



L'UTILIZZO DELLA CALCE NEI LAVORI DI RICICLAGGIO A FREDDO

**UN PROGETTO DI RICERCA SULLA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI PRODOTTI
DALL'UTILIZZO DELLA CALCE COME FILLER ATTIVO NEI LAVORI DI RICICLAGGIO A FREDDO,
SVILUPPATO TRAMITE LA COLLABORAZIONE DELLE UNIVERSITÀ DI NOTTINGHAM (REGNO UNITO),
PARMA, PISA E STELLENBOSCH (SUDAFRICA)**



1. Un impianto mobile di miscelazione KMA per il riciclaggio a freddo

In questi ultimi anni, il tema della salvaguardia ambientale ha assunto sempre maggiore rilevanza sia tra l'opinione pubblica che tra i soggetti operanti in diversi settori industriali.

Il pensiero green è stato assimilato anche dal mondo delle pavimentazioni stradali, principalmente con lo sviluppo di tecniche di riciclaggio che consentono di valorizzare i materiali di risulta delle operazioni di manutenzione, al fine di adoperarli nella realizzazione di nuove infrastrutture.

Grazie allo studio e ai risultati della ricerca svolti in questo ambito, i processi di riciclaggio hanno sperimentato un'evoluzione tecnica significativa, raggiungendo standard qualitativi comparabili con quelli propri dei materiali realizzati con sole materie di primo impiego.

Alcuni aspetti del comportamento di questi materiali meritano comunque un ulteriore approfondimento rivolto all'ottimizzazione sia dei processi produttivi che delle prestazioni in opera. Per tale ragione, le Aziende Wirtgen, Unicalce e Bindi si sono fatte promotrici di un progetto di ricerca rivolto alla valutazione degli effetti prodotti dall'utilizzo della calce come filler attivo nei lavori di riciclaggio a freddo, sviluppato tramite la collaborazione delle Università di Nottingham, Parma, Pisa e Stellenbosch.

IL RICICLAGGIO A FREDDO DELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI

Il tema della sostenibilità ambientale riguarda, in campo stradale, il fabbisogno di materie prime e di energia, lo smaltimento dei materiali provenienti da pavimentazioni a fine vita utile e le emissioni prodotte durante i processi costruttivi. Sotto questo aspetto, le tecniche di riciclaggio a freddo hanno assunto sempre maggiore diffusione, poiché consentono di recuperare gran parte del materiale che viene asportato dalla pavimentazione riutilizzandolo al termine di un processo che si svolge mantenendo gli aggregati a temperatura ambiente.

I vantaggi del riciclaggio consistono nella riduzione del fabbisogno di aggregati naturali, nella riduzione del traffico pesante per il trasporto di tali materiali, così come delle quantità di materiale da destinare a discarica. In particolare le tecniche a freddo consentono di confezionare miscele composte al 100% da fresato, producendo meno emissioni rispetto alle tradizionali tecniche a caldo.

In ragione della natura di questi materiali, nei lavori di riciclaggio a freddo viene spesso previsto l'utilizzo di un filler attivo, principalmente cemento, per migliorare alcune importanti caratteristiche delle miscele (come la resistenza meccanica e la sensibilità all'acqua) e favorire la dispersione del legante all'interno della miscela e facilitare la rottura dell'emulsione.

Da un punto di vista operativo, i materiali da riciclare possono risultare inquinati da una componente argillosa (riciclaggio in sito) oppure presentare un contenuto di acqua eccessivo. In questi casi può essere utile provvedere anche al trattamento con calce dei materiali preventivamente alla fase di riciclaggio, con conseguente incremento della complessità delle operazioni di cantiere. Utilizzando la calce come unico filler attivo di apporto si potrebbe giungere a una significativa riduzione di tale complessità pur mantenendo inalterate, o addirittura elevando, le caratteristiche prestazionali delle miscele riciclate. Partendo da questa considerazione e dalla scarsità di materiale presente in letteratura sull'argomento, la ricerca presentata in questo articolo si pone l'obiettivo di indagare le prestazioni di materiali riciclati a freddo prodotti utilizzando la calce come filler attivo (Figura 1).

IL PROGETTO DI RICERCA

La ricerca è stata sviluppata attraverso la collaborazione di diversi Istituti di ricerca secondo fasi di indagine consequenziali. L'obiettivo della ricerca ha riguardato la caratterizzazione, sia con sperimentazioni di laboratorio che mediante prove in sito, di una serie di miscele riciclate a freddo prodotte sia con bitume schiumato che con emulsione ed impiegando diverse combinazioni di calce e cemento come filler attivo.

Il progetto di ricerca è stato affidato ad un team di ricercatori provenienti dalle Università di Nottingham, Parma, Pisa e Stellenbosch, coordinati dai Professori Airey, Tebaldi, Marradi e Jenkins, referenti scientifici del progetto.

