

---

# EVOLUZIONE DEI CRITERI DI CALCOLO DELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI: I MODELLI PARTICELLARI

---

*Dondi G.*

*Professore ordinario - Università di Bologna - [giulio.dondi@mail.ing.unibo.it](mailto:giulio.dondi@mail.ing.unibo.it)*

*Bragaglia M.*

*Assegnista di ricerca-Università di Bologna-[massimiliano.bragaglia@mail.ing.unibo.it](mailto:massimiliano.bragaglia@mail.ing.unibo.it)*

*Vignali V.*

*Assegnista di ricerca - Università di Bologna - [valeria.vignali@mail.ing.unibo.it](mailto:valeria.vignali@mail.ing.unibo.it)*

## SOMMARIO

Il comportamento meccanico dei conglomerati, in particolare di quelli a legante bituminoso, è determinato dalla mutua interazione fra le varie fasi eterogenee che li compongono. Tuttavia, anche nei metodi di calcolo più evoluti, questi materiali sono schematizzati mediante uno strato di caratteristiche omogenee equivalenti.

Nell'ottica di un'evoluzione di tali criteri è necessario superare questa semplificazione, considerando la composizione "discreta" del conglomerato bituminoso. A tal fine può essere adottato un approccio di tipo microscopico, che consenta di rappresentare i reali processi fisico-meccanici dai quali dipende la risposta macroscopica d'insieme. Ciò è possibile utilizzando il metodo degli Elementi Distinti Particellari (*DEM-P*), che schematizza il materiale granulare, assai realisticamente, come un insieme di particelle indipendenti che interagiscono nei punti di reciproco contatto secondo appropriate leggi costitutive.

Gli autori, sulla base dei risultati ottenuti in precedenti studi che hanno confermato le potenzialità del metodo nel riprodurre l'effettivo comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso, approfondiscono gli aspetti significativi della risposta di una pavimentazione flessibile.

## ABSTRACT

The macroscopic performances of a bituminous mixture are greatly conditioned by nature of its particles. So it can be suitable to analyse its discrete character through a microscopic approach. This is possible using the Distinct Particle Elements Method (*DEM-P*), which schematizes a granular material by particles that displace independently from one another and interact only at contact points. Starting from previous research works, which show the potentialities of the method to reproduce the performances of asphalt mixes, this paper investigates the use of *DEM-P* to simulate the visco-elastic behaviour of a flexible pavement under loading produced by road traffic.

*Keywords: Metodo degli Elementi Distinti Particellari, pavimentazione flessibile, modellazione numerica*

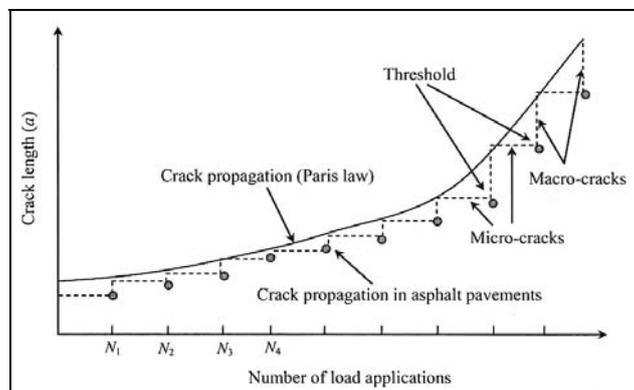
## 1. INTRODUZIONE

Nello studio del comportamento a fatica di una pavimentazione stradale si utilizzano generalmente metodi di calcolo al continuo, i quali schematizzano il conglomerato bituminoso come uno strato di caratteristiche omogenee equivalenti.

Numerosi studi riportati in letteratura, però, evidenziano che il comportamento meccanico di questo materiale è fortemente condizionato dalla mutua interazione tra le varie fasi eterogenee che lo costituiscono (Collop et al., 2004). Per superare questa semplificazione, quindi, può essere opportuno considerarne il carattere discreto attraverso un approccio di tipo microscopico, che consenta di comprendere la reale risposta macroscopica d'insieme (tabella 1).

**Tabella 1 - confronto tra l'approccio tradizionale (in grigio) e quello discontinuo nella progettazione di una pavimentazione flessibile (Birgisson et al., 2007)**

Tecniche numeriche	Metodo degli Elementi Finiti ( <i>FEM</i> ).
	Metodo degli Elementi Distinti Particellari ( <i>DEM-P</i> ).
Dati di input	Carichi applicati, temperatura, modulo elastico e coefficiente di Poisson dei materiali che costituiscono il sistema.
	Curva granulometrica dell'aggregato, modelli di contatto microscopici dei materiali che costituiscono il sistema.
Risultati	Tensioni e deformazioni - valori medi.
	Spostamenti e forze di contatto tra le particelle - valori di picco.
Condizioni della pavimentazione	Condizioni omogenee (lo stato della miscela non varia).
	Condizioni eterogenee (lo stato della miscela può variare).
Studio della fatica, dell'ormaiamento, delle fessurazioni alle basse temperature	L'innesco e la propagazione del fenomeno sono di tipo continuo (figura 1). Il metodo fornisce in output il numero di cicli di carico che portano a rottura la pavimentazione.
	L'innesco e la propagazione del fenomeno si sviluppano per step successivi. Si riesce quindi a modellare la rottura microscopica (figura 1), ottenendo in output il numero di cicli di carico che portano a rottura la pavimentazione e la posizione del punto in cui si localizza la frattura.
Studio dell' <i>healing</i> del conglomerato bituminoso	Non è possibile modellare il fenomeno.
	È possibile modellare il fenomeno.
Studio del <i>bonding</i> tra gli strati di una sovrastruttura	Solo in corrispondenza delle interfacce tra gli strati.
	Su tutti i piani orizzontali passanti per la pavimentazione.



