

La capacità portante delle pavimentazioni misurata ad alto rendimento e collegata al capitolato d'appalto prestazionale ANAS

E. Cesolini & S. Drusin

Anas S.p.A., Centro Sperimentale Stradale - Cesano (Roma), Italy

ABSTRACT: Di fronte alle problematiche connesse alla gestione delle pavimentazioni stradali, in una rete estesa ed articolata come la rete gestita dalla Società ANAS, si presentano le soluzioni e gli orientamenti adottati che vedremo essere costituiti da misure eseguite in “Alto Rendimento”, da nuovi criteri e nuovi strumentazioni di misura, da nuovi indicatori prestazionali e nuove metodologie di controllo, tutto reso operativo ed integrato in specifiche norme di applicazione operativa.

1 LA VALUTAZIONE DI STATO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

La Società ANAS s.p.a. gestisce e mantiene la principale rete viaria italiana; L'estensione complessiva attualmente è di circa 25.000 km, cui si aggiunge la rete in concessione di 6.000 km alle Società autostradali, nei confronti delle quali ANAS s.p.a. esercita una funzione di controllo e sorveglianza. La gestione di una rete infrastrutturale così estesa ed articolata pone notevoli e complesse problematiche, specialmente nel settore vitale della conservazione delle pavimentazioni.

Le pavimentazioni, costituite da materiali a comportamento visco plasto-elastico vanno conservate nelle loro qualità basilari, suddividibili in superficiali, a diretto contatto cioè con le ruote dei veicoli, e profonde, attinenti cioè alla capacità portate del pacchetto complesso che le costituisce.

Esso è soggetto normalmente alla rottura per fatica con conseguente perdita della rigidità e monoliticità necessarie per esperire il compito della portanza.

Il problema della valutazione di stato è stato affrontato con successo per le caratteristiche superficiali, per le quali ormai esistono e sono operative macchine di misura ad alto rendimento¹ usate sia per diagnostica di stato che per accettazione lavori.

Per la portanza invece l'uso più diffuso è quello di attrezzature in genere lente, che si devono normalmente arrestare o procedono a bassa velocità. Inoltre, mentre si usano con difficoltà, data la loro lentezza, per la diagnostica di stato ai fini delle programmazioni delle manutenzioni, non è diffuso il loro uso come criterio di accettazione dei lavori.

L'accettazione è ancora abitualmente gestita con misure indirette che vengono effettuate sulle miscele da porre in opera e da valutazioni indirette in situ, sempre basate su metodi lenti.

L'impiego dei Falling Weight Deflectometer ha però introdotto la possibilità di una misura di prestazione globale, legata alla rigidità complessiva del pacchetto in opera, misurata con il

¹ La diffusa definizione di macchine ad Alto Rendimento è quella di attrezzature che in modo non distruttivo e con velocità elevata, misurano una caratteristica tecnica (parametro) legato al funzionamento della struttura valutata

bacino delle deflessioni su carico dinamico istantaneo, però, la gestione della misura con il ricalcolo tramite “back analysis” del dato è spesso complessa e si presta a contestazioni da parte degli esecutori dei lavori, se usato come controllo finale dei medesimi.

Il nuovo approccio descritto nel presente lavoro riguarda la trasformazione del modo di usare la misura di rigidità tramite il bacino delle deformazioni e di come inserirla nella metodologia totale di progetto e valutazione del lavoro di pavimentazione, abbinandola anche allo studio prestazionale avanzato delle miscele che vengono studiate oltre che per la rigidità, anche per il comportamento a fatica (di cui riferiamo in un altro articolo presentato al MAIREPAV6). La valutazione è svolta attraverso l’analisi di indici di deformazione dinamici, tali da poter essere gestiti sia con FWD, che con nuove attrezzature specifiche per la portanza, più veloci, veramente ad “Alto Rendimento”, di cui riferiremo.

2 LE NUOVE LINEE GUIDA DELLE PAVIMENTAZIONI

Sia la metodologia di progetto delle miscele, che i criteri di controllo, naturalmente, sono stati trasferiti in apposite Linee Guida e poi riversate in un Capitolato Speciale di Appalto che regolerà le lavorazioni di Manutenzione e di Nove Costruzioni dell’ANAS nel futuro.

Le caratteristiche peculiari degli interventi delineati nelle presenti linee guida, corredate di Norme Tecniche² per la formulazione e la verifica dei materiali da utilizzare, sono:

