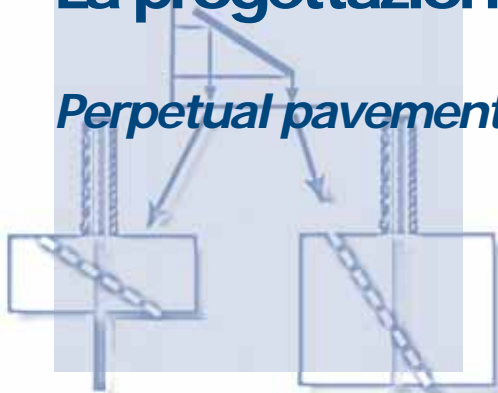


La progettazione delle pavimentazioni perpetue

Perpetual pavement design



MICHELE MORAMARCO
SITEB

Riassunto

Il concetto di *Perpetual Pavement*, anche reso *Long Life Pavement*, è da riferire alla progettazione, costruzione e manutenzione di pavimentazioni bituminose a lunga durata strutturale.

Se adeguatamente mantenute, tali sovrastrutture possono durare anche più di 50 anni, senza la necessità di dover eseguire interventi strutturali o di ricostruzione, operando semplicemente un rinnovo periodico dello strato superficiale, in risposta alle sollecitazioni confinate alla parte superiore della sovrastruttura.

Il presente articolo propone una sintetica analisi di un documento, dal titolo *Perpetual Asphalt Pavement*, pubblicato recentemente dall'Asphalt Pavement Alliance, che raggruppa le associazioni americane Asphalt Institute, National Asphalt Pavement Association e State Asphalt Pavement Associations.

Summary

The Perpetual Pavement concept refers to design, construction and maintenance of long-life asphalt pavements. Proper maintenance procedures and periodic wearing course restoration ensure durability of asphalt paving up to 50 years or more, without the need to carry out structural interventions.

This paper offers a short analysis of a document entitled "Perpetual Asphalt Pavement", recently published by the Asphalt Pavement Alliance, which groups the American associations: Asphalt Institute, National Asphalt Pavement Association and State Asphalt Pavement Associations.

1. Definizioni e concetti di base

Il termine *Perpetual pavements* è utilizzato per descrivere i concetti collegati alla progettazione strutturale, costruzione e manutenzione di pavimentazioni a lunga durata ed è riferito a quei sistemi di progettazione che prevedono dei valori limite per lo stato di sollecitazione e deformazione della pavimentazione al di sotto dei quali il danno strutturale non si verifica.

Il concetto stesso di pavimentazioni di lunga durata non è però nuovo; pavimentazioni *full-depth* (conglomerato bituminoso usato per il confezionamento di tutti gli strati della sovrastruttura) e pavimentazioni *deep-*

strength (strati superficiali e strato di base ad elevata resistenza posto in opera e compattato in uno o più strati, sopra uno strato non legato) sono state costruite a partire dagli anni '50. Tali pavimentazioni venivano progettate per una vita utile di circa 20 anni.

I principali vantaggi di queste sovrastrutture derivano dal basso costo del ciclo di vita, dall'assenza di manutenzioni profonde, dalla riduzione dei costi dovuti all'interruzione del traffico (le manutenzioni sono brevi e limitate) e dal ridotto impatto ambientale, garantito dalla riduzione sostanziale della richiesta di materie prime.

Si consideri anche che molte delle pavimentazioni esi- »

stenti sono state progettate, pur se non volutamente, con i criteri base delle pavimentazioni perpetue.

I primi approcci alla progettazione delle attuali pavimentazioni perpetue erano basati su concetti empirici, la cui premessa era che gli ammaloramenti di origine strutturale potevano essere evitati se le risposte della pavimentazione, in termini di sollecitazioni, deformazioni e deflessioni, potevano essere mantenute al di sotto delle soglie di valori per le quali gli ammaloramenti stessi si manifestano.

La progettazione empirica delle pavimentazioni si basa sulle relazioni tra le osservazioni delle prestazioni, i livelli di traffico, lo spessore dello strato e un indicatore che rappresenta la qualità del materiale, quale ad esempio un coefficiente di struttura.

Per un dato livello di qualità del materiale, lo spessore richiesto della pavimentazione aumenta con l'aumento del traffico. Tuttavia, si arriva ad un punto oltre il quale lo spessore della pavimentazione è più che adeguato, anche per i carichi più pesanti previsti e ogni ulteriore incremento di spessore non comporta quindi nessun ulteriore miglioramento strutturale se non un inutile aggravio dei costi di costruzione e ambientali.

Questi concetti sono stati quindi sviluppati e migliorati con esperienze sul campo che hanno indotto i progettisti ad utilizzare una metodologia di progettazione in grado di controllare sia la resistenza alla fessurazione per fatica sia la resistenza all'ormaiamento.

Questo nuovo approccio (metodo empirico-meccanicistico) prevede una analisi razionale, contempla cioè un modello analitico, della reazione della pavimentazione in termini di sollecitazioni, deformazioni e spostamenti, nel contesto della vita utile attesa per la pavimentazione.

Un diagramma di flusso che mostra un tipico approccio empirico-meccanicistico è indicato in Fig. 1.

In tale approccio iterativo viene utilizzata la risposta della pavimentazione (in termini di sollecitazioni, deformazioni e spostamenti) per stimare il numero consentito di carichi alla rottura (N_f) per una data condizione di spessore, carico e proprietà dei materiali.

Il numero effettivo dei carichi di traffico previsti (n), ovvero il traffico di progetto, è quindi diviso per N_f per definire il grado di danno (D). Il punto in cui il danno è pari a uno è considerato rottura della pavimentazione.

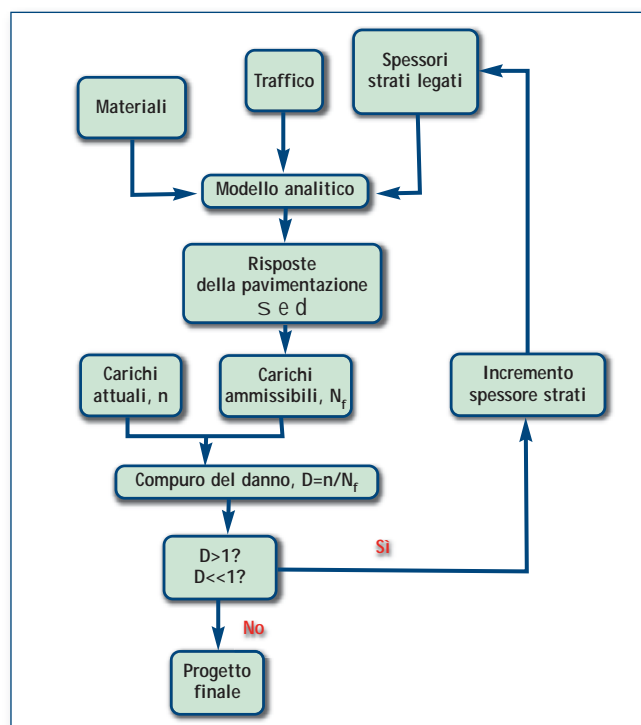


Fig. 1 Approccio al progetto di tipo empirico-meccanicistico

In molti casi, si considera rottura della pavimentazione in corrispondenza del 20% di fessurazione da fatica nel percorso della ruota (*wheel path*) o con profondità di ormaiamento (*rutting*) pari a 0,5 pollici (12,7 cm).

Tale metodologia di calcolo è stata originariamente definita da Miner (1959) come un modo per descrivere il fenomeno della fatica nei metalli (Legge di Miner).

Gli attuali modelli per la progettazione delle pavimentazioni perpetue, in continua evoluzione e perfezionamento, pongono grande attenzione alle proprietà dei materiali costituenti, alla caratterizzazione della risposta della pavimentazione, alle condizioni ambientali e ai parametri di resistenza del sottofondo.

