

Le pavimentazioni stradali "a manutenzione zero": caratterizzazione dei materiali e criteri progettuali*

Zero maintenance road pavements: material characterisation and design criteria

ANDREA SIMONE, CESARE SANGIORGI

*DISTART - Dip. di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti,
delle Acque, del Rilevamento, del Territorio, Università di Bologna*

Riassunto

A fianco delle tecniche di *riutilizzo, riciclo e recupero* ormai diventate di uso comune nel campo delle costruzioni stradali occorre ricordare anche le possibilità offerte dal *risparmio* di risorse e di energie impiegate nella realizzazione e nell'esercizio di una pavimentazione stradale. Le pavimentazioni cosiddette "a manutenzione zero" possono essere considerate un'utile strumento per attuare le corrette politiche di tutela delle risorse naturali e di risparmio in chiave ambientale, valutate nell'arco della vita utile dell'infrastruttura.

Per poter quantificare i reali benefici connessi a questo nuovo approccio progettuale risulta fondamentale l'utilizzo di metodologie di calcolo evolute di tipo empirico-meccanicistico. In questo articolo si forniscono le linee guida principali di questa nuova procedura di calcolo anche in relazione al concetto di pavimentazione perpetua. Si illustrano i vantaggi connessi ad una progettazione razionale della sovrastruttura riferita al comportamento reale dei materiali in opera ed, infine, si evidenziano le nuove possibilità offerte dai test dinamici per la determinazione del modulo di rigidità (ITSM) e della resistenza a fatica (ITFT) per la caratterizzazione dei materiali legati al bitume e per la definizione dei criteri progettuali più opportuni.

Summary

Reuse, recycle and recovery are today amongst the common technical words in the road pavement construction state of the art. Nevertheless designer should prior consider the opportunity of saving resources and energies during the construction and service life of an infrastructure. The zero maintenance pavements can be considered as a useful tool for applying the environment friendly approaches to construction and maintenance for the whole life cycle of the road network.

M-E (Mechanistic-Epirical) design procedures are suitable for the development and the assessment of the real benefits brought to the environment when a perpetual pavement design is to be started.

In this paper, guidelines are given for the application of this design approach with regard to perpetual pavements. The advantages to the road structure rational design are shown taking into account the actual on-site behaviour of the materials. Eventually, the use of dynamic laboratory testing for the evaluation of dynamic modulus (ITSM) and fatigue (ITFT) of asphalts and for the definition of correct design criteria is considered. »

* Memoria presentata al Convegno Nazionale "La sicurezza ed il rispetto dell'ambiente: le novità tecnologiche e normative nel settore stradale" organizzato da Elletipi s.r.l. con la collaborazione del SITEB (Ferrara, 4 maggio 2006).

1. Introduzione

Le pavimentazioni stradali sono compatibili con il rispetto ambientale? Da questo interrogativo possono nascere diverse argomentazioni che spaziano dal reperimento delle materie prime, alla produzione dei conglomerati, dalla costruzione degli strati della sovrastruttura, alla loro manutenzione in esercizio e così via. Nel corso degli ultimi anni, quello che nel passato è parso un punto debole delle infrastrutture stradali è divenuto loro punto di forza anche grazie alla ricerca di nuove soluzioni progettuali e tecnologiche e di nuove metodologie costruttive che consentono di rispondere affermativamente all'interrogativo posto.

Le risorse e le energie impiegate nella realizzazione e nell'esercizio di una pavimentazione stradale sono numerose e, seppur in parte di origine naturale, possono coinvolgere negativamente l'ambiente. Prescindendo dagli aspetti paesaggistici e di vincolo, l'ambiente è chiamato in causa fin dalla preparazione dei piani di posa e dal reperimento delle materie prime. I materiali di scotico, infatti, debbono essere movimentati e talvolta adottati in discarica, i leganti idraulici e bituminosi debbono essere prodotti, trasportati in impianto, stoccati e trattati, gli aggregati per la realizzazione dei vari strati del solido stradale debbono essere cavati, trasportati, vagliati ed eventualmente essiccati per il confezionamento di conglomerati bituminosi. Nella fase costruttiva del pacchetto vi è poi tutto il processo di accantieramento, dalla posa e compattazione dei vari strati non legati e quella dei conglomerati bituminosi o dei calcestruzzi. In questa fase l'ambiente è coinvolto sia da tutte le lavorazioni costruttive vere e proprie, sia dagli effetti che queste possono avere sulla mobilità nell'assetto territoriale circostante.

L'esercizio di una infrastruttura stradale non è legato soltanto alla capacità che il tronco stradale realizzato ha di sopportare strutturalmente e funzionalmente i carichi del traffico che lo interessano, ma anche all'aspetto manutentivo dello stesso. Se da un lato la funzionalità trasportistica di un ramo della rete stradale può interessare l'ambiente quando alle ovvie emissioni inquinanti del traffico regolare, si sommano quelle causate da Livelli di Servizio insufficienti, dall'altro gli interventi di manutenzione ordinaria e straordi-

na sono, nella maggior parte dei casi, sia fonte di utilizzo di nuove materie prime, sia causa diretta ed indiretta di emissioni inquinanti.

Il fatto che la vita di una infrastruttura stradale possa investire la sfera ambientale appare chiaro, tuttavia, se è vero che lo sviluppo di una società moderna può essere misurato in base al livello di mobilità offerta sul territorio, risulta ad oggi impensabile interrompere l'ampliamento e l'ammmodernamento delle reti stradali esistenti. Il tema centrale dello sviluppo sostenibile e le politiche del risparmio debbono comunque essere le nuove linee guida per i progettisti e gli ingegneri di oggi e di domani, nell'intento di costruire ed ammodernare il patrimonio stradale con l'ottica del rispetto ambientale.

Termini come recupero, riciclaggio, riutilizzo sono oramai divenuti familiari nel linguaggio dei tecnici stradali. Le tecniche di riciclaggio a freddo dei conglomerati bituminosi, ad esempio, e l'utilizzo dei cosiddetti materiali da costruzione e demolizione (C&D) sono, da alcuni anni, entrati a far parte di molti capitoli e specifiche tecniche di enti proprietari e società stradali. Vi sono tuttavia nuove tendenze nel rispetto ambientale che hanno portato numerosi studiosi e ricercatori europei e statunitensi a fare un passo indietro soffermandosi su un tema troppo spesso non considerato: per quale motivo si focalizza l'attenzione solamente sui temi di riciclo quando i materiali e le tecniche costruttive e progettuali di oggi possono consentire, *a priori*, il risparmio? Sarebbe possibile ridurre il consumo di risorse materiali e di energie in fase manutentiva realizzando pavimentazioni stradali resistenti e che non necessitino di ripristini strutturali profondi? I dissesti e i degradi degli strati superficiali possono essere contenuti poggiandoli su strati strutturalmente più performanti? La manutenzione superficiale può essere programmata con maggiore certezza e ad intervalli più ampi?

La risposta a questi quesiti pare tanto semplice quanto a portata di mano. Le cosiddette "pavimentazioni perpetue" sembrano essere, in base agli studi condotti, il mezzo col quale costruire strade più durevoli, rispettando l'ambiente risparmiando risorse. Nel paragrafo successivo se ne descriveranno sinteticamente le caratteristiche principali.

2. Le pavimentazioni “perpetue” o “a manutenzione zero”

2.1. Premessa

L'Asphalt Pavement Alliance (APA), coalizione americana tra l'Asphalt Institute, la National Asphalt Pavement Association e le State Asphalt Pavement Associations, introduce con efficacia al lettore il concetto di pavimentazioni perpetue: *“Immaginate! Il rifacimento completo del pacchetto e l'opzione di ricostruzione profonda divengono virtualmente azioni obsolete. L'unico intervento manutentivo richiesto è il ripristino dello strato superficiale ad intervalli ventennali”*.

