

L'innovativo (e complesso) progetto di ricerca “Extreme Recycling of Asphalt” (ERA): una collaborazione di successo tra mondo imprenditoriale e accademico italiani

The innovative and complex research project “Extreme Recycling of Asphalt” (ERA): a successful cooperation between asphalt industry and academia in Italy



RIASSUNTO

A 10 anni dall'avvio del progetto ERA, la società Pavimental, in occasione della manifestazione Asphaltica 2020, ripercorre le tappe fondamentali della collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche, che hanno contribuito a consolidarne la leadership a livello nazionale ed internazionale nel settore delle pavimentazioni stradali, con particolare attenzione ai temi della sostenibilità ambientale (reimpiego dei materiali ed emissioni in atmosfera).

Vengono riassunte le principali tappe del programma di ricerca ERA, riportando alcuni risultati significativi conseguiti nei tre task del progetto, e cioè: Cold recycling, Hot recycling, Warm recycling.

È da sottolineare che in tutte le fasi del programma di ricerca è stato utilizzato bitume nuovo del tipo PMB (Polimer Modified Asphalt) modificato con SBS, e che anche il fresa-to conteneva lo stesso tipo di bitume.

Ulteriore elemento fortemente innovativo è stata la produzione e posa in opera, su cantieri pilota su autostrade a grande traffico, di conglomerato bituminoso per usura drenante riciclato al 15% “tiepido” (prodotto a temperature di circa 130° e posto in opera a circa 120°).

SUMMARY

After 10 years since the ERA project started, the Italian Company Pavimental, on the occasion of the Asphaltica 2020 event, reports the main steps of the cooperation with the Polytechnic University of Marche. This project contributes to consolidate the leadership position of Pavimental in the road and infrastructure construction, at a national and international level.

In particular the complex work done in the laboratory and in the field on toll highways with a lot of traffic, emphasized the attention on environmental sustainability issues (reuse of materials and emissions into the atmosphere).

The main steps of the ERA research program are summarized, reporting some significant results achieved in the three tasks of the project, namely: Cold recycling, Hot recycling, Warm recycling.

It should be noted that in all phases of the research program was used only bitumen of the type PMB (Polymer Modified Asphalt) modified with SBS, and that the RAP also contained the same type of bitumen.

Another highly innovative factor was the manufacturing and laying on pilot sites and on heavy traffic highways of “warm” porous asphalt containing 15% of RAP (produced at temperatures of about 130° and laid at about 120°).

1. Introduzione

Nel 2010 hanno avuto inizio le attività del progetto di ricerca *Extreme Recycling of Asphalt (ERA)* frutto della collaborazione tra la società Pavimental SpA del gruppo Atlantia e l'Università Politecnica delle Marche. Nell'arco di un decennio sono state portate avanti iniziative sperimentali di rilevanza internazionale (tuttora in corso), in laboratorio ed in sito, che hanno ottenuto l'apprezzamento della comunità scientifica di settore. Tale sodalizio tra mondo imprenditoriale ed accademico ha permesso di conseguire importanti risultati favorendo uno scambio osmotico di competenze ed innalzando il livello delle conoscenze nel settore dei materiali stradali.

Fin dall'avvio del progetto ERA, i principi ispiratori sono stati quelli riconducibili alla sostenibilità ed all'innovazione facendo propri gli obiettivi della *Circular Economy* che, in campo stradale, si concretizzano nel diminuire il conferimento in discarica di ingenti quantità di materiale fresato (nel seguito indicato anche con l'acronimo RAP, *Reclaimed Asphalt Pavement*) proveniente dalla demolizione di vecchie pavimentazioni e nel risparmiare rilevanti risorse naturali, attraverso l'inserimento sul mercato di aggregati riciclati.

La sfida più impegnativa è consistita nel perseguire tali obiettivi senza rinunciare alle prestazioni, ricorrendo a tecnologie in grado di garantire benefici ambientali anche in termini di risparmio energetico, riduzione delle emissioni in atmosfera e contenimento del carbon footprint (**Fig. 1**). Ciò anche riguardo alla possibilità di riciclare i conglomerati fatti con bitumi modificati, estesamente impiegati nella rete autostradale.

La spiccata innovazione insita negli argomenti affrontati nel progetto ERA (aumento della quota di fresato nelle miscele bituminose, abbassamento delle temperature di confezionamento e stesa) trova attualmente pieno riscontro nel documento in fase di

elaborazione da parte del Ministero dell'Ambiente riguardante i *Criteri Ambientali Minimi (CAM)* per la progettazione e i lavori inerenti la costruzione, manutenzione e adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali. Tale documento, che risulta parte integrante del *Piano d'Azione per la Sostenibilità Ambientale dei Consumi nel Settore della Pubblica Amministrazione* (ovvero *Piano d'Azione Nazionale sul Green Public Procurement PAN GPP*), stabilisce ai sensi del D.Lgs. 50/2016 (*Codice degli Acquisti Pubblici*), i criteri ambientali minimi che le Amministrazioni pubbliche devono utilizzare nell'ambito delle procedure per l'affidamento dei servizi di progettazione e i lavori inerenti la costruzione, manutenzione e adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali.

Lo stesso D.Lgs. 50/2016 prevede che l'applicazione dei CAM nelle gare d'appalto sarà monitorata dall'Autorità Nazionale Anti Corruzione (ANAC) al fine di valutare l'attuazione pratica delle politiche nazionali in materia di appalti pubblici ed al fine di stimarne, ove possibile, gli effetti in termini di riduzione degli impatti ambientali.

