



MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

Programmi di ricerca cofinanziati - Modello E Relazione scientifica conclusiva sui risultati di ricerca ottenuti - ANNO 2007 prot. 2007423W4R

1. Area Scientifico Disciplinare principale	<i>08: Ingegneria civile ed Architettura</i>
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	<i>SANTAGATA Ezio</i>
- Università	<i>Politecnico di TORINO</i>
- Facoltà	<i>Facoltà di INGEGNERIA</i>
- Dipartimento/Istituto	<i>Dip. IDRAULICA, TRASPORTI E INFRASTRUTTURE CIVILI</i>
3. Titolo del programma di ricerca	<i>MODELLAZIONE E PROGETTAZIONE AVANZATA DI PAVIMENTAZIONI STRADALI PERPETUE</i>
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	<i>ICAR/04</i>
5. Costo originale del Programma:	<i>337.000 €</i>
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	<i>165.100 €</i>
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	<i>75.008 €</i>
8. Finanziamento totale:	<i>240.108 €</i>
9. Durata:	<i>24 mesi</i>

10. Obiettivo della ricerca eseguita

Ad oggi il patrimonio stradale nazionale è prevalentemente costituito da pavimentazioni flessibili e semirigide, la cui richiesta di manutenzione si fa ogni giorno sempre più gravosa, sia in termini economici sia in termini di risorse richieste. Di conseguenza, si sta affermando il concetto delle cosiddette pavimentazioni perpetue, ossia di pavimentazioni in grado di garantire una vita utile dell'ordine dei 50 anni, ben superiore ai limiti massimi generalmente considerati nella progettazione (e riscontrati nella pratica), dell'ordine dei 20-25 anni.

Il progetto di ricerca aveva l'obiettivo di rendere tali concetti fruibili alla realtà italiana con alcuni contributi originali. Tali contributi vengono evidenziati nel seguito.

In primo luogo, si è ritenuto opportuno ampliare il concetto di pavimentazione perpetua per ciò che riguarda le tecnologie costruttive e la destinazione.

Con riferimento alla tecnologia costruttiva si sono prese in esame, per mezzo di opportuna sperimentazione e modellazione, le pavimentazioni rinforzate con reti (contributi delle Unità di ricerca di Ancona e Parma). Per quel che riguarda la destinazione, si è deciso di mettere a punto un sistema di valutazione per l'impiego dei concetti propri delle pavimentazioni perpetue, generalmente destinate alle grandi vie di comunicazione (autostrade), nell'ambito della viabilità ordinaria (contributo dell'Unità di Pisa).

Il progetto intendeva inoltre sviluppare strumenti specifici per la valutazione preventiva delle pavimentazioni perpetue sia per ciò che riguarda le termini di indagini sperimentali sia per ciò che concerne la modellazione.

In tal senso, si è voluto sviluppare un sistema di simulazione dei carichi in laboratorio (contributo dell'Unità di Ricerca del Politecnico di Torino) ed al tempo stesso si sono messi a punto modelli numerici di calcolo agli elementi distinti (contributo dell'Unità di Ricerca di Bologna).

Il programma di ricerca è stato strutturato con una piena integrazione dei contributi delle cinque diverse Unità Operative le cui attività sono state definite in funzione delle specifiche competenze ed esperienze locali.

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Unità di Ricerca del Politecnico di Torino:

L'obiettivo principale dell'Unità di Ricerca del Politecnico di Torino era di mettere a punto un sistema di simulazione in scala reale (in laboratorio) per il rilievo del comportamento dinamico sotto carico delle pavimentazioni, con particolare riferimento a quelle dette "perpetue".

Si è tuttavia rilevato, anche sulla base della letteratura internazionale sull'argomento, che era opportuno separare lo studio di alcuni degli effetti che intervengono sotto carico. Alla luce di ciò, il progetto è stato meglio dettagliato in 3 sotto-progetti dedicati ispezzivamente alla simulazione dei seguenti fenomeni:

- risposta sotto i carichi verticali e tangenziali (di trazione);

- risposta sotto i carichi orizzontali e di taglio;

- risposta sotto i carichi ciclici alternati.

Per affrontare il tema dei carichi verticali e tangenziali, si è adattata l'attrezzatura per ormaimento già disponibile, che ha richiesto in particolare l'acquisizione di particolari casseri per la preparazione delle lastre di conglomerato bituminoso.

Per lo studio della risposta ai carichi orizzontali e di taglio, è stato progettato e realizzato (anche con cospicui fondi provenienti da altre ricerche), un simulatore ad asse orizzontale per il quale si sta provvedendo alla realizzazione di una cella climatica.

