Ancoraggio di pavimentazioni flessibili su ponti metallici a piastra ortotropa a forte pendenza

Mauro D'Apuzzo, Professore all'Università degli studi di Cassino Pietro Giannattasio, già Professore all'Università degli studi di Napoli "Federico II" Roberto Zanon, Ingegnere Civile, Responsabile Tecnico del Dipartimento "Geotecnica e Strutture" in NET Engineering S.p.A. Luca Zanaica Ingegnere Civile in NET Engineering S.p.A.

1. INTRODUZIONE

La realizzazione di pavimentazioni flessibili su impalcati da ponte metallici a piastra ortotropa rappresenta una sfida particolarmente impegnativa per le miscele bituminose a causa dell'elevata deformabilità indotta dai carichi di traffico, i regimi termici gravosi e le condizioni di aderenza all'estradosso della soletta che non sempre sono adeguate alle sollecitazioni cui il materiale risulta sottoposto [1-2]. Se poi l'impalcato è caratterizzato da una forte pendenza ed in curva, possono manifestarsi scorrimenti a carattere viscoso reversibile ed irreversibile che pregiudicano la funzionalità della pavimentazione.

Diverse soluzioni sono state avanzate in passato prevedendo un opportuno irruvidimento della soletta o scegliendo materiali caratterizzati da una maggiore adesività ma non sempre sono stati ottenuti risultati soddisfacenti [3-4].

In questo lavoro si è indagato sulla possibilità di inglobare nella pavimentazione una rete elettrosaldata solidarizzata ai bordi dell'impalcato. Sono preliminarmente riportate alcune valutazioni a carattere teorico sullo stato di sollecitazione indotto in una pavimentazione stesa su di un impalcato a forte pendenza. Successivamente vengono analizzate le modalità ottimali di orditura della rete in relazione alla direzione prevalente di sollecitazione indotta dalle azioni tangenziali trasmesse da traffico. Si è infine proceduto alla valutazione dello stato tensodeformativo nella pavimentazione ai fini delle previsioni prestazionali mediante un modello di calcolo semplificato di tipo multi-strato. Le analisi preliminari sembrano indicare che la soluzione tecnologica messa a punto riesca a mitigare gli scorrimenti viscosi della pavimentazione sulla piastra di acciaio anche in presenza di forti pendenze, di curve di piccolo raggio (rampe), di temperature alte e di conglomerati bituminosi a non altissime prestazioni.

2. STIMA DELLE SOLLECITAZIONI INDOTTE IN IMPALCATI A FORTE PENDENZA

In condizioni di scarsa aderenza all'interfaccia pavimentazione-soletta, negli impalcati metallici a forte pendenza, la componente del peso proprio della pavimentazione parallela alla soletta può indurre scorrimenti viscoso di tipo irreversibile e di tipo reversibile della pavimentazione sullo strato di impermeabilizzazione.

In merito alla aliquota viscoplastica, se la guaina impermeabilizzante viene realizzata mediante uno strato di emulsione bituminosa omogenea di pochi millimetri, e se le temperature ed i tempi di carico sono mediamente elevati si può ipotizzare che il legante bituminoso si comporti come un fluido newtoniano. Se quindi si considera la ben nota relazione:

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \tag{1}$$

dove η è la viscosità del legante bituminoso, r è pari allo sforzo tangenziale e γ è la distorsione angolare, assumendo una temperatura costante ed integrando tale relazione, si può ottenere, noto lo spessore dello strato di impermeabilizzazione, *Himp*, la seguente espressione per stimare l'evoluzione dello scorrimento visco-plastico nel tempo:

$$S(t) = \left(\frac{\tau}{\eta}t + \gamma_0\right) \cdot Himp$$
⁽²⁾

dove γ_0 è il valore della distorsione angolare al tempo t = 0, η è la viscosità del legante bituminoso funzione delle caratteristiche di consistenza del legante [4] e rpuò essere calcolato come:

$$\tau = \gamma_{cb} \cdot Hpav \cdot sen\alpha \approx \gamma_{cb} \cdot Hpav \cdot \tan\alpha$$
(3)

dove γ_{cb} è il peso specifico del conglomerato bituminoso, *Hpav* lo spessore complessivo della pavimentazione prevista ed *a* è l'angolo di massima pendenza, calcolato in maniera approssimata come somma vettoriale della pendenza longitudinale e quella trasversale.

Si fa osservare che nelle peggiori condizioni previste dalle norme di progettazione vigenti (10 % di pendenza longitudinale e 7% di pendenza trasversale) si può arrivare ad un valore massimo di *tana* pari al 12.2 %. A titolo esemplificativo, per una guaina in bitume modificato di spessore pari a 1.5 mm ed una pendenza del 12% si può avere uno scorrimento di 27.5 cm dopo un'esposizione di 100 ore ad una temperatura di 48°C.