Seppure volutamente accentuato, l'impatto delle pavimentazioni perpetue sulle costruzioni stradali potrebbe non discostarsi molto da quello descritto dall'APA. Ad oggi, le tecnologie che sfruttano i materiali bituminosi possono infatti permettere la progettazione di sovrastrutture stradali più durevoli e, al limite, “perpetue”. Il concetto non è del tutto nuovo: il fatto di costruire pavimentazioni bituminose di spessore e resistenza elevati, infatti, risale agli anni sessanta. Oggi, gli sforzi nell'ambito della selezione dei materiali, della progettazione delle miscele, del controllo delle prestazioni e della progettazione della sovrastruttura forniscono le metodologie con le quali ottenere pavimentazioni strutturali che durino fino a 40-50 anni, con interventi periodici di rifacimento e riciclo dello strato superficiale. Secondo David Newcomb, vice presidente della National Asphalt Pavement Association, le pavimentazioni perpetue sono progettate in modo che qualsiasi sollecitazione interessi soltanto gli strati superficiali del pacchetto che, una volta degradati, possono essere sostituiti. Mantenere una pavimentazione perpetua equivale, secondo Newcomb, a mantenere una casa od una qualsiasi struttura: il proprietario può scegliere se ridipingerla o sostituire il tetto od aggiungervi dell'isolante.

Si comprende anche come le pavimentazioni “perpetue” o “a manutenzione zero” non lo siano effettivamente. La lunga durata è infatti una prerogativa dei soli strati strutturali profondi. Gli interventi di ripristino superficiali sono comunque necessari, sia per preservare gli strati sottostanti trasmettendovi sollecitazioni ridotte ed impedendone la contaminazione da parte

delle percolazioni superficiali, sia per garantire le risorse funzionali di sicurezza in termini di aderenza e regolarità del piano viabile. Inoltre, come già accennato, la costruzione di strati superficiali su piani durevoli non può che aumentarne la vita ampliando gli intervalli manutentivi.

2.2. Caratteristiche e vantaggi

Le pavimentazioni perpetue hanno tre peculiarità distinte: uno strato superficiale resistente alle ormaie ed all'usura, uno strato intermedio durevole e resistente alle ormaie ed una combinazione adeguata di spessore bituminoso e flessibilità che le preservi dalle fessurazioni per fatica profonde.

La progettazione muove da una fondazione portante di qualità, sulla quale costruire strati bituminosi ad elevato spessore. Lo spessore bituminoso complessivo deve essere tale per cui le sollecitazioni flessionali cui è soggetto non inducano l'insorgere di fessurazioni alla base dello stesso. L'utilizzo di maggiori quantità di mastici bituminosi che riducano i vuoti e di leganti modificati possono ulteriormente preservare lo strato dallo sviluppo di fessure profonde del tipo *bottom-up*. Lo strato intermedio del pacchetto ha la funzione di resistere alle ormaie. Esso è il vero cuore resistente della struttura stradale e può essere progettato utilizzando aggregati di notevole qualità assieme a leganti modificati.

Lo strato superficiale, infine, è rinnovabile e può essere progettato per specifiche applicazioni. In aree di notevole traffico l'impiego di Splitt Mastix Asphalt (SMA) può essere preferito a quello di una usura tradizionale chiusa. In altri casi, quale ad esempio quello autostradale, l'impiego di conglomerati bituminosi drenanti e fonoassorbenti può migliorare le condizioni di sicurezza in caso di maltempo e ridurre le emissioni acustiche della strada.

L'architettura e le caratteristiche degli strati citati possono essere tali per cui lo spessore complessivo della sovrastruttura stradale comprendente strati legati e non risulti inferiore a quelle che prevedono importanti fondazioni di materiali sciolti.

Da uno studio inglese di Nunn et al. (Nunn, M.E., A. Brown, D. Weston and J.C. Nicholls, 1997) è effettivamente emerso che, ad alti livelli di ormaimento, sono

associati spessori bituminosi sottili. Sezioni con più di 20 cm di "neri" hanno mostrato lenti incrementi nell'approfondimento delle ormaie che, per di più, sono risultate essere limitate al solo strato superficiale. Inoltre, è stato accertato che in pavimentazioni bituminose a spessore elevato, le fessurazioni sono principalmente di tipo top-down con un conseguente risparmio manutentivo dell'ente gestore legato al solo rifacimento dello strato superficiale.

La tabella 1 riassume i principali vantaggi legati all'impiego delle pavimentazioni perpetue dal punto di vista ambientale, economico e della sicurezza. Il primo punto è certamente il minor costo complessivo nella vita utile della pavimentazione, da cui il conseguente risparmio. Sebbene la realizzazione di una pavimentazione perpetua possa presentare costi iniziali superiori a quelli di una pavimentazione tradizionale il vantaggio economico ed ambientale deve essere computato sull'intero arco di vita della sovrastruttura. La riduzione degli interventi manutentivi e la limitazione di questi agli strati superficiali diminuiscono notevolmente l'apporto di nuove risorse, soprattutto quando si attuano tecniche di riciclo. I tempi di intervento, inoltre, risultano sensibilmente ridotti con il conseguente vantaggio per il traffico stradale sulla rete.

Tab. 1 Vantaggi delle pavimentazioni perpetue

Principali vantaggi
▶ Riduzione del costo complessivo nella vita utile della pavimentazione che risulta prossima ai 40-50 anni
▶ Limitazione degli interventi al solo strato superficiale e conseguente riduzione dei tempi di intervento
▶ Conservazione delle risorse naturali non rinnovabili attraverso il risparmio ed il riciclo
▶ Aumento dell'efficacia delle gestioni e manutenzioni dei patrimoni stradali
▶ Aumento della sicurezza della circolazione con maggiore regolarità dei piani viabili, minori interruzioni ed ostacoli al traffico per le ridotte manutenzioni
▶ Riduzione degli inquinamenti atmosferici ed acustici

Il minor numero di interventi e la limitazione degli stessi a spessori inferiori è, nel ciclo della vita utile della pavimentazione, l'aspetto di maggior rilevanza nel rispetto ambientale. Il risparmio di materiali coincide

con la conservazione delle risorse naturali non rinnovabili al pari del riciclo che, allo stesso tempo, elimina il problema dello smaltimento. Nel complesso, la gestione della rete stradale da parte dell'ente proprietario diviene più efficace. I budget possono essere impiegati per il monitoraggio delle funzionalità della pavimentazione e per intervenire superficialmente quando queste siano prossime alla soglia di sicurezza o di danneggiamento. Le pavimentazioni perpetue possono essere dunque più sicure: un manto stradale regolare e caratterizzato da buona aderenza è sinonimo di sicurezza così come lo è il minor numero di cantieri sulla rete. Conseguenza ultima, ma non meno importante di quanto appena descritto è il contenimento degli inquinamenti atmosferici ed acustici, sia in fase di esercizio, sia in fase di manutenzione.

Prima di descrivere i concetti meccanicistici alla base dell'approccio progettuale delle pavimentazioni perpetue è interessante riportare le impressioni di un tecnico stradale su di esse e sul loro utilizzo. Marvin Traylor, ingegnere della Asphalt Pavement Association dello stato americano dell'Illinois dice: *"Il vantaggio delle pavimentazioni perpetue è che può esserne curata la sola parte superficiale, non occorrono interventi a tutto spessore e non è necessario mantenere in essere il cantiere per settimane intere. I costi sono ridotti perché si scarificano semplicemente alcuni centimetri di conglomerato bituminoso e se ne ristendono altrettanti, spesso nell'arco di una sola notte"* (Asphalt Pavement Alliance Publications, *Perpetual Pavement: Structured for the future*).

2.3. Criteri progettuali

Nonostante le pavimentazioni perpetue siano nate per la realizzazione di strade soggette a grandi volumi di traffico, l'approccio progettuale che le contraddistingue può incentivarne l'utilizzo anche per strade di minor importanza.

Attualmente, molte delle metodologie di progetto non considerano ciascuno strato della sovrastruttura per descriverne le caratteristiche in termini di resistenza all'ormaiamento, alla fatica ed alle temperature, ma assimilano il multistrato ad un unico elemento resistente da dimensionare nel suo complesso nei confronti delle azioni esterne. Tuttavia, essendo noto che

ciascuno strato ha la sua specifica funzione nel determinare le prestazioni del pacchetto stradale, si rende necessario un nuovo metodo di progetto che ne consideri singolarmente le caratteristiche di resistenza. È il caso dell'approccio empirico-meccanicistico di cui si parlerà ampiamente in seguito.

La progettazione meccanicistica non differisce da quella impiegata per le altre strutture dell'ingegneria civile quali ponti, edifici e dighe. Conoscendo le caratteristiche dei materiali, le azioni agenti, i punti critici della sovrastruttura e le forme di rottura o degrado che si possono verificare, è possibile progettare gli spessori degli strati ed i materiali da adottare in modo da garantirne la richiesta resistenza e, conseguentemente, la durata.

