SITEBSi srl
Rassegna del bitume
RIVISTA DEL SITEB-ASSOCIAZIONE ITALIANA BITUME ASFALTO STRADE

ESTRATTO DAL N° **49/05**

Analisi dello stato tenso-deformativo delle pavimentazioni drenanti

Analysis of tension-deformative status of draining pavements

Enzo Bonvino
Ingegnere civile

Analisi dello stato tenso-deformativo delle pavimentazioni drenanti

Analysis of tension-deformative status of draining pavements

ENZO BONVINO
Ingegnere civile

Riassunto

L'articolo rappresenta il completamento di una ricerca sperimentale più ampia che, iniziata con la tesi di laurea, ha esaminato prima gli aspetti acustici delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, con particolare riferimento al fenomeno delle riflessioni multiple, quindi, quelli meccanici sotto carico. Nell'ambito di questa seconda parte si sono analizzati, attraverso metodi fem, gli stati tensionali prodotti da un semirimorchio a tre assi su differenti pavimentazioni. Infine, si è approfondita l'indagine tenso-deformativa lungo le verticali condotte per alcuni punti singolari al variare del modulo di reazione del terreno di sottofondo.

Summary

The paper is the final step of a wider experimental survey, examining the acoustic aspects of asphalt mix pavements (with particular reference to multiple reflections phenomenon) and mechanical (under loading) ones.
Among this second part of the survey, tensional condition produced through a three axles semi-truck trailer on different pavements were analyzed with fem method.
Finally, the paper delves the tension-deforming survey on vertical lines carried out for several points, according to the reaction modulus of foundation.

1. Le tipologie delle pavimentazioni

La sperimentazione è stata condotta, come nel corso della caratterizzazione acustica [1], utilizzando due sovrastrutture stradali drenanti (SOV A e SOV B), basate su miscele di conglomerato bituminoso (c.b.) ad elevata porosità; come riferimento è stata utilizzata una terza sovrastruttura di tipo impermeabile (SOV C) (Fig.1):

- **SOV A (singolo stato drenante):** costituita da un unico manto d'usura drenante (SDFEP), spessore cm 5, ad elevatissima porosità (26,0%) e da un sottostante binder in c.b. chiuso fibrorinforzato (CBCF) dello stesso spessore;
- **SOV B (doppio stato drenante):** realizzata con un doppio strato drenante; quello superiore, d'usura (DDFMP, spessore cm 4,1) ad elevata porosità (21,5%)

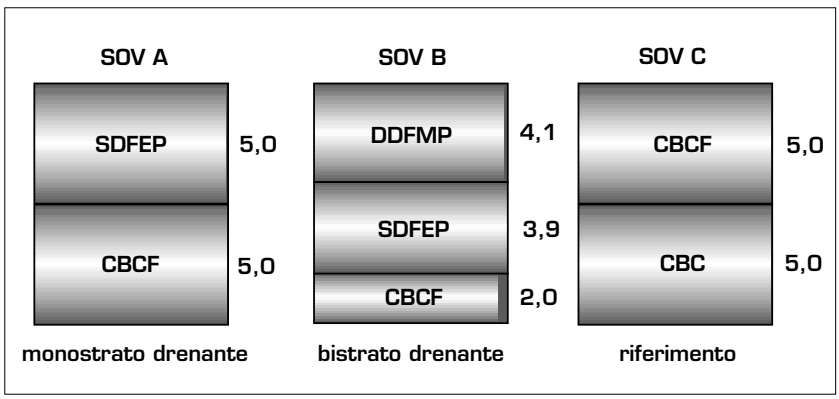

FIG. 1 **Stratigrafia delle sovrastrutture utilizzate nella ricerca**

e quello inferiore (SDFEP, spessore cm 3,9) ad elevatissima porosità (26,0%). Il tutto disposto su uno strato in c.b. chiuso impermeabile (CBCF) di cm 2,0;

- **SOV C (manto classico impermeabile):** costituita da un tradizionale strato d'usura chiuso e da un sottostante binder in c.b. (porosità 5%).

Le tre sovrastrutture dello stesso spessore di 10 cm poggiano su una base in misto bitumato di 15 cm e su una fondazione in stabilizzato granulometrico a cemento di 30 cm, per complessivi 55 cm di spessore. Altre caratteristiche sui materiali utilizzati sono tratte dalla tesi di laurea [2].

2. La costruzione dei modelli FEM

F.E.M. (Finite Element Method) è una tecnica dell'Analisi Numerica volta a simulare la risposta di una struttura continua (una pavimentazione stradale, un ponte, un edificio, ecc,), comunque caricata e vincolata. La struttura reale, opportunamente discretizzata tramite la costruzione di un modello, è suddivisa in elementi finiti molto ravvicinati, tra loro connessi in punti detti nodi. Gli elementi ed i nodi generano la *mesh*, in pratica una maglia (o rete) che, se costruita correttamente, è molto fitta in corrispondenza dei carichi e si presenta veramente aderente alla struttura iniziale. Come tutti i metodi numerici anche il fem fornisce soluzioni approssimate; queste dipendono dalla formulazione ed hanno implicazioni dirette sulla scelta del modello adatto, sulla suddivisione in elementi, sull'imposizione delle condizioni al contorno e delle condizioni di carico e sui valori assegnati ai parametri che controllano la soluzione. Una volta risolto il modello, è necessario saper analizzare i risultati, traendo informazioni utili per le finalità progettuali.