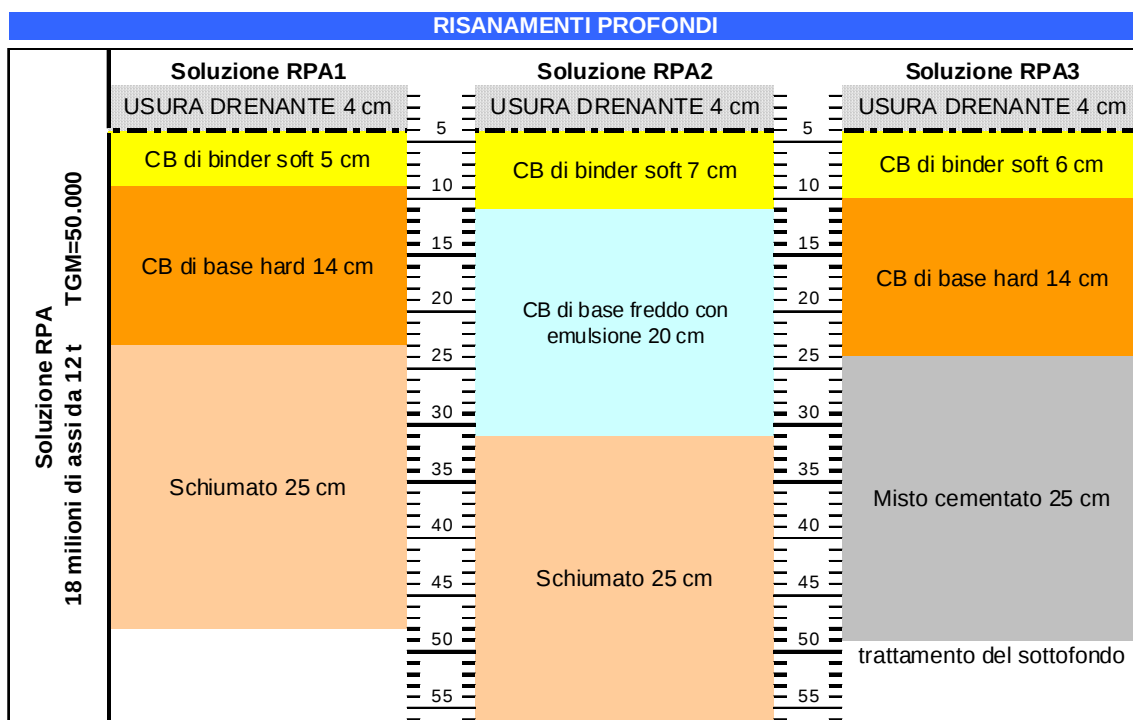
- Dimensionamento dei pacchetti attraverso l’impiego di metodi razionali di calcolo utilizzando curve di fatica specifiche che permettono di calcolare la vita utile dell’intervento.
- Massimo riutilizzo possibile dei materiali fresati e altri materiali marginali disponibili con facilità sul luogo dell’intervento, valutati e verificati nei calcoli di durata a fatica, per ridurre trasporti e costi e preservare l’ambiente.
- Definizione dei criteri generali di lavorazione per tenere presente le problematiche di applicazione pratica su strade in esercizio; gli spessori previsti sono correlati alle necessità di portanza ed anche alla realizzabilità connessa con le tecniche impiegate.
- Impiego generalizzato di bitumi modificati, per incrementare le durate con certezza di risultato.
- Definizione dei metodi di verifica prestazionali, sui materiali singoli, sulle miscele e sulle lavorazioni complete. Per queste ultime vengono assegnati livelli prestazionali³, misurabili ad Alto Rendimento, così definiti e classificati come mostrato al paragrafo 4.

Sulla base di queste indicazioni vengono fornite una serie di soluzioni per nuove pavimentazioni o per interventi di ripristino o rafforzamento sulla rete esistente (vedi in figura un esempio di risanamento profondo RP) che generano delle durate a fatica prevalutate⁴, e, fondamentali per il controllo, delle curve di rigidità prevista per il prodotto in opera del tipo riportato in figura (che si riferisce ad una delle soluzioni di progetto) che sia rapidamente controllabile usando i parametri rilevati sul lavoro dalle macchine di cui si parla.

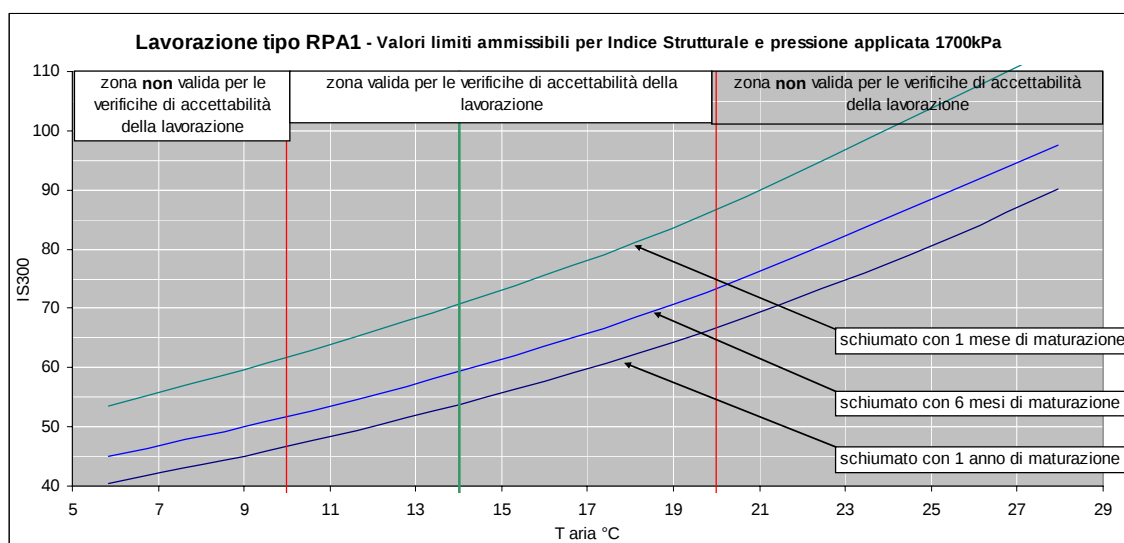
² Tali Norme di tipo prestazionale sono comunque quelle da impiegare per tutti i lavori di questo tipo a partire dal 2009.

³ Le verifiche, da parte delle Direzioni dei Lavori, sono effettuate in modo che i pagamenti siano calibrati con gli effettivi risultati ottenuti; i criteri di valutazione sono indicati nelle ricordate Norme Tecniche allegate alle presenti Linee Guida che dovranno essere, a loro volta, allegate ai Contratti di Appalto, in modo che le Imprese esecutrici ne siano edotte.