La Fig. 1 riporta in maniera qualitativa il risultato della progettazione meccanicistica applicata allo studio di pavimentazioni perpetue. In tale caso, si tratta di garantire la sufficiente rigidezza per gli strati superficiali in modo da contrastare gli ormaiamenti e di fornire un adeguato spessore e flessibilità al pacchetto al fine di non indurre la formazione di fessure per fatica alla base.

La Fig. 2 spiega come la combinazione tra il contenuto di legante e lo spessore bituminoso possano intervenire sulle fessurazioni per fatica dello strato di base. Se da un lato è efficace l'impiego di conglomerati a maggior contenuto di bitume, per i quali ad un certo valore di ϵ corrisponde, in genere, una vita a fatica maggiore, dall'altro l'adozione di spessori bituminosi significativi riduce lo stato deformativo stesso aumentando ulteriormente il numero di applicazioni di carico a rottura.

Un approccio al problema della fatica degli strati profondi può essere quello di progettare quello spessore di strato bituminoso rigido tale per cui gli stati deformativi di trazione alla base risultino insignificanti. Ciò potrebbe al limite favorire l'utilizzo di un'unica miscela bituminosa da impiegarsi nello strato di base ed in quello di collegamento eliminando la

necessità di variare la composizione dei conglomerati bituminosi per gli strati profondi.

Per lo strato di collegamento debbono essere assicurate le caratteristiche di stabilità e durabilità. La prima può perseguirsi nello sviluppo di contatti inerte-inerte tra gli aggregati grossi ed utilizzando leganti con adeguate resistenze alle alte temperature. L'attrito interno tra gli aggregati può essere ottenuto impiegando inerti frantumati nello scheletro litico. Per la durabilità possono essere condotti test di performance relativi all'ormaiamento, alla percentuale dei vuoti in opera ed alla sensibilità all'umidità.

Le caratteristiche funzionali dello strato superficiale richiedono che esso sia durevole, impermeabile, resistente all'ormaiamento e all'usura. L'impiego di SMA (Split Mastix Asphalt) ad esempio, è particolarmente indicato per le aree urbane con elevati traffici pesanti.

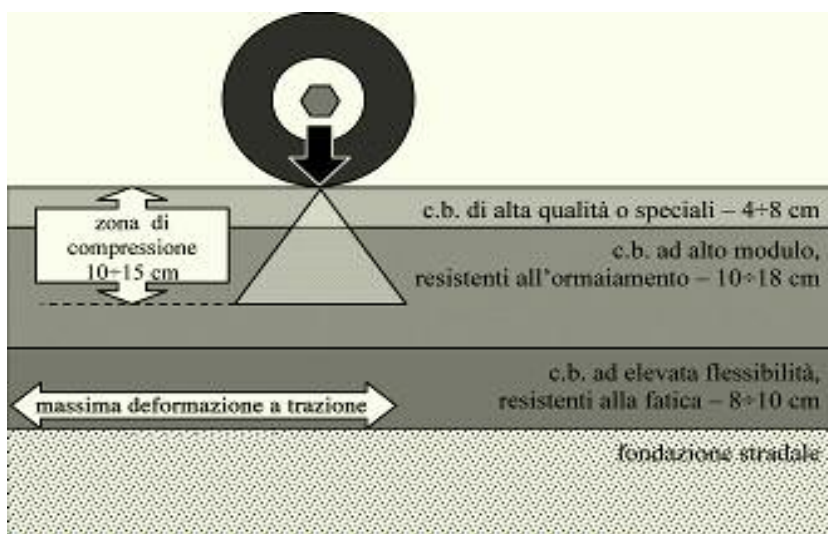


Fig. 1 Criterio progettuale delle pavimentazioni perpetue (c.b. = conglomerato bituminoso)

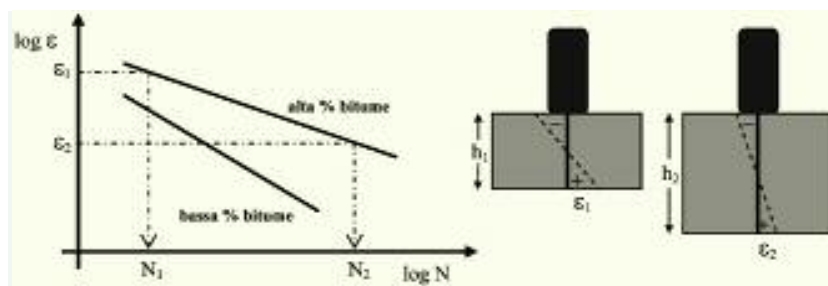


Fig. 2 Resistenza a fatica dello strato di base

2.4. Costruzione, monitoraggio e manutenzione

La costruzione di una pavimentazione perpetua richiede una notevole attenzione ai dettagli e la ricerca di qualità esecutiva fin dal piano di posa. Nel processo costruttivo debbono essere adottate procedure e metodologie di verifica e controllo atte a garantire la continuità qualitativa dei materiali e delle lavorazioni. La fondazione deve offrire sufficiente capacità portante per la compattazione degli strati superiori, così come ciascuno strato deve risultare ben addensato, regolare e sufficientemente rigido per consentire il transito dei mezzi di cantiere e dei compattatori stessi. In esercizio è fondamentale che siano minimizzate le variazioni volumetriche dei sottofondi dovute a rigonfiamenti dei terreni od al gelo. Possono richiedersi drenaggi o interstrati granulari per garantire la consistenza della fondazione nel tempo. Per gli strati bituminosi, l'impiego di leganti modificati è preferibile, ma attenzione è richiesta al surriscaldamento degli stessi, pena lo scadimento delle caratteristiche di suscettività termica. Anche la segregazione degli aggregati grossolani può incidere sulla compattazione e quindi sulla permeabilità degli strati bituminosi. Verifiche volumetriche sulle miscele possono essere di grande aiuto al committente nella valutazione della qualità dei materiali posati. Solo la disponibilità di laboratori specializzati per controlli periodici ed analisi dei dati può garantire che le caratteristiche richieste siano raggiunte nella realizzazione del pacchetto in opera.

Affinché il concetto di pavimentazione perpetua sia durevole nel tempo, è necessario monitorare periodicamente le prestazioni della sovrastruttura per contenere tutte le forme di degrado entro i primi centimetri del pacchetto. Con ciò, problemi quali fessure top-down per fatica, fessure termiche, ormaiamento e usure superficiali debbono interessare uno spessore non superiore a quello dello strato di usura originario. Nel momento in cui le forme di degrado raggiungono un prestabilito livello, è previsto l'intervento manutentivo programmato ed una nuova analisi della pavimentazione. Nell'eventualità in cui talune caratteristiche siano mutate come, ad esempio, si sia indebolito il sottofondo per la presenza di umidità, si può valutare l'opportunità di aggiungere un ulteriore spessore bituminoso per garantire la natura perpetua alla struttura.

La risagomatura per sostituzione dello strato di usura richiede la rimozione dello strato esistente fino alla profondità dell'ammaloramento più grave. Il ripristino può prevedere il riciclo del materiale scarificato secondo le tecniche di riciclaggio comunemente adottate, oppure la posa di nuovo materiale avente le medesime caratteristiche di resistenza alle ormaie, di durabilità, di resistenza a fatica e di usura del conglomerato bituminoso originario.

3. La caratterizzazione meccanica dei materiali e la progettazione dei materiali delle pavimentazioni stradali

3.1. Premessa

Si è fatto cenno alle differenze funzionali, oltre che compositive, tra gli strati che compongono la pavimentazione stradale. A tali differenze possono corrispondere altrettante forme di degrado cui la sovrastruttura nel suo complesso è soggetta durante la vita utile. Le azioni esterne, comprese quelle ambientali, determinano nel tempo il manifestarsi di dissesti che interessano ciascuno strato del pacchetto in maniera differente a seconda dell'architettura e della composizione dello stesso.

Progettare una pavimentazione come perpetua richiede anzitutto la conoscenza delle modalità di genesi e sviluppo delle varie forme di degrado negli strati della sovrastruttura e delle misure attuabili per contrastarle. Un esempio proposto è quello dell'incremento dello spessore complessivo dei "neri" per la riduzione degli stati deformativi alla base dello strato bituminoso più profondo e delle conseguenti fessurazioni a fatica.