**Figura 1 – propagazione delle fratture in una pavimentazione stradale (Birgisson et al., 2007)**

Sebbene il *DEM-P* (Cundall et al., 1979) sia stato largamente impiegato nello studio dei terreni, in letteratura sono disponibili pochi riferimenti riguardanti applicazioni su materiali legati a bitume (Chang et al., 1997; Buttlar et al., 2001; Collop et al., 2004; Dondi et al., 2005 e 2006). Questi ultimi, in particolare, confermano le potenzialità del metodo nel riprodurre l'effettivo comportamento del materiale durante test di laboratorio condotti su provini di piccole dimensioni e non prendono in considerazione la risposta complessiva di una pavimentazione stradale.

Per questo motivo gli autori in un precedente studio hanno sviluppato un modello 3D di sovrastruttura flessibile ed hanno indagato le potenzialità del metodo nel riprodurre l'effettivo comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso (Dondi et al., 2007). I risultati ottenuti, in particolare, sono compatibili con quelli ricavati dal codice *BISAR* e forniscono numerose informazioni aggiuntive sulla dispersione dei valori massimi delle forze di contatto.

Partendo da questi risultati, nella presente memoria si approfondisce la risposta ai carichi veicolari di una pavimentazione flessibile, con particolare attenzione all'innescio ed alla propagazione del fenomeno fessurativo.

Per sviluppare ulteriormente la tecnica numerica utilizzata, inoltre, si indaga l'influenza della forma e delle dimensioni dei grani costituenti l'aggregato sul comportamento complessivo del sistema.

## 2. LA MODELLAZIONE DEM

La modellazione è stata articolata in due fasi distinte:

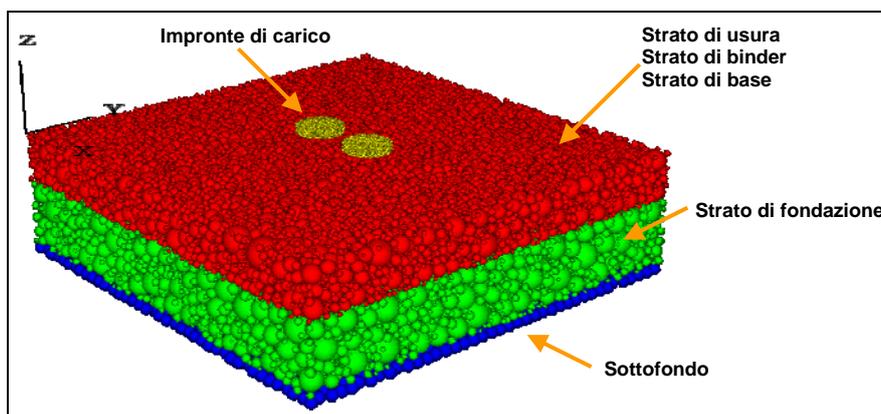
- la prima, nella quale è stata ulteriormente indagata l'affidabilità della tecnica *up-scaling* di generazione delle particelle, che consiste nel moltiplicare il diametro iniziale delle sfere ( $D_{iniziale}$ ) per un fattore amplificativo ( $S$ ), ottenendo così una curva granulometrica con lo stesso andamento di quella reale e traslata verso destra di un valore ( $\Delta D$ ) pari a (Dondi et al., 2005):

$$\Delta D = (S - 1) \cdot D_{iniziale} \quad (1)$$

A tal fine è stato ripreso il modello 3D di sovrastruttura flessibile precedentemente studiato (Dondi et al., 2007), di seguito denominato “modello A”, nel quale, per ottimizzare i tempi di calcolo, era stata utilizzata questa procedura, ed è stato messo a confronto con un nuovo modello, di seguito denominato “modello B”, nel quale gli strati della sovrastruttura flessibile sono stati generati non mediante la tecnica *up-scaling*, ma attraverso particelle di diametro costante pari a quello medio della curva granulometrica corrispondente;

- la seconda, nella quale è stato indagato l’andamento delle forze di contatto in corrispondenza delle interfacce tra gli strati della pavimentazione, ottenendo così indicazioni sull’innesco e sulla propagazione del fenomeno fessurativo all’interno della sovrastruttura in esame.

Il modello A ha dimensioni pari a  $2.00 \times 2.00 \times 0.68 \text{ m}^3$  ed è costituito da uno strato superficiale in conglomerato bituminoso (che schematizza gli strati legati), da una fondazione in stabilizzato granulometrico e da un sottofondo in materiale granulare di spessore pari rispettivamente a 0.23 m, 0.30 m e 0.05 m (figura 2) (Dondi et al., 2007).



**Figura 2 - modello A (Dondi et al., 2007)**

La validità della procedura di generazione del sistema è stata indagata confrontando le curve granulometriche ottenute dal modello numerico con quelle sperimentali (figura 3). In questo modo lo strato superficiale in conglomerato bituminoso e la fondazione sono stati simulati rispettivamente attraverso 16800 ed 11100 particelle; il sottofondo, invece, è stato generato attraverso sfere di raggio costante pari a 0.025 m.