La portata degli effetti che deriveranno dall'entrata in vigore dei CAM è testimoniata dal dibattito che tale documento ha generato tra gli addetti ai lavori rappresentati dalle Pubbliche Amministrazioni e, principalmente, dalle Imprese di costruzioni. Se da un lato, infatti, risulta più che apprezzabile lo spirito innovativo a spiccata vocazione ambientale che caratterizza le linee guida sui CAM attualmente in discussione, è pur vero che da parte dei diretti interessati (soprattutto sul fronte delle Imprese, ma non solo) sussistono molte perplessità che dovrebbero indurre ad una applicazione graduale di tali criteri durante un adeguato periodo transitorio. Tali perplessità sono principalmente motivate dall'esigenza dettata dai CAM di introdurre miscele innovative per le quali non sussistono adeguate conoscenze tecniche e scientifiche consolidate.



Fig. 1 Obiettivi Progetto ERA: sostenibilità e innovazione

Per questo motivo le esperienze acquisite da Pavimental nell'ambito del progetto ERA assumono ancor maggior rilievo, potendo contribuire a colmare tale gap.

2. Inquadramento generale ed approccio metodologico del progetto ERA

In base a quanto richiamato nel paragrafo precedente, appare evidente che lo smaltimento e la valorizzazione del materiale ricavato dalla demolizione mediante fresatura di vecchie pavimentazioni in conglomerato bituminoso rappresentano obiettivi prioritari sia in termini ambientali che economici. Ta-

le problematica è fortemente sentita per tutte le attività di manutenzione della rete stradale esistente, in particolare nel settore delle infrastrutture autostradali, nell'ambito delle quali la produzione di nuove miscele bituminose equivale ai volumi di materiale rimosso e sostituito.

Ne consegue che il principale obiettivo del progetto ERA consiste nel verificare la possibilità di impiegare nella produzione di conglomerati bituminosi confezionati con tecniche tradizionali sia a caldo che a freddo (con bitume schiumato o emulsione bituminosa), oppure ricorrendo all'impiego di additivi per la produzione di miscele bituminose tiepide (*warm mix asphalt WMA*), quantitativi di materiale fresato (RAP) »

superiori rispetto a quelli attualmente consentiti nell’ambito delle Norme Tecniche di Appalto (NTA). Tale esigenza è stata supportata da una verifica prestazionale allo scopo di evidenziare eventuali gap e/o punti di forza rispetto alle miscele correntemente in uso nelle pavimentazioni, agevolando in ultima analisi valutazioni di ordine tecnico ed economico.

La complessità del tema affrontato ha richiesto la pianificazione di attività sperimentali articolate razionalmente su base pluriennale che sono state suddivise in tre principali argomenti (*task*) secondo lo schema rappresentato in **Fig. 2**. Da un punto di vista metodologico, lo studio delle diverse miscele indagate è sempre partito (fase 1) dall’analisi della fase legante che nella fattispecie delle pavimentazioni autostradali ha previsto l’impiego di bitumi modificati con polimeri elastomerici SBS. Successivamente sono state indagate le miscele in laboratorio da un punto di vista delle proprietà volumetriche e meccaniche (fase 2), per poi passare alla validazione del mix design in impianto e alla verifica prestazionale delle proprietà in sito su tronchi pilota autostradali in vera grandezza (fase 3).

In sintesi, i principali elementi distintivi del progetto ERA sono identificabili nello studio di miscele riciclate a caldo in cui sia il legante vergine che quello presente nel fresato è di tipo modificato con polimeri SBS. Degna di segnalazione è anche la posa in opera su autostrade ad elevato traffico di miscele drenanti tiepide contenenti fresato che avuto luogo nell’ambito di una sperimentazione all’avanguardia a livello mondiale.

Nei successivi paragrafi, vengono ripercorse in rapida rassegna le principali tappe del progetto di ricerca ERA richiamando una minima parte dei risultati conseguiti in ciascuno dei 3 task (*cold recycling, hot recycling, warm recycling*). Per eventuali approfondimenti viene comunque fornita, opportunamente citata nel testo, la bibliografia completa degli articoli scientifici pubblicati sulla base dei risultati ottenuti nel corso delle sperimentazioni del progetto ERA.

3. Task 1: riciclaggio a freddo

Nonostante Pavimental abbia una conclamata esperienza pluridecennale nella produzione e stesa di

conglomerati bituminosi riciclati a freddo (le prime applicazioni autostradali risalgono all’inizio degli anni ’90), la sperimentazione condotta nell’ambito del progetto ERA ha dato modo di chiarire alcuni aspetti fondamentali relativi ad un utilizzo ottimizzato e consapevole di tali miscele.

Nel caso specifico, i materiali oggetto di indagine sono stati prelevati mediante carotaggi in sito a seguito di un intervento di risanamento profondo che ha interes-