In questo paragrafo, si prenderà in considerazione l'approccio progettuale empirico-meccanicistico per applicarlo al calcolo delle pavimentazioni stradali in generale ed a quelle perpetue, in particolare. La metodologia proposta rappresenta uno sviluppo delle moderne tecniche razionali e semi-empiriche ed associa all'analisi meccanicistica tradizionale, la caratterizzazione a fatica dei materiali in laboratorio. Risulterà pertanto fondamentale la disponibilità di attrezzature dinamiche per la caratterizzazione a fatica delle miscele bituminose.

3.2. I metodi di calcolo empirico – meccanicistici delle pavimentazioni

Tralasciando i metodi puramente teorici, i moderni metodi di calcolo delle pavimentazioni possono essere classificati in:

- ▶ metodi empirici o semiempirici, fondati su prove sperimentali su pavimentazioni in vera grandezza eventualmente integrati con modelli numerici (Road Note 29, Wyoming, CBR, etc.);
- ▶ metodi meccanicistici o razionali, basati sul calcolo dello stato tenso-deformativo delle pavimentazioni sottoposte ai carichi dei veicoli ed all'applicazione di leggi di fatica predeterminate per strati legati e non (BISAR, JULEA, FENLAP, CAPA3D, etc.);
- ▶ metodi empirico-meccanicistici (*Mechanistic-Empirical methods M-E*) che integrano tra loro i vantaggi di entrambi i metodi precedenti.

I metodi di tipo empirico-meccanicistico, per la loro capacità di riuscire a stimare la prestazione in opera della sovrastruttura in termini di decadimento funzionale e strutturale, rappresentano il futuro prossimo della progettazione delle pavimentazioni stradali ed un innovativo campo di ricerca. La sfida principale nello sviluppo di queste metodologie di calcolo è rappresentata dalla valutazione dei criteri per correlare la risposta della pavimentazione alle prestazioni in opera della stessa.

I metodi M-E costituiscono lo sviluppo naturale di quelli razionali. A partire da questi, è possibile aumentare il grado di affidabilità della progettazione adottando per i parametri meccanici del modello di calcolo della pavimentazione, i valori misurati con opportuni test. Si possono, ad esempio, misurare con prove di laboratorio i moduli elastici dei conglomerati bituminosi da attribuire ai parametri meccanici dei modelli di multistrato elastico della pavimentazione in via di progetto. In uno sviluppo ulteriore, i metodi di progettazione M-E determinano la risposta della pavimentazione in termini di tensioni, deformazioni e deflessioni utilizzando soluzioni numeriche e modelli propri della meccanica dei solidi e correlano tale risposta con la prestazione della pavimentazione in opera in termini di fessurazione, ormaiamento e decadimento della regolarità superficiale, servendosi di relazioni empiriche costruite mediante l'analisi statistica di dati speri-

mentali. Il carattere empirico delle nuove metodologie M-E risiede proprio nella conoscenza sperimentale dei processi di ammaloramento della sovrastruttura e delle leggi di resistenza dei materiali che le compongono.

Per descrivere l'approccio progettuale M-E proposto per le pavimentazioni perpetue è opportuno considerare in primo luogo, la valutazione delle fessurazioni per fatica quali rotture di riferimento per la distinzione tra pavimentazioni potenzialmente perpetue e non, pur essendo nota l'esistenza di altre forme di degrado su cui fondare la progettazione, quali ad esempio quelle considerate nella guida AASHTO Pavement Design Guide 2002 (*NCHRP, 2005*). La procedura di calcolo americana, infatti, si basa sulla scelta di uno o più parametri strutturali e funzionali per la valutazione della prestazione della sovrastruttura alla fine della vita utile e su un livello di affidabilità desiderato per ciascuno di essi. Fra questi, oltre alle fessurazioni per fatica ed all'ormaiamento, sono citati la fessurazione termica, la regolarità del piano viabile ed altri parametri direttamente o indirettamente collegati con i precedenti.

La fessurazione a fatica del pacchetto bituminoso è tradizionalmente valutata tramite il controllo della deformazione orizzontale massima calcolata alla base degli strati legati a bitume. La legge di fatica utilizzata per stimare il numero di ripetizioni di carico ammissibili a rottura ha, in genere, la seguente espressione (*Finn, 1973*):

$$N = k_1 \cdot \epsilon^{-k_2} \cdot E^{-k_3} \quad (1)$$

dove:

- ▶ ϵ = deformazione orizzontale massima alla base dello strato di conglomerato bituminoso;
- ▶ E = modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso (in MPa o psi);
- ▶ k_i ($i = 1,2,3$) = parametri caratteristici della legge di fatica;
- ▶ N = numero totale di ripetizioni di carico ammissibili prima che avvenga la rottura.

La (1) rappresenta l'espressione parametrica sulla quale si basano molti metodi di calcolo M-E coi quali stimare il numero di ripetizioni di carico ammissibili nei confronti delle fessurazioni per fatica per una data configurazione di progetto. »

La scelta del valore da attribuire ai parametri k_1 può influire sul grado di affidabilità della progettazione ed è legata alla conoscenza preventiva dei materiali impiegati ed alla possibilità di caratterizzarli tramite prove di laboratorio, al limite di fatica.

Restano tuttavia numerose incertezze dovute fondamentalmente alle differenze esistenti tra le prestazioni dei materiali in laboratorio e quelle che mostrano effettivamente in sito. A tale proposito è opportuno fare le seguenti considerazioni.

In laboratorio i carichi dinamici sono applicati in modo continuo con periodi di "riposo" costanti e piuttosto brevi. Esiste quindi una notevole differenza tra i risultati ottenuti in laboratorio con prove a fatica e le verifiche sperimentali su pavimentazioni reali. Una delle ragioni principali è direttamente collegata ai tempi di riposo tra i carichi applicati: nelle reali condizioni di traffico le pavimentazioni subiscono carichi con intervalli di applicazione molto variabili. L'intervallo temporale più o meno lungo tra i carichi veicolari consente alla pavimentazione di "recuperare" il danno dando luogo al cosiddetto fenomeno di *healing* del materiale (Castro and Sanchez, 2006; Si et al., 2002).

La rottura nei test di laboratorio avviene abbastanza rapidamente, in breve tempo dopo la nascita della frattura il provino tende al collasso. In situazioni reali il fenomeno di nascita e diffusione delle fratture con conseguente rottura della pavimentazione è sensibilmente più lento. Inoltre, lo stato tenso-deformativo all'interno della sovrastruttura fratturata può risultare assai differente rispetto alle ipotesi iniziali utilizzate per il calcolo della stessa e basate su modelli elastici ed isotropi.

Inoltre, i carichi applicati in laboratorio non risultano mai identici a quelli rilevati in sito. Dopo il passaggio dei carichi mobili negli strati superficiali della pavimentazione possono rimanere delle tensioni residuali. Queste tensioni tendono a diminuire con il passare del tempo. In laboratorio le tensioni residuali si sommano ed il loro valore assoluto può diventare non più trascurabile rispetto a quanto avviene nelle situazioni reali (Sun and Deng, 1998).

Infine, la vita utile di un materiale misurata in laboratorio risulta usualmente più bassa rispetto a quella rilevata in sito. Pertanto le curve di fatica ottenute speri-

mentalmente sono modificate per mezzo di un fattore correttivo (*shift factor*) per poter essere utilizzate nella progettazione delle pavimentazioni (Read and Collop, 1997; Corte and Goux, 1996; Das and Pandey, 1999). Questo processo di correzione può essere considerato come una "calibrazione" delle curve di fatica sperimentali per considerare le situazioni reali di applicazione dei materiali e generalmente si identifica con il parametro k_1 dell'equazione (1).

Alla luce di quanto descritto, molti enti ed istituti di ricerca nazionali ed internazionali hanno proposto delle curve di fatica per fessurazione di riferimento su cui fondare la progettazione delle sovrastrutture bituminose. Tra questi si citano: l'Asphalt Institute, i laboratori di ricerca della Shell International Petroleum (Shook et al. 1982), l'Università della California - Berkeley (Finn, 1973; Craus et al. 1984), l'esercito degli Stati Uniti *U.S. Army*, l'Università di Nottingham (Brunton et al. 1987) e la Società Autostrade. Esistono anche leggi di fatica proposte da autori che modificano quelle già citate. Ad esempio, il modello dell'Asphalt Institute è stato modificato da Craus (Craus et al. 1984) ed il parametro k_1 ridotto a 0.0636 per spessori degli strati legati a bitume inferiori ai 102 mm (4 pollici). Altre espressioni semplificate disponibili in letteratura sono quelle utilizzate negli stati dell'Illinois (Thompson, 1987) e del Minnesota (Timm et al. 1998) e le curve sviluppate da Bergan e Pulles (1973) per i climi rigidi. Nella Tab. 2 sono riportati i parametri dei principali modelli per la stima della fessurazione a fatica per pavimentazioni flessibili. Per un corretto utilizzo degli stessi occorre ricordare che in tutti i casi il modulo E deve essere espresso in psi tranne che per il modello indiano di Das e Pandey (Das and Pandey, 1999) che utilizza i MPa come unità di misura.