Per quanto invece riguarda la risposta viscosa reversibile che andrebbe opportunamente sommata a quella indotta dalle sollecitazioni trasmesse dal traffico, si può fare riferimento ad un modello teorico basato su uno schema di trave alla Winkler soggetta ad un carico assiale uniformemente distribuito (che rappresenta la suddetta componente del peso proprio della pavimentazione) e vincolata da un letto di molle uniformemente distribuito anch'esso orientato nella direzione dell'asse della trave che descrive il vincolo offerto dalla presenza dello strato di impermeabilizzazione (vedi Fig. 1).



Figura 1 – Schema di calcolo per la valutazione dello stato tenso-deformativo indotto dalla inclinazione della soletta dovuta al peso proprio.

Prendendo in esame una striscia di pavimentazione di lunghezza L e di larghezza unitaria lungo la direzione di massima pendenza dell'impalcato ed assumendo che sia vincolata alle due estremità, si può dimostrare che lo schema di calcolo descritto in figura, opportunamente risolto, fornisce la seguente espressione che permette di calcolare lo sforzo normale agente sulla trave in funzione della ascissa x della trave stessa:

$$N(x) = \frac{\beta \cdot E \cdot A \cdot p}{K} \left[\sin(\beta x) + \left(\frac{\cos(\beta L) - 1}{\sin(\beta L)} \right) \cos(\beta x) \right]_{(4)}$$

dove:

$$\beta = \sqrt{\frac{K}{E \cdot A}} \tag{5}$$

K = la rigidezza della molla assiale uniformemente distribuita;

E = il modulo del materiale costituente la trave;

A = l'area della sezione della trave;

p = il carico assiale uniformemente distribuito pari allo
 sforzo tangenziale *r* precedentemente visto.

Noto lo sforzo normale è possibile calcolare la deformazione unitaria assiale come:

$$\varepsilon_x = \frac{N}{E \cdot A} \tag{6}$$

Occorre precisare che in questo caso il modulo E corrisponde al modulo complesso del conglomerato bituminoso per una assegnata temperatura e per un tempo di carico infinito, E^{∞} [2], questo nell'ipotesi che il comportamento viscoelastico possa essere descritto da un modello reologico generalizzato di Maxwell che, come è noto assume la caratteristica forma sigmoidale descritta in Figura 2.

Analogamente, il parametro K rappresenta il coefficiente di reazione all'interfaccia tra la

pavimentazione e la soletta, e pertanto, se si assume l'ipotesi di perfetta aderenza all'intradosso ed all'estradosso della guaina impermeabilizzante, sarà espresso in funzione del valore del modulo complesso visco-elastico del materiale costituente la guaina stimato ad un tempo di carico infinito $E_{g^{\infty}}$, cosi come riportato in [4].



Figura 2 – Rappresentazione schematica del modello sigmoidale per la caratterizzazione dei materiali bituminosi in funzione della frequenza di carico.

Occorre far osservare che la distribuzione delle deformazioni lungo l'asse fornita dalla (4) assume un tipico andamento sinusoidale lungo lo sviluppo della pavimentazione, potendosi attingere le massime deformazioni di trazione (che sotto certe condizioni potrebbero portare anche alla crisi del conglomerato bituminoso) ad intervalli regolari.

A riscontro di tali valutazioni teoriche, sembra interessante riportare nella figura successiva (Fig. 3) un esempio di degradazione di una pavimentazione messa in opera su un ponte con impalcato a forte pendenza che, come si evince, presenta un caratteristico quadro fessurativo contraddistinto da lesioni sub-parallele ed equispaziate.

3. LA SOLUZIONE TECNOLOGICA PROPOSTA

In relazione a tali problematiche, si è valutata la possibilità di inserire una rete elettrosaldata tra lo strato di collegamento e quello di usura su una pavimentazione messa in opera su di un impalcato a piastra ortotropa a forte pendenza in corrispondenza di una rampa di collegamento ad un viadotto.



Figura 3 – Esempio di degradazione di una pavimentazione su un ponte con impalcato a forte pendenza da [5].