Uno dei più importanti vantaggi del modello fem è che esso rende possibile la determinazione dello stato tenso-deformativo, anche quando sulla pavimentazione sono presenti contemporaneamente numerosi carichi. Particolare attenzione è stata rivolta, quindi, alla costruzione di modelli le cui geometrie sono state realizzate nel rispetto di alcune linee guida basate su un maggiore addensamento degli elementi *plates* (celle) in prossimità delle zone di carico, ritenute più sollecitate, e sulla creazione di elementi regolari aventi rapporti di forma prossimi all'unità.

Queste esigenze scaturiscono dall'osservazione che le tensioni calcolate in prossimità dei nodi di un elemento sono numericamente diverse da quelle ottenute negli stessi nodi, appartenenti ad elementi adiacenti; infatti, le tensioni in corrispondenza del generico nodo sono influenzate dagli spostamenti di tutti i rimanenti nodi che delimitano l'elemento. Pertanto, la costruzione delle *mesh* è avvenuta imponendo:

- celle fittissime in corrispondenza delle zone di carico;
- celle diradate nelle aree più distanti dalle ruote;
- elementi di transizione, indispensabili per collegare le prime alle seconde.

Ne sono derivati modelli con migliaia di nodi che hanno comportato la risoluzione di decine di migliaia di equazioni, quindi tempi di calcolo anche di alcune ore e rilevante occupazione della memoria del processore centrale.

Per ogni pavimentazione si sono determinate:

- tensioni principali σ_{11} e σ_{22} su entrambe le basi di ciascuno strato;
- deformazioni unitarie e principali ε_{11}, ε_{22};
- spostamenti e rotazioni;
- momenti flettenti;
- curvature;
- reazioni.

Quali indicatori della bontà dei modelli, si sono utilizzati, per ciascuna delle precedenti grandezze, i valori dei salti normalizzati, ossia la massima differenza tra i valori nodali della grandezza esaminata. La Fig. 2 è un esempio, tramite *contours*, dei salti normalizzati relativi alle tensioni ed alle deformazioni principali indotte sulle basi inferiore (INF) e superiore (SUP) dello strato d'usura della PAV A; si osserva che i valori più elevati sono sempre <10%. Ciò rassicura sulla corretta preparazione dei modelli.

La corretta simulazione del comportamento reale della pavimentazione ha richiesto un particolare studio delle sue dimensioni e dell'interfaccia tra gli strati.

Il primo aspetto è stato risolto per successive approssimazioni: le dimensioni dell'area da esaminare, ipotizzata isolata, sono state incrementate gradualmente fino alla stabilizzazione su valori numericamente insignificanti delle tensioni principali di trazione lungo il

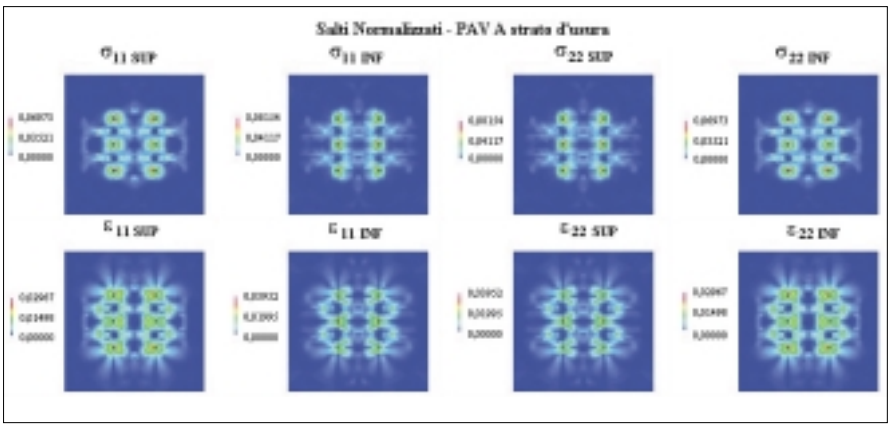

FIG. 2 ***Contours*** **dei salti normalizzati (tensioni e deformazioni principali)**

perimetro del campo; ciò ha consentito l'individuazione di una superficie quadrata di circa 50 m^2. Il secondo aspetto ha richiesto la caratterizzazione dei nodi nell'interfaccia di due strati consecutivi e, quindi, la definizione del loro collegamento. La letteratura scientifica sull'argomento classifica la natura dell'interfaccia tra gli strati in tre categorie:

- perfetta aderenza;
- perfetto scorrimento;
- situazione intermedia tra le prime due.