⁴ Le singole miscele di conglomerato, vergine o riciclato, si possono già valutare con prove dirette di durata a fatica comparate, le cui attrezzature, semplificate, saranno utilizzabili anche nei laboratori di cantiere, vedi “Misura per confronto della durata a fatica delle miscele per le pavimentazioni” di E.Cesolini & P.Bernardinetti & C.Sartori



La soluzione di intervento di tipo RPA1 prevede curve di controllo differenti in funzione del tempo di esecuzione delle prove valutato a partire dal completamento delle fondazioni.



L'indicatore IS, Indice Strutturale, è costituito nel modo descritto nel paragrafo 3.

3 ANALISI DELL'INDICE STRUTTURALE PER IL CONTROLLO DELLA PORTANZA DELLE PAVIMENTAZIONI E CRITERIO DI DIMENSIONAMENTO ADOTTATO

È opportuno ora soffermarci sull'indicatore prestazionale della portanza, e cioè sull'Indice strutturale IS, che è stato messo a punto sia per uniformare le misure "lente" del FWD, che quelle veloci del TSD.

La scelta di tale indice è risultata particolarmente efficace in quanto espressione diretta delle misure effettuate tramite le apparecchiature FWD o TSD; L'indice è definito come differenza della deflessione a centro piastra, o centro ruota nel caso del TSD, e deflessione letta ad una certa distanza da tale punto; Tale indice risulta essere l'espressione della portanza dell'intera sovrastruttura stradale.

Per ciascuna soluzione progettuale adottata, considerando le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati e gli spessori adottati, sono state valutate le durate teoriche di progetto, secondo le formulazioni di seguito riportate, e sono state valutate le caratteristiche di portanza espresse attraverso l'Indice Strutturale IS300, definito come differenza della deflessione a centro piastra ed a 300 mm dal centro.

Nello specifico campo del controllo dei lavori di realizzazione di nuove pavimentazioni, la verifica, ovviamente, deve riguardare ciò che effettivamente è stato realizzato; tipologie d'intervento che possiamo definire superficiali, che non interessano cioè gli strati più profondi delle pavimentazioni, come le basi o le fondazioni, per essere valutate correttamente, richiedono l'applicazione di opportune correzioni da apportare all'indice IS, tali correzioni sono calcolate, sempre in forma semplice, direttamente valutando il bacino di deflessione.

In tale caso poi l'Indice Strutturale di riferimento è IS200, definito come differenza tra la deflessione a centro piastra ed a 200 mm dal centro.

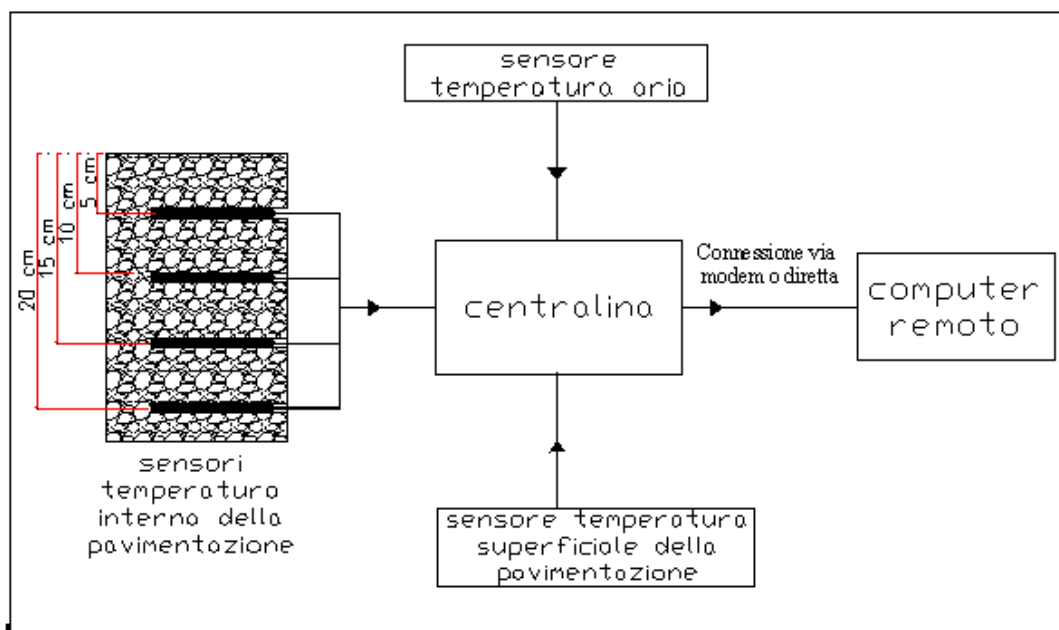
Gli indici definiti risultano essere influenzati dalle condizioni di prova, ed in particolare dalle temperature del conglomerato bituminoso, è necessario quindi fornire le correzioni per riportare l'indice alle condizioni di temperatura di riferimento.

Per valutare gli effetti della variazione delle caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso, e quindi dell'indice IS, al variare della sua temperatura si è optato per una soluzione semplificata, il controllo avviene infatti attraverso la misura della temperatura dell'aria; Con essa si valuta la correzione dell'indice strutturale IS per poter giudicare la pavimentazione indipendentemente dalle condizioni di prova; In realtà è definito un intervallo di temperature dell'aria in cui le prove si considerano effettivamente accettabili, si intende tuttavia, nel prossimo futuro, anche attraverso una maggiore conoscenza del fenomeno, ampliare tale intervallo.