Il comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso è stato schematizzato attraverso il modello di Burger, che consente di valutare le rigidzze di contatto normale ( $k_n$ ) e tangenziale ( $k_s$ ) in funzione dei seguenti parametri (Collop et al., 2004) (tabella 2):

- tempo di carico;
- coefficiente di Poisson ( $\eta$ ), densità ( $\gamma$ ), modulo elastico ( $E'$ ), modulo di deformazione volumetrica ( $K'$ ) e di taglio ( $G'$ ) del conglomerato bituminoso;
- raggio medio ( $R$ ), indice dei vuoti ( $V_V$ ) e numero medio dei contatti ( $C_V$ ) delle particelle che compongono il sistema.

Per la definizione dei contatti che schematizzano la fondazione ed il sottofondo, entrambi incoerenti, non sono stati introdotti modelli di legame. Il comportamento del mezzo è quindi governato dalle rigidzze normale ( $k_n$ ) e tangenziale ( $k_s$ ) e dalle proprietà d'attrito ( $\mu$ ) (tabella 3). Quest'ultimo, in particolare, è stato valutato partendo dall'angolo d'attrito macroscopico delle miscele ( $\varphi = 35^\circ$ ) ed è stato assunto pari a 0.8.

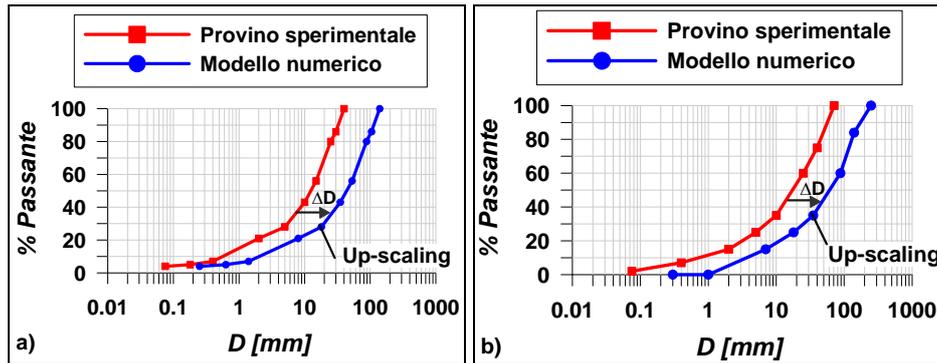


Figura 3 – modello A: curva granulometrica degli strati in conglomerato (a) e della fondazione (b) (Dondi et al., 2007)

Tabella 2 - modello A: specifiche dei materiali degli strati legati e del relativo modello di contatto (Dondi et al., 2007)

Layer	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\eta$	$E'$ [MPa]	$K'$ [MPa]	$G'$ [MPa]	$k_n$ [MN/m]	$k_s$ [MN/m]
Usura	2650	0.35	2500	2780	925	$6.4 \cdot 10^8$	$6.4 \cdot 10^7$
Binder	2650	0.35	2200	2445	815	$6.4 \cdot 10^8$	$6.4 \cdot 10^7$
Base	2650	0.35	2000	2220	715	$6.4 \cdot 10^8$	$6.4 \cdot 10^7$

Tabella 3 - modello A: specifiche dei materiali degli strati non legati e del relativo modello di contatto (Dondi et al., 2007)

Layer	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\eta$	$E'$ [MPa]	$K'$ [MPa]	$G'$ [MPa]	$k_n$ [MN/m]	$k_s$ [MN/m]
Fondazione	2625	0.45	800	2670	280	$3.6 \cdot 10^{10}$	$3.1 \cdot 10^9$
Sottofondo	2300	0.47	150	830	50	$1.6 \cdot 10^{10}$	$2.9 \cdot 10^9$

La pavimentazione è stata sollecitata mediante un unico ciclo di carico attraverso due impronte circolari che inducono ciascuna sulla sovrastruttura una forza verticale costante pari a 30 kN (figura 2).

Il modello B, invece, ha forma cilindrica di raggio pari a 0.32 m, ed è costituito dagli stessi strati del modello A, in termini sia di spessore sia di tipologia di materiale (figura 4, tabelle 2 e 3). Questi ultimi, però, sono stati generati non mediante la tecnica dell'*up-scaling* ma attraverso particelle di diametro costante, pari a quello medio della curva granulometrica corrispondente. La pavimentazione è stata sollecitata mediante un unico

ciclo di carico attraverso un'impronta circolare uguale a quella del modello A, che induce sulla sovrastruttura una forza verticale costante pari a 30 kN.

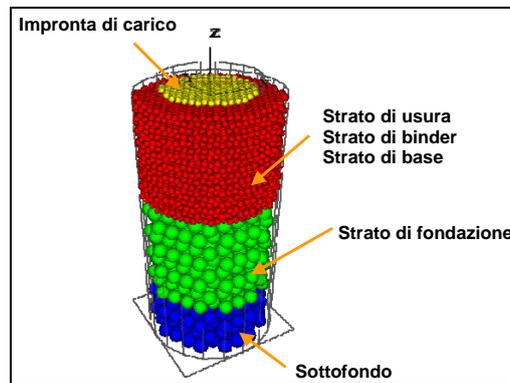


Figura 4 - modello B

### 3. RISULTATI OTTENUTI

È stata analizzata la distribuzione delle forze di contatto all'interno del modello A: la figura 5 mostra che al termine del processo di carico queste ultime sono prevalentemente di compressione e si diffondono radialmente all'interno del sistema interessando prima lo strato superficiale in conglomerato bituminoso, poi la fondazione ed il sottofondo.

