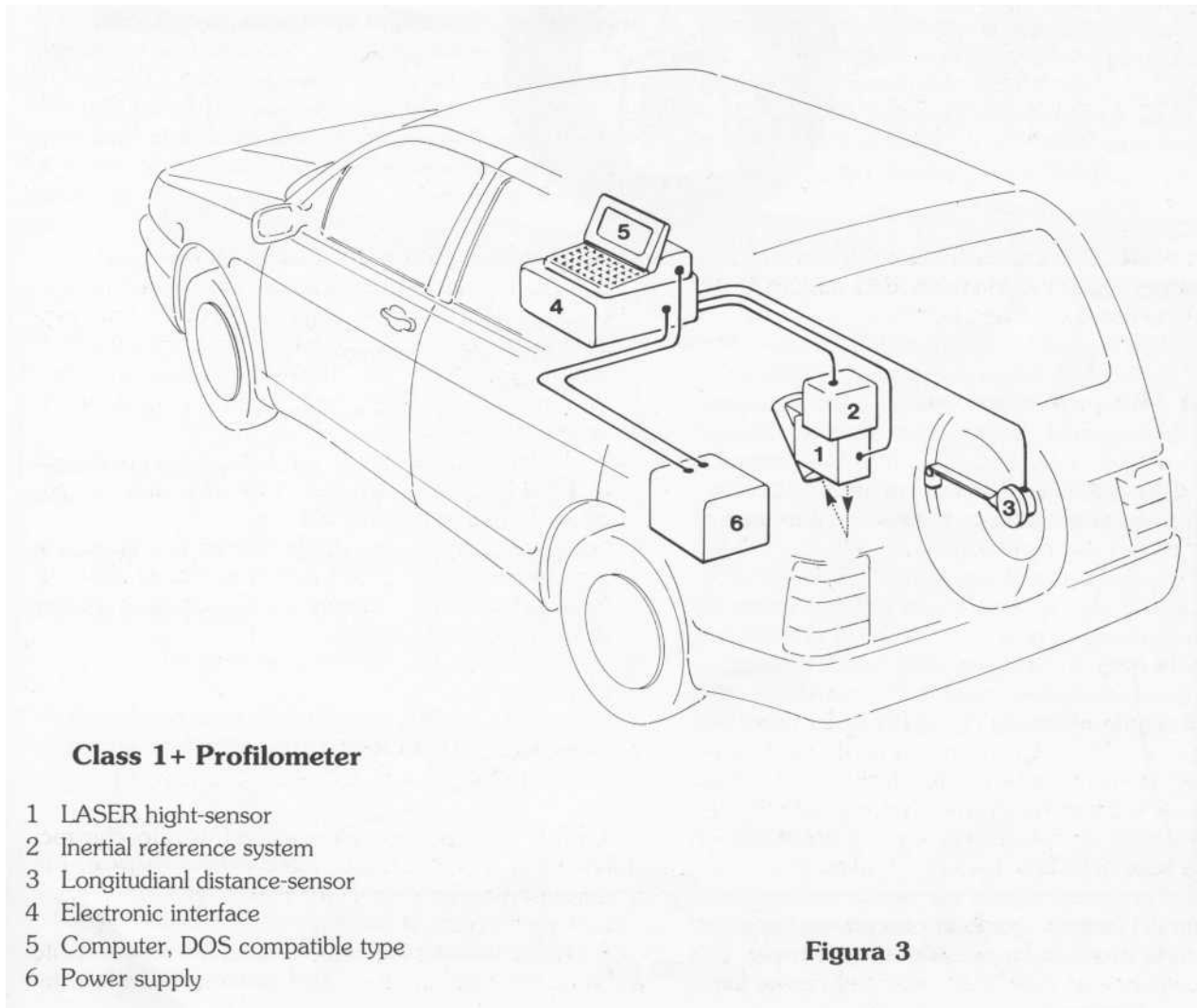
Il calcolo dell'I.R.I. dalla misura del profilo longitudinale della strada è basato su modello matematico, chiamato Quarter Car Simulation (QCS) che rappresenta la simulazione matematica, mediante opportune equazioni, della risposta di una ruota singola di una automobile soggetta al profilo longitudinale rilevato. **In figura 4** è