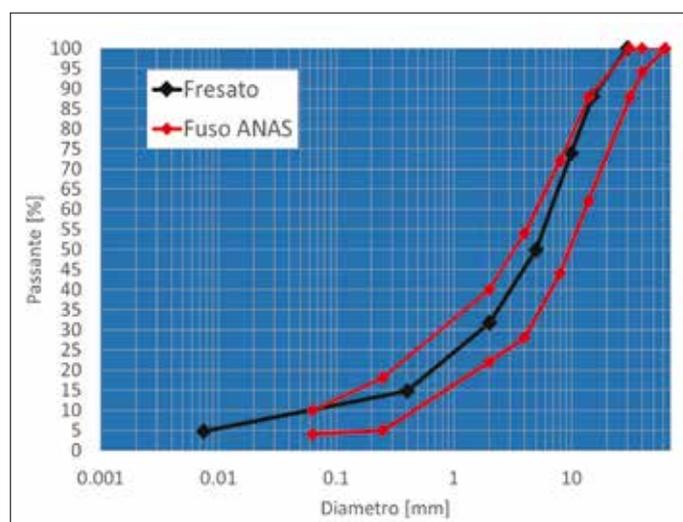
Le miscele indagate presentano stesse caratteristiche fisiche (tipologia di inerti impiegati e granulometria della miscela - 100% fresato) e si distinguono sia per tipologia e quantità di legante bituminoso sia per la composizione del filler. La curva granulometrica è stata costruita miscelando una frazione 0-10 mm e una frazione 0-20 mm in rapporto 1:2, e per il fuso granulometrico di



2. I referenti scientifici del progetto: da sinistra, il Prof. Alessandro Marradi (Università di Pisa), il Prof. Gabriele Tebaldi (Università di Parma), il Prof. Kim Jenkins (Stellenbosch University) e il Dott. Marco Garofalo (Wirtgen Macchine SpA)

referimento sono state assunte le prescrizioni indicate dal Capitolato ANAS nei lavori di riciclaggio a freddo.

Le caratteristiche di costipamento sono state ottimizzate mediante prova Proctor Modificata, secondo quanto previsto dalle Linee Guida tracciate dall'Asphalt Academy per la caratterizzazione di miscele stabilizzate a bitume (Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials). Il contenuto di bitume residuo all'interno del fresato è risultato pari al 6,1%.



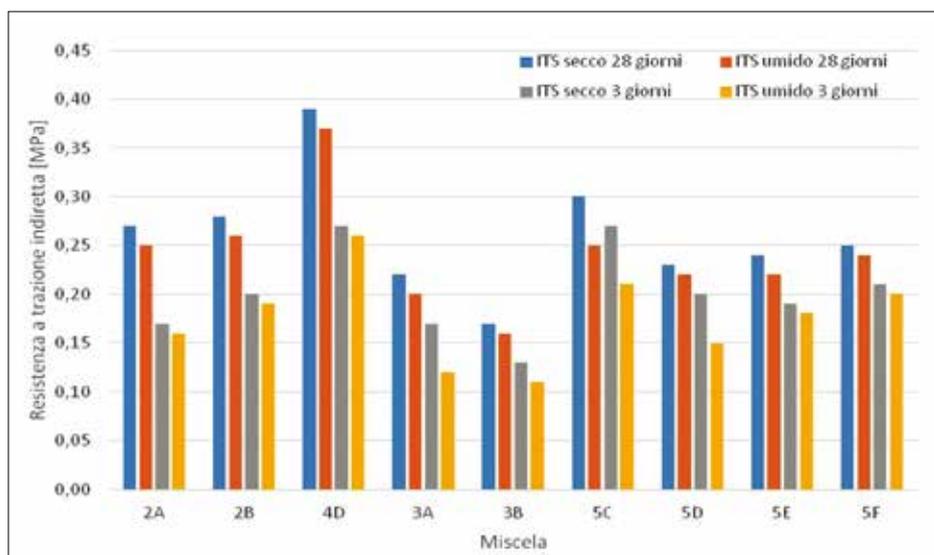
3. La granulometria del fresato e i fusi prescritti da ANAS per i lavori di riciclaggio a freddo

In totale sono state investigate tre miscele stabilizzate con emulsione bituminosa e sei con schiuma di bitume, con percentuale di legante rispetto al peso secco degli inerti variabile tra il 2 e il 3%. Il quantitativo totale di filler, pari al 4,5%, è lo stesso per tutte le miscele, e risulta composto da calce (0-3%), cemento (0-2,5%) e filler minerale (0-3,5%). Le miscele selezionate sono state analizzate sia tramite prova Proctor modificata che con pressa giratoria, con valori ottimi della massa volumica secca pari a circa 2,1 Mg/m³ per percentuali d'umidità comprese tra 6,4 e 6,8%.

MISCELA	TIPOLOGIA LEGANTE	LEGANTE [%]	CEMENTO [%]	CALCE [%]	FILLER MINERALE [%]
2A	Emulsione	3,0	1,0	2,0	1,5
2B	Emulsione	3,0	1,0	0	3,5
4D	Emulsione	3,0	2,5	0	2,0
3A	Schiuma di bitume	2,0	1,0	2,0	1,5
3B	Schiuma di bitume	2,0	1,0	0	3,5
5C	Schiuma di bitume	3,0	2,5	2,0	0
5D	Schiuma di bitume	3,0	2,5	0	2,0
5E	Schiuma di bitume	3,0	0,0	2,0	2,5
5F	Schiuma di bitume	3,0	0,0	3,0	1,5

4. La composizione delle miscele

La caratterizzazione in laboratorio ha interessato inoltre la resistenza meccanica dei materiali attraverso prove a trazione indiretta dopo 3 e 28 giorni dal confezionamento, sia in condizioni asciutte che dopo una fase di imbibizione.