Ai fini progettuali tali modelli prevedono "valori limite" dei parametri deformativi al di sotto dei quali il danno non si verifica e quindi non viene cumulato.

Schematicamente una pavimentazione perpetua può essere illustrata come in Fig. 2. Essa è costituita da tre strati principali (sul sottofondo o sulla fondazione) di cui quello più profondo, di spessore generalmente compreso tra 75 e 100 mm, progettato per resistere alle sollecitazioni a fatica, quello intermedio, dimensionato con

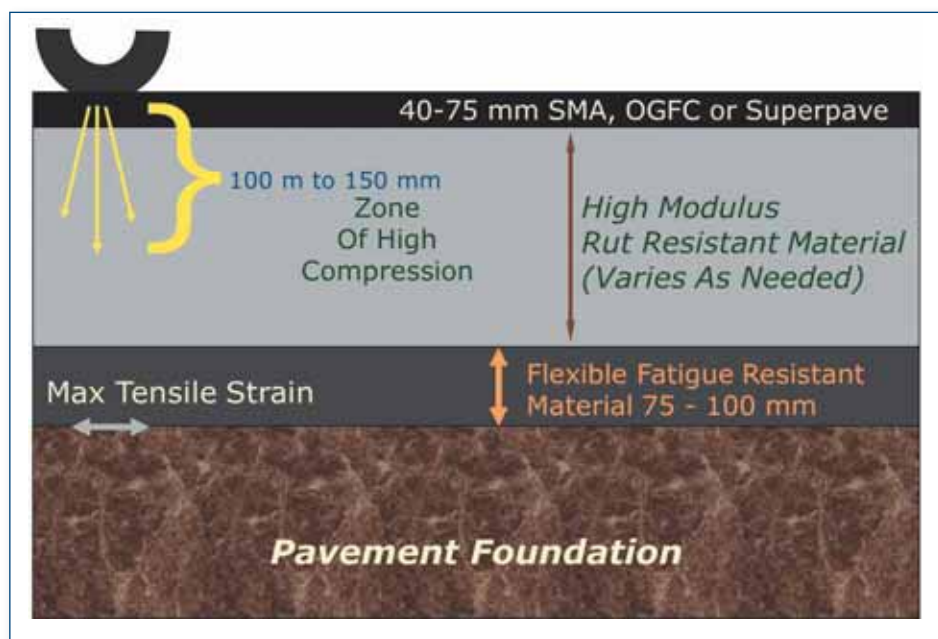


Fig. 2 Schema tipo di una pavimentazione perpetua

spessore variabile in relazione ai carichi, realizzato per offrire resistenza all'ormaiamento e infine quello superficiale di usura realizzato a scelta tra alcune alternative suggerite.

Supponendo che le pavimentazioni siano costruite in modo adeguato, la progettazione si basa sui seguenti presupposti:

- Ⓡ la pavimentazione deve avere sufficiente integrità strutturale e spessore tale da impedire ammaloramenti quali rotture per fatica, deformazioni permanenti o ormaiamenti strutturali;
- Ⓡ la pavimentazione deve essere sufficientemente duratura per resistere alle sollecitazioni del traffico e a quelle ambientali.

A tali condizioni si giunge individuando i valori limite di rottura e controllando la risposta della pavimentazione.

2. I valori limite che individuano la rottura

La progettazione della pavimentazione perpetua richiede la definizione dei punti critici, in risposta alle

sollecitazioni cui la struttura è sottoposta, al di sotto dei quali il danno strutturale non si accumula. In pratica, questo significa che nel processo di progettazione empirico-meccanicistico, sotto questi punti, il danno strutturale è considerato nullo.

Se la pavimentazione è progettata in modo che la maggior parte dei carichi previsti produca sollecitazioni, deformazioni o spostamenti inferiori a quelli che provocherebbero danni strutturali, la progettazione può riferirsi ad una pavimentazione perpetua.

Attualmente, la maggior parte degli approcci alla progettazione delle pavimentazioni perpetue concentrano l'attenzione sulle risposte relative alla deformazione strutturale e alla fessurazione per fatica.

2.1 Deformazione strutturale

Tale deformazione si verifica quando la sollecitazione complessiva imposta sulla struttura dal traffico veicolare è tale da generare consistenti deformazioni permanenti, sia nella fondazione granulare sia nel sottofondo. Questi ammaloramenti richiedono costosi interventi di manutenzione, se non il totale rifacimento della sovrastruttura.

Ovviamente le pavimentazioni con spessori maggiori tendono ad impedire le deformazioni strutturali del sottofondo, limitando le deformazioni agli strati superficiali, fino a qualche centimetro di profondità.

Gli studi più accreditati indicano di utilizzare la tensione verticale a compressione, misurata nella parte superiore del sottofondo, quale parametro di progetto limitante. Il valore scelto per la progettazione è stato di 200 me (microstrain¹), considerando che al di sotto di tale soglia la deformazione plastica negli strati inferiori non si verificherebbe. Operativamente ciò si ottiene aumentando lo spessore »

¹ microstrain = unità di misura adimensionale dello sforzo, pari a 10⁻⁶

totale della sovrastruttura o aumentando la rigidità di uno o più degli strati della pavimentazione.

Un differente approccio è stato invece proposto da alcuni ricercatori dell'Università dell'Illinois che hanno utilizzato quale parametro caratterizzante la rottura il rapporto tra la deformazione del sottofondo e la resistenza a compressione del suolo, noto come Rapporto di sollecitazione del sottofondo (RSS). Essi hanno rilevato nei loro studi che per i terreni argillosi la transizione da una condizione stabile ad una instabile si verifica quando il valore dell'RSS ricadeva nell'intervallo 0,50-0,60. Per la progettazione è stato consigliato di utilizzare un RSS di 0,42.

Anche se è stato riconosciuto che tale criterio non è ben definito, questo approccio permette di tener conto anche della resistenza del sottofondo nella determinazione della risposta limite a rottura della pavimentazione.

2.2 Rottura per fatica

Quando nella pavimentazione si presentano rotture per fatica che si diramano dagli strati inferiori fino agli strati superficiali legati è in atto un fenomeno di ammaloramento accelerato che consente all'acqua di penetrare fino agli strati non legati, causandone il repentino ammaloramento, anche in conseguenza di fenomeni di *pumping* e di dilavamento dei fini.

La rottura per fatica è causa, generalmente, delle ripetute deformazioni che si verificano alla base degli strati legati, dovute al passaggio dei carichi di traffico. Le ricerche hanno dimostrato che limitando le sollecitazioni orizzontali alla base di tali strati si limitano di conseguenza le rotture causate da fenomeni di fatica.

Una schematizzazione del meccanismo di rottura a fatica causato da sforzo a trazione alla base degli strati legati è mostrato in Fig. 3.

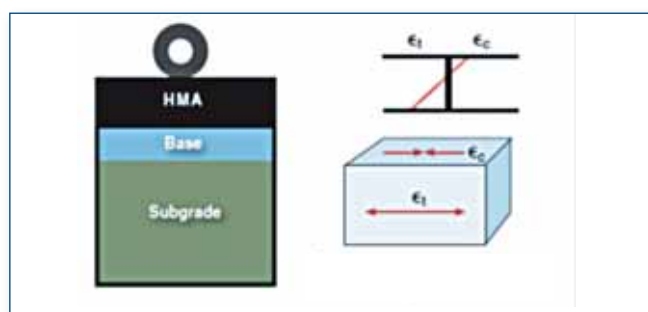


Fig. 3 Meccanismo di rottura a fatica

Un aumento dello spessore della pavimentazione comporterebbe una minore probabilità di propagazione superficiale delle fessurazioni per fatica in conseguenza della maggiore altezza e in conseguenza della riduzione dello sforzo di trazione massimo che si verifica alla base dello strato.