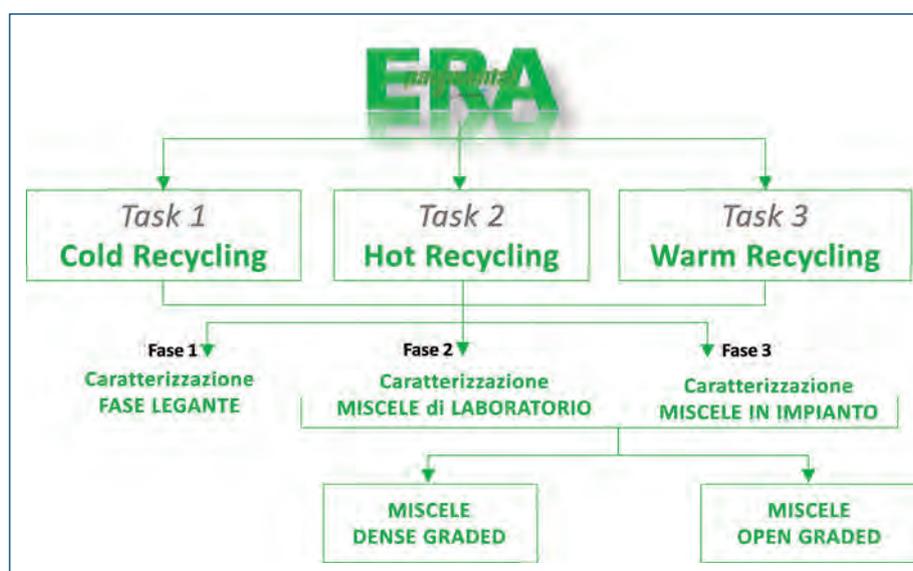


Fig. 2 Approccio metodologico Progetto ERA

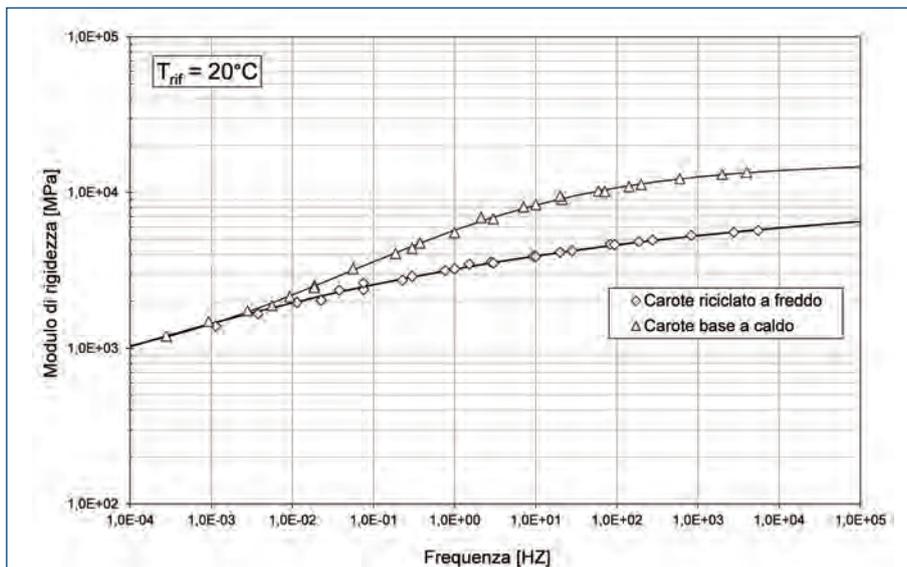


Fig. 3 Confronto curve maestre

sato l'autostrada A1, nei pressi di Fiano Romano. In particolare, le miscele riciclate a freddo poste in opera, confezionate con il 90% di RAP, cemento Portland ed emulsione bituminosa cationica addizionata con lattice naturale, sono state impiegate per la realizzazione di uno strato di base e risultano caratterizzate da specifiche peculiarità nel processo produttivo (con o senza trattamento a vapore all'impianto di produzione) allo scopo di raggiungere elevate prestazioni. A titolo di confronto, nella stessa sperimentazione in sito, è stato eseguito un tratto in cui lo strato di base è costituito da una tradizionale miscela contenente il 30% di fessato, confezionata a caldo con bitume modificato con polimeri SBS.

I risultati ottenuti nel corso della sperimentazione sulle carote prelevate in sito hanno fornito utili indicazioni evidenziando una netta differenza tra le miscele riciclate a freddo e le miscele tradizionali confezionate a caldo per strati di base [1].

In particolare, le prove di rigidezza in regime di compressione monoassiale hanno evidenziato un comportamento reologico completamente differente per i due materiali. In generale, il riciclato a freddo risulta dotato di una rigidezza inferiore ed una fase di transizione visco-elastica molto meno marcata rispetto a quella fornita dal conglomerato a caldo (rilevabile dalla curva maestra a 20 °C di **Fig. 3**) con conseguente minore suscettività termica eviden-

ziata a titolo di esempio dalla isocrona a 10 Hz di **Fig. 4** (comportamento giustificato dal minore contenuto di legante bituminoso e dalla contestuale presenza di legante idraulico).

Un'ulteriore conferma della minore suscettività termica delle miscele riciclate a freddo è fornita dai risultati ottenuti nel corso di prove di creep dinamico »