Al fine di valutare il posizionamento e l'orientamento ottimale della rete elettrosaldata, sono state svolte modellazioni 3D FEM. Il pacchetto stradale considerato è stato modellato mediante elementi brick ed ai materiali sono state assegnate le caratteristiche meccaniche in funzione della loro suscettività termica, analizzando nel dettaglio uno scenario "estivo" ed uno "invernale". Le sollecitazioni sono state rappresentate attraverso un carico verticale da 5t su un'impronta quadrata di dimensioni 30cm x 30cm per il quale si è considerata anche una componente tagliante di uguale intensità nell'intenzione di rappresentare l'azione dovuta alla frenatura. Il pacchetto in conglomerato bituminoso è stato applicato su una lastra metallica con deformabilità comparabile a quella della lastra ortotropa effettivamente presente in opera ed è stata esplicitamente inoltre modellata una rete elettrosaldata con barre Ø 6mm e maglia 10cm x 10cm, inserita nel pacchetto stradale (vedi figura 4).

Le analisi FEM hanno evidenziato che il comportamento flessionale indotto dai carichi verticali risulta dominante rispetto a quello legato alle componenti orizzontali di sollecitazione derivanti dalle azioni radenti da traffico e che la presenza di una rete metallica, opportunamente ancorata ai piatti di contenimento della pavimentazione, risulta essere efficiente nel contenere le sollecitazioni nel pacchetto. Il miglior effetto si ha quando la rete è posizionata tra lo strato di binder e quello di usura, e quando le maglie sono disposte in modo da creare angoli di 45° con l'asse stradale, grazie ad una re-distribuzione più efficace degli sforzi trasmessi dalle azioni di frenatura da quelle centrifughe e dalla componente del peso proprio della stessa pavimentazione mobilitata per effetto della pendenza, in quanto vengono coinvolte entrambe le orditure della rete rispetto al caso che prevede una disposizione delle maglie parallela all'asse stradale.



Figura 4 – Particolare del modello 3D della pavimentazione.

A titolo esemplificativo nella figura successiva (Figura 5) viene riportata la distribuzione delle tensioni lungo la direzione x restituite dal modello nello scenario più severo (scenario estivo con modulo complesso del conglomerato bituminoso pari a 200 MPa e modulo della guaina pari a 0.2 MPa) in presenza di rete elettrosaldata ancorata ai bordi.



Figura 5 – Diagrammi delle tensioni lungo x nello scenario estivo con rete elettrosaldata ancorata ai bordi.

4. VALUTAZIONE DELLA DEFORMA-ZIONE INDOTTA DAI CARICHI DI TRAFFICO

Sulla scorta di questi risultati preliminari, si è proceduto a valutare la deformazione indotta dai carichi di traffico ai fini della previsione prestazionale della sovrastruttura.

Poiché l'impiego di un modello di calcolo multistrato consente una più agevole e speditiva valutazione delle sollecitazioni indotte dai carichi di traffico si è deciso di calibrare un modello multi-strato equivalente (validato anche rispetto ai risultati forniti da un più elaborato modello FEM 3D dettagliato in [2]) in base ad un criterio di equivalenza basato sulla curvatura, formalizzato nella seguente espressione:

$$\left(\frac{M}{EI}\right)_{multi-strato} = \left(\frac{M}{EI}\right)_{reale}$$
(7)

dove si assume che la curvatura nella pavimentazione sia pari a quella nella soletta e quindi a quella reale.

L'impalcato metallico a piastra ortotropa viene ricondotto ad un equivalente schema di trave di Winkler sottoposta ad un carico uniformemente distribuito ottenuto ripartendo a 45° fino al piano medio della soletta un'area di carico circolare relativa ad un pneumatico standard applicata all'estradosso della pavimentazione (vedi figura 6).



Figura 6 – Schema di calcolo per la calibrazione del modello multi-strato.

Una stima sufficientemente approssimata del momento indotto dal carico uniformemente distribuito può essere ricavata come valore medio del momento in mezzeria al carico, supposto assimilato ad una forza concentrata e quello letto al bordo del carico, entrambi calcolati mediante la relazione:

$$M = \frac{P}{4\alpha} e^{-\alpha x} \left[\cos(\alpha x) - \sin(\alpha x) \right]$$
(8)

dove:

M è il valore del momento flettente, in daNcm

P è il valore del carico in daN;

x è la distanza dal punto di applicazione del carico, in cm;

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{KB}{4EI}}$$

K è la rigidezza verticale equivalente in daN/cm³;

B è la larghezza della trave, assunta pari alla lunghezza del carico uniformemente distribuito in cm; *El* rappresenta la rigidezza flessionale totale del sistema piastra-pavimentazione che può essere stimata approssimativamente (ipotesi di aderenza nulla) come:

$$EI = E_{acc} I_{sol} + E_{cb} I_{pav}$$
⁽⁹⁾

dove:

 E_{acc} è il modulo di Young dell'acciaio, in daN/cm²;

 I_{sol} è il momento di inerzia della soletta in acciaio in cm⁴;

 E_{cb} è il modulo complesso del conglomerato bituminoso, in daN/cm²;

 I_{pav} è il momento di inerzia della pavimentazione, in cm⁴;

La rigidezza verticale equivalente, K, viene calcolata in base alla rigidezza flessionale nella direzione longitudinale degli arcarecci.