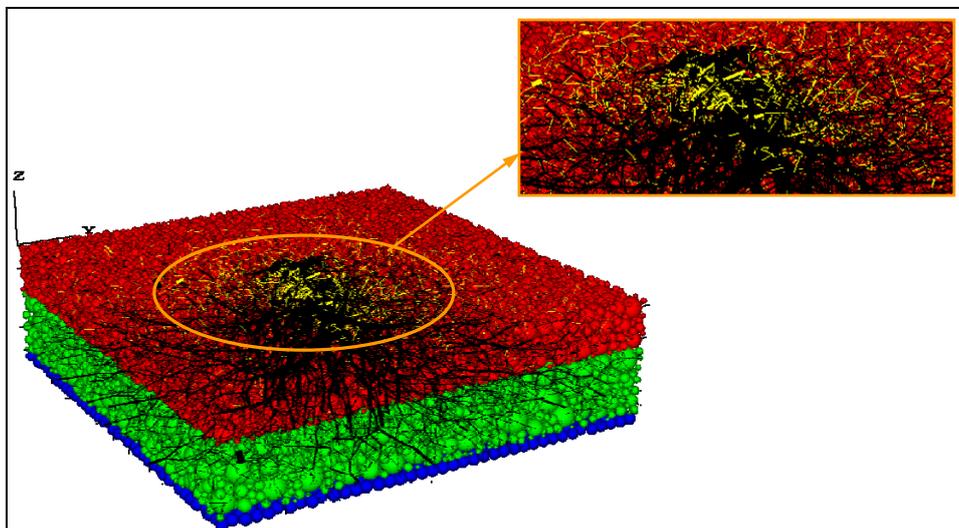


Figura 5 - Distribuzione delle forze di contatto all'interno del modello A (forze di compressione in nero, forze di trazione in giallo)

In corrispondenza delle interfacce degli strati che costituiscono la pavimentazione (figura 6), in particolare, è stato analizzato l'andamento delle forze di contatto. Al fine di ottenere un confronto significativo tra i due modelli, queste ultime sono state comparate introducendo opportuni fattori correttivi ( $F_C$ ).

Per il modello A,  $F_C$  tiene conto del fatto che gli strati in conglomerato bituminoso e la fondazione, essendo stati generati con la tecnica dell'*up-scaling*, sono formati da particelle di diametro amplificato rispetto a quello della curva granulometrica reale. Per la sua valutazione, in particolare, è stato calcolato il numero medio di contatti che si generano tra le particelle di diametro reale che sono contenute all'interno di un grano in *up-scaling*, nelle configurazioni di addensamento massimo e minimo (figura 7, tabella 4).

Per il modello B, invece,  $F_C$  tiene conto del confinamento laterale che l'elemento cilindrico di contorno (figura 4) esercita sulla diffusione della perturbazione indotta dal carico all'interno della pavimentazione.

In entrambi i modelli le forze di contatto ( $F_z$ ) manifestano un massimo sotto le impronte di carico (descritte dalle linee verticali tratteggiate) ed una progressiva diminuzione procedendo verso il contorno del modello (figura 8).