Occorre sottolineare come, per la determinazione delle suddette leggi, gli autori si siano basati su criteri di rottura differenti, così come differenti sono stati i materiali impiegati e le procedure utilizzate per testare a fatica gli stessi. Per i modelli dell'Asphalt Institute, ad esempio, la rottura è stata fissata al raggiungimento del 45% di area fessurata sulla pavimentazione nella zona di passaggio dei veicoli, mentre per il modello indiano tale limite è stato assunto pari al 25%.

Tab. 2 Modelli principali per la stima della fessurazione a fatica

Modello	k_1	k_2	k_3	Rif.
Asphalt Institute (AI)	0,0796	3,291	0,854	Asphalt Institute (1981)
Shell	0,0685	5,671	2,363	Shell (1978), Shook et al. (1982)
Belgian Road Research Center UC-Berkeley - Asphalt	$4,92 \times 10^{-14}$	4,76	0	Verstraeten et al. (1984)
Institute (AI) modificato	0,0636	3,291	0,854	Craus et al. (1984)
TRRL	$1,66 \times 10^{-10}$	4,32	0	Powell et al. (1984)
Illinois	5×10^{-6}	3,0	0	Thompson (1987)
US Army	478,63	5,0	2,66	Department of Defense (1988)
Minnesota	$2,83 \times 10^{-6}$	3,21	0	Timm et al. (1998)
Modello Indiano	0,1001	3,565	1,4747	Das e Pendey (1999)
Autostrade	$1,467 \times 10^{-10}$	4,2735	0	Giannini e Camomilla (1978)

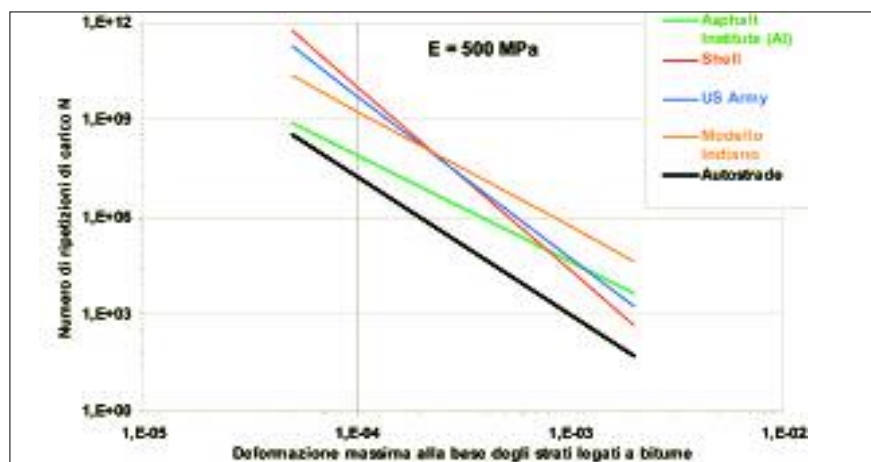


Fig. 3 Leggi di fatica a fessurazione ($E = 500 \text{ MPa}$)

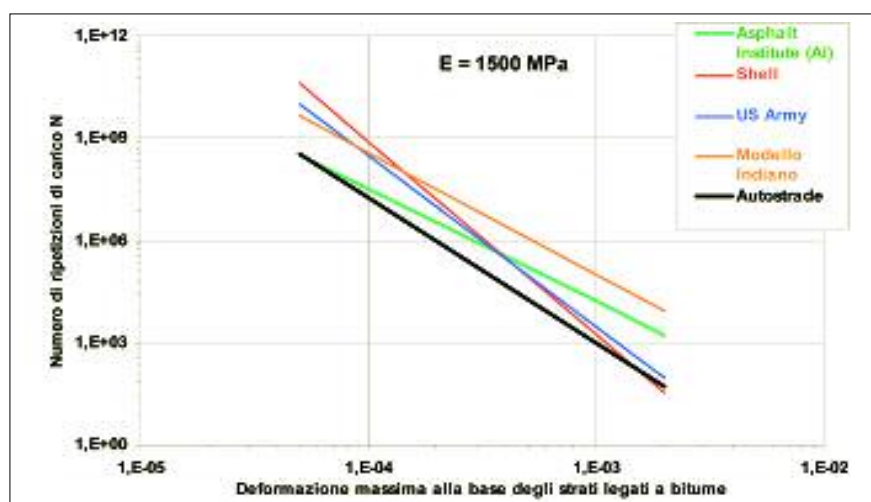


Fig. 4 Leggi di fatica a fessurazione ($E = 1500 \text{ MPa}$)

Le Fig. 3, 4 e 5 illustrano in forma grafica alcune delle curve riportate in Tab. 2 al variare del modulo di rigidità assunto per rappresentare gli strati legati a bitume. Dai dati riportati in Tab. 2 e dall'analisi delle figure, si può osservare come l'esponente k_2 vari poco mentre il parametro k_1 può variare di alcuni ordini di grandezza.

Il dimensionamento degli strati bituminosi tramite i metodi razionali prima e quelli M-E poi richiede l'utilizzo di una delle leggi di fatica di Tab. 2 o di leggi analoghe con le quali stimare, in base allo stato tenso-deformativo calcolato per i punti critici a fessurazione del pacchetto, il numero di ripetizioni di carico ammissibili al termine della vita utile della pavimentazione, generalmente fissato in 20 anni (50 per le pavimentazioni perpetue). La scelta di una delle leggi descritte per il calcolo di pacchetti stradali tradizionali o perpetui, se ben indirizzata, non conduce ad errori, ma risente inevitabilmente della aleatorietà legata alle modalità con le quali la legge di fatica stessa è stata ricavata, prima fra tutte la tipologia di materiali impiegati nelle sperimentazioni. Il passaggio a progettazioni M-E più articolate e precise, come quella proposta dall'AASHTO Pavement Design Guide 2002 (NCHRP, 2005), richiede la caratterizzazione preventiva dei materiali impiegati tramite prove di laboratorio tradizionali come, ad esempio, il design volumetrico con pressa giratoria. Un ulteriore raffinamento delle metodologie di calcolo meccanistiche, con riferimento alla importante problematica fessurativa responsabile, secondo molti autori, dei maggiori dissesti delle pavimentazioni bituminose, prevede la messa a punto di leggi di fatica specifiche per ciascun caso »

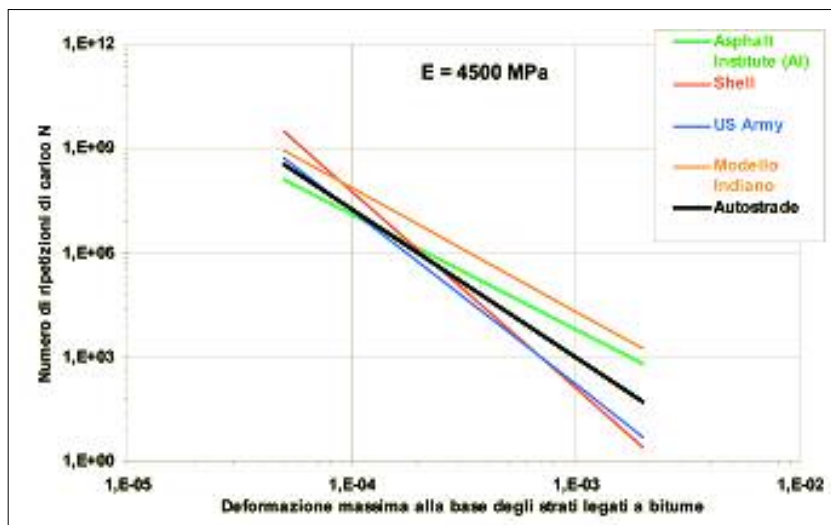


Fig. 5 Leggi di fatica a fessurazione ($E = 4500 \text{ MPa}$)

progettuale incontrato. Tale studio può essere condotto tramite mirate indagini di laboratorio.