La deformazione longitudinale in questo punto assume il valore massimo nelle pavimentazioni completamente legate e si è dimostrata essere elemento critico nelle pavimentazioni a spessore sottile.

Quando la forza di trazione alla base dello strato legato è ridotta, la posizione critica per la forza di trazione si sposta dalla base dello strato alla superficie della struttura dove l'interazione degli pneumatici e l'invecchiamento del legante contribuiscono ad indurire lo strato di usura, rendendolo in tal modo più fragile e soggetto a rottura per fessurazione tipo *top-down* (dall'alto verso il basso).

In tale circostanza, poiché l'ammaloramento è confinato allo strato di usura superficiale, è possibile limitare la manutenzione a tale strato, ricorrendo, tra l'altro, a soli interventi funzionali (e non strutturali quindi) di ripristino dell'aderenza e della regolarità.

Anche per questo parametro di rottura (indicato come limite di resistenza a fatica - FEL) i ricercatori hanno individuato un limite al di sotto del quale il danno non si presenta, ritenendo che la fessurazione per fatica non si verifica quando la tensione alla base dello strato legato è tenuta al di sotto di 200 me. Per la progettazione, il valore suggerito è di 150 me.

Altri ricercatori hanno suggerito di utilizzare quale parametro di rottura a fatica un valore percentile (es.: 95%) del campo di tensioni che potrebbero essere usate come valore di progetto, ricavate in laboratorio.

3. L'approccio alla progettazione perpetua

Sono stati adottati diversi approcci per sviluppare progetti di pavimentazioni perpetue, tutti comunque riconducibili a procedure che implementano qualche particolare aspetto di progettazione empirico-meccanicistica, appositamente adattato, nel tentativo di caratterizzare e minimizzare i danni alla pavimentazione.

3.1 Pavimentazione ad elevato traffico veicolare

Specifici programmi di calcolo sono stati sviluppati a partire dal 2000, modificando opportunamente alcuni concetti di analisi elastica e di analisi statistica, al fine di adattare tali teorie al caso delle pavimentazioni stradali.

A titolo di esempio, vengono fornite alcune informazioni generali sul programma di calcolo (*PerRoad*) sviluppato dalla APA e disponibile anche sul sito del SITEB (www.siteb.it/perRoad.rar).

Obiettivo dell'analisi computerizzata è quello di determinare le tensioni e le deformazioni che si rivelano dannose ai fini della resistenza a fatica e dell'ormaiamento (*rutting*).

Tra i parametri di input necessari alla caratterizzazione della sovrastruttura, dei carichi di traffico e delle condizioni ambientali al contorno sono presi in considerazione: i moduli elastici (stagionali e annuali) degli strati non legati, gli spessori degli strati legati e non legati, gli spettri di carico del traffico di progetto, l'entità dei parametri limite per la fatica, la posizione per l'analisi della risposta della pavimentazione.

L'*output* consiste nella valutazione della percentuale di ripetizioni di carico in grado di generare una risposta della pavimentazione i cui valori sono inferiori ai limiti imposti in ingresso, in una stima della quantità di danni subiti per carico dell'asse singolo e nella stima del tempo occorrente affinché il danno accumulato risulti essere pari a 0,1 (il valore 1,0 è associato alla rottura della pavimentazione).

Per le pavimentazioni ad alto volume di traffico quindi la risposta della pavimentazione viene valutata stimando la percentuale di ripetizioni del carico consentita entro i valori limite di rottura. Risulta generalmente consigliato, per la progettazione perpetua di strade ad elevato traffico, imporre percentuali di ripetizioni del carico del 90% o superiori. In caso contrario è necessario incrementare lo spessore del pacchetto, con un processo iterativo del tipo di quello indicato in **Fig. 4**.

Nel 1999, in California (nei pressi di Long Beach), fu realizzata una pavimentazione per la *Interstate 710*, applicando intenzionalmente i dettami della progettazione perpetua (**Fig. 5**).

La porzione "tutt'asfalto" di questo progetto consisteva in un totale di circa 13" (325 mm) di conglomerato bituminoso nel cui strato più basso, di 3" (75 mm), era stato

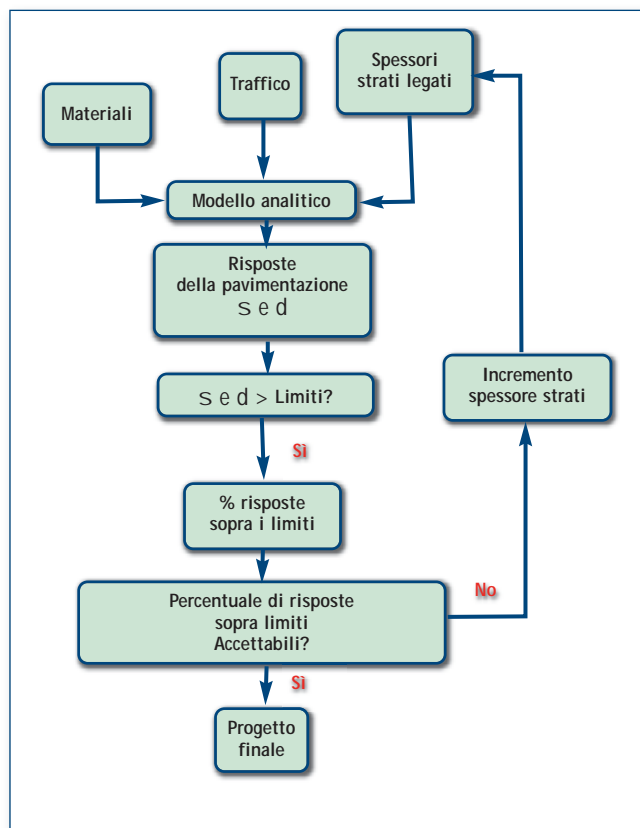


Fig. 4 Schema di progettazione per pavimentazioni ad elevato traffico veicolare

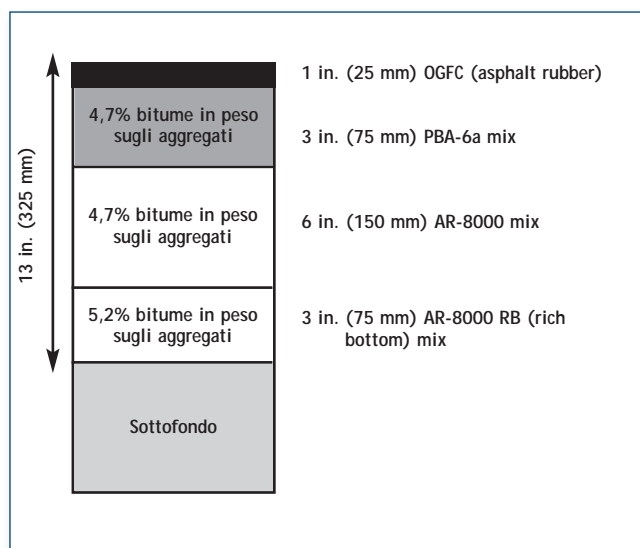


Fig. 5 La sezione della I-710

umentato il tenore di bitume dello 0,5 per cento rispetto al valore ottimale del 4,7%. Questo maggiore contenuto di legante era reso necessario per migliorare la durata a fatica della pavimentazione e per migliorare la durabilità del conglomerato bituminoso in quello strato. Sopra questo strato ne era stato realizzato uno di 6" (150 mm), impiegando la stessa curva granulometrica e la stessa tipologia di bitume dello strato sottostante, variando solamente il contenuto di legante che veniva riportato al valore ottimale del 4,7%. Quale legante venne utilizzato un bitume modificato di grado relativamente rigido affinché ne fosse migliorata la resistenza all'ormaiamento.