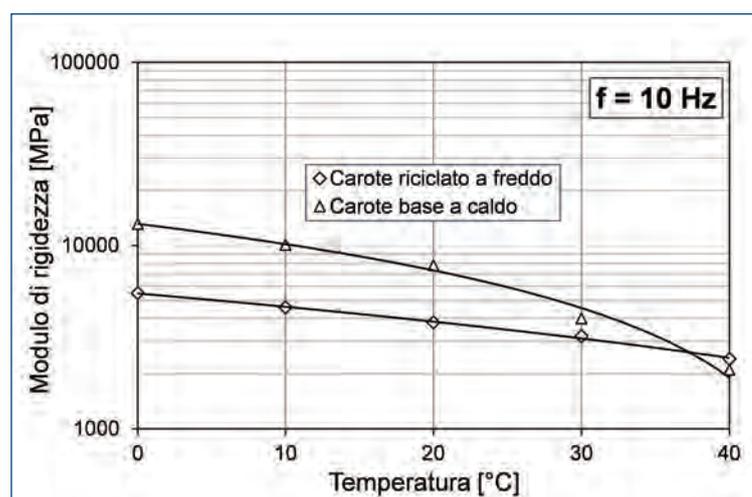


Fig. 4 Confronto curve isocrone a 10 Hz

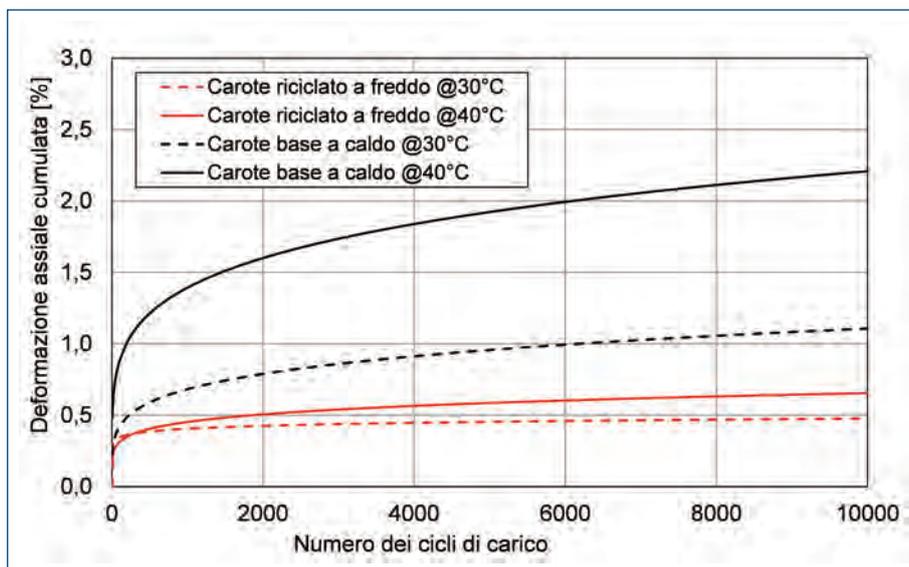


Fig. 5 Confronto risultati deformazioni permanenti a diverse temperature

a diverse temperature in termini di accumulo delle deformazioni permanenti all'aumentare dei cicli di carico. Da tali prove emerge, infatti, che l'incremento di deformazioni permanenti all'aumentare della temperatura è decisamente più evidente nel caso del conglomerato a caldo (Fig. 5).

Inoltre, le prove di creep dinamico in cella triassiale hanno mostrato che, a parità di temperatura, il conglomerato a caldo presenta in valore assoluto deformazioni permanenti decisamente superiori a quelle della miscela riciclata a freddo, in corrispondenza di qualsiasi ciclo di carico, permettendo di affermare che il riciclato a freddo studiato è meno suscettibile allo sviluppo di cedimenti irreversibili alla base del fenomeno dell'ormaiamento.

Per ciò che concerne il comportamento a fatica, i risultati relativi

alla resistenza all'azione dei carichi ciclici in configurazione di trazione indiretta (Fig. 6) hanno evidenziato che il materiale riciclato a freddo fornisce un numero di cicli a rottura di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella della miscela a caldo. Diversamente da quanto emerso in termini di rigidità e di resistenza alla deformazioni permanenti, nel caso della resistenza ai carichi ciclici a trazione indiretta il trattamento a vapore della miscela in impianto ha dato luogo ad effetti positivi tangibili (Fig. 6).

In tal senso, quindi, il conglomerato bituminoso riciclato a freddo confezionato con le tradizionali tecniche in impianto presenta una bassa resistenza nei

termini di rigidità e di resistenza alla deformazioni permanenti, nel caso della resistenza ai carichi ciclici a trazione indiretta il trattamento a vapore della miscela in impianto ha dato luogo ad effetti positivi tangibili (Fig. 6).

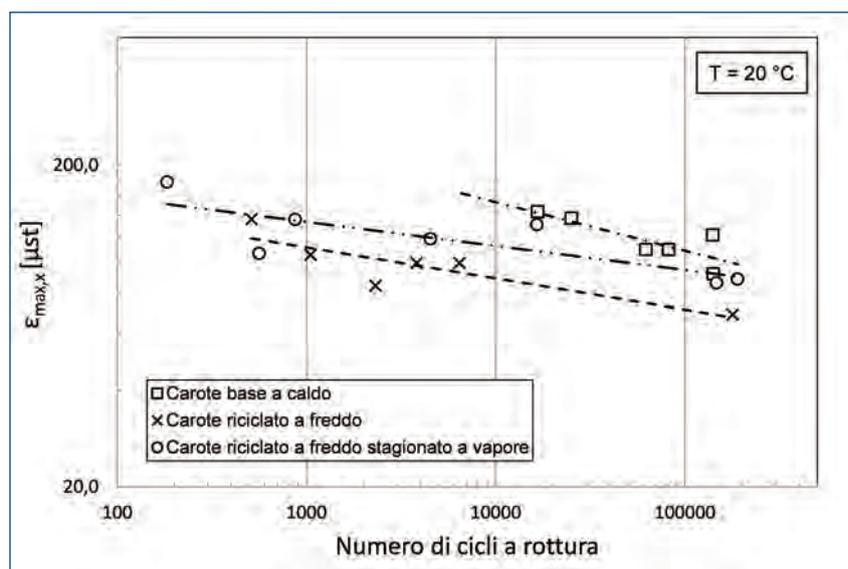


Fig. 6 Resistenza delle miscele sottoposte a carichi ciclici

confronti dell'inizio della fessurazione. Tale comportamento è stato confermato nel corso delle prove di laboratorio durante le quali le miscele riciclate a freddo hanno manifestato una elevata tendenza alla frattura ed un comportamento spiccatamente fragile.

In definitiva, lo studio condotto nell'ambito del progetto ERA consente di affermare che le miscele riciclate a freddo, pur avendo un modulo di rigidità inferiore e una minore capacità di resistere all'innescio della fessurazione rispetto a quelle confezionate a caldo, sembrano enfatizzare le proprie caratteristiche in presenza di confinamento laterale.

In tal senso, è possibile affermare che la minore suscettibilità alle deformazioni permanenti del materiale riciclato a freddo, accompagnata alla sua minore termo-dipendenza, sembrano assicurare la possibilità di un suo utilizzo ottimale come strato di sotto-base di pavimentazioni autostradali, consentendo una riduzione sensibile dello spessore dello strato di base in conglomerato bituminoso a caldo e in eventuale sostituzione del misto cementato. Questi due materiali (riciclato a freddo e misto cementato) denotano, infatti, un comportamento tendenzialmente fragile (mitigato nel riciclato a freddo grazie alla presenza del legante bituminoso) ed hanno entrambi elevata resistenza all'accumulo delle deformazioni permanenti.