5. I valori di resistenza alla trazione indiretta dopo 3 e 28 giorni dal confezionamento, sia in condizioni asciutte che dopo imbibizione

IL CAMPO PROVE

All' fine di valutare le prestazioni dei materiali direttamente in situ, grazie alla collaborazione tra le Aziende Wirtgen, Unicalce e Bindi, che hanno messo a disposizione macchinari, materiale e Personale qualificato, è stato appositamente costruito e monitorato nel tempo un apposito campo prove all'interno di una strada in costruzione nel comune di Figline e Incisa Valdarno (FI).

Gli spessori della pavimentazione sono stati assegnati in modo da evidenziare le prestazioni dei materiali oggetto di studio, pur mantenendosi compatibili con gli obiettivi di progetto: base in ma-



6. Vista satellitare del campo prove prima e dopo la costruzione

teriale riciclato a freddo di 17 cm su uno strato di fondazione stabilizzato a calce di 40 cm. A completamento della pavimentazione è stato previsto un tappeto di usura tradizionale di spessore 4 cm. Le nove miscele sono state stese su tre allineamenti da 2,75 m ciascuno coprendo l'intera larghezza della carreggiata, in modo tale che ogni miscela fosse interessata da almeno un allineamento su cui transitano le ruote dei veicoli. Ogni allineamento a sua volta è diviso in tre sezioni di lunghezza pari a 42 m.

Le miscele sono state confezionate utilizzando la tecnica del riciclaggio in impianto allo scopo di ottenere un miglior

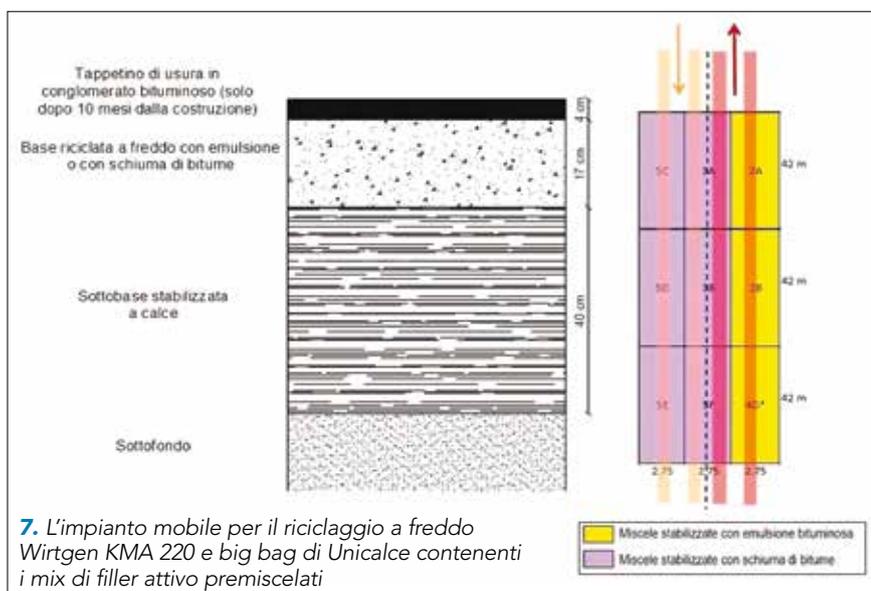
grado di omogeneità rispetto ai risultati ottenibili con il riciclaggio in situ. Per il confezionamento è stato utilizzato l'impianto mobile Wirtgen KMA 220 di proprietà dell'Impresa Bindi SpA, che oltre alle garanzie di qualità di miscelazione presenta una

notevole versatilità, caratteristica fondamentale per lavorare efficientemente con un così diversificato set di miscele.

La versione più moderna del KMA 220 permette inoltre di gestire contemporaneamente due filler attivi.

Una volta confezionate, le miscele sono state stese per mezzo di una vibrofinitrice e compattate fino a raggiungere il 100% della densità Proctor modificata. Gli strati riciclati sono stati protetti con emulsione bituminosa nel periodo invernale, e la pavimentazione è stata ultimata attraverso la posa dello strato di usura e successivamente aperta al traffico dopo circa dieci mesi dalla costruzione dello strato riciclato.

In questo modo è stato possibile escludere l'effetto delle azioni di traffico sulla maturazione delle miscele.



zioni: il Light Weight Deflectometer (LWD) ed il Falling Weight Deflectometer (FWD).

La strumentazione LWD viene utilizzata principalmente per valutare il modulo elastico di strati granulari e stabilizzati con bitume e/o cemento.

Il test con LWD consiste nel rilevare la risposta strutturale della pavimentazione sottoposta ad un carico dinamico in termini di deflessione verticale. Il carico viene trasmesso alla pavimentazione attraverso una piastra circolare e viene prodotto facendo scivolare delle masse lungo un supporto e facendole impattare contro una serie di smorzatori collegati alla piastra di carico. L'entità del carico applicato e la deflessione superficiale vengono registrati rispettivamente per mezzo di una cella di carico e di un geofono posto al centro della piastra.