Nei due paragrafi che seguono, quindi, si descriveranno brevemente alcune metodologie di prova dinamiche con le quali caratterizzare sperimentalmente i conglomerati bituminosi, al fine di applicarne i risultati alla progettazione M-E di pavimentazioni tradizionali e perpetue. Nell'approccio progettuale proposto, infatti, la "calibrazione" delle leggi di fatica tramite i parametri k inizia proprio, come detto, dal laboratorio. Per il calcolo a fatica del pacchetto non ci si accontenta infatti delle leggi tradizionali calcolate da altri con condizioni e materiali differenti (Tab. 2), ma si sfruttano le apparecchiature dinamiche a disposizione per determinare autonomamente il comportamento a fatica dei materiali effettivamente impiegati, correggendole sulla base degli *shift factors* citati.

3.3. La caratterizzazione meccanica dei materiali per la "calibrazione" dei modelli di calcolo: la prova ITSM

Come anticipato nel paragrafo precedente esiste la possibilità di individuare con un grado di affidabilità noto, i parametri meccanici e di risposta ai carichi ciclici dei materiali stradali che andranno a costituire la pavimentazione stradale. I provini di conglomerato bituminoso confezionati con la pressa giratoria in fase di progettazione volumetrica delle miscele, così come quelli estratti

da stese sperimentali o da pavimentazioni esistenti, possono essere caratterizzati meccanicamente con dispositivi per la determinazione del Modulo di rigidità dinamica e della resistenza a fatica.

In Fig. 6 è rappresentata l'apparecchiatura MatTA (Material Testing Apparatus) in dotazione al DISTART Strade dell'Università di Bologna con la quale è possibile realizzare le prove citate.

Il modulo di rigidità ITSM è direttamente collegato alla capacità del materiale della pavimentazione di diffondere i carichi. La Fig. 7 descrive qualitativamente le modalità di diffusione degli stati tensiona-

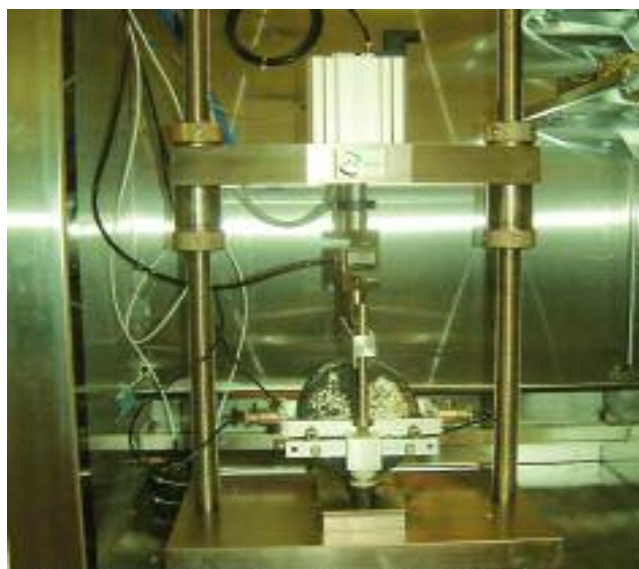


Fig. 6 Apparecchiatura MatTA (Configurazione Indirect Tensile Stiffness Modulus – ITSM)

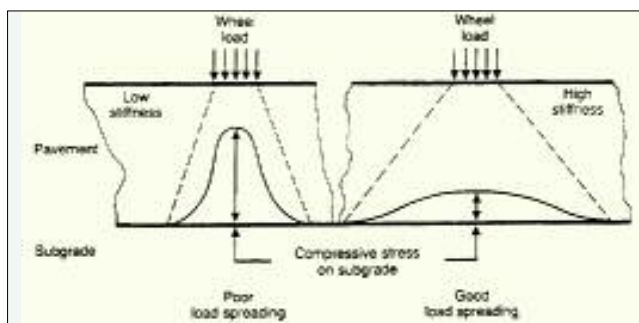


Fig. 7 Influenza modulo rigidezza su diffusione carichi

li indotti dai carichi stradali all'interno del pacchetto bituminoso, fino agli strati di sottofondo.

La rigidità, inoltre, è richiesta come dato di ingresso per ogni modellazione elastica degli strati del multistrato stradale ed è quindi alla base del calcolo M-E della pavimentazione nel caso in cui siano noti i materiali impiegati per la costruzione. Inoltre, nei metodi M-E più avanzati, può e deve essere utilizzata per definire il parametro E dell'equazione (1), ottenendo una legge di fatica parzialmente specializzata per il materiale in esame.

I parametri che influenzano il Modulo di rigidità di un conglomerato bituminoso testato in laboratorio possono essere suddivisi in due principali categorie:

- ▶ parametri di prova: frequenza, temperatura, livello di carico;
- ▶ parametri di progetto della miscela dipendenti dalle condizioni del materiale (contenuto in vuoti) e dalla sua composizione (tipo e contenuto di aggregati, filler, bitume).

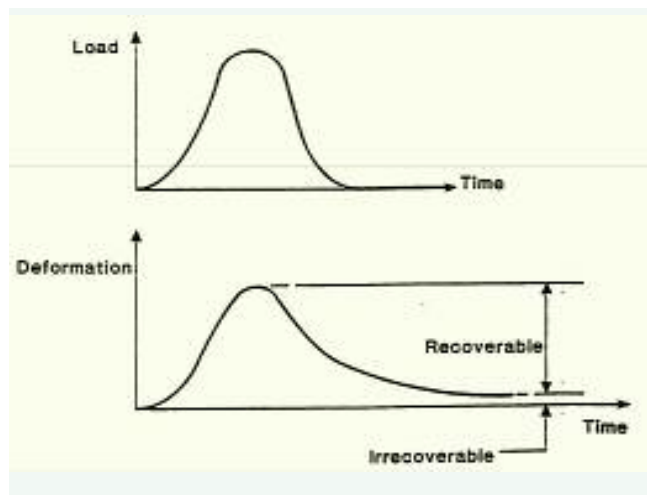


Fig. 8 Risposta del materiale bituminoso ad un singolo impulso di carico

La Fig. 8 illustra come un conglomerato bituminoso risponde, in genere, ad un singolo impulso di carico e può essere considerata rappresentativa dell'effetto causato dal passaggio di una ruota sul piano viabile. L'impulso di carico provoca una deformazione, comprensiva di una componente recuperabile e di una permanente. Nel caso dell'impulso singolo, la componente recuperabile è la dominante, mentre la piccola parte irrecuperabile

viene ignorata in quanto trascurabile.

È con queste ipotesi che la rigidità può essere definita, in termini generali, come il rapporto tra il livello tensionale e la deformazione recuperabile ed è su questo principio che si basa la determinazione del modulo di rigidità ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus). Il metodo corrente di prova è descritto nella normativa *UNI EN 12697- parte 26, Miscela bituminosa - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo, Rigidità*.

Il test per la valutazione dell'ITSM sfrutta la misurazione dei livelli tensionali e deformativi all'interno del materiale da caratterizzare, generati con un impulso di carico lungo due linee generatrici diametralmente opposte del provino cilindrico sottoposto a prova nella configurazione di trazione indiretta o "brasilianna". Come schematizzato in Fig. 9, la parte centrale del provino è soggetta ad uno stato tensionale di trazione. Lo stato di tensione presente all'interno del

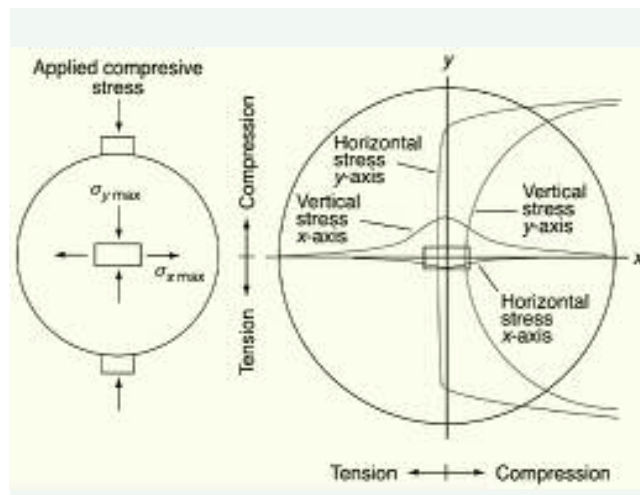


Fig. 9 Stato tensionale durante la prova ITSM

provino sottoposto a trazione indiretta risulta quindi simile allo stato di tensione presente negli strati bituminosi di una pavimentazione stradale. A tale proposito, lo schema in Fig. 10 illustra una configurazione tensionale tipica di uno strato della pavimentazione stradale sottoposta al carico prodotto da una ruota. Infine, è opportuno precisare che, tra i metodi di prova riportati nella normativa europea, quello per il calcolo del ITSM è l'unico in grado di restituire direttamente il