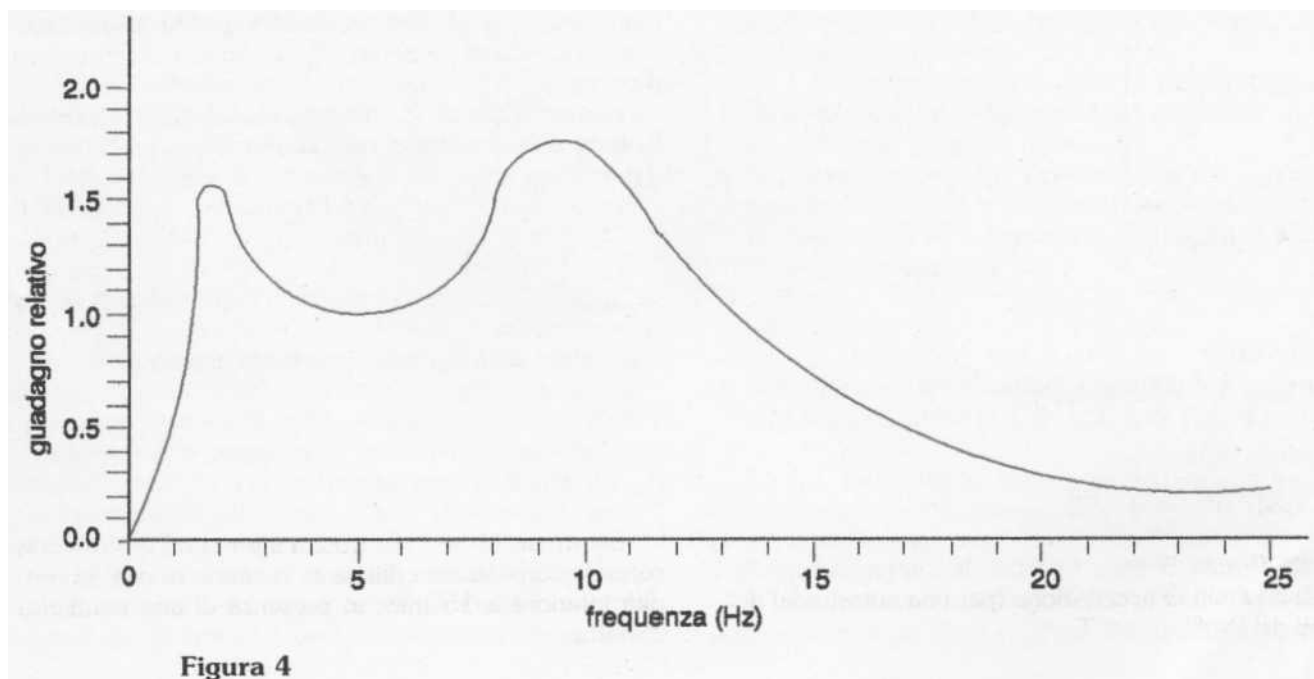
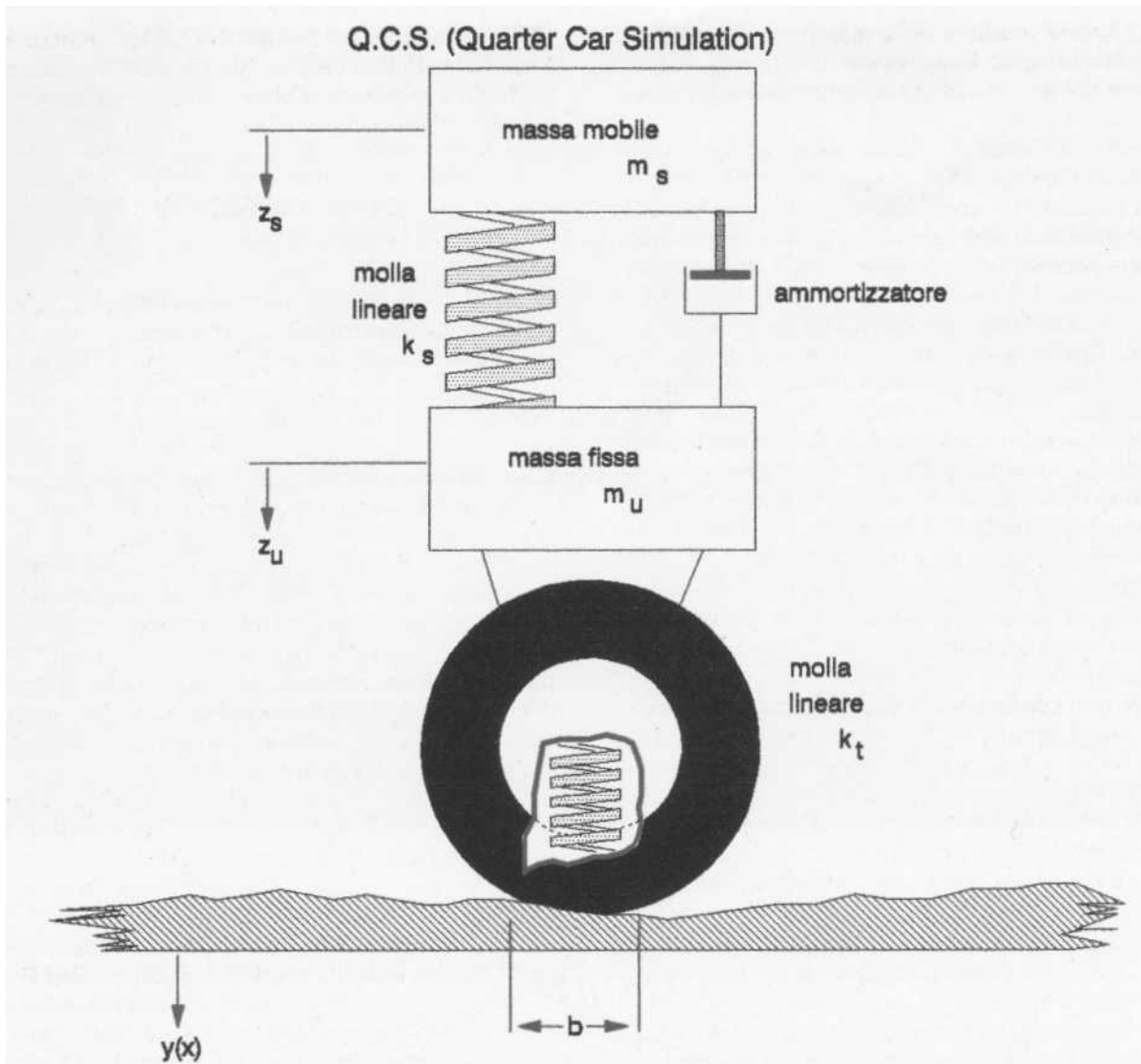
riportato schematicamente il modello QCS, in cui è descritta una interpretazione meccanica del fenomeno: l'interazione del corpo del veicolo-ruota è rappresentata dalle due masse  $m_s$  (libera) e  $m_u$  (fissa), dal sistema di molle (con costanti  $k_s$  e  $k_t$ ) e ammortizzatori lineari ( $c$ ).