Prestazioni analoghe possono, quindi, far pensare ad un vantaggioso utilizzo del riciclato a freddo sia in termini di maggiore facilità di posa in opera (il misto cementato richiede, infatti, l'esecuzione di giunti per evitare, a causa dei fenomeni connessi al ritiro, successive fessurazioni di riflessione) che in termini ambientali legati al riutilizzo del fresato.

4. Task 2: riciclaggio a caldo

4.1. Analisi della fase legante

Il processo di riciclaggio a caldo avviene a temperature elevate in quanto l'aggregato vergine d'ag-

giunta e quello riciclato derivante dalla fresatura di pavimentazioni esistenti vengono riscaldati durante la premiscelazione e la miscelazione. All'atto della miscelazione, il ricorso a temperature elevate implica una riattivazione del bitume presente nel RAP che si andrà a mescolare con il bitume vergine d'aggiunta, formando una nuova fase legante caratterizzata da proprietà diverse rispetto al bitume vergine. Non si deve, inoltre, tralasciare il fatto che l'esposizione a temperature elevate provoca un processo ossidativo addizionale, oltre quello già subito nel corso della vita utile, del bitume proveniente dal materiale fresato (RAP). Tale circostanza altera ulteriormente le caratteristiche chimiche e meccaniche del bitume contenuto nel RAP.

Ne consegue, pertanto, l'esigenza di studiare le proprietà del bitume invecchiato proveniente dal materiale riciclato e delle sue possibili combinazioni con il bitume vergine, con particolare attenzione alla sua caratterizzazione chimica e reologica.

In quest'ottica, uno specifico studio condotto nell'ambito del progetto ERA ha previsto l'analisi approfondita delle prestazioni fornite da diversi leganti bituminosi ottenuti a partire da uno stesso bitume base, preventivamente modificato con tre diverse percentuali di polimero SBS (modifica *soft* "S", *medium* "M" e *hard* "H"). Il bitume modificato hard è stato l'unico utilizzato per simulare il legante proveniente dal materiale fresato, andando a riprodurre in laboratorio il processo di invecchiamento a lungo termine subito dalle pavimentazioni stradali in fase di confezionamento e di esercizio. Il bitume così ottenuto è stato successivamente aggiunto, in varie percentuali, a ciascuno dei tre bitumi modificati inizialmente prodotti.

L'esito della vasta campagna di prove chimiche e reologiche, ha consentito di ottenere preziose informazioni, di seguito sinteticamente richiamate [2]. In primo luogo, dall'analisi spettroscopica FT-IR (*Fourier* »

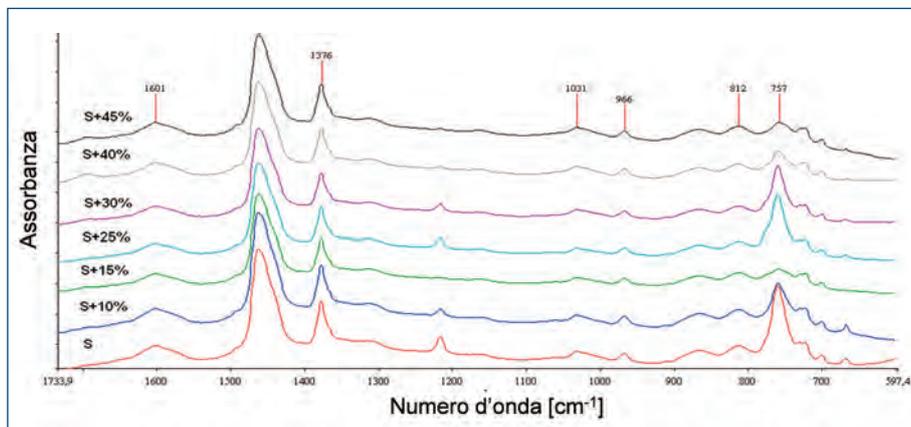


Fig. 7a Risultati prove FT-IR

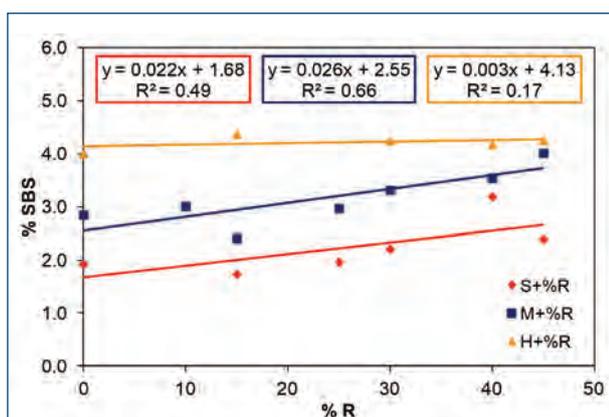


Fig. 7b Relazione tra quantitativo di polimero e percentuale di fresato

Transform InfraRed Spettroscopy) è emerso che il quantitativo di polimero resta invariato nei leganti modificati dopo processi di invecchiamento a lungo termine (Fig. 7). Inoltre, è stato confermato quanto emerso nel corso di precedenti studi secondo cui l'ossidazione causa una rottura delle catene polimeriche in corrispondenza del blocco butadienico che funge da elemento sacrificale. In tal modo la presenza del polimero tende a preservare la componente maltenica portando alla formazione di catene polimeriche più corte in grado di favorire una migliore interdiffusione del bitume, meccanismo principale alla base dello svi-

luppo dell'autoriparazione (healing).