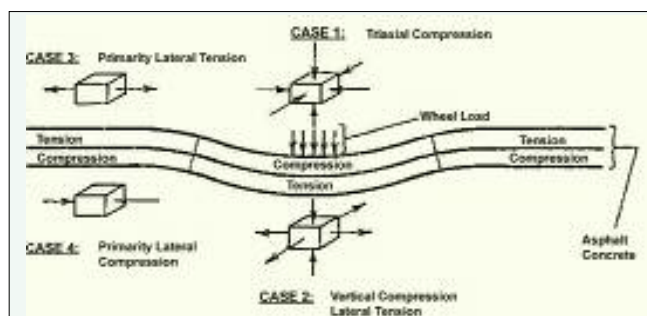


Fig. 10 Stato di tensione tipico di uno strato bituminoso a cui è applicato il carico di una ruota (Roque e Buttlar, 1992)

Modulo di rigidezza del materiale investigato senza la necessità di calcolarlo indirettamente dal Modulo complesso o da quello resiliente.

3.4. La caratterizzazione a fatica dei materiali per la "calibrazione" dei modelli di calcolo: la prova ITFT

La calibrazione dei parametri della espressione generale di fatica per i conglomerati bituminosi parte dalla determinazione del Modulo di rigidezza, ma può essere ulteriormente affinata attraverso l'applicazione di tensioni inferiori a quelle di resistenza a trazione ultime del materiale, ma ripetute nel tempo. Si tratta in sostanza di condurre le cosiddette prove a fatica sui conglomerati impiegati, nelle quali viene determinato il numero di applicazioni di carico che portano a rottura il provino.

Come accennato in precedenza, la fessurazione per fatica è solo una delle forme di degrado della sovrastruttura stradale che occorre conoscere per condurre una progettazione M-E completa del pacchetto. Essa tuttavia è, a detta di molti autori, la più importante e lo è soprattutto per le pavimentazioni perenni che, come descritto nei paragrafi introduttivi, debbono essere progettate *in primis* per cautelarsi nei suoi confronti.

Per caratterizzare a fatica i conglomerati bituminosi la normativa europea (UNI EN 12697 – parte 24) riporta numerose configurazioni di prova tra le quali, quella a trazione indiretta su provini cilindrici (TI-CY) è la più comune e facile da attuare.

Anche lo studio di Read e Collop (Read e Collop, 1997)

consiglia l'utilizzo dell'ITFT (Indirect Tensile Fatigue Test) su provini cilindrici, soprattutto per la minore necessità di incrementare il numero di campioni per ottenere dati statisticamente significativi. Dalla stessa memoria è possibile estrapolare una breve lista di vantaggi e svantaggi connessi alla prova.

Tra i primi sono riportati:

- ▶ la facilità di impiego;
- ▶ la rottura sotto uno stato tensionale relativamente uniforme;
- ▶ la maggiore rappresentatività delle condizioni reali dello stato tensionale biassiale rispetto a quello monoassiale;
- ▶ la facilità di produrre provini cilindrici in laboratorio ed in sito;
- ▶ la sensibilità della prova alle variazioni volumetriche delle miscele e delle caratteristiche dei leganti;
- ▶ la maggiore ripetibilità della prova rispetto ad altre configurazioni a fatica come, ad esempio, quella flessionale;
- ▶ la possibilità di condurre la prova in cella climatica.

Tra i secondi:

- ▶ l'impossibilità di variare il rapporto esistente tra tensione verticale e tensione orizzontale applicata;
- ▶ il fatto che la configurazione del test non permetta l'inversione delle tensioni;
- ▶ la significativa sottostima della resistenza a fatica del materiale, comunque reintegrabile per mezzo degli *shift factors*.

La Fig. 11 riporta alcune tipiche curve di fatica convenzionalmente rappresentate in scala logaritmica al fine di ottenere un andamento lineare delle regressioni analitiche. A titolo puramente esemplificativo sono tracciate le curve di un conglomerato bituminoso per strati di collegamento (DBM – linea nera a tratti) e di un conglomerato bituminoso ad alto modulo per strati di base (BAM – linea rossa continua). Si osservi come per comodità di calcolo e senza nulla togliere alla significatività del grafico, le leggi di fatica delle Fig. 3, 4 e 5 siano state rappresentate ad assi invertiti.

Dal grafico di Fig. 11 è possibile riscontrare come, riportando i risultati dei test di fatica in termini di deformazioni specifiche, i risultati ottenuti per rigidezze diverse e temperature diverse tendono a coincidere. Questo indica che la deformazione rappresenta il crite-

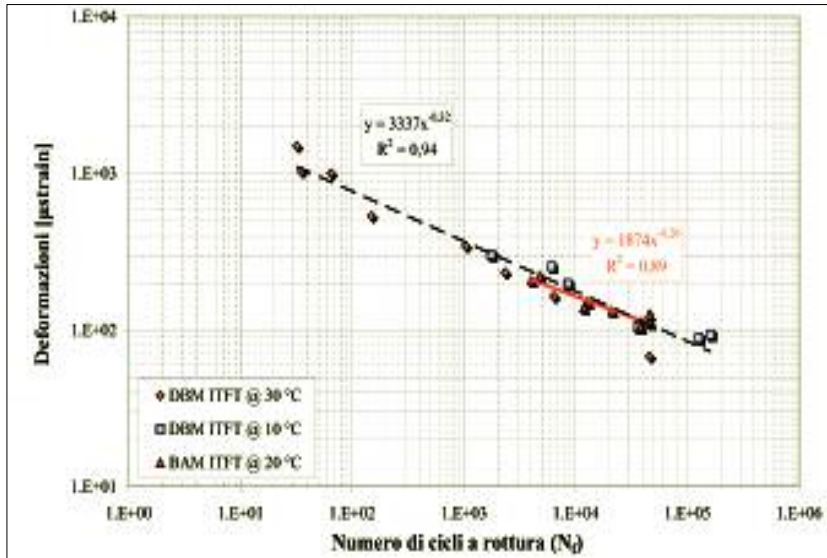


Fig. 11 Curve sperimentali da ITFT

rio di rottura e gli effetti di temperatura e tempo di carico possono essere considerati in relazione alla loro influenza sulla rigidità. Negli studi a fatica questa analisi prende il nome di “strain criterion” e viene generalmente accettata come comportamento di rottura a fatica dei materiali bituminosi.

La relazione generale che definisce il fenomeno della fatica rispetto all’inizio della frattura per i conglomerati bituminosi è, in generale, la seguente e corrisponde alla determinazione sperimentale della (1):

$$N_f = C \left[\frac{1}{\epsilon_t} \right]^m \quad (2)$$

dove:

N_f = numero di applicazioni di carico all’inizio della rottura per fatica;

ϵ_t = massima deformazione specifica applicata;

C, m = fattori correttivi dipendenti dalla composizione e dalle proprietà della miscela.

Elaborando i risultati sperimentali come quelli di Fig. 11, possono essere definiti tutti i parametri dell’equazione (2) da cui è possibile anche ricavare direttamente il parametro k_2 da impiegare nell’equazione (1), trattandosi appunto della medesima legge di fatica espressa in forma differente.

Di più difficile soluzione risulta la determinazione del parametro k_1 , chiamato anche fattore correttivo o, come detto, “shift factor”. Tale parametro considera le differenze tra le condizioni di prova in laboratorio e le reali condizioni riscontrabili su strada.