Preferendo la prima ipotesi la pavimentazione è assimilata ad un solido non omogeneo, ma continuo.

La scelta della seconda ipotesi comporta lo sdoppiamento di ciascun nodo d'interfaccia e l'inserimento di gradi di libertà al fine di rendere indipendenti gli spostamenti orizzontali, pur mantenendo uguali quelli verticali.

Nella terza categoria il percorso logico è simile alla seconda, ma con l'inserimento di vincoli tipo biella (funzione della temperatura, dei carichi e della mano d'attacco tra gli strati) in grado di simulare l'aderenza tra gli strati per mezzo di un "modulo di reazione orizzontale" presente nell'interfaccia.

Si è scelta la seconda alternativa nella quale i due nodi corrispondenti, quello dello strato superiore e quello dello strato inferiore, sono collegati tramite *links* vincolati in modo tale da subire il medesimo spostamento verticale.

Dopo la preparazione dei modelli si è scelto quale riferimento per i successivi confronti quello della pavimentazione impermeabile PAV C; nello stesso tempo, si sono affrontati alcuni aspetti ritenuti importanti per lo sviluppo della ricerca:

- mantenendo costanti le proprietà del sottofondo, come variano le caratteristiche tensionali e deformative di ciascuno strato al variare della pavimentazione drenante? E quali sono le differenze rispetto alla pavimentazione di riferimento, impermeabile?
- la diversa portanza del sottofondo come modifica l'entità dello stato di sforzo all'interno di ciascuno strato?

Per risolvere questi aspetti si è schematizzato il sottofondo come uno strato semi-infinito alla Winkler, ipotizzando un modulo di reazione variabile nell'intervallo 2÷8 daN/cm^3, un'area d'impronta ellittica ed un carico per asse di 9 tonnellate.

La Fig. 3 riporta il telaio del semirimorchio, gli interassi in cm tra le ruote, la *mesh* dell'area d'impronta ellittica, l'indicazione delle direzioni 1, 2, 3, 4, lungo le quali si è effettuata l'analisi tensionale e, infine, i punti I, II, III, IV, ottenuti dalle intersezioni delle precedenti direzioni.

Lungo le verticali passanti per i quattro punti si è ulte-

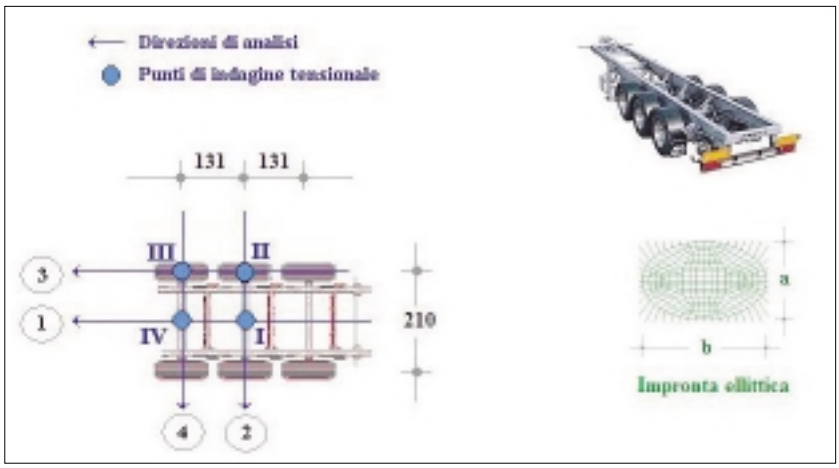

FIG. 3 **Semi-rimorchio a tre assi, area d'impronta, direzioni e punti di studio**

TABELLA 1

PAV A				PAV B				PAV C			
Strato	E	n	g	Strato	E	n	g	Strato	E	n	g
	daN/cmq		Kg/mc		daN/cmq		Kg/mc		daN/cmq		Kg/mc
SDFEP	22000	0,36	1920	DDFMP	24000	0,38	2050	CBCF	30000	0,40	2300
CBCF	30000	0,40	2300	SDFEP	22000	0,36	1920	CBC	20000	0,36	2100
-	-	-	-	CBCF	30000	0,40	2300	-	-	-	-
Base	15000	0,34	2000	Base	15000	0,34	2000	Base	15000	0,34	2000
Fondazione	8000	0,30	1800	Fondazione	8000	0,30	1800	Fondazione	8000	0,30	1800