I restanti 3" sovrastanti vennero realizzati impiegando leganti polimerici fortemente modificati. Quale strato superficiale di usura, di 25 mm di spessore, venne impiegato un conglomerato tipo *open-grade* con bitume tipo *asphalt rubber*.

Negli anni successivi, verso il 2005, vennero sviluppati i concetti di *perpetual pavements* con riferimento a degli studi di laboratorio e proposti modelli che facevano ricorso agli elementi finiti per schematizzare la pavimentazione bituminosa. Tra di essi, quello sviluppato dall'Università dell'Illinois, appunto denominato ILLI-Pave, che prendeva in considerazione un certo carico di traffico per asse singolo equivalente, ipotizzando che tale valore fosse quello effettivamente atteso per la pavimentazione.

Il lavoro ha dimostrato che se la deformazione alla base dello strato legato risulti inferiore al FEL, non si verifica fessurazione per fenomeni di affaticamento pur essendo trascorso fino al 30% della durata di vita a fatica prevista per la pavimentazione.

Queste considerazioni sono quindi state verificate con misurazioni di deflessione sul campo: si è pertanto potuto concludere che, secondo tale criterio, molte pavimentazioni esistenti possono essere considerate quali perpetue. In tal senso anche altri metodi di progettazione in uso possono essere riferiti a progettazioni per pavimentazioni perpetue, prevedendo anche che l'ottimizzazione del sistema esistente potrebbe portare ad una riduzione dello spessore della pavimentazione di circa 4" (100 mm).

Nel 2008 anche l'AASHTO ha pubblicato la Guida *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* che può es-

sere utilizzata, con riferimento alla progettazione perpetua, per quanto riguarda l'individuazione dei limiti di resistenza alla fatica. Tali valori sono compresi in un intervallo che va da 75 a 200 me; conseguentemente il metodo di calcolo proposto nella guida, denominato MEP DG, è in buona corrispondenza con gli altri metodi di calcolo propri delle pavimentazioni perpetue.

3.2 Pavimentazione a basso traffico veicolare

I concetti di pavimentazione perpetua sono stati applicati anche al caso di pavimentazioni con ridotto traffico veicolare; è stato verificato che con tali criteri le prestazioni della sovrastruttura duravano molto più al lungo rispetto al caso di *mix design* tradizionale e anche il costo totale risultava essere più basso.

Un metodo per la progettazione perpetua di tale tipologia di strade è stato derivato da quello originale, effettuando delle simulazioni applicate ad un elevato numero di casi con entità di traffico da medio a basso.

I dati di ingresso per l'analisi della risposta della pavimentazione sono in questo caso i seguenti:

- ® classificazione funzionale della strada;
- ® traffico medio giornaliero annuo;
- ® stima della crescita percentuale di traffico di progetto;
- ® classificazione del terreno di sottofondo e suo modulo;
- ® spessore dello strato di base non legata;
- ® modulo della miscela bituminosa.

La risposta della pavimentazione e il conseguente dimensionamento degli strati avviene riferendosi a limiti a rottura ricavati per una vita utile di 30 anni.

3.3 Pavimentazione ad alto modulo

Le pavimentazioni ad alto modulo consentono di impiegare meno materiale e di ridurre gli spessori. Nell'approccio al dimensionamento perpetuo, una miscela di conglomerato molto rigido viene utilizzata per realizzare lo strato di base e per quelli intermedi. In queste pavimentazioni la miscela per lo strato di base è realizzata impiegando legante bituminoso molto duro, in dosaggi relativamente elevati, con basse percentuali di vuoti residui. Tale scelta permette una riduzione del 25-30% dello spessore della sovrastruttura. Il comportamento a fatica ne risulta migliorato in conseguenza dell'utilizzo di un maggior quantitativo di legante mentre la resistenza a rottura rimane pressoché invariata.

3.4 Progetti di riabilitazione delle pavimentazioni

Uno degli obiettivi principali del secondo programma americano denominato SHRP2 (Progetto R23) era stato quello di individuare un metodo per il rapido rinnovamento e riabilitazione delle sovrastrutture esistenti, avendo contemporaneamente verificato se per le stesse fossero soddisfatte, o potevano essere applicati, i concetti propri delle pavimentazioni perpetue.

Ciò ha portato alla scelta di una metodologia *standard* che prevedeva il ricoprimento di pavimentazioni flessibili con un altro strato di conglomerato bituminoso e il ricoprimento di pavimentazioni rigide con uno strato di miscela bituminosa confezionata con polverino di gomma (*asphalt rubber*).

4. I materiali costituenti gli strati

A differenza delle procedure di progettazione rigorosamente empiriche, i metodi empirico-meccanicistici richiamano le proprietà dei materiali direttamente come *input*. Ciò richiede metodi e strumenti specifici per determinare queste proprietà e per capire come queste variano con le condizioni ambientali.

La definizione delle proprietà e il modo in cui esse variano è fondamentale per la progettazione perpetua in quanto la maggior parte dei danni si verifica quando la struttura della pavimentazione è più debole ed i carichi sono i più alti; l'obiettivo della progettazione è quello di ridurre al minimo questo danno.

4.1 La fondazione (il sottofondo)

La progettazione e la costruzione di un solido, stabile e coeso strato di fondazione (soprattutto quando il sottofondo non ne abbia i requisiti) è essenziale per la realizzazione di una pavimentazione perpetua.

Durante la costruzione, la fondazione fornisce una piattaforma di lavoro che supporta i mezzi d'opera e fornisce resistenza ai rulli in modo che gli strati legati soprastanti possano ottenere la densità desiderata. Per tutto il periodo di vita utile, la fondazione fornisce supporto ai carichi di traffico ed è fondamentale per ridurre la variazione di sollecitazioni indotte da stagione a stagione a causa del gelo-disgelo, della variazione di umidità o per la presenza di argille soggette

a rigonfiamento a causa di acqua libera. In particolari condizioni climatiche e in presenza di terreni suscettibili, generalmente, si richiede che lo spessore totale della sovrastruttura sia almeno uguale o 1,5 volte maggiore della prevista profondità del gelo. Ovviamente i materiali costituenti gli strati, soprattutto quelli non legati, devono necessariamente essere non sensibili al gelo.

Gli strati di fondazione sono costituiti generalmente da strati di sottofondo appositamente compattati o che hanno subito un processo di stabilizzazione chimica o meccanica (misto granulare stabilizzato). Indipendentemente dal tipo di materiale impiegato, la fondazione deve soddisfare alcuni requisiti minimi di resistenza per tutta la fase di costruzione, così come durante la vita della pavimentazione.

Nella progettazione di pavimentazioni perpetue è importante sapere come i cambiamenti stagionali nei moduli dei materiali non legati possano influenzare la risposta della pavimentazione; in tali circostanze può essere necessario considerare la condizione peggiore per escludere danni indebiti durante una particolare stagione.

Inoltre, in considerazione della locale situazione e del clima, possono essere richieste, prima della realizzazione dello strato di fondazione, delle opere di captazione e drenaggio delle acque meteoriche e/o di falda. Indicativamente uno spessore tipico per lo strato di fondazione è considerato pari a 12" (30 cm).

Alcuni Stati americani prescrivono che per terreni di sottofondo con valore CBR superiore ad 8 non è richiesto nessun intervento; per valori di CBR compresi tra 8 e 6 »

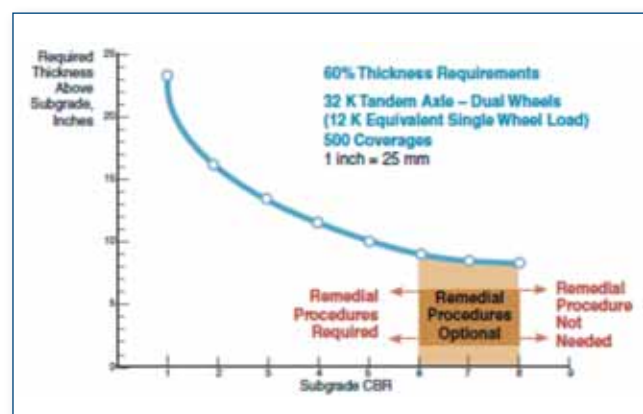


Fig. 6 Valori CBR del sottofondo

è richiesto un intervento di stabilizzazione o miglioramento, generalmente eseguito con calce o tramite asportazione e integrazione con materiale granulare, con eventualmente aggiunta di geosintetici.