8. L'impianto mobile per il riciclaggio a freddo Wirtgen KMA 220 e big bag contenenti i mix di filler attivo premiscelati



10. Le strumentazioni Light Weight Deflectometer utilizzate per le indagini prestazionali nel breve termine



9A e 9B. Le fasi di stesa e di compattazione delle miscele riciclate costituenti il campo prove



LE METODOLOGIE DI INDAGINE

Una volta completato il campo prove, le caratteristiche meccaniche delle miscele sono state indagate per mezzo di una serie di campagne deflettometriche. Tali campagne di rilievo sono state eseguite a intervalli di tempo ben definiti, in modo tale da poter tracciare chiaramente l'andamento delle prestazioni strutturali di ogni miscela posta in opera, sia nel breve che nel medio termine. I rilievi sono stati condotti con due differenti strumentazioni:

La pavimentazione viene modellata come un semispazio equivalente ed il suo modulo elastico viene stimato tramite la formula di Boussinesq. Grazie alle moderne metodologie prestazionali, l'utilizzo della strumentazione LWD si sta diffondendo in tutto il mondo principalmente come strumento di controllo qualità delle lavorazioni. Come nel caso del LWD, il funzionamento del FWD si basa sull'applicazione di un impulso di carico per mezzo di un sistema di masse battenti e la sua trasmissione alla pavimentazione avviene mediante una piastra di carico. Il carico generato dal macchinario risulta comparabile con quello di un veicolo pesante che viaggia ad una velocità compresa tra i 60 e gli 80 km/ora, e le deflessioni prodotte vengono registrate da una serie di geofoni posti a diverse distanze dal centro della piastra.



11. La strumentazione Falling Weight Deflectometer utilizzata durante le prove in situ

Le rigidzze di ogni singolo strato componente la pavimentazione vengono stimate attraverso un processo di back-calculation a partire dalle deflessioni registrate e dagli spessori degli strati stessi. Tale processo consiste nel ricercare in maniera iterativa i valori dei moduli elastici che minimizzano la differenza tra le deflessioni rilevate e quelle calcolate modellando la pavimentazione come un multi strato elastico. Oggigiorno il FWD risulta uno degli strumenti più utilizzati per valutare le caratteristiche strutturali delle pavimentazioni in servizio. Nel breve termine, le caratteristiche prestazionali delle miscele riciclate sono state valutate stimando il modulo superficiale equivalente di ogni miscela sulla base dei dati relativi alle indagini eseguite dopo 4 e 24 ore dalla compattazione rispettivamente con strumentazione LWD e FWD, secondo la procedura per la verifica della corretta esecuzione delle lavorazioni indicata nel Capitolato prestazionale ANAS.

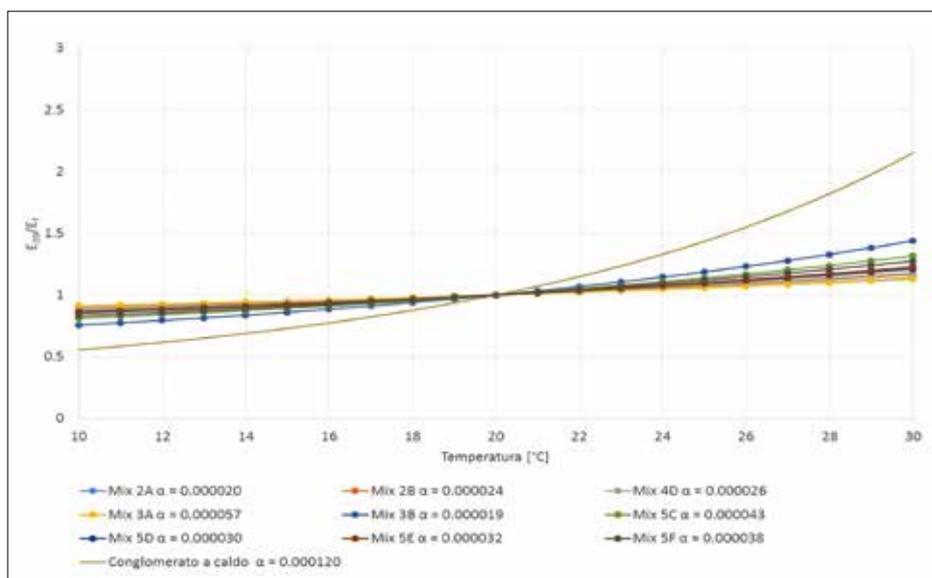
Le prestazioni strutturali nel medio termine invece sono state indagate attraverso le successive campagne, condotte con strumentazione FWD dopo 14 e 28 giorni, e 9, 20 e 26 mesi dalla messa in opera. I dati acquisiti durante le diverse campagne di indagine sono stati elaborati al fine di determinare i moduli elastici degli strati riciclati corretti alla temperatura di riferimento di 20 °C. I risultati delle prove effettuate fino al nono mese sono relativi ai soli strati riciclati a freddo mentre quelli relativi alle prove successive riguardano il complesso costituito dalla base riciclata e dallo strato di usura.

LA SENSIBILITÀ ALLA TEMPERATURA

Dal momento che la rigidzza degli strati contenenti bitume risulta influenzata dalle condizioni di prova, ed in particolare dalla temperatura, i moduli elastici risultanti dal processo di back-calculation devono essere corretti rispetto una temperatura di riferimento, tipicamente di 20 °C, prima di poter essere confrontati tra loro. Considerando il fatto che in letteratura le informazioni riguardanti la sensibilità termica delle miscele riciclate a freddo risultano limitate, è stata eseguita un'apposita campagna di rilievo finalizzata a caratterizzare le specifiche meccaniche di ogni miscela in funzione della temperatura.