Da un punto di vista reologico, è stato preliminarmente valutato l'effetto dovuto all'aggiunta di varie percentuali di bitume invecchiato sulla viscosità del legante risultante, con particolare attenzione rivolta alla lavorabilità della miscela in fase di confezionamento e stesa in sito, mediante l'analisi det-

tagliata delle temperature di miscelazione e com-

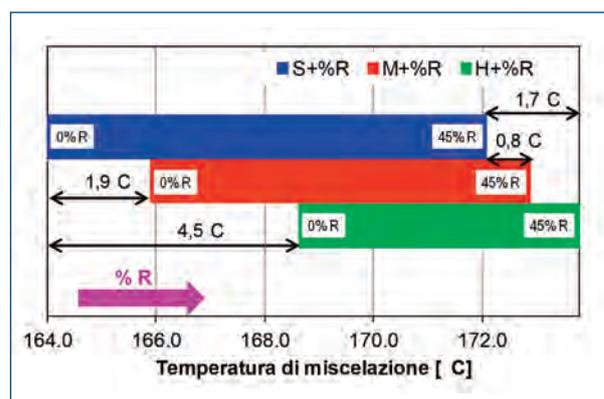


Fig. 8a Influenza del fresato sulle temperature di miscelazione

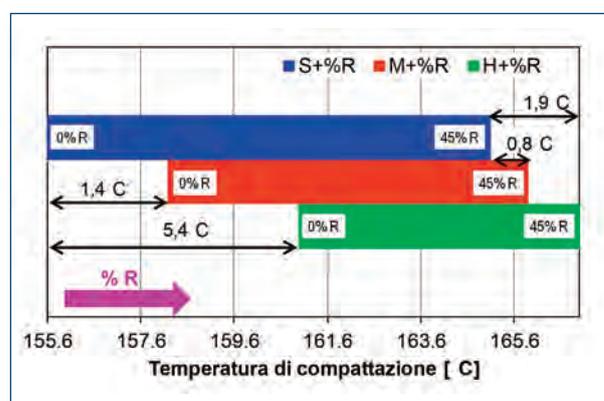


Fig. 8b Influenza del fresato sulle temperature di compattazione

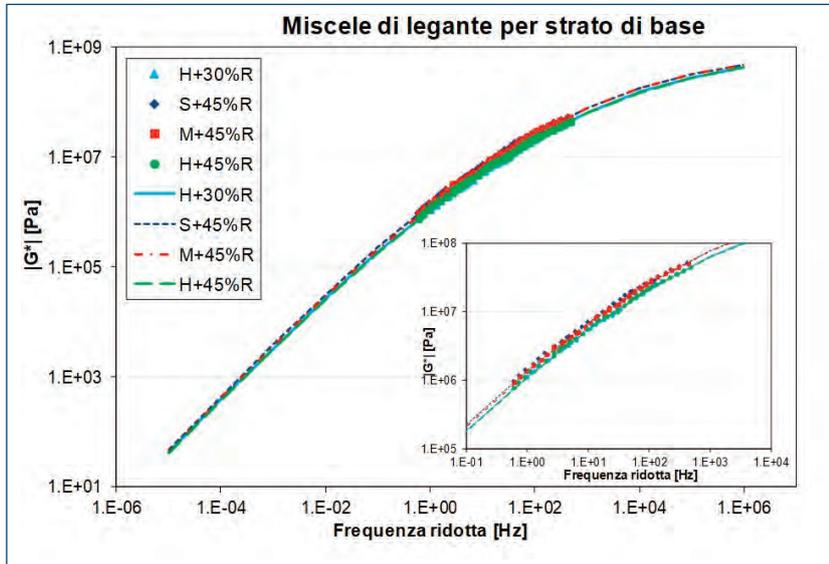


Fig. 9 Confronto curve maestres con diversi bitumi vergini e percentuali di fresato

pattazione del materiale. I risultati ottenuti [2], hanno evidenziato che un incremento del quantitativo di fresato (rispetto a quello attualmente utilizzato per la produzione di conglomerati bituminosi) non incide in maniera significativa sulle temperature di miscelazione e compattazione, indipendentemente dal bitume vergine d'aggiunta utilizzato, come evidenziato in Fig. 8.

È interessante sottolineare come la differenza tra le curve maestres delle miscele di legante contenenti lo stesso quantitativo di bitume invecchiato, confezionate a partire dai tre bitumi modificati (S, M, H), risulti trascurabile. In particolare, dai risultati ottenuti in termini di rigidità, è emersa la possibilità di incrementare del 15% il quantitativo di fresato attualmente inserito nel conglomerato bituminoso sia per strati di usura che di base, impiegando uno qualsiasi dei tre bitumi modificati di aggiunta, senza particolari ripercussioni sulla fase legante (Fig. 9).

Ulteriori effetti registrati all'aumentare del quantitativo di legante proveniente da RAP si traducono in una minore tendenza all'accumulo delle deforma-

zioni permanenti e in un miglioramento della resistenza a fatica, oltre che della capacità auto-riparativa (*healing*). Quest'ultimo risultato è stato raggiunto mediante l'adozione di un protocollo di prova innovativo mediante *Dynamic Shear Rheometer (DSR)* i cui risultati sono sintetizzati in Fig. 10 [2]. Infine, lo studio della fase legante si è concluso con la valutazione delle caratteristiche di adesione tra bitume vergine ed aggregato di recupero, al fine di confrontare il tipo di legante che si instaura all'interfaccia fra il bitume vergine d'aggiunta e la superficie pre-bitumata

del RAP rispetto al caso di aggregato lapideo vergine, sia in condizioni asciutte (*dry*) che bagnate (*wet*). »