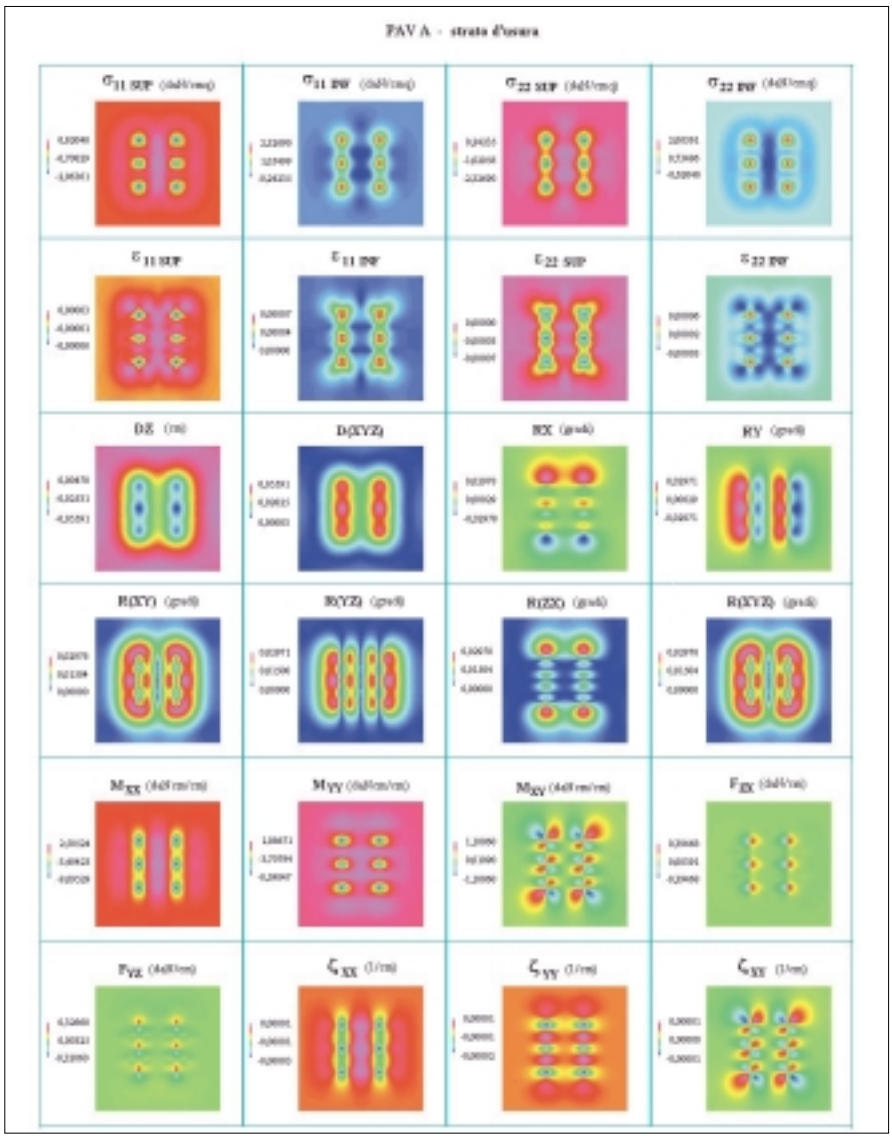

FIG. 4 ***Contours*** **strato d'USURA PAV A (K=5 daN/cm³)**

riormente approfondito lo studio tensionale nell'interfaccia di separazione tra gli strati.
La Tab. 1, infine, riporta alcune caratteristiche utilizzate per ciascuno degli strati delle tre pavimentazioni.

3. Analisi dei risultati

Assemblando opportunamente i risultati ottenuti, si è realizzata la Fig. 4 che è un esempio di contours relativo allo strato d'usura della PAV A (monostrato drenante) nell'ipotesi che il sottofondo presenti un K=5 daN/cm^3.
Da un primo esame dei *contours* si osserva che:

- tutte le grandezze calcolate si stabilizzano lungo il perimetro della superficie delle pavimentazioni dove assumono valori di modesta entità;
- le tensioni e le deformazioni principali di trazione si raggiungono sotto le aree d'impronta nella base inferiore dello strato, mentre quelle di compressione sulla faccia opposta;
- i cedimenti verticali massimi appaiono inferiori al millimetro e si sviluppano sotto le due ruote

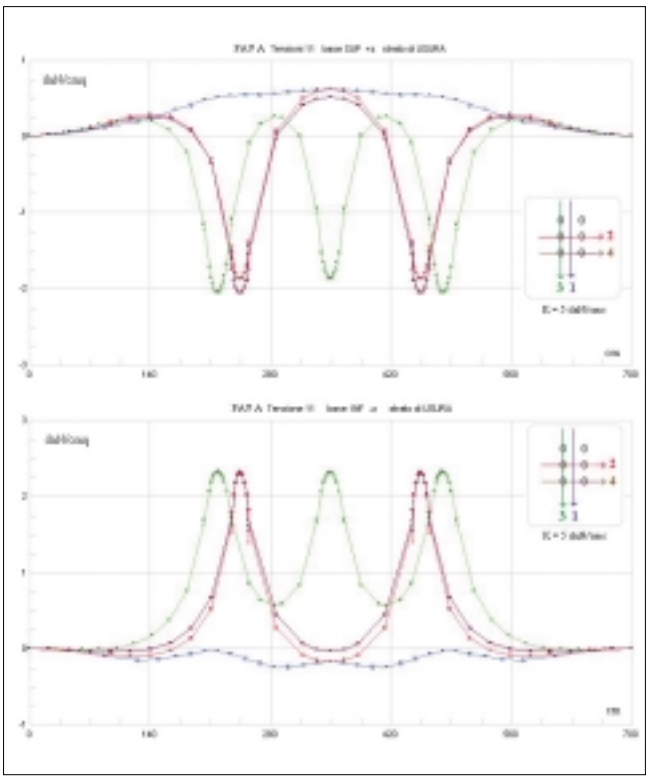

FIG. 5 Le tensioni principali σ_{11} nello strato strato d'usura della PAV A: basi superiore ed inferiore (K=5 daN/cm³)