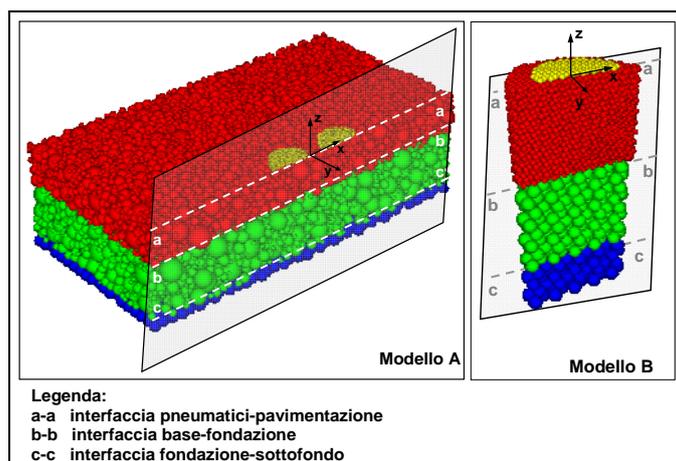


Figura 6 – interfacce per la misura delle  $F_z$

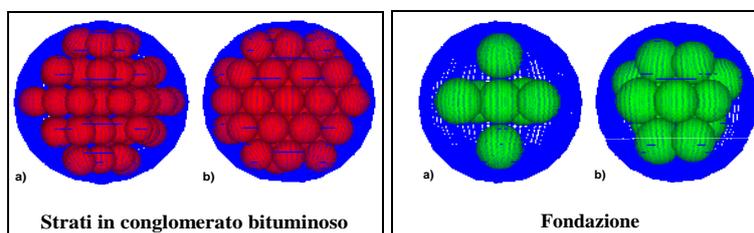
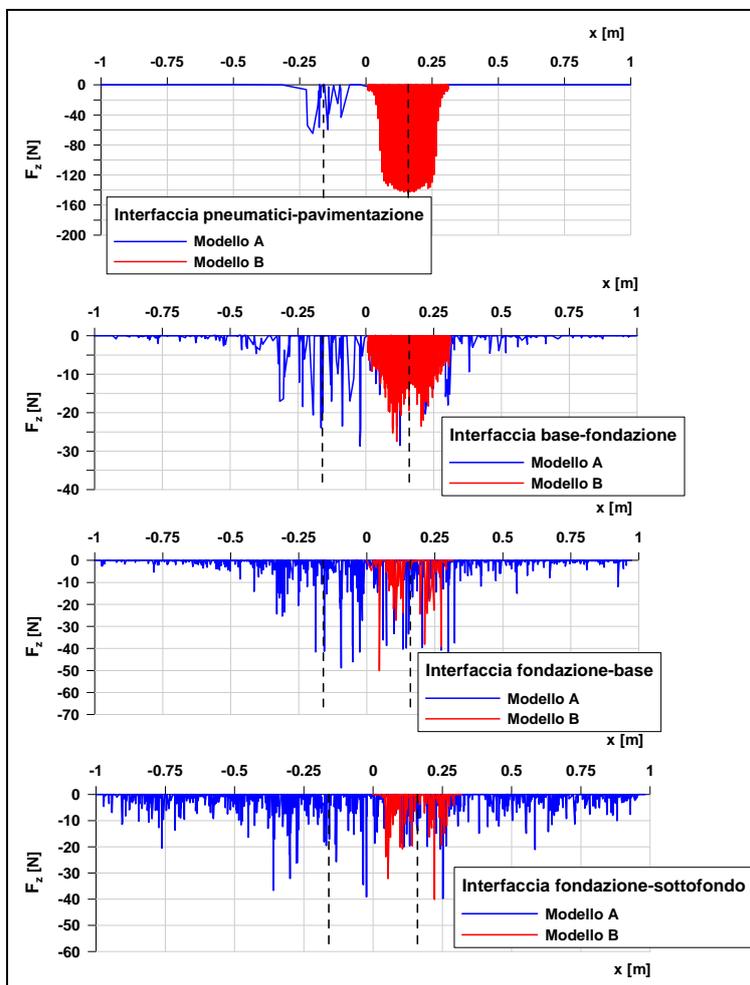


Figura 7 - modello A: particelle di diametro reale contenute all'interno di un grano in *up-scaling*, per gli strati in conglomerato bituminoso e per la fondazione, nelle configurazioni di addensamento minimo (a) e massimo (b)

**Tabella 4 - modello A: contatti che si generano tra le particelle di diametro reale contenute all'interno di un grano in *up-scaling***

Layer	Strati in conglomerato bituminoso		Fondazione	
	Minimo (figura 7a)	Massimo (figura 7b)	Minimo (figura 8a)	Massimo (figura 8b)
Numero totale di particelle	53	66	7	13
Numero di contatti interni	52	54	6	24
Numero di contatti di frontiera	21	21	6	11
Numero di contatti totali	73	75	12	35
Numero medio di contatti totali	74		24	



**Figura 8 –  $F_z$  alle diverse interfacce**

Il confronto tra i valori di picco, in particolare, conferma le potenzialità della tecnica *up-scaling* nella generazione delle particelle (tabella 5).

**Tabella 5 - Confronto tra i picchi di  $F_z$  nei modelli A e B [N]**

Interfaccia	Modello A	Modello B	$\Delta F_z$ [%]
Pneumatici - pavimentazione	136	144	5.88
Strato di base - fondazione	29	27	6.89
Fondazione - strato di base	49	50	2.00
Fondazione - sottofondo	40	40	0.00

Note le forze di contatto massime in corrispondenza del piano viabile e dell'interfaccia tra lo strato di base e la fondazione (tabella 5), per il modello A sono state investigate le modalità con cui si innescano e si diramano le fessurazioni. A tal fine è stata utilizzata la legge di *Paris-Erdogan* in forma integrale, la quale consente di determinare il numero di cicli di carico ( $N_f$ ) necessari all'innescamento di una fessura di lunghezza  $c_0$ , in funzione del fattore di concentrazione degli sforzi (*stress intensity factor*,  $\Delta K_{cr}$ ) e delle costanti del materiale  $A$  ed  $n$  (Dondi, 1993):

$$N_f = \frac{1}{A \cdot (\Delta K_{cr})^n} \cdot (c_0 - 0) \quad (2)$$

Per i conglomerati bituminosi  $n$  si assume pari a 4 (Dondi, 1993), mentre il parametro  $A$  si valuta dalla seguente espressione (Dondi, 1993):

$$n = -0.92 - 0.42 \cdot \log A \quad (3)$$

Di complessa determinazione, invece, risulta essere lo *stress intensity factor*, in quanto dipende dalle condizioni geometriche e da quelle di contorno del modello, nonché dal tipo di frattura. Per il modello A,  $\Delta K_{cr}$  si valuta secondo l'espressione (4) in funzione del modulo elastico del materiale ( $E$ ) e dell'energia per unità di superficie assorbita in seguito all'innescamento della frattura ( $\gamma_s$ ) (Dondi, 1993):