In tal senso il Centro Sperimentale Stradale ANAS di Cesano sta svolgendo studi specifici, anche avvalendosi di prove sperimentali eseguite presso la Strada Statale "Aurelia" S.S.1 al Km 23+500. In tale sito è ormai da un anno presente un sistema di monitoraggio in continuo ed in tempo reale delle temperature. Tale sistema è costituito da 4 sensori per il rilievo della temperatura della pavimentazione a diverse profondità (-5, -10, -15 e -20 cm), 1

1 sensore ad infrarosso per il rilievo della temperatura superficiale, 1 sensore per il rilievo della temperatura dell'aria; tutta la strumentazione è controllata da una centralina che acquisisce, registra e trasmette dati via modem.

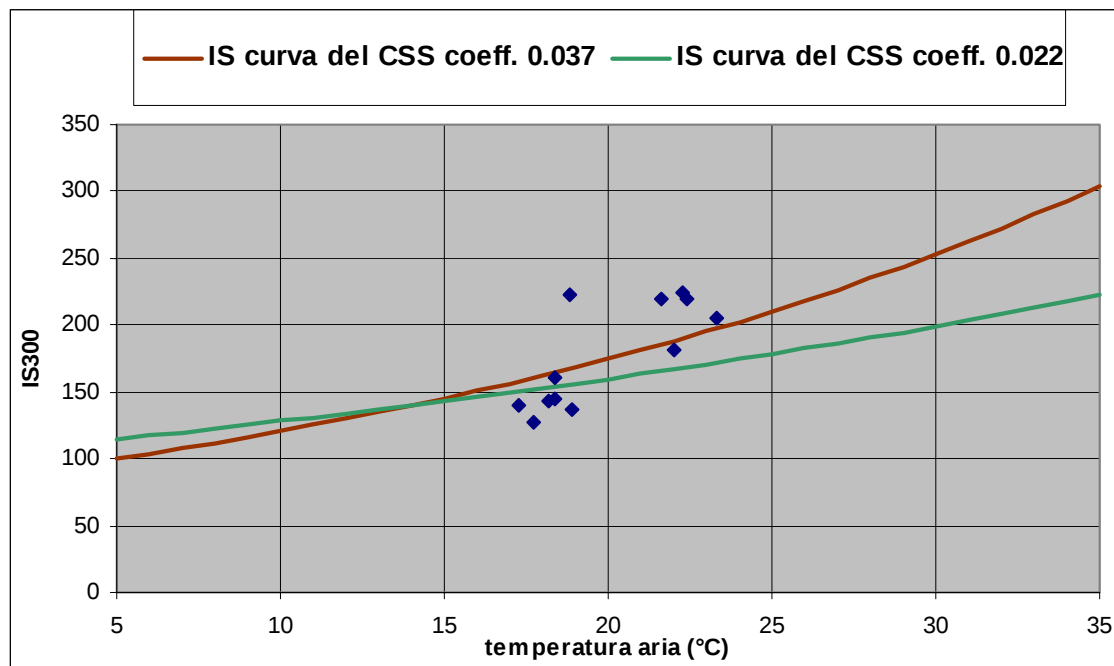


Le misure raccolte, anche confrontate con le prove di portanza, eseguite attraverso le apparecchiature FWD e TSD, hanno permesso di verificare e tarare i modelli proposti per considerare il comportamento termico del conglomerato bituminoso valutato attraverso l'indice strutturale IS300 e semplicemente corretto attraverso la temperatura dell'aria.

Come mostrato nel grafico i valori di portanza, espressi in termini di Indice Strutturale IS300, misurati con prove ripetute di FWD in differenti condizioni di temperature dell'aria sono confrontati con le curve teoriche adottate nel Capitolato d'Appalto per correggere le condizioni associate alle temperature di prova e riportarle alle condizioni standard ($T_{aria}=14^{\circ}\text{C}$); le curve si riferiscono ai risanamenti di tipo profondo (RP) ed ai risanamenti di tipo superficiale (RS) e sono espresse attraverso la relazione

$$IS_{14^{\circ}\text{C}}/IS_{T_{prova}} = \exp(c \cdot (14 - T_{prova}))$$

dove $c=0,037$ per gli interventi di tipo RP e $c=0,022$ per gli interventi di tipo RS.

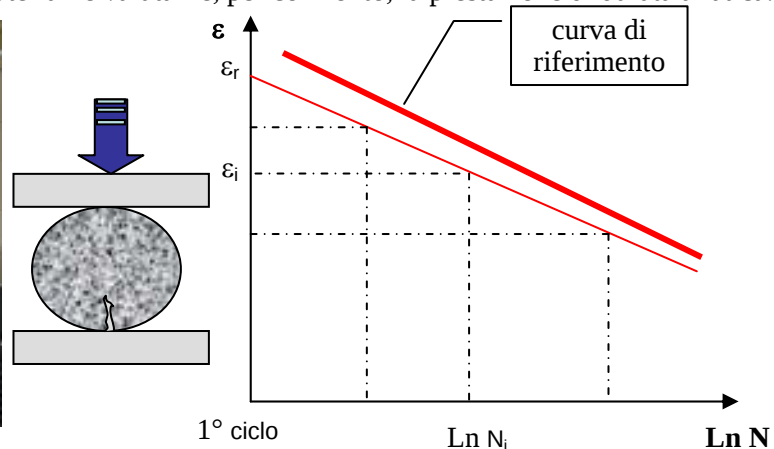


L'aspetto ora affrontato, riguarda il calcolo di durata delle pavimentazioni stradali. Come sopra accennato, in un sistema efficiente di gestione delle pavimentazioni occorre che esse siano effettivamente dimensionate sul traffico previsto, sulle condizioni ambientali, sui materiali impiegati e sulla base di una durata di progetto programmata anche in relazione alle risorse disponibili. I calcoli applicati si basano su metodi cosiddetti razionali.