Per la valutazione del comportamento sotto carichi ciclici alternati, si è sfruttata l'attrezzatura per prove di fatica su 4 punti, particolarmente utile per lo studio dei cosiddetti conglomerati "rich bottom base".

Le prove di simulazione sono state eseguite su conglomerati bituminosi aventi caratteristiche compatibili con il concetto di pavimentazione perpetua. In particolare, si è valutato il comportamento dei cosiddetti conglomerati "rich bottom base", aventi una percentuale di bitume piuttosto elevata ed una percentuale dei vuoti ridotta. Lo stesso tipo di conglomerato bituminoso è stato messo in opera in interventi in scala reale sull'autostrada A32 Torino-Bardonecchia, ove sono stati effettuati tutti i controlli in corso d'opera.

Una ulteriore fase della ricerca è stata dedicata allo studio dei conglomerati per strato di base ad elevato contenuto di fresato. Le corrispondenti prove di stesa in scala reale sono state eseguite sull'autostrada A1 nei pressi di Settebagni, ove sono tuttora in corso i lavori di allargamento della carreggiata autostradale.

Per quel che riguarda la strumentazione acquisita, si sono privilegiate attrezzature di complemento all'impianto generale del progetto, che nelle prime prove di simulazione richiedeva la termostatazione di ingenti quantitativi di conglomerato bituminoso. Si sono inoltre acquisiti accessori di corredo alle attrezzature impiegate

per la compattazione.

I risultati concreti della ricerca si sono tradotti in curve di accumulo del danno (da fatica o da deformazioni visco-plastiche) che sono state utilizzate nell'ambito di alcuni codici di calcolo per la stima della vita utile delle pavimentazioni.

Si ritiene che il contributo sia del tutto innovativo e che possa essere di grande utilità per i progettisti stradali.

Altro risultato di rilievo del progetto è la realizzazione del simulatore ad asse orizzontale, per il quale si stanno valutando le possibilità di deposito di brevetto.

Unità di ricerca dell'Università Politecnica delle Marche:

L'obiettivo principale dell'Unità di Ricerca dell'Università Politecnica delle Marche era di valutare in laboratorio e sul campo (mediante la realizzazione di un tronco pilota opportunamente strumentato) il contributo strutturale fornito alle pavimentazioni "perpetue" da parte delle reti di rinforzo. Ciò con particolare riferimento alla risposta alle sollecitazioni di taglio e flessionali.

In laboratorio le prove sperimentali hanno riguardato bistrati rinforzati con geosintetici che sono state preparate mediante compattatore a piastra ponendo particolare cura nel posizionamento delle reti all'interfaccia. Dalle piastre si sono quindi ricavati provini prismatici, che sono stati sottoposti a prove cicliche a flessione e provini cilindrici, ottenuti mediante carotaggio, sottoposti a prove di taglio all'interfaccia.

Sono state studiate 3 diverse tipologie di rinforzo:

° una geogriglia in fibra di vetro e resina termoindurente avente una maglia di dimensioni pari a 33 mm × 33 mm;

° una geogriglia in poliestere e rivestita in SBR avente una maglia di dimensioni pari a 30 mm × 30 mm e rinforzata con degli elementi in fibra di vetro;

° una geomembrana composita termoadesiva resistente all'acqua che contiene un rinforzo al suo interno.

In tutti i casi è stata applicata una mano d'attacco all'interfaccia, realizzata mediante emulsione bituminosa.

Per una stessa tipologia di interfaccia, alla temperatura di 20 °C, sono state eseguite tre ripetizioni sia per il livello di carico scelto, per le prove dinamiche a flessione su 4 punti, che per ciascuno dei tre valori di sforzo normale all'interfaccia, per le prove ASTRA. L'intero programma sperimentale previsto per ciascuna tipologia di rete è stato ripetuto, a titolo di confronto, su provini dotati di interfacce prive di rinforzo.

I risultati sperimentali hanno mostrato che relativamente al comportamento a taglio, la presenza del rinforzo agisce da elemento di separazione producendo una riduzione della resistenza a taglio all'interfaccia, anche se l'utilizzo abbinato ad una mano d'attacco con emulsione modificata consente di limitarne le conseguenze conferendo al sistema bistrato buone prestazioni a taglio.

Con riferimento al comportamento ai carichi ripetuti, in tutti i casi analizzati, il rinforzo ha evidenziato un'azione efficace testimoniata dal prolungamento della vita utile del sistema bistrato sottoposto alle verifiche sperimentali. Più precisamente, i provini rinforzati hanno mostrato una marcata estensione della vita utile del materiale rispetto a quelli non rinforzati. Dal confronto tra le varie tipologie di rete è emerso che un valore di modulo equivalente (cioè riferito all'intero provino bistrato considerato omogeneo) più elevato non implica una resistenza ai carichi ripetuti altrettanto elevata.