$$\Delta K_{cr} = \sqrt{2 \cdot \gamma_s \cdot E} \quad (4)$$

Per la valutazione di  $\gamma_s$  si impone il bilancio energetico del sistema in funzione dell'energia di deformazione elastica ( $W_{el}$ ) e di quella superficiale assorbita ( $W_s$ ):

$$W_{tot} = W_{el} - W_s = W_{el} - 2 \cdot c_0 \cdot \gamma_s = 0 \quad (5)$$

$$\gamma_s = \frac{W_{el}}{2 \cdot c_0} \quad (6)$$

In corrispondenza sia del piano viabile sia dell'interfaccia tra lo strato di base e la fondazione, è stato graficato l'andamento dell'energia elastica di deformazione per unità di lunghezza ( $W_{el}$ ), al fine di individuare il corrispondente valore di picco da inserire nella (6) (figure 9 e 10).

La lunghezza iniziale della frattura ( $c_0$ ), invece, è stata definita come la quota del punto a massima energia elastica, misurata rispetto alla giacitura di riferimento (tabella 6).

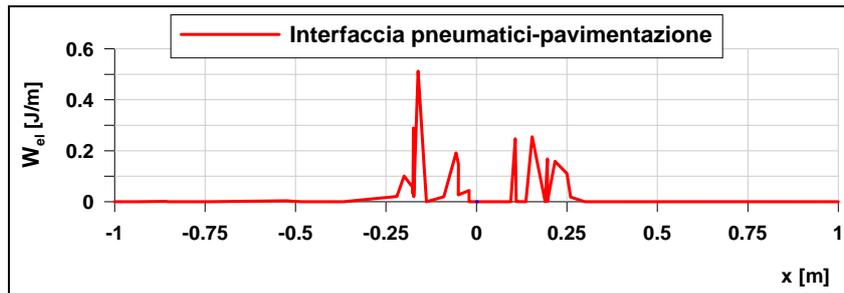


Figura 9 – energia elastica di deformazione in corrispondenza del piano viabile

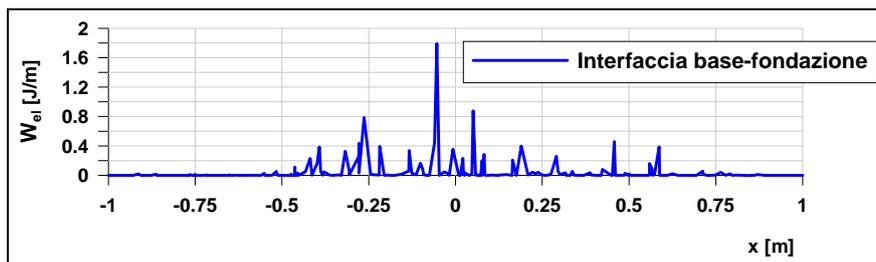


Figura 10 – energia elastica di deformazione in corrispondenza dell'interfaccia base-fondazione

Tabella 6 - legge di *Paris-Erdogan* per il modello A

Interfaccia	Piano viabile	Base-fondazione
$A$ (3)	$1.93 \cdot 10^{-12}$	$1.93 \cdot 10^{-12}$
$W_{el}$ [J/m] (figure 10 e 11)	$5.12 \cdot 10^{-1}$	$1.79 \cdot 10^0$
$c_0$ [m]	$3.49 \cdot 10^{-4}$	$7.16 \cdot 10^{-4}$
$\gamma_s$ [J/m <sup>2</sup> ] (6)	$7.34 \cdot 10^2$	$1.25 \cdot 10^3$
$\Delta K_{cr}$ [MPa·√m](4)	1.81	2.36
$N_f$ (2)	$1.68 \cdot 10^7$	$1.19 \cdot 10^7$

Dalla tabella 6 si evidenzia che i requisiti prestazionali della pavimentazione modellata iniziano a decadere dopo  $1.19 \cdot 10^7$  cicli di carico. Le fratture, in particolare, si innescano in corrispondenza sia del piano viabile sia dell'interfaccia tra lo strato di base e la fondazione.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati mediante la legge di fatica dell'*AASHTO Road Test*, la quale lega la deformazione di rottura alla base dei conglomerati bituminosi ( $\epsilon$ ) al numero di applicazioni di carico ( $N$ ). Per la valutazione di  $\epsilon$  è stato utilizzato il codice di calcolo *BISAR*, partendo dalle specifiche indicate in tabella 7. Per il sottofondo elastico, in particolare, è stato utilizzato un materiale con modulo di Young e coefficiente di Poisson molto alti, al fine di schematizzare il piano orizzontale inferiore di contenimento previsto dal modello *DEM*.

**Tabella 7 - Specifiche degli strati della pavimentazione in *BISAR***

Strato	Spessore [m]	Modulo di Young [MPa]	Coefficiente di Poisson
Strati legati	0.23	2235	0.35
Fondazione	0.30	800	0.45
Sottofondo	0.05	150	0.47
Sottofondo elastico	---	$10^{12}$	0.50

Il confronto, in particolare, è stato eseguito per l'interfaccia base-fondazione (tabella 8).