Essi prevedono la schematizzazione della pavimentazione in una sovrapposizione di strati, omogenei ed isotropi (collaboranti o meno), aventi comportamento elastico lineare a loro volta sovrapposti ad uno strato indefinito. Tutti gli strati sono caratterizzati da un valore di modulo elastico E , da un coefficiente di Poisson ν e da uno spessore.

In tale schematizzazione è possibile esprimere il comportamento della pavimentazione, in termini di tensioni e deformazioni, sotto l'effetto delle diverse condizioni ambientali e di traffico, ed in oltre, attraverso l'impiego di opportune curve di fatica dei materiali utilizzati, è possibile anche valutarne la relativa durata.

Le curve di fatica esprimono il numero di ripetizioni di un assegnato carico in grado di portare a rottura il materiale esaminato. Esse sono state definite utilizzando dati di letteratura e sono state tarate impiegando il catalogo delle pavimentazioni italiane; esse sono, inoltre, il risultato di prove ed esperienze acquisite utilizzando apparecchiature innovative disponibili presso il Centro Sperimentale Stradale ANAS di Cesano con cui è possibile effettuare in maniera speditiva misure di fatica di diversi materiali e valutarne, per confronto, la prestazione di durata a fatica.



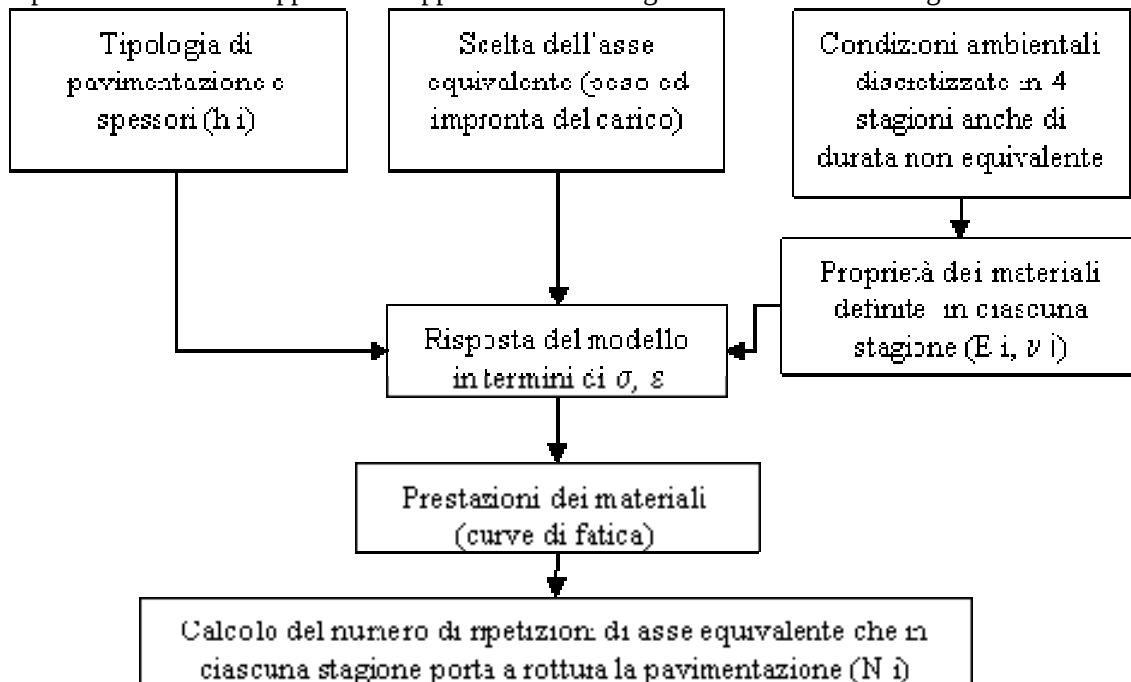
Non entrando nello specifico dei modelli che definiscono il comportamento a fatica dei materiali stradali impiegati, si assume che le curve siano esprimibili attraverso la seguente espressione

$\epsilon = k \cdot (N/10^6)^{-1/a}$, dove ϵ rappresenta la deformazione tangenziale alla base del conglomerato bituminoso o alla base dello strato di misto cementato, N rappresenta il numero di passaggi sopportabili, k ed a sono delle costanti dipendenti dal materiale impiegato.