Nella fase finale del programma di ricerca si è quindi proceduto alla realizzazione di un tronco sperimentale pilota al fine di studiare il comportamento di una pavimentazione stradale flessibile rinforzata sotto l'azione di carichi da traffico e di azioni climatiche.

Il comportamento della pavimentazione, e quindi anche l'effetto del rinforzo, è stato valutato sia tramite il monitoraggio visivo del tronco pilota che tramite l'installazione di strumentazioni che permettono di misurare lo stato tenso-deformativo.

Per la realizzazione del tronco pilota è stato individuato un tratto di strada situato all'interno di un'area a destinazione industriale, in località Osimo Stazione, nel comune di Osimo (AN).

Si è ritenuto opportuno realizzare una stesa di lunghezza pari a 45 m e larghezza 5 m, a sua volta divisa in sezioni di lunghezza 15 m aventi diverse tipologie di rinforzo.

Tenendo conto degli studi sperimentali eseguiti in laboratorio e dello stato dell'arte riguardante i rinforzi delle sovrastrutture, si è ritenuto opportuno impiegare come rinforzo le geogriglie. In particolare sono state scelte:

- una geogriglia in fibra di vetro e resina termoindurente avente una maglia di dimensioni 33 mm x 33 mm (FP);

- una geogriglia in fibra di carbonio pre-bitumata con maglia di dimensioni 25 mm x 25 mm (CF).

Inoltre, per tenere conto della variabilità nelle condizioni di applicazione dei rinforzi, sulla superficie dello strato inferiore (in ciascuna sezione) sono state preparate 2 aree di caratteristiche particolari:

- un'area con tagli fatti secondo una maglia quadrata per simulare l'effetto di eventuali fessure e studiare il fenomeno delle fessure da riflessione;

- un'area preparata mediante l'applicazione di un agente di de-bonding per simulare le condizioni di superficie non perfettamente pulita.

Sul tronco pilota sono state eseguite prove di carico in vera grandezza utilizzando un veicolo pesante a tre assi. In ciascuna sezione, il veicolo è stato fatto transitare per 9 volte in corrispondenza dell'allineamento della strumentazione. Ad ogni passaggio sono state registrate la posizione del veicolo, le pressioni (cella di pressione) e le deformazioni (straining gauges) e le temperature all'interno della pavimentazione.

Le time-histories registrate nel sistema di acquisizione hanno confermato il corretto funzionamento degli strumenti fornendo andamenti e valori di picco in linea con le previsioni effettuate mediante un semplice modello di multistrato elastico.

Le prove hanno inoltre consentito di acquisire dati sperimentali la cui interpretazione è ancora in corso e risulterà di grande utilità per la modellazione del multistrato e la verifica dell'efficacia del rinforzo.

Unità di ricerca dell'Università di Pisa:

L'obiettivo principale dell'Unità di Ricerca dell'Università di Pisa era di valutare il comportamento strutturale di pavimentazioni perpetue mediante una modellazione visco-elastica avanzata, con la conseguente messa a punto di un sistema esperto finalizzato alle pavimentazioni della viabilità ordinaria.

Per l'analisi strutturale delle pavimentazioni perpetue oggetto di studio è stato selezionato il software Viscoroute 2.0, sviluppato presso il LCPC di Nantes, in cui la pavimentazione è schematizzata come un multistrato e ad ogni strato vengono assegnati lo spessore e le caratteristiche meccaniche calcolate utilizzando il modello di Huet-Sayegh, in funzione della temperatura e dei parametri visco-elastici del materiale.

Nell'ambito delle attività di studio è stata eseguita la raccolta delle specifiche prestazionali disponibili relative alle tecniche di rinforzo e di ricostruzione delle pavimentazioni. In particolare, si è fatto riferimento alle specifiche tecniche predisposte nell'ambito del progetto Leopoldo (sviluppato dai membri dell'Unità operativa con finanziamenti del Ministero delle Infrastrutture e della Regione Toscana) per la realizzazione dei siti sperimentali. Ciò ha consentito, mediante le indagini eseguite in laboratorio e in sito sulle miscele utilizzate per la costruzione di tali pavimentazioni, di determinare le effettive prestazioni ottenibili con le miscele previste nelle specifiche tecniche.