Lo studio è stato condotto eseguendo due sessioni di rilievi deflettometrici a poche ore di distanza l'una dall'altra, in modo tale da poter assumere lo stesso livello di maturazione durante le due sessioni, e considerare la rigidzza delle miscele dipendente solamente dalla temperatura. Utilizzando la formula proposta dall'Asphalt Institute per la correzione dei moduli in funzione della temperatura, è stato quindi calcolato il coefficiente di suscettività termica α delle singole miscele.

$$E_{T_{rif}} = E \cdot 10^{\alpha(T^2 - T_{rif}^2)} \rightarrow \alpha = \frac{\log\left(\frac{E_1}{E_2}\right)}{(T_2^2 - T_1^2)}$$



13. I coefficienti di correzione dei moduli rispetto alla temperatura confrontati con quello di un conglomerato bituminoso standard

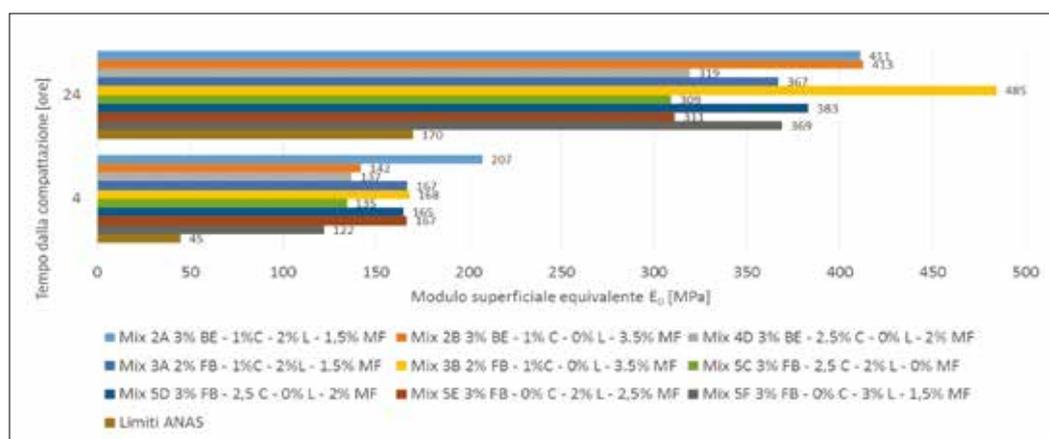
TEMPO TRASCORSO DALLA STESA	STRUMENTAZIONE	OGGETTO DELL'INDAGINE
4 ore	LWD	Miscele riciclate
24 ore	FWD	Miscele riciclate
14 giorni	FWD	Miscele riciclate
28 giorni	FWD	Miscele riciclate
9 mesi	FWD	Miscele riciclate
20 mesi	FWD	Pavimentazione completa
26 mesi	FWD	Pavimentazione completa

12. Lo schema temporale delle campagne deflettometriche di rilievo

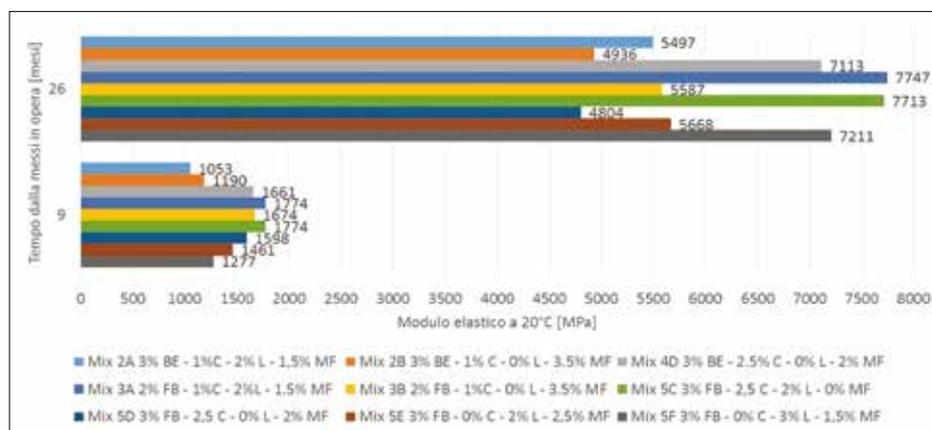
I test appositamente eseguiti hanno messo in luce come tutte le miscele presentino una sensibilità alla temperatura notevolmente inferiore rispetto a quella di un normale conglomerato steso a caldo, presentando coefficienti di suscettività termica α compresi tra 0,00002 e 0,00006, e pari a circa 1/3 di quelli che vengono generalmente assegnati ai conglomerati bituminosi.