Il modello meccanico è descrivibile mediante un sistema di equazioni differenziali del 2° ordine dalle quali, noto il profilo longitudinale  $y(x)$ , è possibile dedurre gli spostamenti relativi ( $z_s - z_u$ ) delle due masse, in relazione all'intervallo percorso:

$$z_s - z_u = RS \text{ (pendenza)}$$

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n RS_i \quad (n = n^P \text{ intervalli})$$





L'integrazione analitica delle equazioni differenziali implica indirettamente l'assunzione di una «velocità di simulazione» del fenomeno che naturalmente influenza i risultati.

Per motivi di standardizzazione quindi è stata scelta una velocità di simulazione del fenomeno di 80 km/h.

Quindi l'I.R.I. è un indice della rugosità ottenibile dal profilo longitudinale della strada applicato al modello matematico-meccanico QCS, supponendo una velocità di simulazione del fenomeno di 80 km/h.

La risposta alla frequenza del modello meccanico **riportato in figura 4** dipende dalla banda di lunghezza d'onda che il veicolo può «vedere» alla velocità di simulazione fissata.

Il guadagno (output/input) in funzione della frequenza, ha un andamento tipico di quello riportato in figura 4 con due massimi intorno a 0.1-0.2 Hz e tra 10-15 Hz equivalenti ad una banda di lunghezza d'onda di circa 1.4-200 m alla velocità di 80 km/h.

La metodologia di calcolo dell'I.R.I. provvede automaticamente a filtrare i dati, in modo da considerare solo le bande di lunghezza d'onda più efficaci ai fini della determinazione dell'interazione veicolo-strada.

Occorre non confondere la velocità simulata da quella reale con cui vengono effettuate le misure: nel caso del sistema Class 1+ Laser Profilometer la precisione della misura del profilo longitudinale è praticamente indipendente dalla velocità con cui viene eseguita la prova, e tale precisione è notevolmente superiore a quella specificata dalla Banca Mondiale come di seguito riportato.

	Class 1+ Profilometer	Specifiche «Banca Mondiale Class 1»
Intervallo di misura ei dati	5 mm	max 250 mm
Precisione	< 0.1 mm	< 0.5 mm
Risposta in frequenza	0.5% *	> 2% **

\* a lunghezze d'onda da 0.05 m a 100 m

\*\* a lunghezze d'onda da 0.5 m a 20 m

### I.R.I. e simulazioni APL

Nella **figura 5** sono riportate le interpretazioni dei risultati e i limiti di accettazione (per una autostrada) dei risultati dei Profilometer Test.

Si può notare che la scala dell'I.R.I. è inversa a quella del PSI o PSR ed è possibile passare approssimativamente da una misura all'altra, con la seguente formula:

$$IRI = 5.5 \text{ LOGe } (5.0/PSI)$$

L'APL è un sistema meccanico usato dal Laboratorio Centrale Francese «Ponts et Chaussées» per il rilievo del profilo superficiale entro un range di frequenza tra 0.5 e 20 Hz.

L'analisi dei risultati può essere successivamente filtrata in lunghezza d'onda corte, medie e lunghe. Nel capitolo «Autostrade» Spa, esiste una specifica riguardante la regolarità in termini di APL riportata in figura 5.

La conoscenza dell'ampiezza dell'irregolarità per onde corte (1-3.3 m) e medie (3.3 m - 13 m) è molto importante per individuare la causa delle irregolarità. Infatti se l'irregolarità è dovuta alle onde corte è presumibile che la causa sia da ricercare nello stato superficiale della pavimentazione (ammaloramenti e stesa irregolare), mentre per onde lunghe la spiegazione può essere dovuta a problemi di assestamento anomali degli strati di fondazione o sottofondo della strada.

Il software disponibile nel sistema CLP permette, mediante simulazione, di effettuare una analisi filtrata dei risultati per ottenere i valori di APL.

### 3 - MISURA DEL PROFILO TRASVERSALE

La misura del profilo trasversale è molto importante perché permette, oltre che controllare la corretta pendenza della strada, anche di mettere in evidenza sezioni soggette a potenziali fenomeni di accumulo d'acqua.

I valori della pendenza trasversale, come riportato in **figura 5**, devono di norma essere compresi fra il 2 e il 4%.

In fig. 6 e 7 è riportata l'interpretazione dei dati di pendenza per una strada a più corsie. Valori negativi di pendenza si possono avere solo in presenza di una curva, mentre il caso della presenza di un cambio di segno della pendenza di una delle corsie, può causare, come si può notare dalla figura 7, l'accumulo di acqua.

### 4 - ORMAIE

Le ormaie riferite alla traccia interna od esterna non sono da considerarsi critiche se risultano di una profondità inferiore a 15 mm, in presenza di una pendenza corretta.

## PROFILOMETER TEST

### INTERPRETAZIONE dei RISULTATI e LIMITI DI ACCETTAZIONE

**PENDENZA TRASVERSALE:** La pendenza trasversale è da considerarsi corretta quando è compresa nel range tra 2% e 4%

**ORMAIE:** Le ormaie NON sono da considerarsi critiche quando con una pendenza trasversale corretta risultano con una profondità inferiore a 15 mm.

#### REGOLARITA' (A.P.L. simulazione)

Amplezza dell' Irregolarità per onde corte (da 1 a 3.3 m.) < 2mm.

Amplezza dell' Irregolarità per onde medie (da 3.3 a 13 m.) < 4 mm.