Sono state eseguite prove di laboratorio su carote di conglomerato bituminoso estratte dalle pavimentazioni stradali di 4 siti sperimentali realizzati nell'ambito del progetto Leopoldo su altrettante strade regionali nelle Province di Arezzo, Firenze, Lucca e Pisa; in particolare, oltre alle prove per la determinazione della composizione volumetrica delle miscele, sono state eseguite prove di trazione indiretta in condizioni dinamiche (ITCY) finalizzate alla caratterizzazione visco-elastica dei materiali nonché prove di fatica. Inoltre, sono state effettuate indagini in sito per valutare la risposta delle suddette 4 pavimentazioni sperimentali che, in fase di costruzione, erano state opportunamente strumentate con sistemi di monitoraggio delle deformazioni e delle tensioni nonché del peso dei veicoli, delle temperature e dell'umidità del sottofondo; le pavimentazioni sono state sottoposte ad azioni impulsive indotte sia con FWD sia al passaggio dei veicoli.

Tali dati sono stati utilizzati nelle fasi successive della ricerca per la verifica sperimentale del modello di valutazione della risposta meccanica della pavimentazione implementato nel software Viscoroute 2.0. In particolare, nelle pavimentazioni sperimentali è stato possibile caratterizzare le seguenti tecnologie: riciclaggio delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso attraverso l'utilizzo di emulsioni bituminose e di bitume schiumato, strati di pavimentazione con conglomerato bituminoso ad alto modulo e con conglomerato bituminoso ad elevata durata a fatica nonché strati in conglomerato bituminoso tradizionale assunti come riferimento.

Per lo sviluppo di specifici modelli analitici per la valutazione della risposta meccanica della pavimentazione sono state affrontate tre particolari problematiche:

1) Analisi viscoelastica-viscoplastica dei risultati di prove di trazione indiretta eseguite in laboratorio per la caratterizzazione meccanica dei conglomerati bituminosi;

2) Analisi della risposta visco-elastica delle pavimentazioni stradali;

3) Determinazione di un valore rappresentativo della frequenza da utilizzare per il calcolo del modulo di rigidezza in condizioni dinamiche nell'analisi lineare elastica equivalente.

Ad integrazione delle attività sopra descritte sono state sviluppate:

1) Un modello economico per la valutazione dei benefici economici delle pavimentazioni perpetue (attraverso il software RealCost, sviluppato dalla FHWA);

2) Un sistema esperto che consente di effettuare in modo automatico tutti i passi necessari per eseguire una valutazione del costo sul ciclo di vita utile di differenti alternative progettuali di pavimentazione perpetua.

Unità di ricerca dell'Università di Parma:

L'obiettivo principale dell'Unità di Ricerca dell'Università di Parma era di valutare su scala reale il comportamento strutturale di pavimentazioni perpetue dotate di sistemi di rinforzo (metallici, in fibra di vetro ed in poliestere), con particolare riferimento all'incremento di vita utile.

Nello specifico, le attività sviluppate hanno riguardato:

1) L'analisi in scala reale tramite allestimento di un tratto di strada sperimentale sul quale sono state testate tre tipologie di rinforzo posizionate all'interfaccia tra lo strato di base e lo strato di binder;

2) Lo studio di un'adeguata metodologia di laboratorio per valutare gli effetti di rinforzi metallici e in fibra di vetro posti all'interfaccia tra strato di base e strato di

binder sia nelle pavimentazioni flessibili sia nelle pavimentazioni rigide. A tale scopo è stata predisposta una originale procedura di invecchiamento artificiale accelerato dei leganti bituminosi e dei materiali polimerici mediante esposizione a lampada UV ad alta emissione.

3) L'analisi sperimentale dei possibili benefici apportati dalla presenza del rinforzo sia nelle pavimentazioni flessibili, sia nelle pavimentazioni rigide, in termini di incremento della vita utile e prevenzione del fenomeno della fessurazione riflessa.

4) L'elaborazione di un modello teorico in grado di rappresentare il comportamento prestazionale di una pavimentazione, sia flessibile che rigida, rinforzata con rete metallica.

L'analisi in scala reale ha previsto lo studio di tre tipologie di rinforzo, ovvero: rete metallica, rete in fibra di vetro e rete in fibre di poliestere. L'analisi in scala ridotta in laboratorio ha invece previsto un confronto tra rinforzo in rete metallica e in fibra di vetro. Il rinforzo metallico è costituito da una rete di acciaio a maglie esagonali aventi diametro di 2.4 mm, irrigidita da barre di diametro di 4.4 mm, poste a interasse di 18 cm; il rinforzo in fibra di vetro è costituito da una rete in fibra di vetro ad alta resistenza rinforzata con un rivestimento di polimeri modificati; il rinforzo in poliestere è invece costituito da una geogriglia tessuta in filamenti di poliestere ad alta tenacità con rivestimento a matrice bituminosa.