I RISULTATI DELLE PROVE PRESTAZIONALI

Relativamente alle prestazioni nel breve periodo, i risultati ottenuti evidenziano come tutte le miscele riciclate a freddo presentino valori ben al di sopra delle soglie di accettabilità prescritte da ANAS pari a 45 e 170 MPa rispettivamente dopo 4 e 24 ore dalla compattazione. I valori medi dei moduli superficiali variano tra circa 120 e 200 MPa dopo 4 ore, e tra 300 e 500 MPa dopo



14. I valori dei moduli superficiali equivalenti registrati dopo 4 e 24 ore dalla compattazione



15. I moduli delle miscele corretti alla temperatura di 20 °C dopo 9 e 26 mesi dalla stesa

24 ore, verificando la corretta esecuzione della messa in opera dei materiali. Analizzando i dati delle campagne FWD è stato osservato come nei primi 14 giorni tutte le miscele sperimentino un aumento della rigidità seguito da una successiva fase stabile. Dopo 9 mesi dalla stesa, quando la fase di maturazione delle miscele può ritenersi conclusa, i moduli risultano compresi tra i 1.000 e i 1.700 MPa. A seguito della sovrapposizione dello strato di usura, i test successivi mostrano un ulteriore aumento della capacità portante della pavimentazione, con moduli a 20 °C dopo 26 mesi dalla stesa del complesso base-usura variabili tra 4.800 e 7.500 MPa.

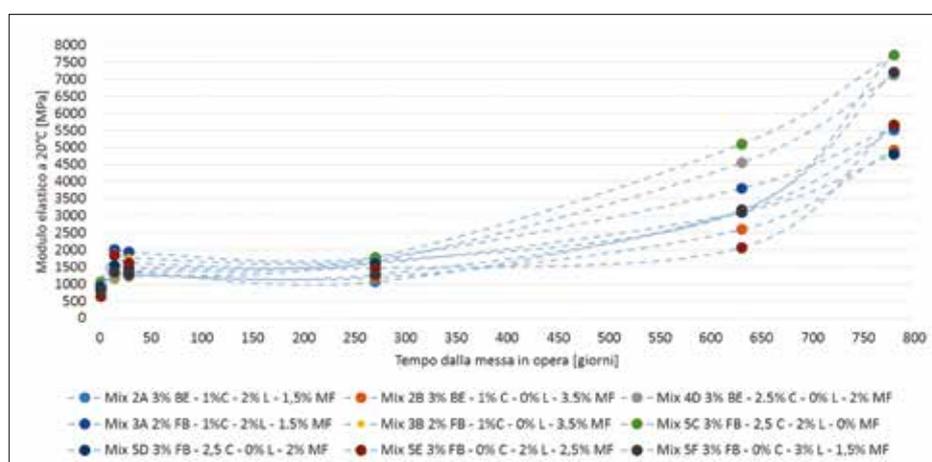
CONCLUSIONI DELLO STUDIO E SVILUPPI FUTURI

Nel corso della ricerca presentata gli effetti del filler attivo, calce e/o cemento, nei materiali riciclati a freddo sono stati ampiamente studiati, concentrando l'attenzione sulle prestazioni strutturali delle miscele indagate.

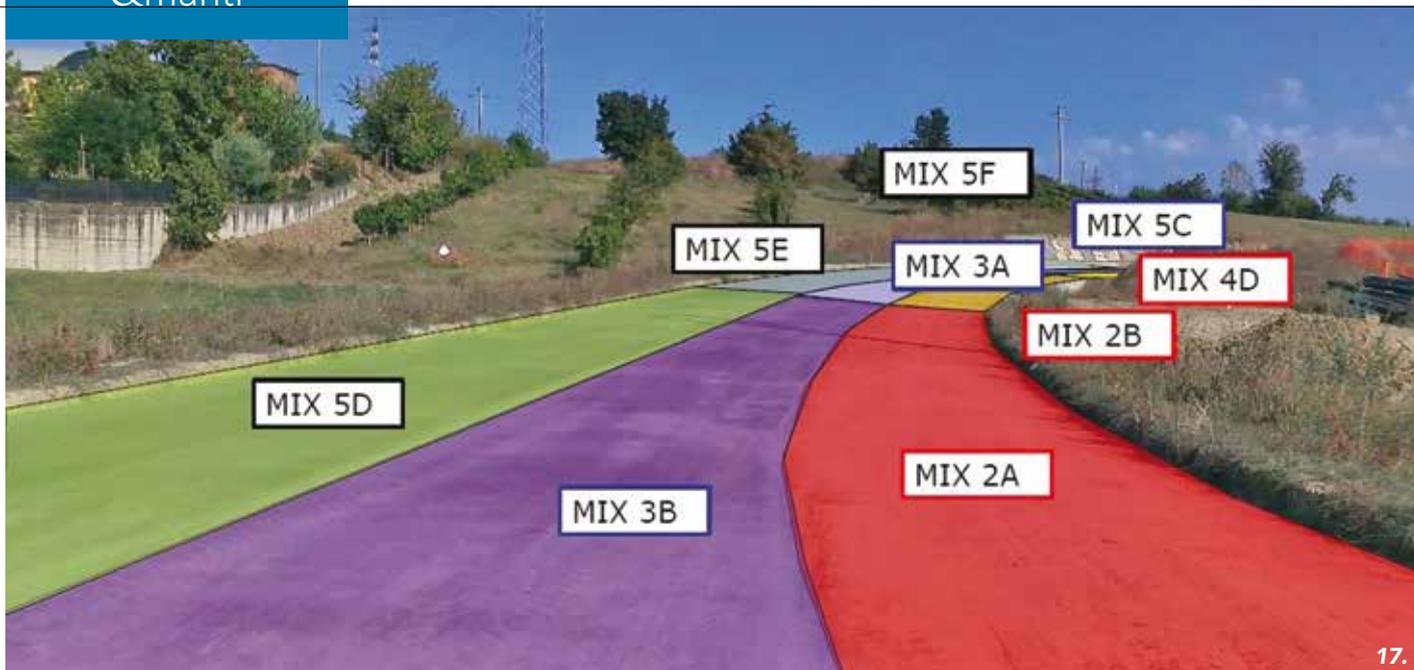
Lo studio condotto sulla sensibilità termica ha messo in evidenza come la capacità portante degli strati riciclati risulti meno