IRI ( m/Km = mm/m )

Accettazione per valori < 4.0

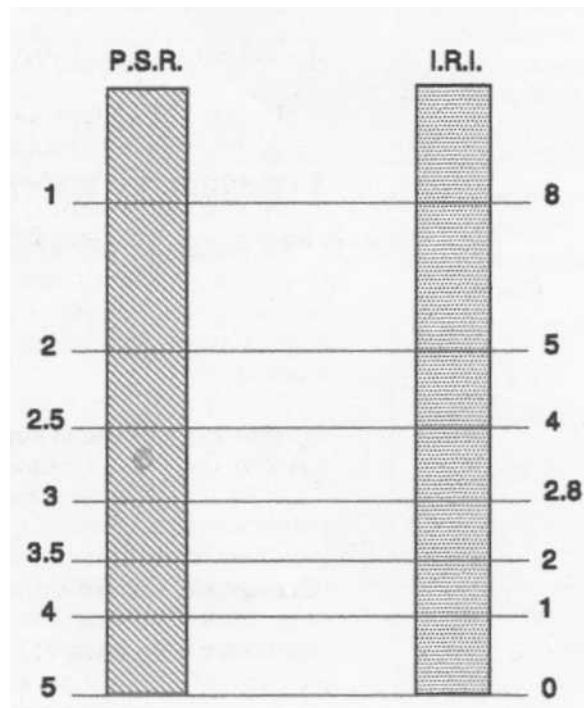


Figura 5



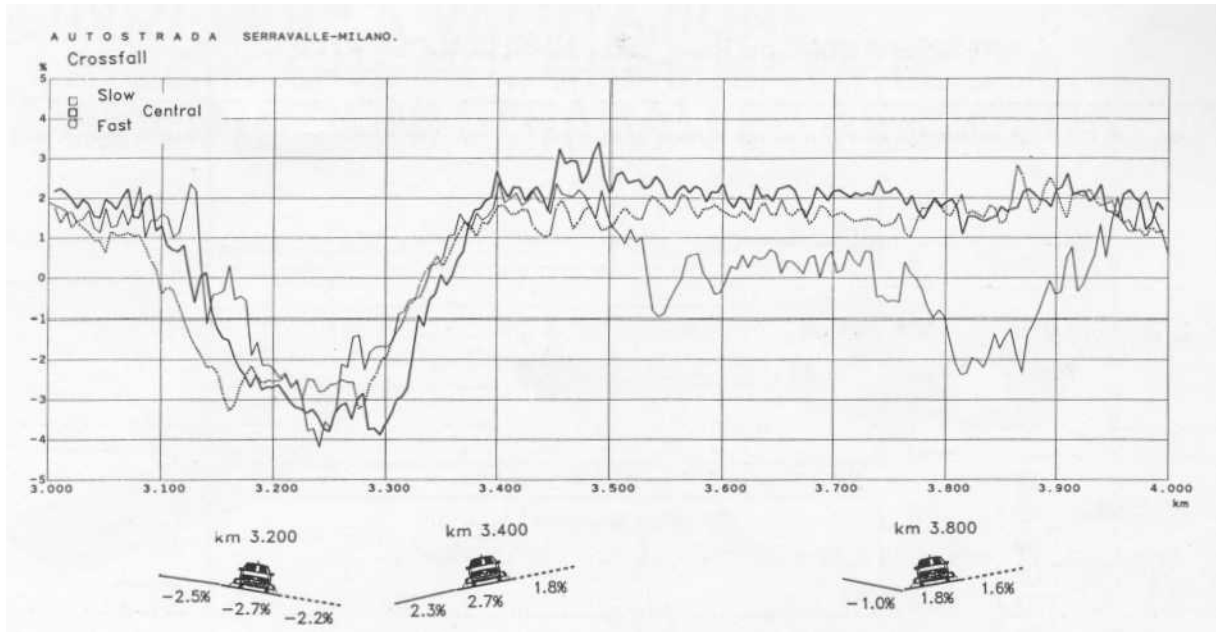


Figura 6

## 5 - RAGGIO DI CURVATURA

I raggi di curvatura sono dedotti nel nuovo sistema Laser Profilometer, mediante opportuni giroscopi che misurano la velocità angolare della vettura ...