centrali; evidente, seppure di entità modesta, il sollevamento del bordo del campo di pavimentazione esaminato;

- le rotazioni e le reazioni assumono valori quasi coincidenti e indipendenti dai particolari assi di riferimento;
- in valore assoluto i momenti e le curvature risultano, rispettivamente:

$$M_{xx} > M_{yy} > M_{xy} \; ; \qquad Z_{xx} > Z_{yy} > Z_{xy}$$

Si sono poi analizzate le tensioni principali σ_{11} σ_{22} lungo le direzioni 1, 2, 3, 4, relative alle basi superiore (SUP) ed inferiore (INF) dello strato d'usura della PAV A, pervenendo alla Fig. 5 dalla quale scaturiscono le seguenti considerazioni lungo le direzioni individuate.

Base superiore:

- Asse 1: lungo questo allineamento, coincidente con uno degli assi di simmetria geometrica e di carico, il manto appare interamente teso; l'entità delle tensioni appare modesta poiché i valori massimi superano, di poco, 0,5 daN/cm²;
- Asse 2: partendo dal perimetro dell'area di pavimentazione esaminata, le tensioni sono di trazione; esse cambiano segno a circa 50 cm dall'asse della ruota dove raggiungono circa 2 daN/cm² di compressione. Ovviamente, in asse tra le due ruote centrali, si ripresenta la trazione di cui al punto precedente;
- Asse 3: l'andamento delle tensioni principali è simile a quello evidenziato lungo la direzione 2, ma con intensità leggermente più elevata;
- Asse 4: il *trend* tensionale è quasi coincidente con quello riscontrato lungo l'asse 2; anche in questo caso i picchi di compressione, sotto le due ruote, risultano più elevati.

Base inferiore.

- Asse 1: le tensioni sono solo di compressione con valori massimi assai modesti: circa 0,3 daN/cm²;
- Asse 2: evidenti le trazioni sotto le due ruote centrali con picchi superiori ai 2 daN/cm², uguali per evidenti ragioni di simmetria;
- Asse 3: ovviamente lungo questa direzione si osservano tre massimi uguali sotto ciascuna ruota e d'intensità pari a quella riscontrata lungo l'asse 2;
- Asse 4: si conferma la distribuzione tensionale ottenuta lungo l'asse 2; l'entità dei picchi di trazione è praticamente la stessa, mentre quella di compressione appare leggermente più elevata.

La Fig. 6 mostra l'andamento dei cedimenti subiti dalla PAV A lungo le direzioni 1, 2, 3, 4 e permette di formulare le seguenti considerazioni.

- Asse 1: lungo questa direzione di simmetria si osserva la formazione di un ampio bacino d'intensità inferiore a quella riscontrata lungo le altre direzioni;
- Asse 2: è questa la direzione lungo la quale si attivano le più elevate deformazioni (circa 0,6 mm) rispetto a qualunque altra direzione;
- Asse 3: come era logico attendersi, si osservano tre massimi proprio in corrispondenza delle aree d'impronta; di un certo interesse appare il massimo assoluto sotto la ruota centrale che raggiunge lo stesso valore riscontrato lungo l'asse 2;
- Asse 4: come per le tensioni, l'andamento è simile a quello osservato lungo la direzione 2, ma i valori numerici appaiono sensibilmente inferiori.