influenzata dalla temperatura rispetto ad un conglomerato steso a caldo. I risultati delle campagne deflettometriche mostrano come le miscele con calce presentino moduli elastici comparabili con quelli relativi alle miscele con un quantitativo simile di cemento. Da un punto di vista della portanza le miscele presentano caratteristiche omogenee, mostrando come la calce possa essere impiegata in qualità di filler attivo, in sostituzione oppure in combinazione al cemento.

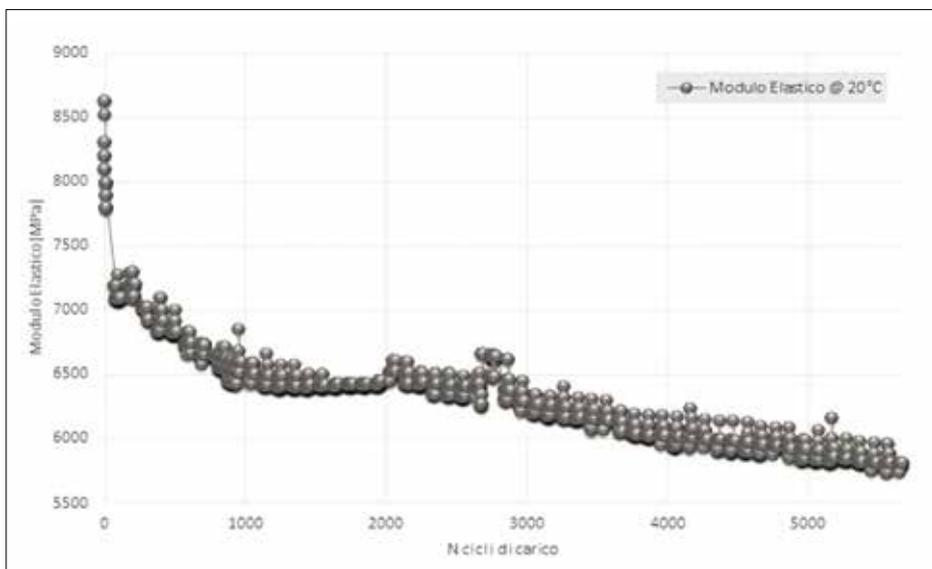
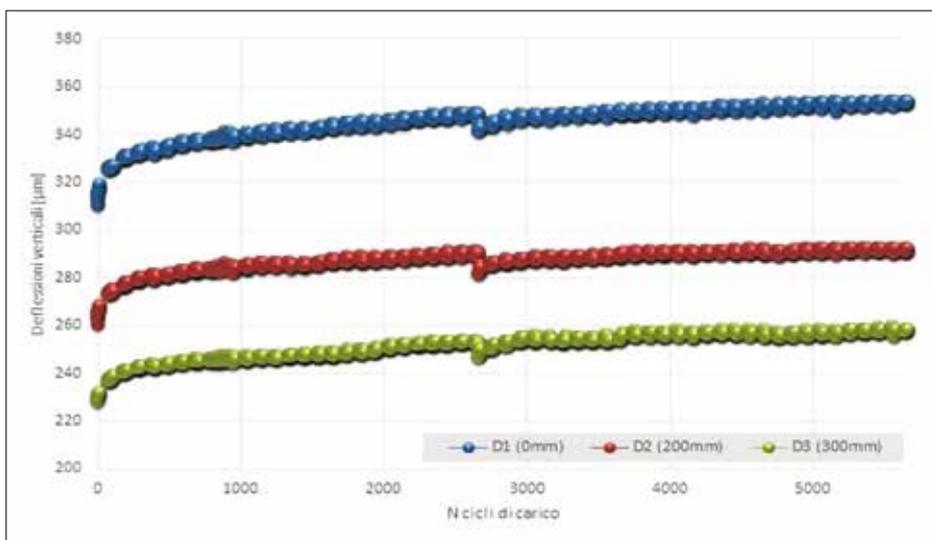
Nell'ultimo articolo pubblicato sul Road Materials and Pavement Design Journal (Active fillers' effect on in situ performances of foam bitumen-recycled mixtures, Betti et al.), il comportamento delle miscele viene definito come quello di un materiale granulare ad alte prestazioni, dal momento che in zone climatiche come l'Italia la variazione di rigidità nei periodi estivi e invernali risulta di minore entità rispetto a quella di una base in conglomerato bituminoso. In particolare, nel caso in esame questo si traduce in un effetto benefico in termini di supporto del traffico pesante lento in approccio ed in uscita dalla rotatoria.