Nota inoltre la velocità lineare della vettura ... si può ricavare semplicemente il raggio di curvatura R:

$$R = \frac{v}{\omega}$$

Per convenzione, valori di R positivi indicano la presenza di una curva a destra, negativi curva a sinistra.

### Esempio di output del Laser Profilometer.

In figura 8 è mostrato un tipico elaborato di output dei risultati di alcune prove condotte con il CLP.

In esso è riportato per 2 km una rappresentazione riassuntiva di:

- l'andamento dei valori dell'I.R.I. (m/km)
- i valori di APL (mm) ricavati mediante un'analisi dei risultati filtrata per lunghezze d'onde corte (1-3.3 metri) e medie (3.3-13 metri)
- la pendenza trasversale (%)
- l'altezza delle ormaie esterna e interna (in mm).

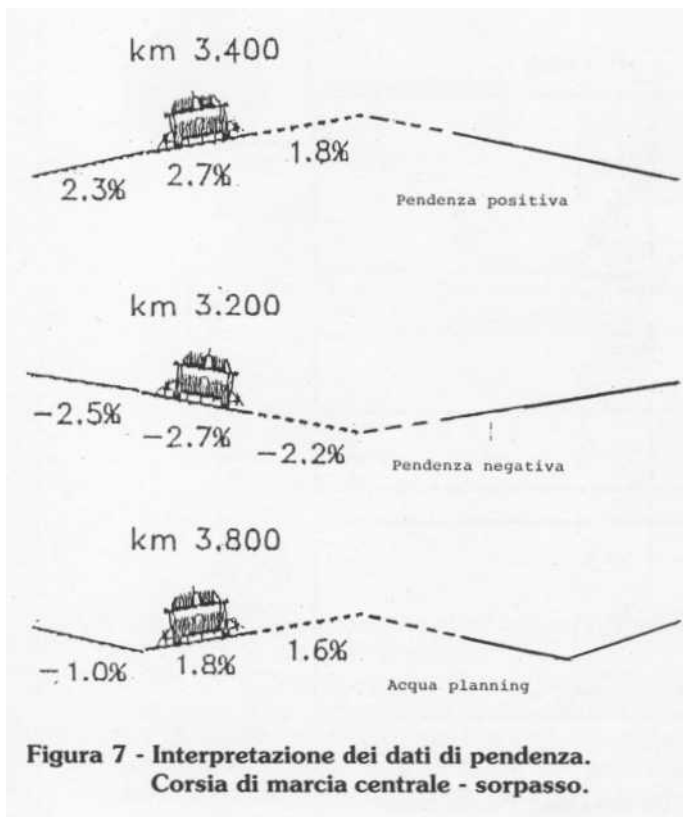


Figura 7 - Interpretazione dei dati di pendenza.  
Corsia di marcia centrale - sorpasso.