Unità di ricerca dell'Università di Bologna:

L'obiettivo principale dell'Unità di Ricerca dell'Università di Bologna era di provvedere allo studio avanzato del comportamento a fatica di pavimentazioni stradali perpetue per la definizione di nuovi criteri di progettazione e di verifica.

Per raggiungere questi risultati è necessario superare i criteri classici di calcolo a fatica delle pavimentazioni stradali flessibili basati su condizioni medie ripetute nel tempo e su un processo di accumulo del danno di tipo continuo. Questi ultimi, infatti, ipotizzano che tutti i carichi producano necessariamente un danno, che i tassi di incremento del danno su strada siano direttamente proporzionali a quelli ottenuti in laboratorio, che l'effetto di auto-riparazione del conglomerato non risulti significativo e che i materiali in opera presentino un comportamento omogeneo. Nasce, quindi, la necessità di prendere in considerazione non più le condizioni medie, ma quelle critiche, fondate su uno sviluppo del danno di tipo discontinuo.

Per raggiungere questi obiettivi si è previsto l'utilizzo di tecniche numeriche avanzate in grado di prendere in considerazione il fatto che il conglomerato bituminoso, essendo un materiale multifase caratterizzato da una complessa natura intrinseca disomogenea ed anisotropa e fortemente influenzata dalle condizioni ambientali, esplica un comportamento meccanico difficilmente schematizzabile.

Tra i metodi discontinui disponibili in letteratura, in particolare, è stato utilizzato il software Particle Flow Code (PFC) 3D, basato sul metodo degli Elementi Distinti Particellari, poiché, schematizzando il sistema come un insieme di particelle di forma circolare, si presta particolarmente allo studio del comportamento meccanico di un materiale granulare.

I risultati ottenuti in precedenti studi ne hanno confermato le potenzialità nel riprodurre l'effettivo comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso sia durante test di laboratorio condotti su provini di piccole dimensioni, sia all'interno di una pavimentazione stradale flessibile. Nell'ambito dello studio del comportamento a fatica di quest'ultima, in particolare, hanno evidenziato che con questa metodologia 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'innescio della frattura.

Il confronto tra i risultati numerici e quelli ottenuti dalle leggi di fatica tradizionali, inoltre, ha mostrato che l'introduzione di parametri quali la forma e le dimensioni dei grani dell'aggregato permette 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. Nasce, quindi, l'esigenza di indagare ulteriormente questi parametri. A tal fine un utile strumento è rappresentato dal confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali ottenuti da modelli formati da sfere reali.

Lo studio ha previsto le seguenti attività:

1. la scelta della metodologia di modellazione più opportuna al fine di simulare l'aggregato reale in modo significativo e la calibrazione dei relativi parametri microscopici;

2. l'indagine dell'influenza della forma e delle dimensioni dei grani dell'aggregato sul comportamento tenso-deformativo del sistema.

Relativamente alla prima attività, partendo dai risultati disponibili in letteratura, è stato necessario:

° selezionare il materiale costituente le sfere: è stato scelto l'acciaio poiché costituisce un "aggregato ideale", in grado di fornire un confronto significativo tra i risultati numerici e quelli sperimentali in virtù del fatto che è ben riproducibile con il metodo DEM particellare. Infatti:

° la geometria delle sfere in acciaio è facilmente modellabile in termini sia di diametro, sia di sfericità;

° la superficie delle sfere è uniforme ed è nota la relativa tolleranza di fabbricazione.

° definire il test di laboratorio da modellare: è stato scelto quello triassiale poiché:

° fornisce risultati significativi sul fenomeno fisico studiato;

° è facile e veloce da svolgere;

° è facile da modellare con il metodo DEM particellare.

La calibrazione dei parametri microscopici con cui schematizzare le sfere di acciaio è stata ottenuta dalla modellazione 3D di una prova triassiale, confrontando i risultati del modello numerico con quelli di laboratorio.

Per quanto riguarda, invece, la scelta della metodologia più opportuna per simulare numericamente l'aggregato non sferico, partendo dai risultati disponibili in letteratura sono stati utilizzati dei clump, cioè degli elementi ottenuti assemblando particelle circolari aventi comportamento rigido. Questi ultimi, in particolare, hanno un diametro totale pari a quello delle sfere singole utilizzate nella fase di calibrazione dei parametri microscopici, al fine di ottenere un confronto significativo.