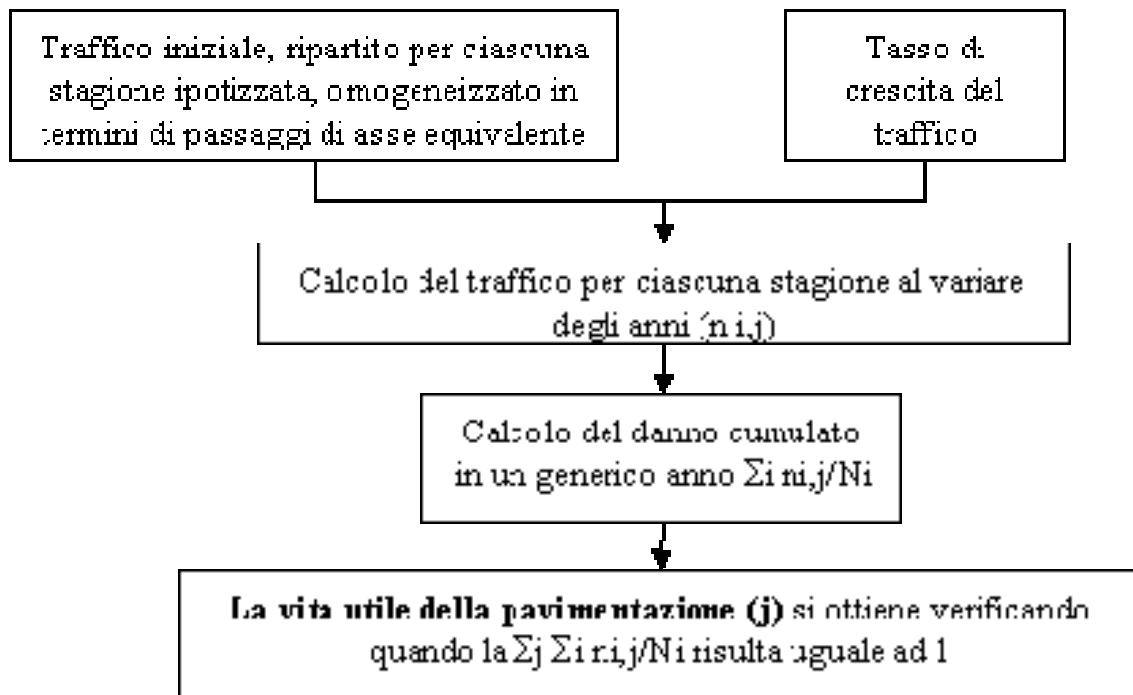
Il meccanismo di rottura prevede due fasi; quello iniziale, in cui lo strato di fondazione si presenta integro e risponde con il modulo elastico iniziale (in questa fase avviene la rottura dello strato di fondazione), e quello finale, in cui lo strato di fondazione si presenta fessurato e risponde con il modulo elastico finale (in questa fase avviene la rottura dello strato in conglomerato bituminoso); in questo secondo meccanismo di rottura si tiene conto del danno già accumulato nel conglomerato bituminoso stesso durante la prima fase.

I carichi sono omogeneizzati in numero di passaggi di assi equivalenti da 12 t, mentre, per considerare le escursioni termiche stagionali sono considerate 4 stagioni, di durata non equivalente tra loro, assumendo temperature medie del conglomerato costanti in tali periodi.

Il processo di calcolo applicato è rappresentato nel diagramma di flusso che segue.



Noto il numero di assi a rottura per ogni stagione i (N_i) si calcola la durata effettiva della pavimentazione applicando la legge di Miner.



4 LE ATTREZZATURE DI MISURA AD ALTO RENDIMENTO DELL'ANAS PER LE PAVIMENTAZIONI

Come si è visto, nell'ambito della gestione delle pavimentazioni stradali le problematiche principali si possono essenzialmente riassumere in:

- Valutazione di stato, finalizzate principalmente alla redazione di piani di manutenzione programmati con l'obiettivo della gestione ottimale delle risorse disponibili, incluso il miglioramento progressivo delle funzioni della strada nel tempo (terotecnologia);
- Progetto di sovrastrutture stradali, le pavimentazioni devono essere effettivamente dimensionate sul traffico previsto, sulle condizioni ambientali, sui materiali impiegati e sulla durata di progetto programmata;
- Verifica e controllo lavori, per efficienti collaudi e quale consuntivazione della manutenzione prevista in fase di programmazione. Misure ripetute permettono di controllare l'evoluzione delle prestazioni delle pavimentazioni nel tempo, è possibile così conoscere, non solo le prestazioni al tempo zero (verifica in fase di collaudo), ma anche la loro durabilità.

Elemento essenziale per inquadrare correttamente tutte queste problematiche risulta, quindi, la definizione di indicatori prestazionali delle caratteristiche superficiali e profonde della pavimentazione, ed anche l'individuazione di strumenti di misura adeguati, che rendano possibili misurazioni speditive ed estensive, in grado cioè di monitorare tutta la rete, magari anche con prove ripetute.

Sono stati individuati, e sono di uso corrente, i seguenti indicatori prestazionali delle caratteristiche superficiali:

- Coefficiente di aderenza trasversale CAT per valutare l'aderenza
- Altezza media di macrotestitura MPD per valutare la macrotestitura
- Indice internazionale IRI per valutare la regolarità.

Successivamente sono stati individuati nuovi indicatori prestazionali delle caratteristiche profonde:

- spessori degli strati
- Indice Strutturale IS per la valutazione della portanza

Non si esclude che in seguito si possano considerare altri indicatori purché misurabili con le caratteristiche sopra descritte.



Il Centro Sperimentale Stradale ANAS di Cesano dispone già delle apparecchiature in grado di misurare gli indicatori prestazionali riportati. Tutte le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni vengono misurate con l'impiego di una sola attrezzatura denominata ERMES. Evoluzione del sistema SCRIM della Società WDM, tale apparecchiatura monta due ruote di misura per il rilievo del coefficiente di aderenza trasversale, e due laser accoppiati con due accelerometri per il rilievo della

macrotestitura e della regolarità.



Le caratteristiche profonde, ed in particolare gli spessori degli strati, vengono misurati dall'apparecchiatura denominata THETIS; Tale apparecchiatura dispone di due antenne ad alta frequenza (1,2 GHz) per il controllo degli strati più superficiali, ed un antenna da 600 MHz per il controllo degli strati più profondi.