**Tabella 8 - numero di cicli di carico che portano a rottura il modello A**

	Interfaccia	
	Piano viabile	Base-fondazione
Legge di <i>Paris-Erdogan – DEM-P (2)</i>	$1.68 \cdot 10^7$	$1.19 \cdot 10^7$
Legge di fatica dell' <i>AASHTO Road Test</i>	---	$7.81 \cdot 10^8$

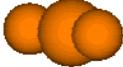
Dall'analisi dei risultati ottenuti si evidenzia che la legge di fatica di *Paris-Erdogan* specializzata con il Metodo degli Elementi Distinti Particellari fornisce un valore del numero di cicli di carico inferiore a quello valutato con la formulazione classica. Questo risultato può essere imputabile a diversi fattori: in primo luogo al fatto che per alcuni parametri, quali ad esempio lo *stress intensity factor*, sono necessari opportuni approfondimenti sperimentali; in secondo luogo alla forma delle particelle utilizzate nei modelli, in quanto le sfere adottate consentono uno sviluppo parziale dell'ingranamento tra gli elementi dell'inerte.

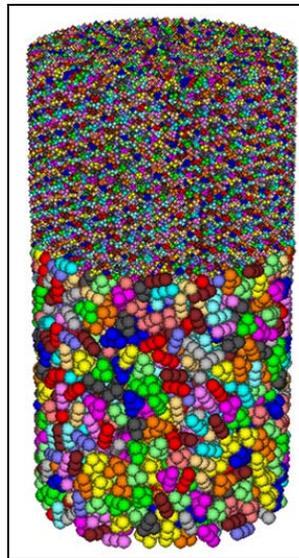
Per risolvere il problema, può essere conveniente introdurre parametri, quali forma e dimensioni dei grani dell'aggregato, per ora trascurati a causa di limiti computazionali. A tal fine è stato creato un nuovo modello, di seguito denominato "modello C", costituito dagli stessi strati del modello B, sia in termini di spessore sia di tipologia di materiale, ma generato attraverso la logica *clump*. Quest'ultima, in particolare, consente di creare elementi di forma generica, dotati di comportamento rigido, ottenuti assemblando particelle circolari. Per il modello C sono stati definiti quattro tipi di *clump*, due per gli strati legati a bitume e due per la fondazione, caratterizzati da forma e dimensioni diverse (tabelle 9 e 10). Il modello è stato sollecitato mediante un unico ciclo di carico attraverso un'impronta circolare uguale a quella del modello B, che induce sulla sovrastruttura una forza verticale costante pari a 30 kN (figura 11).

**Tabella 9 - modello C: *clump* utilizzati per lo strato di fondazione ( $R_1$  è il raggio medio del grano reale della fondazione)**

Numero di particelle del <i>clump</i>	3	5
Raggio delle particelle che compongono il <i>clump</i>	Ball n. 1: $(R_1/2)$ Ball n. 2: $(R_1/2)$ Ball n. 3: $(R_1/2)$	Ball n. 1: $(R_1/2)$ Ball n. 2: $(R_1/2)$ Ball n. 3: $(R_1/2)$ Ball n. 4: $(R_1/2)$ Ball n. 5: $(R_1/2)$
Descrizione del <i>clump</i>		

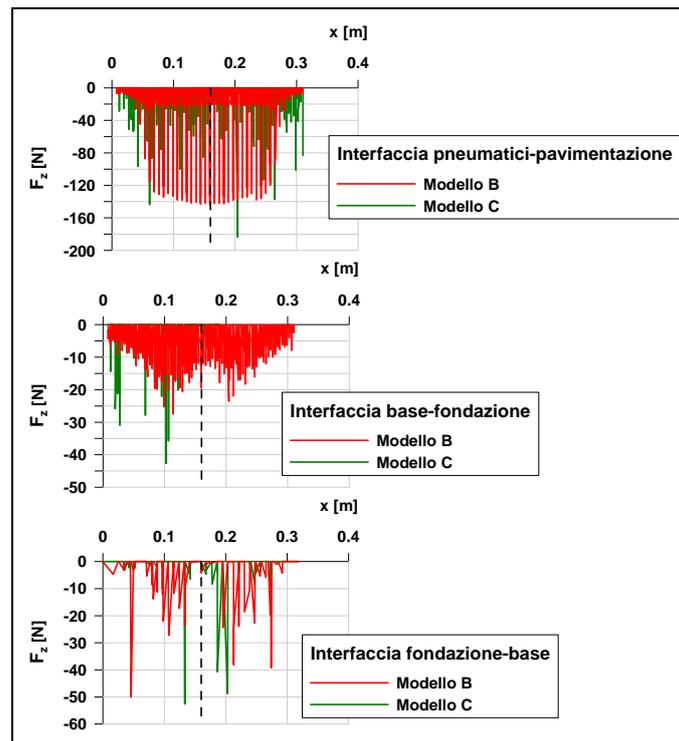
**Tabella 10 - modello C: *clump* utilizzati per gli strati legati ( $R_2$  è il raggio medio del grano reale degli strati legati a bitume)**

Numero di particelle del <i>clump</i>	3	5
Raggio delle particelle che compongono il <i>clump</i>	Ball n. 1: $(R_2/2)$ Ball n. 2: $0.85 \cdot (R_2/2)$ Ball n. 3: $0.85 \cdot (R_2/2)$	Ball n. 1: $(R_2/2)$ Ball n. 2: $0.75 \cdot (R_2/2)$ Ball n. 3: $0.75 \cdot (R_2/2)$ Ball n. 4: $0.75 \cdot (R_2/2)$ Ball n. 5: $0.75 \cdot (R_2/2)$
Descrizione del <i>clump</i>		



**Figura 11 - modello C**

In corrispondenza delle interfacce degli strati che costituiscono la pavimentazione (figura 6) è stato analizzato l'andamento delle forze di contatto. Al fine di ottenere un confronto significativo tra i modelli B e C, queste ultime sono state comparate introducendo un fattore correttivo che tiene conto del confinamento laterale che l'elemento cilindrico di contorno esercita sulla diffusione della perturbazione indotta dal carico all'interno del sistema (figura 12, tabella 11).