Per riprodurre clump di acciaio in laboratorio, sono stati svolti diversi test al fine di capire quale fosse il collante migliore con cui unire le sfere che li compongono.

Sono state prese in considerazione diverse possibilità, tenendo in considerazione vari aspetti quali:

° il vincolo dettato dalla dimensione delle sfere che schematizzano l'aggregato fine della miscela;

° la richiesta di elevata resistenza affinché i clump non si disgregino durante il test triassiale;

° la facilità di utilizzo del collante;

° l'assenza di residui tossici del collante.

Alla luce di queste considerazioni si adotta come collante l'acciaio liquido.

Per ottenere indicazioni sull'influenza della forma dell'aggregato sul comportamento tenso-deformativo del sistema sono stati confrontati i risultati ottenuti da prove triassiali condotte in laboratorio e modellate numericamente, eseguite su diversi provini al variare del tipo di particella elementare.

I risultati ottenuti evidenziano che per ogni tipologia di particella elementare le forze di contatto sia normali, sia tangenziali aumentano al crescere della tensione di confinamento. Le prime, in particolare, sono sempre più elevate delle seconde. Per ogni valore di sollecitazione di confinamento, inoltre, i valori delle forze di contatto aumentano al crescere della complessità della forma delle particelle che compongono il provino, poiché, aumentando l'ingranamento reciproco tra queste ultime, la resistenza complessiva del sistema diventa più elevata.

I provini modellati, inoltre, manifestano un andamento della curva tensione deviatorica-deformazione che, dopo una fase iniziale nella quale la prima cresce in modo monotono, arriva a rottura in corrispondenza del punto di picco della curva, oltre il quale la resistenza diminuisce. All'aumentare della tensione di confinamento crescono sia la resistenza ultima sia quella residua.

Per ogni valore di sollecitazione di confinamento, inoltre, i valori di picco delle curve aumentano al crescere della complessità della forma delle particelle che compongono il provino, poiché, aumentando l'ingranamento reciproco tra queste ultime, la resistenza complessiva del sistema diventa più elevata. Una tendenza opposta, invece, si osserva per la pendenza del ramo iniziale del grafico.

All'aumentare della dimensione del clump, inoltre, crescono sia la resistenza complessiva del sistema, sia il suo angolo di attrito macroscopico.

Alla luce dei risultati ottenuti, quindi, si confermano le potenzialità del metodo DEM, il quale consentendo una rappresentazione del modello molto fedele alla realtà fisica, si propone come una valida evoluzione delle teorie tradizionali.

Questi risultati prefigurano interessanti sviluppi sia nel campo della ricerca sia in quelli applicativi che, però, potranno essere affrontati una volta risolte le attuali difficoltà che si possono così riassumere:

° lunghi tempi di calcolo che, utilizzando gli attuali processori, costringono ad adottare sistemi di dimensioni ridotte o formati da un numero limitato di particelle;

° individuazione dei parametri microscopici da utilizzare nella modellazione, assai diversi da quelli macroscopici derivanti dalla letteratura o dai test di laboratorio;

° individuazione di leggi di interazione fra le particelle, specifiche per i materiali analizzati.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Nelle varie Unità di Ricerca non sono stati riscontrati particolari problemi.

Le variazioni che sono state apportate ai vari programmi di lavoro sono derivate dai risultati ottenuti e sono state finalizzate all'ottimizzazione del progetto di ricerca per il raggiungimento degli obiettivi finali.

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate (da consuntivo)

	(mesi uomo)
TOTALE	132
da personale universitario	132
altro personale	188
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	57

14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

Partecipazioni a convegni:

	Già svolti (numero)	Da svolgere (numero)	Descrizione
in Italia	21	0	<i>Partecipazione a Convegni inerenti il settore di ricerca nel quale si è sviluppato il progetto (v. rendiconti delle Unità di ricerca).</i>
all'estero	17	0	<i>Partecipazione a Convegni inerenti il settore di ricerca nel quale si è sviluppato il progetto (v. rendiconti delle Unità di ricerca).</i>
TOTALE	38	0	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Articoli pertinenti pubblicati:

	Numero	Descrizione
su riviste italiane con referee	0	<i>Come da consuntivo delle singole unità di ricerca.</i>
su riviste straniere con referee	13	<p><i>Come da consuntivo delle singole unità di ricerca.</i></p> <p>SANTAGATA E., CHIAPPINELLI G, RIVIERA P.P, BAGLIERI O (2010). Triaxial Testing for the Short Term Evaluation of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN, vol. 11; p. 123-147, ISSN: 1468-0629</p> <p>SANTAGATA E., BAGLIERI O, DALMAZZO D., TSANTILIS L (2009). Rheological and Chemical Investigation on the Damage and Healing Properties of Bituminous Binders. JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS, vol. 78; p. 567-596</p> <p>BASSANI M., SANTAGATA E., BAGLIERI O., FERRARIS M., SALVO M., VENTRELLA A. (2009). Use of vitrified bottom ashes of municipal solid waste incinerators in bituminous mixtures in substitution of natural sands. ADVANCES IN APPLIED CERAMICS, vol. 108 (1); p. 33-43, ISSN: 1743-6753, doi: 10.1179/174367608X364285</p> <p>SANTAGATA E., BAGLIERI O, DALMAZZO D (2008). Experimental Investigation on the Fatigue Damage Behaviour of Modified Bituminous Binders and Mastics. JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS, vol. 77; p. 851-884</p> <p>OLIVEIRA J.R.M., SANGIORGI C., FATTORINI G., ZOOROB S.E.; 2009; Investigating the Fatigue Performance of Grouded Macadam; Rivista: ICE Transport; Volume: 162; pp.: pp.115-123; ISBN: issn: 0965-092X</p> <p>COCURULLO A., AIREY G.D., COLLOP A.C., SANGIORGI C.; 2008; Indirect Tensile versus Two Point Bending Fatigue Testing; Rivista: ICE Transport; Volume: 161; pp.: pp. 207-220; ISBN: issn: 0965-092X</p> <p>LOSA M., LEANDRI P (2010). The reliability of tests and data processing procedures for pavement macrotexture evaluation. INTERNATIONAL JOURNAL OF PAVEMENT ENGINEERING, vol. (iFirst) 2010; p. 1-15, ISSN: 1029-8436, doi: 10.1080/10298436.2010.501866</p> <p>LOSA M., BACCI R, LEANDRI P (2008). A Statistical Model for Prediction of Critical Strains in Pavements from Deflection Measurements. ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN, vol. 1; p. 373-396, ISSN: 1468-0629</p> <p>LOSA M., LEANDRI P, BACCI R (2010). Empirical rolling noise prediction models based on pavement surface characteristics. ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN, vol. Special Issue, ISSN: 1468-0629</p> <p>LOSA M., LEANDRI P, BACCI R (2008). Mechanical And Performance-related Properties Of Asphalt Mixes Containing Expanded Clay Aggregate. TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, vol. 1; p. 52-62, ISSN: 0361-1981</p> <p>BIRGISSON B, MONTEPARA A., ROMEO E, RONCELLA R., ROQUE R, TEBALDI G (2009). An Optical Strain Measurement System for Asphalt Mixtures. MATERIALS AND STRUCTURES, vol. 42; p. 427-441, ISSN: 1359-5997, doi: 10.1617/s11527-008-9392-8</p> <p>ROMEO E, BIRGISSON B, MONTEPARA A., TEBALDI G (2010). The Effect of Polymer Modification on Hot Mix Asphalt (HMA) Fracture at Tensile Loading Conditions. INTERNATIONAL JOURNAL OF PAVEMENT ENGINEERING, vol. 11(5); p. 403-413, ISSN: 1029-8436</p> <p>B. BIRGISSON, MONTEPARA A., E. ROMEO, R. ROQUE, G. TEBALDI (2010). Influence of Mixture Properties on Fracture Mechanics in Asphalt Mixtures. ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN, vol. 11; p. 68-81, ISSN: 1468-0629</p>
su altre riviste italiane	2	<p><i>Come da consuntivo delle singole unità di ricerca.</i></p> <p>PETTINARI M., SANGIORGI C.; 2010; Le proprietà di autoriparazione dei conglomerati bituminosi; Rivista: Le Strade; Volume: Vol. 1454; pp.: pp. 112-118; ISBN: issn: 0373-2916</p> <p>BUCCHI A., LANTIERI C.; 2010; Le nuove frontiere delle pavimentazioni stradali; Rivista: Rassegna del Bitume; Volume: n. 64/10; pp.: pp. 57-65</p>
	0	<i>Come da consuntivo delle singole unità di ricerca.</i>