Il controllo della portanza tradizionale avviene, in maniera affidabile, attraverso prove effettuate con l'apparecchiatura Falling Weight Deflectometer FWD. Tale



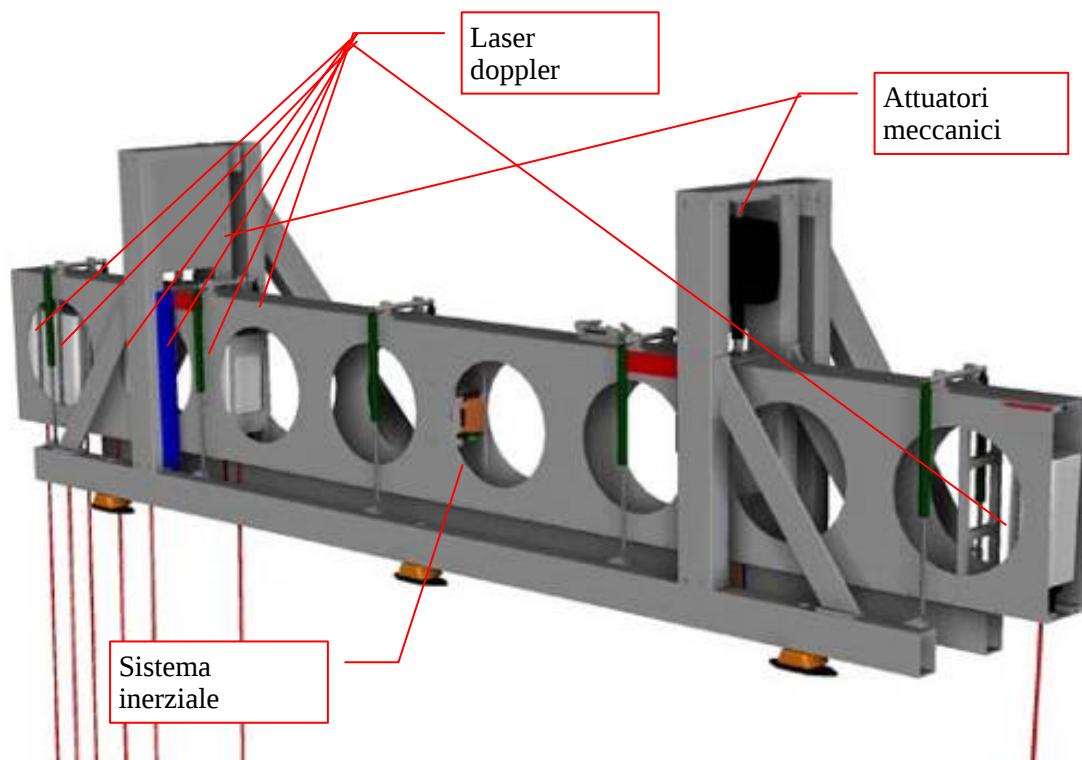
apparecchiatura impone un carico noto sulla pavimentazione e registra il bacino di deflessione attraverso 9 sensori disposti

in linea con il carico. Il grosso inconveniente risiede nel fatto che le misure sono eseguite a mezzo fermo e ciascuna stazione di prova richiede circa 1,5 minuti per essere completata; Altra problema è connesso alla gestione del dato rilevato in termini di valutazione globale della portanza rilevata.

Un'apparecchiatura, molto innovativa, fabbricata dalla Società danese Greenwood Engineering A/S, che permette di superare tale limite ed anche studiata per la gestione operativa del dato di portanza, è denominata Traffic Speed Deflectometer (TSD). Essa è in grado di misurare la portanza delle pavimentazioni in continuo ed ad alta velocità (90km/h).

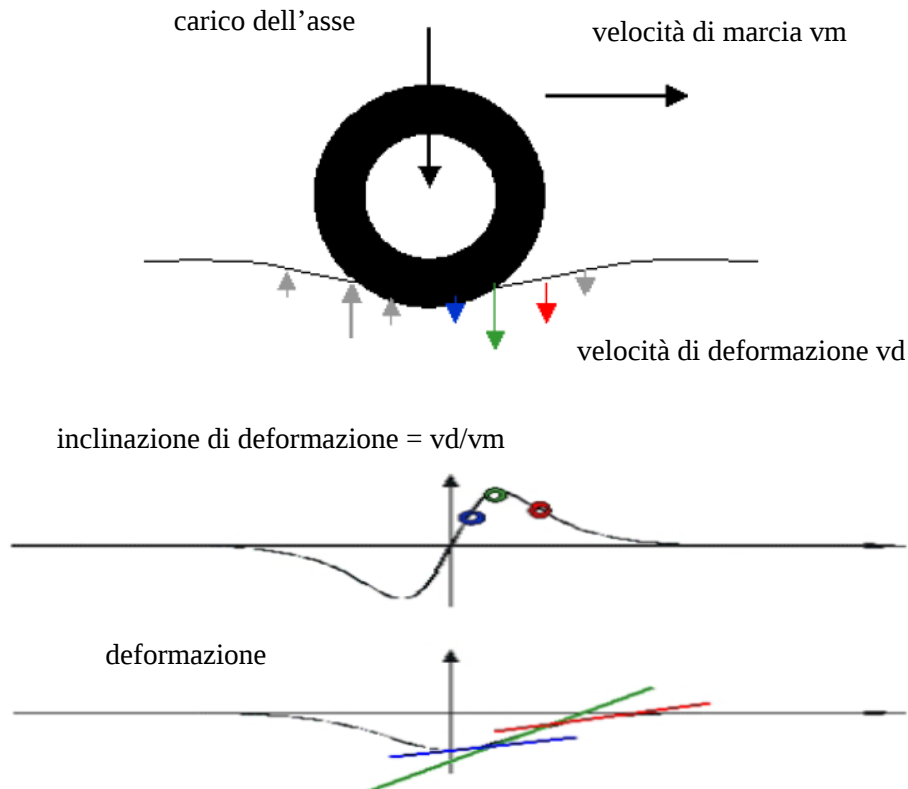


L'apparecchiatura è composta da un mezzo autoarticolato con un rimorchio strumentato il cui asse gemellato posteriore scarica 12t; l'asse esercita sulla pavimentazione una sollecitazione cui consegue una serie di deformazioni ed è abbastanza lontano dagli altri assi del veicolo, in modo da non risentirne l'influenza. Tali deformazioni non vengono misurate in termini di deflessioni, come nei mezzi tradizionali, ma in termini di velocità di deformazione, attraverso l'impiego di una serie di laser doppler installati su una barra indeformabile contenuta all'interno del rimorchio.