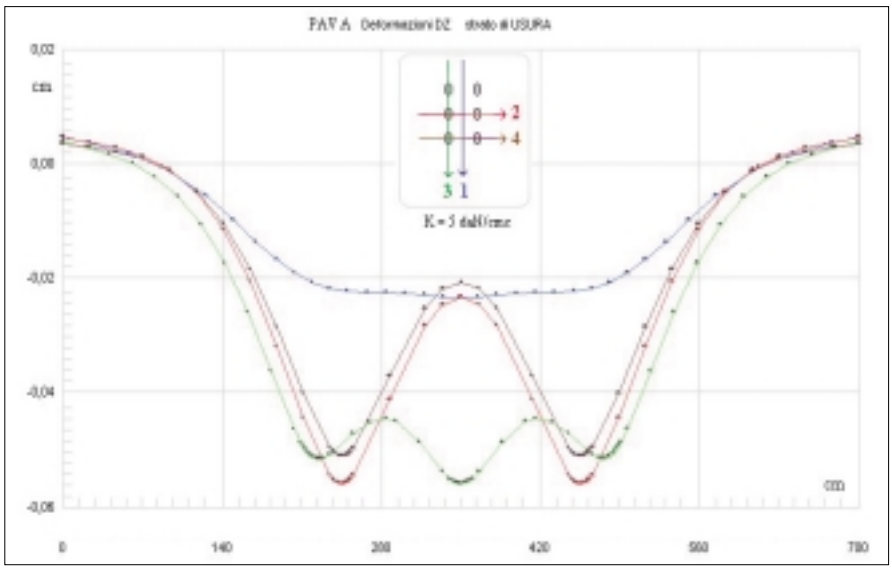

FIG. 6 Cedimenti dello strato d'usura (K=5 daN/cm³)

Disponendo di tutti i valori numerici, si è indagato sulla variazione, nel passaggio da uno strato al successivo, di alcune delle grandezze precedentemente calcolate.
In particolare, si è ritenuto opportuno analizzare le tensioni principali lungo le verticali condotte per i punti I, II, III, IV, nello spessore complessivo delle pavimentazioni. Si è quindi approntata la Fig. 7, valida per K=5 daN/cm^3, nella quale si sono confrontati gli stati tensionali indotti dal carico su ciascuna pavimentazione dalla quota 0,00 fino a -0,55 cm.
Si è osservato quanto segue:

- quando le verticali passano per i centri delle aree d'impronta, punti II e III, le tensioni sulla superficie di ciascuno strato sono di compressione; ne consegue che lungo queste direzioni le corrispondenti basi inferiori sono, invece, tese. Viceversa per le altre due verticali passanti per i punti I e IV;
- Indipendentemente dal particolare strato esaminato, e quindi dal tipo di pavimentazione, le σ_{11} di trazione sono, in valore assoluto, sempre più elevate lungo le verticali passanti per i centri delle aree d'impronta (punti II e III);
- i valori numerici delle σ_{11} lungo le verticali II e III, a parità di profondità, sono in pratica gli stessi; più marcata appare, invece, la differenza delle tensioni lungo le verticali condotte per i punti I e IV;
- qualunque pavimentazione si scelga, le σ_{11} più elevate di trazione si riscontrano sempre negli strati di base e di fondazione i quali, quindi, sono maggiormente sollecitati;
- lungo le verticali condotte per i punti II e III le tensioni di trazione e di compressione quasi si equivalgono; questa caratteristica non appare lungo le verticali per i punti I e IV.

Infine, poiché tra gli obiettivi della ricerca vi era quello di valutare lo stato tensionale e deformativo al variare della portanza del terreno di sottofondo, si è ripetuto l'iter precedente imponendo altri valori (K=2÷8 daN/cm^3) al modulo di reazione. Con i risultati numerici ottenuti, è stato possibile schematizzare il comportamento delle pavimentazioni al variare delle caratteristiche del sottofondo; poiché da un punto di vista qualitativo la risposta delle tre pavimentazioni è stata simile, si è analizzata la sola PAV A e, in particolare, il suo strato d'usura (Fig. 8).
Rilevante appare il contributo del modulo di reazione K nei confronti delle deformazioni le quali subiscono notevoli riduzioni pur in presenza di modesti incrementi dell'indicatore di portanza.
Anche le tensioni principali decrescono, ma con più bassi gradienti. Così, ad esempio, il raddoppio del modulo K da 4 a 8 daN/cm^3 comporta una riduzione del 75% sulle deformazioni e solo del 9% circa sulle tensioni.
Una semplice analisi di regressione compiuta sui dati sperimentali ha individuato la funzione y=a+b/K quale migliore curva interpolante (R>0,99) sia per le tensioni principali di trazione che per i cedimenti.

4. Conclusioni

Lo stato tenso-deformativo indotto da carichi stradali su due pavimentazioni drenanti mono e bi-strato è stato affrontato con l'analisi degli elementi finiti ed una schematizzazione degli strati ipotizzati orizzonta-