Con tale operazione si riduce anche il fenomeno di rotture superficiali dello strato in conseguenza del traffico dei mezzi d'opera.

Valori di CBR al di sotto di 6 comporterebbero invece un'eccessiva deformazione già a seguito della sola costruzione dei successivi strati non legati. In tal caso si interviene sugli spessori, con incrementi inversamente proporzionali ai valori delle resistenze riscontrate (Fig. 6). Ai fini della determinazione dei valori di resistenza vengono suggeriti metodi di prova in-situ che utilizzano specifiche apparecchiature (es. prove di carico su piastra, statica e/o dinamica, FWD).

Per esempio con il FWD (con carico di 9.000 libbre) vengono prescritti dei valori di resistenza (rigidità) in corrispondenza dello strato di sottofondo (5.800 psi²) e in corrispondenza della sotto-base (9.500 psi).

Nel Regno Unito il dimensionamento della fondazione avviene con riferimento alla seguente Tab. 1.

In relazione al valore CBR del sottofondo vengono indicati gli spessori di due strati non legati sovrastanti denominati "sotto-base" e "capping" (riempimento), intendendo per capping un materiale di qualità meno pregiata rispetto a quello utilizzato per la sotto-base. Per un CBR del sottofondo inferiore a 15, è richiesto un spessore minimo di sotto-base di 6" (150 mm).

Il Ministero tedesco dei Trasporti (1989) richiede un valore minimo del modulo del sottofondo di circa 6.500 psi, ricavato utilizzando una piastra di carico di 300 mm. Nella parte superiore dello strato di fondazione, vengono invece richiesti circa 17.000 psi per condizioni di traffico leggero e circa 26.000 psi per traffico pesante.

Tab. 1 UK: spessori dei due strati di fondazione in funzione del CBR del sottofondo

Subgrade CBR	< 2	2 - 5	> 5
Subbase Thickness, in.	6	6	9
Capping Thickness, in.	24	14	—

² 1 bar = 15 psi = 100 kPa = 0,99 atm

I francesi fanno riferimento a due metodi di misura della resistenza (di cui almeno uno deve essere verificato), applicati al pacchetto stradale già costruito in opera: una deflessione inferiore a 0,1 mm in condizioni di carico di 14 ton/asse o un modulo superiore a 7.300 psi (ricavato con *plate bearing test*).

In Italia l'ANAS, a titolo di riferimento, propone diverse tipologie di strati di fondazione, realizzati facendo ricorso a leganti idraulici, bitume schiumato, misti granulari stabilizzati o strati non legati. Il controllo della portanza è effettuato con il LFWD (con sforzo di sollecitazione di 70 kPa e durata dell'impulso di 30 msec) assumendo valori limite, calcolati dopo 4 ore e dopo 1 giorno, differenziati a seconda della tipologia di strato messo in opera (45-50 MPa dopo 4 h e 180-170 MPa dopo 1 giorno).

4.2 Gli strati legati: materiali e mix design

Poiché ogni singolo strato della pavimentazione assolve ad una specifica funzione è opportuno impiegare delle miscele bituminose appositamente progettate. Quali funzioni principali degli strati possiamo considerare: lo strato legato inferiore deve fornire un'eccellente durata e offrire resistenza alla fessurazione per fatica; lo strato intermedio deve offrire durezza e resistenza all'ormaiamento; lo strato superficiale deve essere progettato per sopportare il traffico e l'esposizione diretta all'ambiente esterno.

L'uso di asfalto recuperato (RAP) può essere d'aiuto per irrigidire le miscele e fornire resistenza all'ormaiamento, possibilmente senza aggiunta di polimeri modificanti.

Nel tentativo di fornire una guida sulla migliore applicazione per i vari tipi di miscele, in funzione della dimensione massima dell'inerte (NMA - *Nominal Maximum Aggregate Size*), dello spessore previsto per lo strato e del livello di traffico, alcuni ricercatori americani hanno indicato una tabella di riferimento per la selezione delle miscele destinate alle pavimentazioni perpetue (Tab. 2).

Il semplice aumento dello spessore dello strato non dà, però, assoluta garanzia che la pavimentazione avrà una più lunga durata, soprattutto in termini di resistenza alla fatica. Contemporaneamente è stato dimostrato che aumentando lo spessore dello strato diminuisce la tensione di trazione alla base di esso ma l'entità della

Tab. 2 Guida alla scelta delle miscele

(Newcomb and Hansen, 2006)

Pavement Layer	Mix Type	NMAS, mm (in.)	Lift Thickness Range, mm (in.) ¹	Traffic Level, MESAL ^{2,3}		
				<0.3	0.3-10	>10
Base	Dense, Fine	37.5 (1-1/2)	110-150 (4.5-6)	√√	√√	√√
		25 (1)	75-100 (3-4)	√√	√√	√√
		19 (3/4)	60-75 (2.5-3)	√√	√√	√√
	Dense, Coarse	37.5 (1-1/2)	150-190 (6-7.5)	√√	√√	√√
		25 (1)	100-125 (4-5)	√√	√√	√√
		19 (3/4)	75-100 (3-4)	√√	√√	√√
ATPB	37.5 (1-1/2)	75-100 (3-4)			√√	
	25 (1)	50-100 (2-4)			√√	
	19 (3/4)	40-75 (1.5-3)			√√	
Intermediate	Dense, Fine	25 (1)	75-100 (3-4)	√√	√√	√√
		19 (3/4)	60-75 (2.5-3)	√√	√√	√√
	Dense, Coarse	25 (1)	100-125 (4-5)	√√	√√	√√
		19 (3/4)	75-100 (3-4)	√√	√√	√√
Surface	Dense, Fine	19 (3/4)	60-75 (2.5-3)	√√	√√	√
		12.5 (1/2)	40-60 (1.5-2.5)	√√	√√	√
		9.5 (3/8)	25-40 (1-1.5)	√√	√√	√
		4.75 (1/4)	15-20 (0.5-0.75)	√√	√√	√
	Dense, Coarse	19 (3/4)	75-100 (3-4)			√√
		12.5 (1/2)	50-60 (2-2.5)			√√
		9.5 (3/8)	40-50 (1.5-2)			√√
	SMA	19 (3/4)	50-60 (2-2.5)			√ √√
		12.5 (1/2)	40-50 (1.5-2)			√ √√
		9.5 (3/8)	25-40 (1-1.5)			√ √√
	OGFC	12.5 (1/2)	25-40 (1-1.5)			√√
		9.5 (3/8)	20-25 (0.75-1)			√√

Notes: 1. Lift thickness conversion is approximate for practical design.
 2. MESAL - Millions of Equivalent Single Axle Loads
 3. (√) indicates "Recommended," (√√) indicates "Strongly Recommended."

riduzione dipende dalla miscela con cui lo strato è realizzato. Quindi, in un corretto processo di progettazione, è importante specificare la miscela giusta per la appropriata funzione da esplicare nella pavimentazione.

4.3 Miscela per strato di base

Lo strato di base in conglomerato bituminoso deve resistere alla tendenza a rottura per fatica sotto i carichi ripetuti del traffico veicolare.