Esso dipende da quattro fattori principali: le differenze nello stato tensionale causate dalla inevitabile anisotropia del materiale in sito, la variabilità delle traiettorie e dei carichi veicolari sul campo, le differenze tra i materiali realizzati in laboratorio e quelli compattati in opera e successivamente sottoposti al traffico veicolare ed, infine, l’effetto di autoriparazione (healing) tipico dei materiali legati a bitume già descritto in precedenza. Si può così definire un fattore

correttivo complessivo (SHF totale) esprimendolo attraverso la seguente relazione empirica:

$$SHF_{totale}(t) = SHF_{stato-tensionale}(t) \times SHF_{var-traiettorie}(t) \times SHF_{diff-materiali}(t) \times SHF_{healing}(t) \quad (2)$$

dove

$SHF_{totale}(t)$ = fattore correttivo complessivo (k_1);

$SHF_{stato-tensionale}(t)$ = fattore correttivo che considera le differenze nello stato tensionale a causa dell’anisotropia del materiale in sito;

$SHF_{var-traiettorie}(t)$ = fattore correttivo che considera la variabilità delle traiettorie e dei carichi veicolari sul campo;

$SHF_{diff-materiali}(t)$ = fattore correttivo che considera la differenza tra la compattazione del materiale impiegato in laboratorio e quello realizzato in opera;

$SHF_{healing}(t)$ = fattore correttivo che considera l’effetto di autoriparazione (healing) tipico dei materiali legati a bitume.

Come ricordato, tra gli svantaggi delle prove a fatica a trazione indiretta su provini cilindrici, vi è una sottostima della resistenza a fatica del materiale, soprattutto se »

si utilizza come parametro discriminante per la progettazione la deformazione principale di trazione. Questo fatto è confermato da un SHF_{totale} che può variare da 10 a 100 e che quindi può modificare le curve di fatica sperimentali di diversi ordini di grandezza.

Una volta che la caratterizzazione dinamica dei conglomerati bituminosi a fatica è completa, la progettazione M-E proposta per le pavimentazioni perpetue può essere portata a termine. In particolare, sulla base delle conoscenze relative ai livelli deformativi massimi che si possono verificare alla base dei c.b. di un pacchetto perpetuo affinché non si inneschino fessurazioni, è possibile calcolare lo spessore bituminoso necessario per garantire la vita utile di 40-50 anni tipica di tali pavimentazioni. La vita utile è computata con riferimento al numero di assi di carico transitanti tenuto conto delle variazioni di traffico nell'arco temporale di esercizio.

Noto dalle prove di laboratorio dinamiche il comportamento a fatica dello strato bituminoso e fissato un massimo di 60 microstrain per le deformazioni a trazione alla base dei c.b. (secondo Monismith, 2004), risulta agevole progettare lo spessore degli strati bituminosi profondi di una sovrastruttura flessibile per renderla perpetua.

4. Conclusioni

La comparsa del concetto di pavimentazione perpetua nel panorama tecnico stradale internazionale, ha offerto lo spunto per riconsiderare le tradizionali metodologie di approccio progettuale razionale. Il passo verso progettazioni di tipo empirico-meccanicistico è breve, ma il grado di affidabilità offerto dalle vecchie formulazioni per il calcolo a fatica degli strati può non risultare sempre accettabile.

Nuove potenzialità e conseguentemente nuovi campi di ricerca si aprono per una corretta progettazione delle pavimentazioni stradali flessibili in termini di riduzione degli impatti:

- ▶ le pavimentazioni "perpetue" presentano numerosi vantaggi anche in termini ambientali, pur presentando un maggior costo iniziale;
- ▶ la progettazione di una pavimentazione stradale non può essere considerata solo una verifica strut-

turale delle sollecitazioni di progetto, ma deve anche valutare il comportamento a fatica partendo dall'analisi dei costi nell'intero ciclo di vita utile, non verificando quindi unicamente la risposta strutturale del pacchetto, ma anche la sua durabilità;

- ▶ il modulo di rigidità dinamica e la caratterizzazione a fatica dei materiali a diverse temperature sono parametri indispensabili per lo studio e l'analisi della prestazione in opera delle pavimentazioni e per l'utilizzo di modelli predittivi di performance (*performance prediction models*) così come richiesto dalle nuove procedure di progettazione meccanicistico-empiriche (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG);
- ▶ la prova per la determinazione del modulo dinamico - Indirect Tensile Stiffness Modulus (UNI EN 12697-26 *Miscela bituminosa - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Rigidità*) e la prova di resistenza a fatica - Indirect tensile fatigue test (ITFT) (EN-12697 24 *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of fatigue*) usciranno presto dallo stretto ambito della ricerca per diventare un dato indispensabile da affiancare alla documentazione tecnica tradizionale dei materiali in fase di progettazione.

Sono numerose e tutte ugualmente interessanti le sfide che si prospettano sia nel campo della ricerca di laboratorio sia in quello più strettamente applicativo per il futuro; occorre essere pronti ad affrontarle anche per rispondere alle sempre più attuali e stringenti esigenze di tutela dell'ambiente.

5. Bibliografia

- ▶ Asphalt Pavement Alliance Publications, *Perpetual Pavement*, AA-2, (2001).
- ▶ J. M. Brunton, S. F. Brown, , and P. S. Pell *Development to the Nottingham analytical design method for asphalt pavements*, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich., International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Lexington, Ky., Proc. 6th Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, 1, 366-377, (1987).
- ▶ M. Castro and J.A. Sánchez, *Fatigue and Healing of Asphalt Mixtures: Discriminate Analysis of Fatigue*

- Curves*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 2, 168-174, (2006).
- ▶ J. Corte and M. Goux, *Pavement distress under accelerated trafficking*, Transportation Research Record 1539, Transportation Research Board, Washington, D.C., 116-124, (1996).
 - ▶ J. Craus, R. Yuce and C.L. Monismith, *Fatigue behavior of thin asphalt concrete layers in flexible pavement structures*, Proc. Assoc. of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, 53, 559-582, (1984).
 - ▶ A. Das and B.B. Pandey, *Mechanistic-empirical design of bituminous roads: an Indian perspective*, J. Transp. Eng., 125 (5), 463-471, (1999).
 - ▶ F.N. Finn, *Relation between cracking and performance*, Special Rep. No. 140, Highway Research Board, Washington, D.C, (1973).
 - ▶ Y. H. Huang, *Pavement analysis and design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., (1993).
 - ▶ C.L. Monismith, *Evolution of Long-Lasting Asphalt Pavement Design Methodology: A Perspective*, Distinguished Lecture, International Society for Asphalt Pavements. Presented at International Symposium on Design and Construction of Long-Lasting Asphalt Pavements, Auburn University, AL, (2004).
 - ▶ D.E. Newcomb, M. Buncher, I.J. Huddleston, *Concepts of Perpetual Pavements*, (2001).
 - ▶ M.E. Nunn, A. Brown, D. Weston and J.C. Nicholls, *Design of long-life flexible pavements for heavy traffic*, Report No. 250, Transportation Research Laboratory, Berkshire, United Kingdom, (1997).
 - ▶ *Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Project 1-40D, (2005). Web-site: <http://www.trb.org/mepdg/>.
 - ▶ W.D. Powell et al. *The structural design of bituminous pavements*, TRRL Laboratory Rep. 1132, Transportation and Road Research Laboratory, London, (1984).
 - ▶ J.M. Read and A. Collop, *Practical Fatigue of Bituminous Paving Mixtures*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 66, (1997).
 - ▶ R. Roque and W.G. Buttlar, *The development of a measurement and analysis system to accurately determine asphalt concrete properties using the indirect tensile mode*, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists-Vol 61-pp 304-332, (1992).
 - ▶ J.F. Shook, F.N. Finn, M.W. Witczak, and C.L. Monismith, *Thickness design of asphalt pavements—the Asphalt Institute method*, Proc., 5th Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, ISAP, Lexington, Ky., 1, 17-44, (1982).
 - ▶ Z. Si, D.N. Little, and R.L. Lytton, *Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, No. 6, 461-470, (2002).
 - ▶ L. Sun, and X. Deng, *Predicting vertical dynamic loads caused by vehicle-pavement interaction*, J. Transp. Eng., 126 (5), 470-478, (1998).
 - ▶ D. Timm, B. Birgisson and D. Newcomb, *Development of mechanistic-empirical pavement design in Minnesota* Transportation Research Record 1629, Transportation Research Board, Washington, D.C., 181-188, (1998).
 - ▶ M. R. Thompson, *ILLI-PAVE based full-depth asphalt pavement design procedure*, Proc., 6th Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, Mich, (1987).
 - ▶ Transportation Research Board *Circular, perpetual Bituminous Pavements*, number 503, ISSN 0097-8515, December 2001.