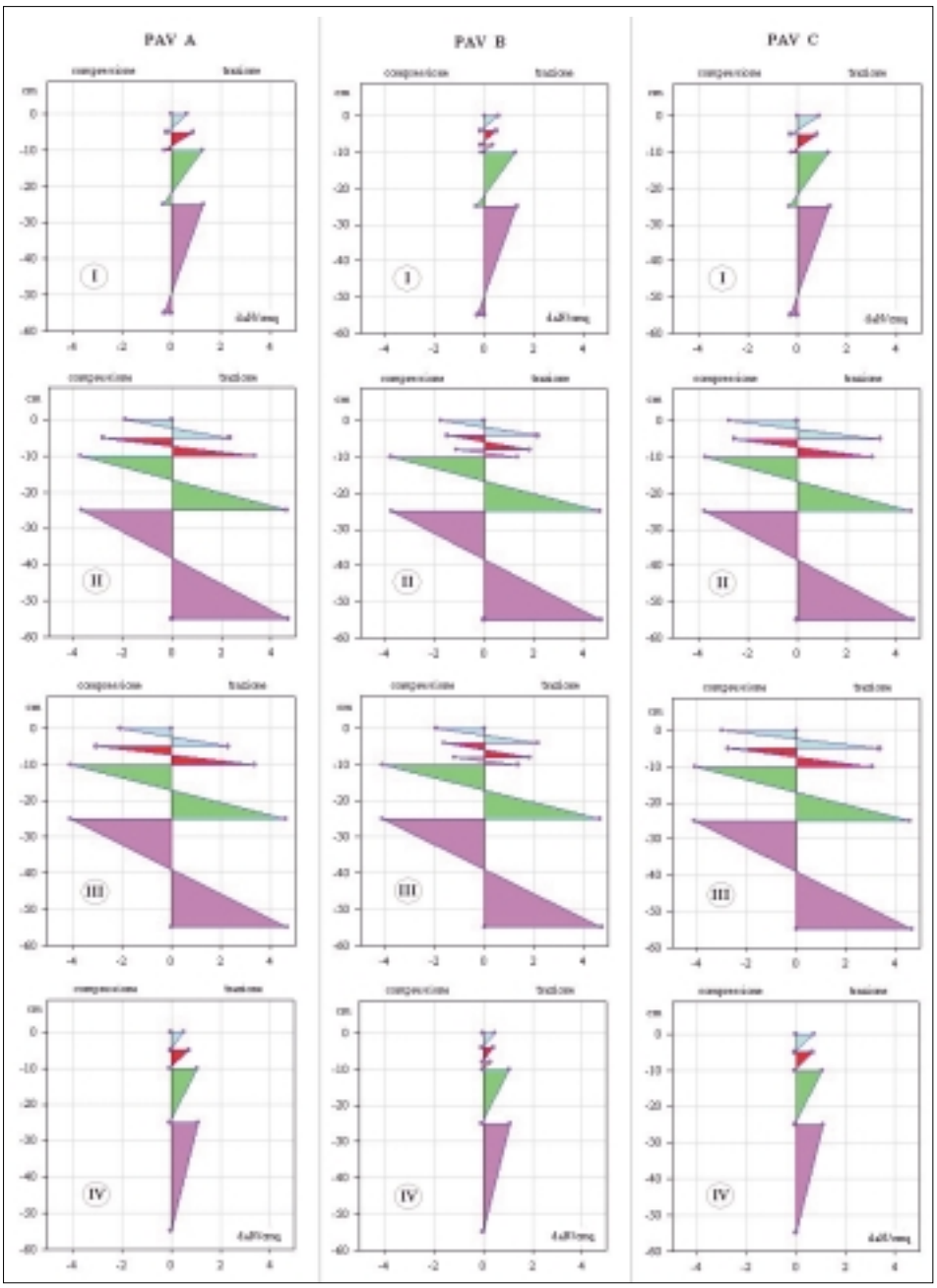

FIG. 7 Andamento delle tensioni principali al variare della profondità (K=5 daN/cm³)

li, sovrapposti, indefiniti in pianta, di spessore costante, aventi le proprietà dell'omogeneità, dell'isotropia e della elasticità lineare. Ognuno di essi è stato introdotto nei modelli fem con particolari valori del coefficiente di Poisson e del modulo E. Lungo il piano di separazione di due strati contigui si sono sdoppiati i nodi d'interfaccia e vincolati in modo tale da rendere indipendenti gli spostamenti orizzontali, pur mantenendo uguali quelli verticali. Al fine di valutare la risposta sotto carico delle miscele drenanti, si è assunta quale struttura di riferimento una classica pavimentazione impermeabile in conglomerato bituminoso chiuso. La costruzione dei modelli fem ha utilizzato, infine, la schematizzazione alla Winkler del terreno di sottofondo la cui portanza è stata fatta variare nell'intervallo 2÷8 daN/cm^2.

I carichi verticali, trasmessi dalle sei ruote di un semirimorchio a tre assi, sono uniformemente distribuiti su superfici ellittiche, di area uguale a quella d'impronta dei pneumatici, con pressione pari a quella di gonfiaggio. L'analisi tensionale e deformativa è stata condotta lungo direzioni orizzontali e verticali al fine di valutare anche nello spessore di ciascuna pavimentazione la risposta degli singoli strati e l'influenza delle distanze tra le ruote.

Si è prestata particolare attenzione alla distribuzione delle tensioni principali di trazione in ciascun punto delle pavimentazioni a partire dalla superficie di rotolamento fino al piano di sottofondo; i risultati a cui si è giunti, sono solo in parte documentati nella letteratura scientifica. In particolare, i valori più elevati di trazione, attivati dai carichi agenti staticamente, si riscontrano sempre lungo gli strati di base e di fondazione, indipendentemente dal fatto che l'indagine sia condotta tra le ruote (assi I e IV) o sotto di esse (assi II e III).