A partire dal 2001 sono stati avviati un certo numero di studi di laboratorio sia per la caratterizzazione del limite di resistenza alla fatica (FEL), sia per capire la meccanica di base del fenomeno, nonché per l'ideazione di metodiche di applicazione di tali concetti alla progettazione perpetua. Il FEL è stato definito come "livello di tensione al di sotto del quale non vi è alcun danno cumulativo su un numero infinito di cicli" ed è stato dimostrato che per definire con precisione un tale valore limite è opportuno mettere in relazione fattori quali gli effetti della tem-

peratura, l'invecchiamento e la composizione stessa della miscela.

Studi di laboratorio hanno verificato che a bassi livelli di deformazione vi è un sensibile cambiamento nella risposta della pavimentazione alle sollecitazioni cicliche, con conseguenti minori danni da fatica.

Un contenuto di legante di progetto "più elevato" (entro certi limiti) può servire per migliorare e proteggere la miscela da fenomeni di rottura per fatica (Fig. 7) e permette al materiale di essere compattato ad una densità superiore, in quanto è il contenuto di legante a fornire al-

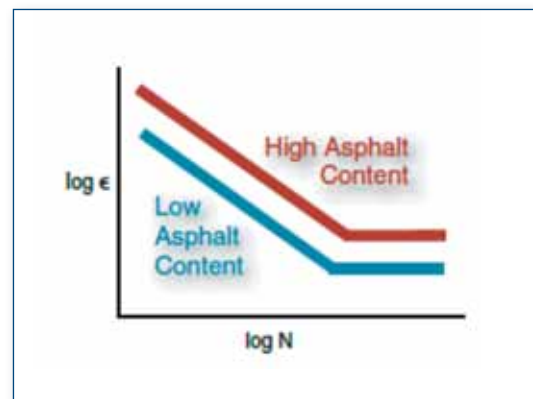


Fig. 7 Miglioramento della resistenza a fatica all'aumentare del contenuto di legante

la miscela il giusto grado di flessibilità tale da inibire la formazione e lo sviluppo delle fessure. Ciò, in combinazione con un adeguato spessore complessivo degli strati legati che garantisce contro la risalita delle fessurazioni da fatica che si dipartono dallo strato inferiore (Fig. 8).

È importante comunque sottolineare che il miglioramento delle resistenze a fatica è garantito dalla adeguata compattazione dello strato, senza la quale, sia l'aumento del tenore di legante sia l'incremento dello spessore dello strato non consentirebbero il raggiungimento del risultato atteso.

Sulla base di queste considerazioni molte procedure consolidate di progettazione delle miscele per strati di base sono state modificate, imponendo condizioni di compattazione tali da richiedere un maggior contenuto di legante. »

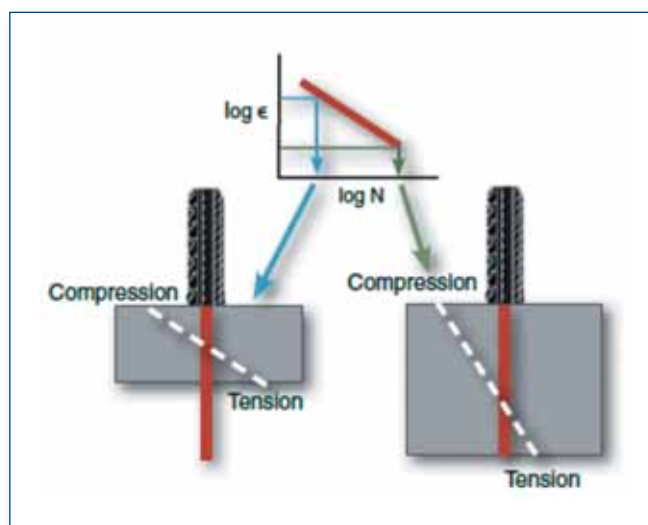


Fig. 8 Riduzione delle tensioni alla base dello strato legato all'aumentare dello spessore

Numerosi studi di laboratorio hanno cercato di definire il FEL per tali miscele; quale risultato condiviso è stato dimostrato che per esse esiste un limite di resistenza alla fatica e che ad influire sul valore è soprattutto il tipo di legante, rispetto al contenuto dello stesso. Quale limite di riferimento è stato assunto il valore di 70 me (il campione di miscele testate nello studio era pari a 20). Un altro approccio per garantire la durata a fatica sarebbe quello di progettare uno spessore per una struttura rigida in modo tale che la deformazione di trazione sul fondo degli strati legati a bitume venga ridotta al minimo, nella misura in cui il danno cumulativo non si verifichi. Ciò consentirebbe un mix design unico, da utilizzare sia per lo strato di base sia per quelli intermedi.

Questa strategia è utilizzata in un metodo inglese proposto dal TRL (*Transport Research Laboratory*) così come in un metodo francese pubblicato da EAPA nel 2009. Alcuni ricercatori suggerivano che utilizzando tale metodologia, prevedendo quindi un materiale rigido per gli strati di base e quelli intermedi, lo spessore complessivo di conglomerato bituminoso poteva ridursi fino al 40 per cento. A tal fine veniva impiegato un legante bituminoso fortemente modificato, con contenuto percentuale di polimero SBS variabile dal 6 al 7,5%. Altri, al contrario, sostenevano che il miglior modo per

migliorare la durata a fatica era quello di impiegare un bitume duro, non modificato, in quantitativi piuttosto elevati, tali da permettere valori piuttosto limitati di percentuali di vuoti residui.

In ogni caso, considerando che lo strato di base è quello che viene prima a contatto prolungato con l'acqua, è opportuno controllare la sensibilità all'acqua (nonché la distribuzione e l'uniformità dei vuoti residui) per verificarne il comportamento al gelo e all'umidità.

4.4 Miscela per strati intermedi

Lo strato intermedio deve combinare le qualità di stabilità e di durata; la stabilità può essere conseguita realizzando una miscela con elevato attrito interno, povera di frazioni fine (maggiori punti di contatto tra gli aggregati grossi), con un elevato valore del diametro nominale massimo dell'aggregato e con un bitume ad elevato punto di rammollimento. Ciò è fondamentale soprattutto nei primi 40 mm di pavimentazione, dove le forti sollecitazioni possono causare oramaiamento in conseguenza di rottura per azioni di taglio indotte dai carichi. Per le miscele con un diametro nominale massimo fino a 37,5 mm può essere utilizzato il *mix design* previsto dal *Superpave*.

Tuttavia va notato che l'impiego di aggregati con valori di diametro massimo elevati può portare alla segregazione della miscela e ad un eccessivo contenuto di vuoti residui che possono riempirsi pericolosamente di acqua. In tali circostanze occorre prestare attenzione nel richiedere, con il *mix design*, più bassi valori di vuoti residui e nel garantire alti livelli di compattazione in opera.

Per la scelta del legante da utilizzare in questo strato si prevede l'utilizzo del sistema PG (*Performance Grades, Superpave*), con la scelta della temperatura massima per il legante pari a quella massima ambientale prevista sulla superficie della sovrastruttura; per la temperatura più bassa ci si può riferire a valori di alcuni gradi più elevati rispetto a quella minima ambientale utilizzata per la scelta del legante dello strato superficiale.

Per esempio, se un PG 70-28 viene specificato per lo strato superficiale, un PG 70-22 può essere usato per lo strato intermedio.

Per la determinazione del corretto grado PG del legante per ogni strato della sovrastruttura è disponibile un apposito programma di calcolo (LTPP Bind software), ri-

cavato nell'ambito del LTPP - *Long-Term Pavement Performance Program*.

Il processo di *mix design* per questo strato potrebbe essere quello indicato dall'approccio *standard* del programma Superpave. Anche la verifica delle prestazioni e i controlli possono essere effettuati secondo le metodologie *standard* previste dal Superpave, includendo sempre test di ormaiamento e di suscettibilità all'acqua. Ai fini progettuali, la determinazione del modulo dello strato può essere fatta sia in laboratorio sia con prove di deflessione in situ, attraverso procedure di *back-analisi*, riferendosi alla temperatura media mensile della pavimentazione.