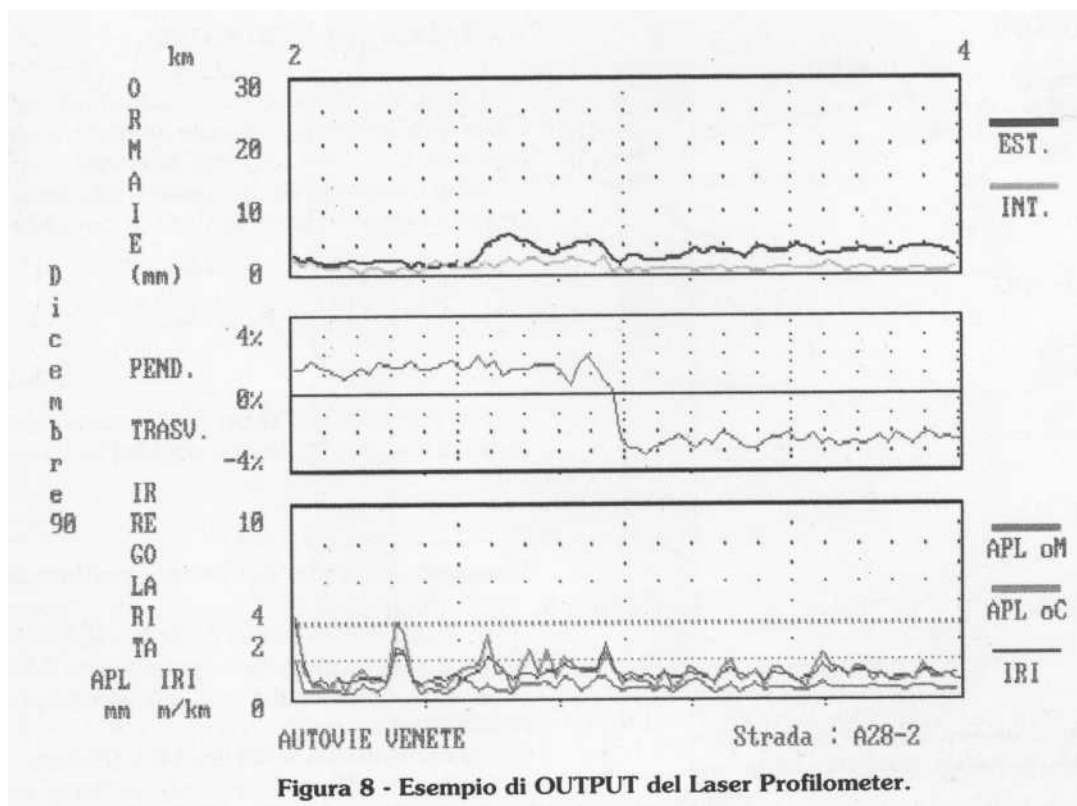
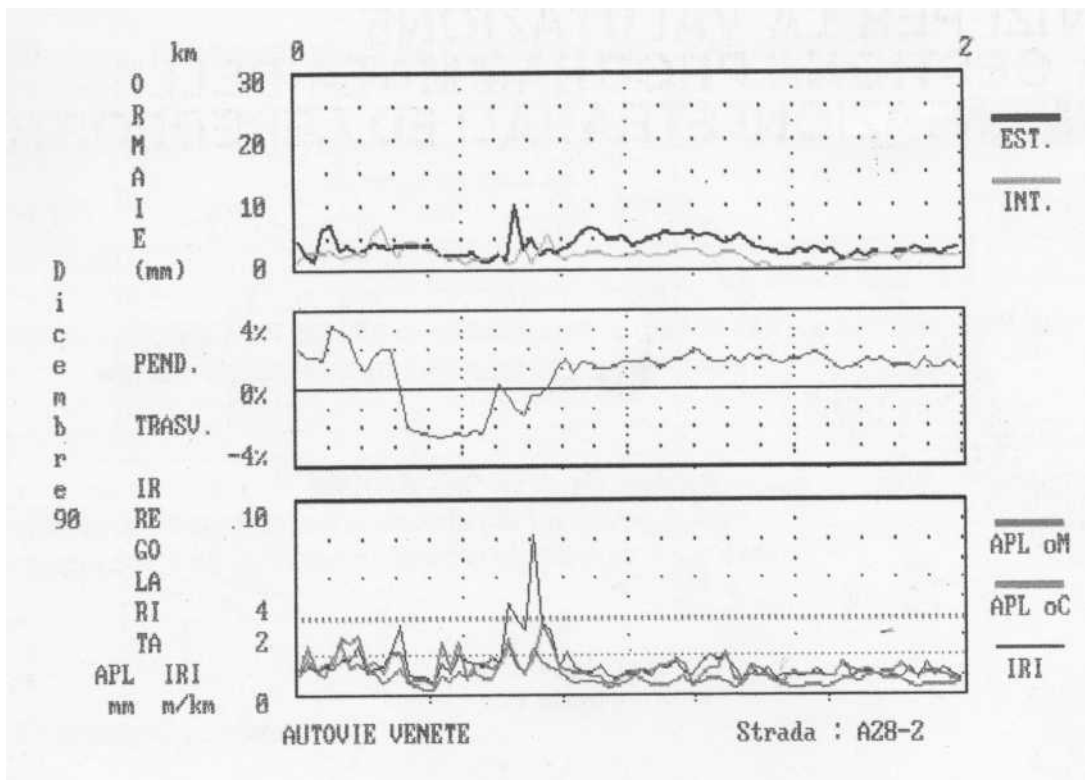


Figura 8 - Esempio di OUTPUT del Laser Profilometer.