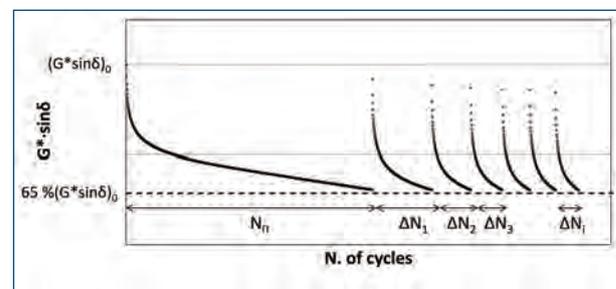


Fig. 10a Output prove di healing

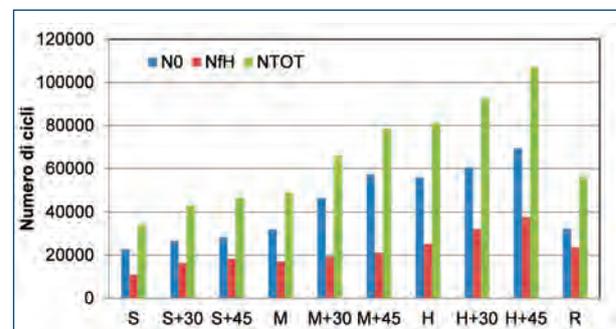


Fig. 10b Confronto resistenza globale a fatica tra i diversi blend

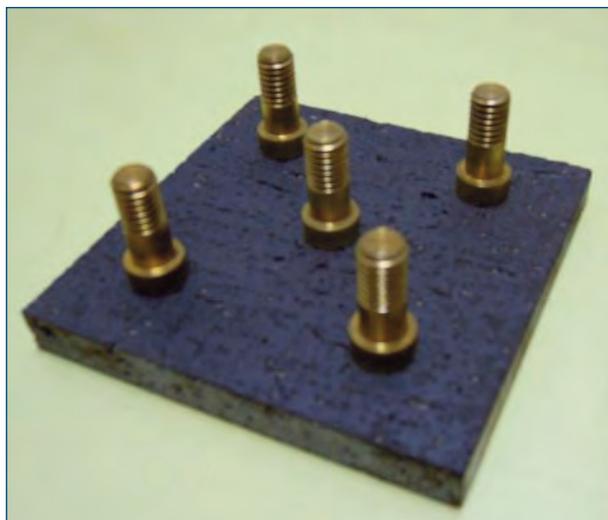


Fig. 11a Provini BBS test

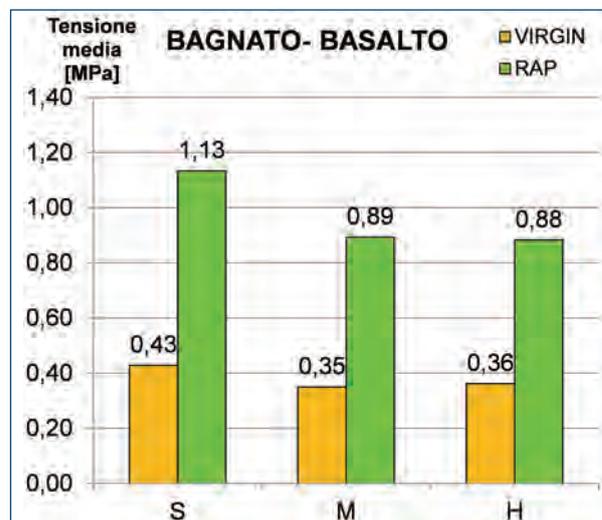


Fig. 11c Risultati in condizioni bagnate aggregati basaltici

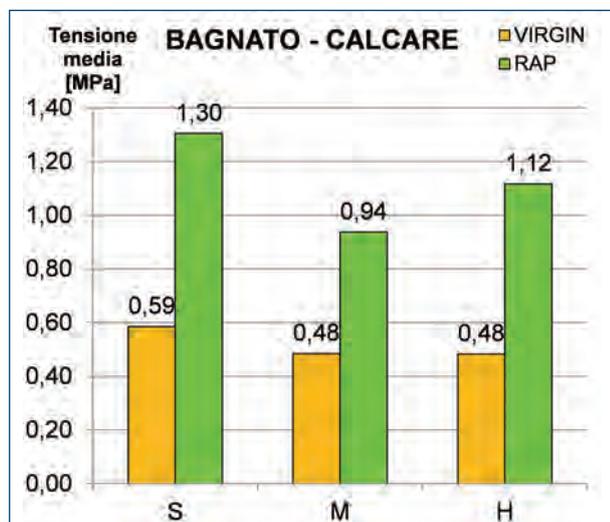


Fig. 11b Risultati in condizioni bagnate aggregati calcarei

A tale proposito è stata impiegata una procedura sviluppata in collaborazione con l'Università del Wisconsin denominata *Bitumen Bond Strength (BBS) Test* (AASHTO TP 91). I principali risultati di tale sperimentazioni sono stati presentati in occasione del *93rd Annual Meeting del Transportation Research*

Board [3], sinteticamente richiamati in Fig. 11 in cui, a titolo di esempio, viene evidenziato il contributo offerto dalla presenza di aggregati prebitumati (RAP) in condizioni bagnate, sia per aggregati calcarei che basaltici.

4.2. Conglomerati bituminosi aperti per strati di usura drenante riciclati a caldo

L'utilizzo di conglomerati drenanti si è largamente diffuso nel corso degli anni, tanto che oggi più dell'80% degli strati di usura dei tratti autostradali italiani sono realizzati con questa tipologia di conglomerato, per interventi sia in fase di costruzione che di manutenzione.

Risulta evidente che l'utilizzo diffuso di tali miscele richiede, con sempre maggiore urgenza, un mix design di tipo sostenibile appositamente dedicato. Tuttavia, le NTA autostradali non prevedono, ad oggi, l'impiego di materiali di riciclo nei conglomerati drenanti, rendendo necessari studi approfonditi che ne mettano in luce potenzialità e limiti applicativi.

I principi che hanno ispirato lo studio di miscele drenanti contenenti percentuali variabili di RAP nel-



Fig. 12 Fattori che governano lo sgranamento dei conglomerati bituminosi drenanti

l'ambito del progetto ERA partono dal presupposto che la durata dei conglomerati bituminosi drenanti risulta strettamente correlata alla loro durabilità nei confronti delle azioni ambientali indotte dall'acqua, dalla temperatura e dalla radiazione UV.