4.5 Miscela per strati di usura

I requisiti dello strato di usura superficiale sono direttamente correlati alle condizioni di traffico e ambientali, alle esperienze locali nonché alle condizioni economiche. I requisiti prestazionali riguardano la resistenza all'ormaiamento e alle rotture superficiali, la capacità di attenuare il rumore di rotolamento pneumatico-strada nonché la capacità di limitare i fenomeni di aquaplaning, gli spruzzi e le nebbie d'acqua. In relazione a ciò, le indicazioni fornite per la scelta delle miscele di usura sono relative allo SMA, o a tre distinte tipologie di miscela individuate nell'ambito del Superpave e definite *dense, fine - dense, course* e *open graded friction course (OGFC)*.

In alcuni casi, soprattutto nelle aree urbane con elevati volumi di traffico lento e pesante, il ricorso allo SMA risulterebbe quasi obbligato.

Nei casi in cui i carichi di traffico non sono troppo elevati o sono relativi a carichi leggeri, al posto dello SMA può risultare più appropriato proporre uno strato di usura progettato seguendo le specifiche Superpave (*dense-graded Superpave mixture*).

Miscele tipo *open-grade* vengono invece suggerite quando si vuole dare priorità allo smaltimento superficiale delle acque meteoriche. La progettazione di queste miscele impone un contenuto percentuale di vuoti che varia dal 18 al 22%.

Il tipo di legante da utilizzare per lo strato di usura (grado PG), in linea con la prassi Superpave, deve essere appropriato per tipologia di clima e traffico di quella determinata zona. Anche in questo caso è suggerito l'impiego del programma di calcolo previsto dal LTPP.

5. Costruzione

La costruzione di pavimentazioni perpetue non comporta apprezzabili differenze rispetto alla costruzione di pavimentazioni convenzionali ma richiede particolare attenzione ai dettagli e un impegno appropriato per costruire in qualità i singoli strati.

Il processo di costruzione deve sempre essere accompagnato da indagini e prove sperimentali in grado di fornire un *feedback* continuo sulla qualità dei materiali e sulle operazioni di cantiere.

Il sottofondo in quanto tale o lo strato di fondazione, se necessario, deve essere in grado di supportare le operazioni di compattazione e di pavimentazione durante la costruzione.

I materiali che meglio si prestano a tale scopo sono materiali sabbiosi o misti e ghiaia naturale, materiali non stabilizzati o materiali stabilizzati, quali misti granulari e misti cementati.

Quale strato sul quale impostare la pavimentazione, il sottofondo, o la fondazione, deve essere ben compattato, risultare liscio, uniforme e rigido quanto basta per supportare i carichi di compattazione degli strati superiori. Particolarmente importanti in questa fase sono i controlli da effettuare in situ per la verifica delle qualità portanti.

L'insieme di una corretta progettazione strutturale, un corretto processo di *mix design* per i materiali e una corretta pratica costruttiva garantiscono un risultato finale appropriato.

I problemi che invece possono interessare la costruzione degli strati bituminosi e che risultano piuttosto dannosi per le prestazioni dell'intera sovrastruttura sono la mancanza di legame all'interfaccia tra gli strati, la mancanza del giusto grado di addensamento, la segregazione e la permeabilità all'acqua. Sebbene alcuni di questi problemi siano collegati tra loro, si consideri che gli stessi possono essere originati da cause diverse.

5.1 Il legame all'interfaccia tra gli strati

Un problema che può influenzare l'addensamento dello strato legato di base è l'assenza di attrito, e il conseguente scorrimento, all'interfaccia con lo strato di sottofondo o fondazione. In tal caso la compattazione dello strato di base può risultare inefficace in conseguenza dello scorrimento della miscela bituminosa, causato »

dal passaggio dei rulli. Questa condizione di assenza di "interconnessione" tra i due strati può essere dovuta alla presenza eccessiva di materiale polverulento sulla superficie del piano di posa della base, causata dal traffico di cantiere, o ad una stabilizzazione che presenta un eccesso di materiale fino libero sulla superficie. Più semplicemente può essere causata dalla presenza di acqua o umidità superficiale dello strato non legato.

In questo ultimo caso, un rimedio potrebbe essere quello di attendere che il materiale si asciughi sino ad un grado di umidità accettabile; negli altri casi può risultare conveniente scavare i primi pochi centimetri superficiali per rimuovere il materiale polverulento, aggiungere del materiale granulare sciolto appositamente confezionato o, in casi estremi, prevedere la stesa di un apposito strato supplementare (*chip seal*).

5.2 L'addensamento

La mancanza di densità, ovvero il ridotto grado di addensamento, è pregiudizievole per l'ottenimento delle necessarie prestazioni, in quanto causa di rotture (*cracking*) negli strati inferiori e causa di ormaimento in quelli superiori.

Bassa densità dello strato equivale quindi ad una vita utile inferiore e ad un più basso limite di resistenza alla fatica; se il limite di resistenza a fatica causato dal ridotto grado di addensamento è inferiore a quello di progetto, la pavimentazione collasserà dal basso con rotture che progressivamente si dirameranno anche in superficie, attraversando tutti gli strati della sovrastruttura.

Ai fini della compattazione è importante anche mettere in relazione lo spessore dello strato da compattare con la dimensione massima dell'aggregato utilizzato: per miscele a granulometria fine, in generale, lo spessore minimo dello strato deve essere tre o quattro volte quello del diametro massimo nominale; nel caso di miscele a granulometria grossa è richiesto uno spessore minimo almeno quattro o cinque volte superiore al D_{max} .

La mancanza di costipamento negli strati legati a bitume può essere causata da una eccessiva rigidità, conseguente l'impiego di leganti che sono stati ossidati da un eccessivo surriscaldamento nel processo di miscelazione o di produzione all'impianto. Questo problema si aggrava quando i leganti bituminosi utilizzati sono di tipo modificato con polimeri.

La lavorabilità delle miscele bituminose può essere notevolmente migliorata utilizzando tecnologia tipo *Warm mix* che permettono al materiale di essere steso e compattato a temperature decisamente inferiori rispetto a quelle necessarie agli asfalti convenzionali.

5.3 La segregazione

La segregazione delle miscele rappresenta un'altra causa di ammaloramento repentino della sovrastruttura. Essa può essere il risultato finale di una separazione fisica tra aggregati grossi e aggregati fini che si manifesta durante la fase di produzione, trasporto e stesa della miscela.

Il problema si manifesta in particolar modo per le miscele con elevate percentuali di aggregati grossi in quanto possono generarsi, in fase di messa in opera, delle vere e proprie "tasche grossolane" che possono dar seguito ad infiltrazioni di acqua ed umidità, rendendo lo strato pericolosamente permeabile.

La corretta movimentazione delle miscele sia in fase di produzione che di trasporto e messa in opera può essere determinante per evitare questo problema. La corretta rimescolazione del materiale prima delle operazioni di stesa può eliminare quasi completamente il fenomeno.

Strettamente correlata alla segregazione è il problema del minor addensamento in corrispondenza dei bordi longitudinali dello strato posto in opera (giunti longitudinali); poiché il grado di addensamento tende ad essere inferiore ai bordi (anche per la ridotta azione costipante dei rulli a seguito del mancato confinamento), la miscela può essere più permeabile in corrispondenza di tali zone, più suscettibile di infiltrazioni di umidità e quindi maggiormente soggetta ad ammaloramento. Per evitare ciò è opportuno riferirsi alle migliori pratiche per la realizzazione dei giunti longitudinali o stendere in maniera contemporanea, quando possibile, le due strisciate adiacenti.