**Figura 12 –  $F_z$  alle diverse interfacce**

**Tabella 11 - Confronto tra i picchi di  $F_z$  nei modelli B e C [N]**

Interfaccia	Modello B	Modello C	$\Delta F_z$ [%]
Pneumatici - pavimentazione	144	184	21.74
Strato di base - fondazione	27	43	37.21
Fondazione - strato di base	50	52	3.80

Dall'analisi dei risultati ottenuti si evidenzia che il modello C è caratterizzato da valori di picco delle forze di contatto diversi da quelli del modello B, superiori in modulo. Tenendo in conto di parametri quali la forma e le dimensioni dei grani dell'inerte, quindi, è possibile individuare nuovi punti in corrispondenza dei quali possono innescarsi le fratture.

#### 4. CONCLUSIONI

Dall'analisi dei risultati ottenuti mediante modellazione numerica è possibile osservare che:

- il confronto tra i valori di picco delle forze di contatto dei modelli A e B conferma la validità della tecnica *up-scaling* che, consentendo l'aumento del diametro delle particelle, garantisce una notevole riduzione dei tempi di calcolo;
- il Metodo degli Elementi Distinti Particellari, fornendo i valori di picco delle forze e degli spostamenti a cui è soggetto il sistema, consente una rappresentazione del modello molto fedele alla realtà fisica e si propone quindi come una valida evoluzione delle teorie tradizionali basate, invece, sui valori medi delle grandezze indagate. Per lo studio del comportamento a fatica, in particolare, è possibile ottenere indicazioni sia sul numero di cicli di carico che la portano a rottura, operazione questa già possibile con le tecniche classiche, sia soprattutto sulla localizzazione del punto d'insacco della frattura. Diventa così possibile studiare la propagazione di fenomeni fessurativi di tipo *bottom-up* e *top-down*, tenendo in considerazione anche la sovrapposizione degli effetti conseguente alla loro interazione all'interno dello strato;
- la comparazione tra i risultati ottenuti mediante la legge di fatica di *Paris-Erdogan* specializzata con il Metodo degli Elementi Distinti Particellari e quella dell'*AASHTO Road Test* ha fornito valori diversi tra loro. Questo risultato può essere imputabile a diversi fattori: in primo luogo al fatto che per alcuni parametri, quali ad esempio lo *stress intensity factor*, sono necessari opportuni approfondimenti sperimentali; in secondo luogo alla forma delle particelle utilizzate nei modelli, in quanto le sfere adottate consentono uno sviluppo parziale dell'ingranamento tra gli elementi dell'inerte;
- l'introduzione di parametri, quali la forma e le dimensioni dei grani dell'aggregato, ha consentito non solo di ottenere un modello più rispondente alla realtà fisica, ma anche di approfondire il comportamento a fatica del sistema individuando nuovi punti in corrispondenza dei quali possono innescarsi le fratture.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Birgisson B., Wang J., Roque R. (2007), Numerical implementation of a strain energy-based fracture model for HMA materials, *Road materials and pavement design*, vol. 8, n. 1;
- Buttlar W.G., You Z. (2001), Discrete element modelling of asphalt concrete, *Transportation Research Board*, vol. 1757, n. 1;
- Chang K.N.G., Meengoda J.N. (1997), Micromechanical simulation of hot mix asphalt, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, n. 5, pg. 495-503;
- Collop A.C., McDowell G.R., Lee Y. (2004), Use of the distinct element method to model the deformation behaviour of an idealised asphalt mixture, *International Journal of Pavement Engineering*, n. 5, pp. 1-7;
- Cundall P. A., Strack O. D. L. (1979), A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, vol. 29, n. 1, pp. 47-65;

- Dondi G. (1993), Limitazione della propagazione delle lesioni nelle pavimentazioni stradali flessibili, Tesi di Laurea di Lucia Farnè, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna;
- Dondi G., Bragaglia M. & Vignali V. (2005), Bituminous Mixtures Simulation With Distinct Particle Elements Method, III International SIIV Congress, Bari, 22-24 september;
- Dondi G., Bragaglia M. (2006), Modellazione ad elementi distinti particellari della prova ITSM, XVI Convegno Nazionale SIIV, Arcavacata di Rende (CS), 20-22 settembre;
- Dondi G., Vignali V., Bragaglia M. (2006), Modellazione mediante elementi distinti particellari delle prove sui materiali granulari, XVI Convegno Italiano di Meccanica Computazionale, Bologna, 26-28 giugno;
- Dondi G., Bragaglia M., Vignali V. (2007), Flexible pavement simulation with distinct particle element method, IV International SIIV Congress, Palermo, 12-14 september;
- Itasca (2002), PFC3D: Particle flow code in three dimensions, Itasca Consulting Group.