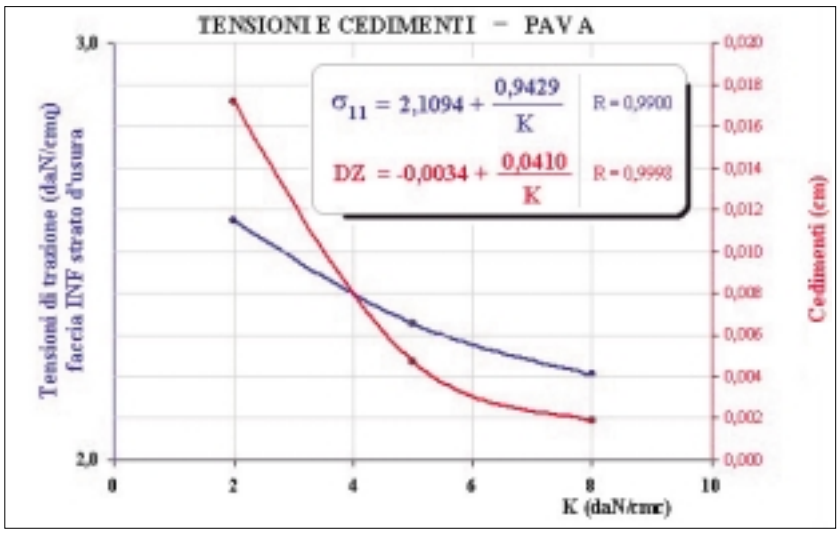

FIG. 8 **Influenza del modulo K sullo strato d'usura della PAV A**

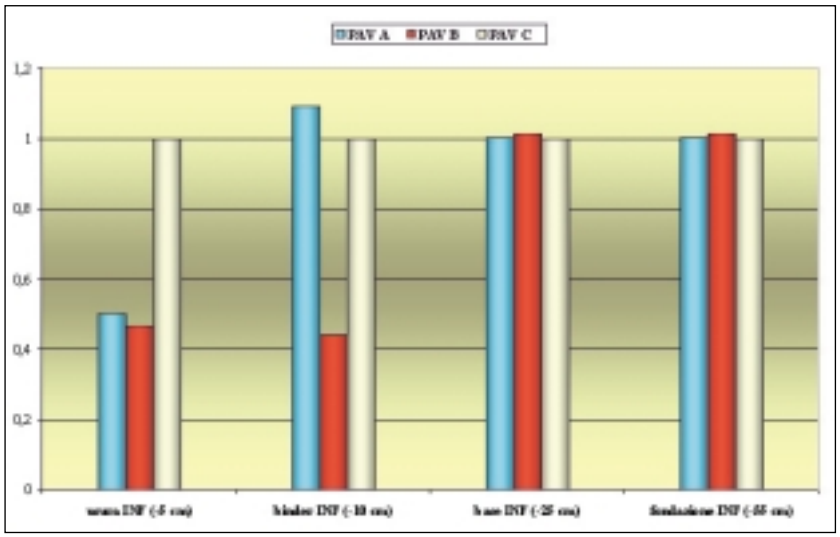

FIG. 9 **Il confronto tensionale tra le pavimentazioni**

Sulla superficie del manto, invece, si evidenziano tensioni di compressione di modestissima entità solo in corrispondenza delle verticali condotte dai punti II e III ubicati sotto le ruote, mentre quelle di trazione, quasi nulle, si osservano tra le ruote lungo gli assi I e II. Da un punto di vista numerico, la modellazione approntata consente di affermare che le pavimentazioni drenanti a semplice e doppio strato reagiscono alle sollecitazioni indotte dai carichi in maniera leggermente diversa anche quando varia la capacità portante del terreno di sottofondo.

Si è osservato, infatti, che fino alla profondità di 5 cm dal piano di rotolamento le tensioni principali di trazione si equivalgono, pur rimanendo notevolmente inferiori alle analoghe della PAV C, impermeabile ed assunta quale riferimento, mentre già alla profondità di 10 cm la PAV B (doppio strato drenante) presenta il più basso livello tensionale (Fig. 9).

A profondità ancora maggiori, invece, il livello tensionale è numericamente lo stesso e indipendente dalla particolare tipologia della pavimentazione.

Infine, si è verificato che l'incremento del modulo di reazione K appare fondamentale per ridurre drasticamente l'entità delle deformazioni, mentre più modesta appare la sua l'influenza sullo stato tensionale. ■

Bibliografia

[1] E. Bonvino, Comportamento acustico delle sovrastrutture drenanti soggette a riflessioni multiple, rivista LE STRADE – giugno 2004.

[2] E. Bonvino, Studio sperimentale sul coefficiente d'assorbimento acustico delle pavimentazioni stradali - Applicazione ai conglomerati bituminosi drenanti mono e bi-strato. Tesi di laurea giugno 2003.