Per tutte le fasi di costruzione è opportuno procedere con delle verifiche volumetriche per il controllo della densità e del costipamento. Del resto la realizzazione di pavimentazioni perpetue non differisce da quella per sovrastrutture ordinarie: occorre garantire uno strato di fondazione resistente ed uniforme, occorre raggiungere il giusto grado di addensamento in ciascuna miscela legata; è indispensabile assicurare l'ancoraggio tra i diversi strati.

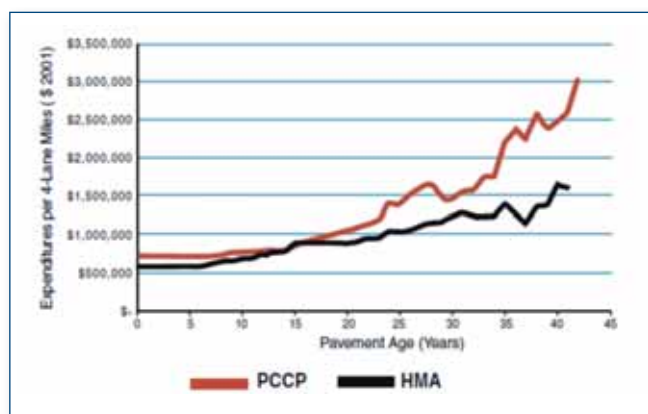


Fig. 9a Costi in confronto con una pavimentazione rigida (PCCP)

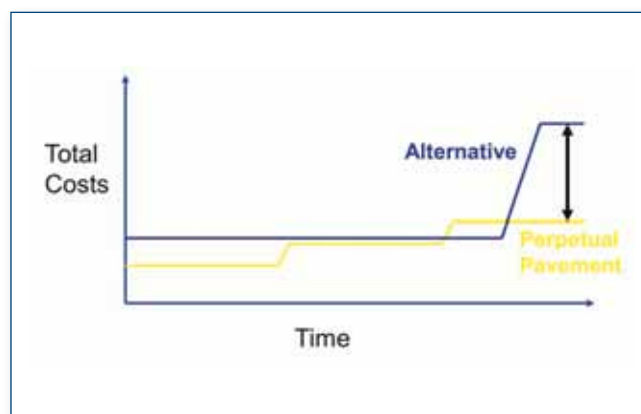


Fig. 9b Costi in confronto con una pavimentazione bituminosa tradizionale

6. Prestazioni e aspetti economici

Le prestazioni delle pavimentazioni perpetue devono essere valutate sia dal punto di vista tecnico-ingegneristico che da quello economico. Una progettazione che tiene conto dei difetti strutturali, la corretta selezione dei materiali, le buone pratiche di costruzione e le attività di pianificazione per mantenere la funzionalità della pavimentazione sono gli aspetti principali da controllare per garantire le prestazioni tecniche della sovrastruttura; progettazione efficiente, bassi costi di manutenzione e riabilitazione e la lunga durata di vita utile garantiranno invece l'economia della pavimentazione.

Nel concetto di *perpetual pavement* è necessario monitorare periodicamente le condizioni della sovrastruttura per tenere traccia dei difetti di superficie e far sì che questi non progrediscano ulteriormente nella struttura, rispetto ai pochi centimetri superficiali. Così, ammaloramenti quali rotture da fatica tipo *top-down*, rotture da *cracking* termico, ormaiamenti e deformazioni di superficie possono essere limitati al manto di usura, il quale, mediamente, può essere riabilitato dopo 12-13 anni. A tal proposito, uno studio danese condotto su 176 sezioni di pavimentazione ha evidenziato che le rotture superficiali, su strati di conglomerato bituminoso più spessi di 6" (150 mm), si limitano ad una profondità non superiore ai 4" (100 mm). I ricercatori hanno potuto concludere che, per strati in conglomerato bituminoso di un certo spessore, le rotture per fatica negli

strati superficiali sono praticamente da escludere; i difetti superficiali in tal caso sono da ricondurre esclusivamente a rotture superficiali.

Col passare del tempo poi gli strati che offrono resistenza strutturale diventano sempre più "forti" invece di indebolirsi come comunemente assunto.

Alcune considerazioni di carattere economico riferite all'intero ciclo di vita della pavimentazione, condotte per confronto con una pavimentazione rigida in calcestruzzo, attestano ancora di più la convenienza della soluzione in conglomerato bituminoso. Uno studio del 2002, condotto in Kansas da Cross e Parsons, ha concluso, come mostrato in Fig. 9a, che in media, nell'arco di 40 anni, i costi di manutenzione sono sempre inferiori se riferiti a pavimentazioni legate a bitume. Una tale situazione si ripropone se il confronto è riferito a lungo termine tra una pavimentazione in conglomerato bituminoso tradizionale ed una definita con i criteri delle pavimentazioni perpetue Fig. 9b.

7. Conclusioni

Nel corso degli anni sono stati sviluppati un discreto numero di procedure di progettazione che analizzano le condizioni della pavimentazione per le quali esse non risultano soggette a danni strutturali. Tra queste, quelle che si riferiscono a criteri empirico-meccanicistici, passando attraverso la definizione dei limiti di resistenza »

» LA PROGETTAZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI PERPETUE

della sovrastruttura, rappresentano il sistema che meglio si presta per progettare la pavimentazione. Queste procedure comprendono una vasta gamma di applicazioni tra le quali quelle per pavimentazioni ad alto e a basso volume di traffico, quelle per le pavimentazioni in alto modulo e quelle per la riabilitazione di pavimentazioni sia flessibili che rigide.

La selezione dei materiali, che devono essere scelti in funzione del ruolo che svolgono nella pavimentazione, gioca un ruolo chiave nella progettazione e realizzazione di pavimentazioni perpetue così come le pratiche di costruzione che sono di fondamentale importanza.

In molti casi, quale miscela per lo strato di usura superficiale, viene utilizzato uno *stone mastic asphalt*, un OGFC, o una miscela progettata secondo i canoni di Superpave. Al di sotto di tale strato, la miscela per lo strato intermedio deve garantire durabilità e resistenza all'ormaiamento: particolarmente curate devono essere quindi le proprietà e le procedure per il massimo addensa-

mento e la conseguente rigidità. Infine, per lo strato di base la miscela deve garantire resistenza alla fatica anche attraverso un incremento del tenore di legante e la riduzione del contenuto di vuoti residui.

Le procedure di costruzione non differiscono dalle migliori normali pratiche, ma è importante prestare attenzione a tutti gli aspetti della produzione e della messa in opera del materiale. Il sottofondo o lo strato di fondazione deve fornire una piattaforma di lavoro robusta ed uniforme per sostenere carichi di traffico. Densità e uniformità delle miscele bituminose sono fondamentali per la durata a lungo termine della pavimentazione e questo può essere realizzato attraverso la corretta progettazione degli spessori, la scelta del materiale e del mix design. Anche l'ancoraggio tra gli strati della sovrastruttura è stato dimostrato essere essenziale per la prestazione a lungo termine. A tutto ciò si aggiunga una normale procedura di controllo che deve essere garantita durante tutta la fase di costruzione.



PadovaFiereSpa

asphaltica

21-23 NOVEMBRE / NOVEMBER 2012

Salone delle soluzioni e tecnologie per pavimentazioni e infrastrutture stradali
Exhibition of equipment and technologies related to the asphalt industry

AVANTI PER
LA STRADA GIUSTA

Made by



In collaborazione con /
In collaboration with:
SITEB Associazione Italiana
Bitume Asfalto Strade



SICUREZZA NEL MONDO DELL'ASFALTO

Linee Guida

Ordina on-line
SU
www.siteb.it



Riferimento per l'individuazione e la comprensione degli obblighi e delle responsabilità delle figure coinvolte nei cicli di produzione e di messa in opera dei conglomerati bituminosi

310 pagine

4 capitoli

- Comprendere la sicurezza
- Impianto di produzione
- Sicurezza sulle strade
- Approfondimenti



SITEB
Gruppo Ambiente