su altre riviste straniere		
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	11	<p><i>Come da consuntivo delle singole unità di ricerca.</i></p> <p>GRAZIANI A., CARDONE F., SANTAGATA E., BARBATI S.D. (2009). <i>Evaluation of Runway Bearing Capacity: In-Situ Measurements and Laboratory Tests. In: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Champaign, Illinois (USA), June 29 - July 2, 2009, New York: CRC Press, vol. Volume 1, ISBN/ISSN: 9780415871990</i></p> <p>SANTAGATA E., DALMAZZO D, TSANTILIS L, BAGLIERI O (2009). <i>The enhancement of performance-related properties of bituminous binders by means of fibers. In: MAIREPAV6, 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Torino, Italy, July 8-10, 2009, vol. 1, p. 64-73, ISBN/ISSN: 9788882020293</i></p> <p>SANTAGATA E., BASSANI M., LIOI D., COSSALE G. (2009). <i>Multi-scale testing of bituminous systems for additive evaluation. In: MAIREPAV6, 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Torino, Italy, July 8-10, 2009, vol. 1, p. 175-184, ISBN/ISSN: 9788882020293</i></p> <p>SANTAGATA E., SOGNO E.G, URAS S (2009). <i>Simulative testing for the assessment of damage caused by anti-icing chemicals on bituminous surface mixtures for airport pavements. In: MAIREPAV6, 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Torino, Italy, July 8-10, 2009, vol. 1, p. 333-342, ISBN/ISSN: 9788882020293</i></p> <p>G. DONDI, C. SANGIORGI, C. LANTIERI, R. CANCELLIERI, P. VIOLA; 2010; <i>Experimental comparative analysis of laboratory compaction methodologies for stabilized soils; Rivista: Proceedings: ICTI - iSMARTi, 2nd International Conference on Transport Infrastructures, São Paulo, Brazil, 4-6 August 2010.</i></p> <p>C. SANGIORGI, C. LANTIERI, A. MARRADI, U. PINORI; 2009; <i>Dynamic field assessment of bearing capacity for pavement subgrades and foundations.; Rivista: Proceedings: 6th International Conference on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control MAIREPAV6, Torino, Italy, July 8-10, 2009.</i></p> <p>LOSA M., BACCI R, LEANDRI P (2009). <i>Experimental characterization of high performance WAM-Foam trial sections. In: MAIREPAV 6. TORINO, 8/07/2009, TORINO: EZIO SANTAGATA, vol. 1, p. 449-457, ISBN/ISSN: 978-0-415-87199-0</i></p> <p>LOSA M., AXERIO A, BACCI R, LEANDRI P (2009). <i>Design of long life pavements containing foamed bitumen recycled layers. In: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. URBANA CHAMPAIGN, 29/06/2009, URBANA CHAMPAIGN: Erol Tutumler & Imad L. Al-Qadi, vol. 1, p. 387-396, ISBN/ISSN: 978-0-415-87199-0</i></p> <p>LOSA M., LEANDRI P, BACCI R (2008). <i>Monitoring and Evaluating Performance Requirements of Flexible Road Pavements. In: Transportation and development best practices. BeijinASCE, p. 511-517, ISBN/ISSN: 978-0-7844-0961-9</i></p> <p>MONTEPARA A., G. TEBALDI, A. COSTA, V. ROTA (2008). <i>Interlayer steel mesh system effect in asphalt pavement at low temperature. In: Transportation Research Board. Washington D.C.</i></p> <p>MONTEPARA A., A. COSTA, G. TEBALDI (2009). <i>Pavement Rehabilitation Using a Surface Steel Reinforcement. In: The 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Torino, 7/7/2009, p. 1-1</i></p>
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	3	<p>4. DONDI G., BRAGAGLIA M., VIGNALI V.; 2008; <i>Evoluzione dei criteri di calcolo delle pavimentazioni flessibili: i modelli particellar; Rivista: Atti del 17° Convegno Nazionale SIV SOCIETÀ ITALIANA INFRASTRUTTURE VIARIE; Volume: su CD; pp.: pp.1-14; ISBN: 978-88-89440-40-7; Enna, 10-12 settembre 2008</i></p> <p>5. DONDI G., VIGNALI V., DEZI G.; 2008; <i>Capitolo 5 - Pavimentazioni per gli spazi pedonali e ciclabili; Rivista: Monografia "Progettazione e gestione degli spazi esterni alla carreggiata"; pp.: pp. 87-116; ISBN: 978-88-8482-272-7; a cura di Giulio Maternini e Silvia Foini- Volume XII Collana "Tecniche per la sicurezza in ambito urbano" - direttore Prof. Roberto Busi- egaf edizioni - Forlì, Ottobre 2008</i></p>
rapporti interni	2	<i>Come da consuntivo delle singole unità di ricerca.</i>
brevetti depositati	0	<i>Come da consuntivo delle singole unità di ricerca.</i>
TOTALE	31	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 22/12/2010 00:30

Firma

Si autorizza alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali". La copia debitamente firmata deve essere depositata presso l'Ufficio competente dell'Ateneo.