Sistemi di controllo e regolazione costituiti da accelerometri, giroscopi, attuatori meccanici elettrocomandati, processori, permettono al sistema di funzionare correttamente; attraverso tali strumenti è infatti possibile valutare e compensare le velocità fittizie associate alle vibrazioni della barra indotte dalle forze di inerzia presenti durante il moto, è possibile, inoltre, regolare l'altezza di lavoro dei laser doppler, in modo che sia sempre rispettato il loro campo ottimale di misura.

Il principio di misura è descritto nell'immagine che segue dove si intuisce come la velocità effettivamente utilizzata nei calcoli sia il rapporto tra la velocità di deformazione della pavimentazione v_d , letta dai laser doppler, e la velocità di marcia del veicolo, v_m .

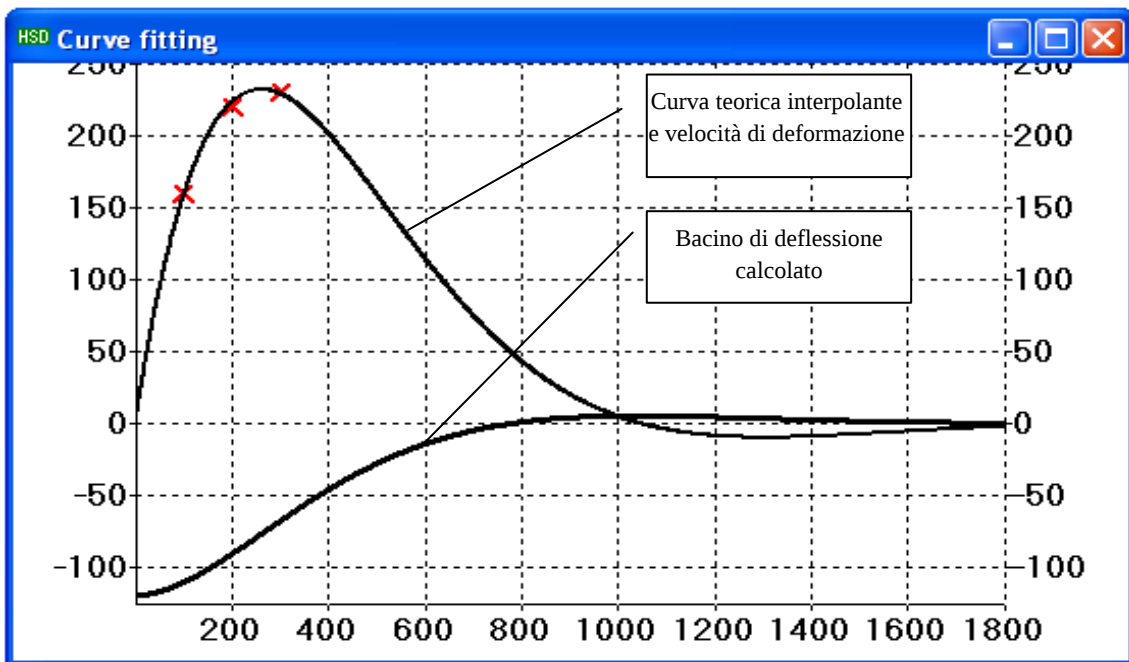


Il principio di calcolo, invece, si basa sul modello di trave elastica indefinita che poggia su un letto di molle. Il principio di conservazione dell'energia permette di scrivere che l'energia accumulata dalla trave e dalle molle è equivalente al lavoro compiuto delle forze esterne; Tale principio si esprime nell'equazione differenziale, di seguito riportata, che ammette soluzione in forma chiusa.

$$EI \frac{\partial^4}{\partial x^4} w(x) + kw(x) = -F\delta(x)$$

deflessione	:	$d(x) = -\frac{A}{2B}(\cos(Bx) + \sin(Bx))e^{-Bx}$
inclinazione	:	$d'(x) = A(\sin(Bx))e^{-Bx}$
curvatura	:	$d''(x) = AB(\cos(Bx) - \sin(Bx))e^{-Bx}$

Il sistema presenta due incognite, A e B; tali incognite vengono calcolate minimizzando lo scarto tra la curva teorica nota e le velocità di deformazione effettivamente misurate; il calcolo del bacino di deflessione è poi facilmente ottenibile attraverso la prima espressione riportata.



Diverse campagne di misura eseguite in Italia con l'apparecchiatura Greenwood hanno permesso di verificare l'affidabilità di tale apparecchiatura, il suo buon livello di ripetibilità, e misure di confronto con misure FWD, hanno dato prova del buon grado di correlazione esistente tra le due apparecchiature.

La ricerca e la realizzazione delle metodologie esposte sono state svolte con la consulenza dell'ing. Gabriele Camomilla.

5. CONCLUSIONI

L'impiego avanzato di tecnologie ad alto rendimento, la definizione di nuovi indicatori prestazionali a servizio della gestione e manutenzione delle strade, apre nuovi e importanti scenari di aggiornamento ed evoluzione delle tecniche stradali.

In particolare, vantaggi rilevanti potranno derivare da un'elevazione degli standard di progettazione nonché nell'efficacia dei controlli eseguiti in modo agevole e estensivo.