Noto il valore della curvatura ottenuto come rapporto tra il momento precedentemente calcolato e la rigidezza ricavata dalla relazione (9), si provvede ad implementare un modello multi-strato caratterizzato dagli stessi spessori e dalle stesse caratteristiche meccaniche per i materiali (conglomerato bituminoso ed acciaio) adottate nel precedente schema. Mediante una procedura iterativa, il valore del modulo di Young del semispazio sottostante la soletta in acciaio viene aggiornato in modo da fornire un valore della curvatura nella soletta stessa pari a quella ricavata dallo schema di calcolo descritto in precedenza.

Per una sovrastruttura campione costituita da uno strato di binder di 3 cm e da uno di usura da 5 cm realizzati in conglomerato bituminoso modificato con polimeri, è stata effettuata la stima dello stato tenso-deformativo, in base allo schema di calcolo precedentemente descritto in assenza (Scenario 1) ed in presenza (Scenario 2) della rete elettro-saldata.

Nello Scenario 1 si è considerata anche l'aliquota aggiuntiva viscosa reversibile indotta dallo scorrimento della pavimentazione sulla guaina impermeabilizzante attraverso le relazioni (4) e (6) che ha permesso di stimare un valore della deformazione indotta dalla componente del peso proprio parallela l'impalcato pari a 7.68•10⁻⁷.

Nello Scenario 2 la rete elettrosaldata è stata schematizzata mediante l'inserimento di uno strato fittizio di spessore pari a 1.3 cm (valore assunto a causa del doppio registro di tondini che realizza la rete stessa ed all'aderenza migliorata delle barre) caratterizzato, in analogia a quanto correntemente ipotizzato nel calcolo delle strutture in c.a., da un modulo omogeneizzato.

Come si evince dal confronto delle deformazioni ricavate nei due scenari analizzati riportato nella Tabella 1, la presenza della rete elettro-saldata riesce nelle condizioni maggiormente critiche (temperature più elevate) a conseguire una riduzione delle deformazioni intorno al 10%.

Si aggiunga inoltre che la presenza della rete consente di eliminare gli scorrimenti viscosi irreversibili cui sarebbe andata incontro la pavimentazione е che avrebbero potuto pregiudicarne la funzionalità.

6

Tabella 1 – Valori della massima deformazione di trazione in assenza (Scenario 2) ed in presenza (Scenario 1) di rete elettro-saldata.

POSIZIONE	Temp. [°C]	ε [adim.] Scenario 1	ε [adim.] Scenario 2
Estradosso usura	70	6.17E-04	5.75E-04
Estradosso usura	50	3.72E-04	3.56E-04
Estradosso usura	30	2.00E-04	1.95E-04
Estradosso usura	10	8.96E-05	8.86E-05
Estradosso usura	0	5.06E-05	5.01E-05
Intradosso binder	70	3.16E-04	2.85E-04
Intradosso binder	50	2.98E-04	2.80E-04
Intradosso binder	30	1.94E-04	1.88E-04
Intradosso binder	10	2.98E-05	2.90E-05
Intradosso binder	0	1.01E-05	9.49E-06

BIBLIOGRAFIA

 Medani T.O. "Asphalt Surfacing Applied to Orthotropic Steel Bridge Decks" Report 7-01-127-1, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Marzo 2001, ISSN 0169-9288.
 Caliendo C.: "Sul contributo della sovrastruttura stradale

[2] Caliendo C.: "Sul contributo della sovrastruttura stradale sulla riduzione delle sollecitazioni nelle solette in acciaio dei ponti metallici a piastra ortotropa". CUES, Febbraio 2004. ISBN 88-87030-77-4.

[3] T. Medani M. Hurrman, "The structural effects of adhesive membrane in asphalt surfacings on orthotropic steel bridge decks", TU Delft Research Report, Dicembre 2005.

[4] D'Apuzzo M., Giannattasio P., *"Una proposta metodologica per la valutazione dei parametri prestazionali delle guaine impermeabilizzanti per impalcati da ponte."* Convegno Nazionale AIPCR, Roma Ottobre 2010.

[5] AA. VV. . "Catalogue des dégradations des revêtements hydrocarbonés d'ouvrages d'art", CR8/78, Centre de Recherches Routières, Bruxelles, 1978.