16. Il trend di sviluppo delle capacità strutturali delle miscele ricavato dalle prove in situ



17.

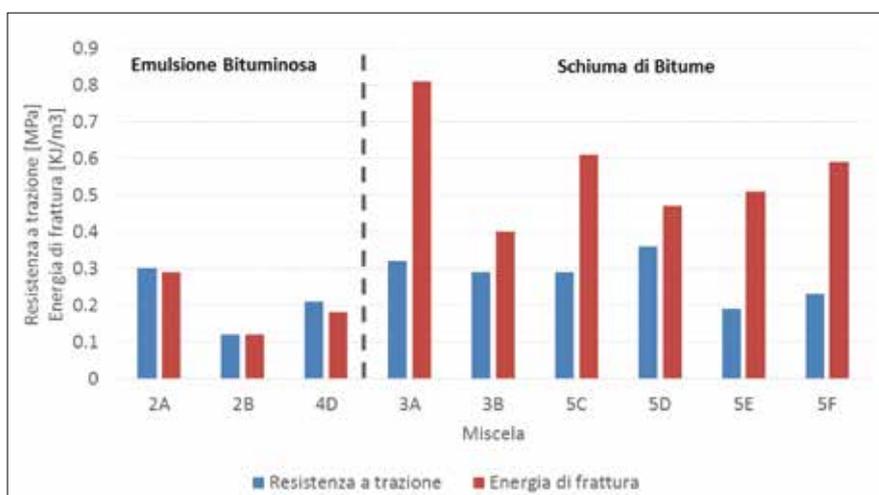


18A e 18B. I risultati della prova APT effettuata sulla miscela 5F

Al fine di confermare tali risultati il progetto di ricerca prevede ulteriori studi per caratterizzare il comportamento strutturale delle miscele nel lungo termine. Per quanto riguarda le indagini in situ è stata già condotta una prova di danno accelerato (Accelerated Pavement Testing) utilizzando l'innovativa strumentazione Fast Falling Weight Deflectometer prodotta dalla Dynatest, la quale si distingue dalle altre strumentazioni FWD per l'assenza di componenti idrauliche e che, grazie al sistema elettrico di movimentazione delle masse, permette di raggiungere una produttività di circa 3.000 ripetizioni di carico l'ora su una stessa postazione. Il test APT è stato effettuato sulla miscela 5F, contenente solamente calce come filler attivo, alla quale sono state applicate circa 5.600 ripetizioni di carico. Inoltre in laboratorio è stato valutato il comportamento a rottura delle miscele sottoponendo delle carote prelevate dalle sezioni di prova a test Superpave a trazione indiretta, opportunamente modificato per materiali con comportamento fragile. I provini sono stati portati a rottura imponendo una velocità di deformazione di 0,19 mm/s, mentre le deformazioni sono state rilevate sia con estensimetri che attraverso l'analisi di immagini digitali, acquisite con una frequenza di circa 80 frame al secondo, attraverso un software di correlazione delle immagini appositamente riprogettato. Il comportamento a rottura è stato valutato in termini di resistenza a trazione, deformazione ultima di rottura ed energia di frattura.

MIX	LEGANTE [%]	CEMENTO [%]	CALCE [%]	FILLER MINERALE [%]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [$\mu\epsilon$]	ENERGIA DI FRATTURA [kJ/m^3]
2A	3,0	1,0	2,0	1,5	0,3	910	0,29
2B	3,0	1,0	0	3,5	0,12	814	0,12
4D	3,0	2,5	0	2,0	0,21	571	0,18
3A	2,0	1,0	2,0	1,5	0,32	1624	0,81
3B	2,0	1,0	0	3,5	0,29	938	0,4
5C	3,0	2,5	2,0	0	0,29	702	0,61
5D	3,0	2,5	0	2,0	0,36	636	0,47
5E	3,0	0	2,0	2,5	0,19	1092	0,51
5F	3,0	0	3,0	1,5	0,23	1091	0,59

19. I risultati delle prove a trazione indiretta



20. I valori di resistenza a trazione e di energia di frattura ottenuti dai test di laboratorio

I risultati della sperimentazione mostrano come, sia nel caso dell'emulsione bituminosa che della schiuma di bitume, le miscele contenenti calce presentino valori di energia di frattura maggiori rispetto alle altre. La presenza della calce apporta quindi un vantaggio concreto in termini di comportamento a rottura, confermando la valenza tecnica dell'utilizzo della calce nei processi di riciclaggio a freddo.

⁽¹⁾ Ingegnere Civile

⁽²⁾ Ricercatore a Contratto presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa

⁽³⁾ Pavement Engineer della Dynatest International S/A



Ringraziamenti

Per la realizzazione dello studio, oltre alle aziende promotrici già citate quali Wirtgen, Unicalce, e Bindì, si ringraziano gli uffici "Servizio Progettazione e Direzione Lavori Stradali" e "Manutenzione Rete Strade" della Città Metropolitana di Firenze nella persona dell'Ingegnere Alessio Del Fungo e dell'Architetto Giuseppe Biancamano. Inoltre, un particolare ringraziamento va a Fabio Capanelli di Valli Zabban per il prezioso e competente supporto fornito durante le fasi di mix design e di analisi delle prove laboratoristiche.