I dissesti correlati alla durabilità delle miscele drenanti si manifestano sotto forma di sgranamenti che in condizioni critiche (elevate sollecitazioni, errata posa in opera, ecc.) possono avere luogo per strati di usura in opera da meno di 3 anni, anche se di norma si assiste all'inizio del fenomeno dello sgranamento dopo 5 anni dalla posa in opera con un termine della vita utile che mediamente si raggiunge dopo 10 anni in esercizio. La capacità di resistere al fenomeno dello sgranamento da parte di un conglomerato bituminoso drenante dipende sia dalle proprietà adesive (che influenzano l'interazione bitume-aggregati) che dalle proprietà coesive della fase legante (**Fig. 12**).

Lo studio svolto nell'ambito del progetto ERA si è basato sul presupposto che l'aggiunta nel conglomerato bituminoso drenante di una frazione grossa

selezionata ($d/D = 8/16$ mm) di RAP, possa incidere positivamente prevalentemente sulla componente adesiva, tenuto conto che il tipo e la quantità di bitume aggiunto e la frazione fina degli aggregati rimangono sostanzialmente inalterati. Inoltre, il confronto con la miscela di riferimento confezionata solo con aggregati vergini ha riguardato principalmente gli effetti dovuti all'azione dell'acqua, potendo ritenere che l'invecchiamento del legante sia in entrambi i casi paragonabile.

In sostanza, si è ritenuto che il legante di apporto presente nel fre-

sato funga prevalentemente da pre-bitumatura della frazione grossa di aggregati contenuti nella frazione 8/16 del RAP, e che le caratteristiche reologiche del legante vergine di apporto rimangano pressoché inalterate per effetto del limitato quantitativo di legante riattivato contenuto nel fresato (quest'ultima considerazione trova conferma nei risultati ottenuti durante lo studio della fase legante).

Sulla base di tali premesse, l'obiettivo delle indagini sperimentali è stato quello di valutare la possibilità di produrre miscele di conglomerato bituminoso drenante contenenti diverse percentuali di fresato selezionato di dimensioni 8/16 mm. Nel dettaglio, i principali aspetti investigati sono stati orientati al confronto tra la miscela drenante attualmente impiegata sulla rete autostradale e le miscele di conglomerato drenante riciclato (CDR) ottenute con il 15% di RAP al fine di evidenziare eventuali carenze e/o bonus prestazionali in termini di durabilità nei confronti dell'azione dell'acqua.

A tale proposito le attività di laboratorio svolte hanno previsto la preparazione in laboratorio di miscele

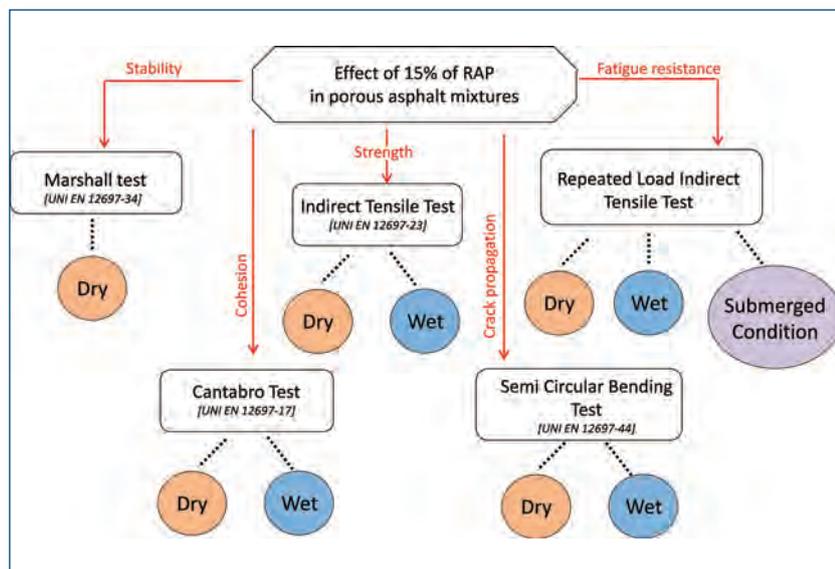


Fig. 13 Schema programma di prove di laboratorio per conglomerati bituminosi drenanti

le di conglomerato bituminoso drenante (con e senza materiale fresato) nel rispetto dei criteri granulometrici fissati dalle NTA, seguendo delle procedure (concordate con Pavimental) in grado di riprodurre le fasi delle lavorazioni effettivamente seguite per la produzione in impianto. Per la miscela di riferimento senza fresato assunta come termine di paragone è stata prevista una percentuale di legante modificato con polimeri SBS Hard pari al 5% riferita al peso degli aggregati, mentre per le miscele CDR l'influenza del contenuto di legante è stata valutata prevedendo il confezionamento di impasti caratterizzati da 5 tenori di legante (4.50%, 4.75%, 5.00%, 5.25%, 5.50%). Per tutte le miscele indagate, le prove di laboratorio sono state eseguite su provini asciutti e su provini sottoposti all'azione dell'acqua al fine di valutare sia le prestazioni asso-

lute che le perdite relative dovute alla suscettività all'acqua secondo lo schema riportato in Fig. 13.

Dall'analisi dei risultati sperimentali ottenuti in laboratorio [4] sono state tratte preziose informazioni sinteticamente riepilogate di seguito. In particolare, dagli studi svolti è emerso che il mix design contenente il 15% di RAP non penalizza in alcun modo le proprietà volumetriche finali in termini di vuoti residui. Inoltre, le miscele di conglomerato drenante riciclato a caldo sono risultate in grado di soddisfare le prescrizioni di Capitolato, eguagliando o superando le

prestazioni della miscela di riferimento, sia in relazione alla prova Marshall che alla prova di trazione indiretta.

Anche i risultati della prova Cantabro (Fig. 14) hanno evidenziato, a parità di vuoti residui, valori migliori di coesione interna (i.e. minore perdita di ma-

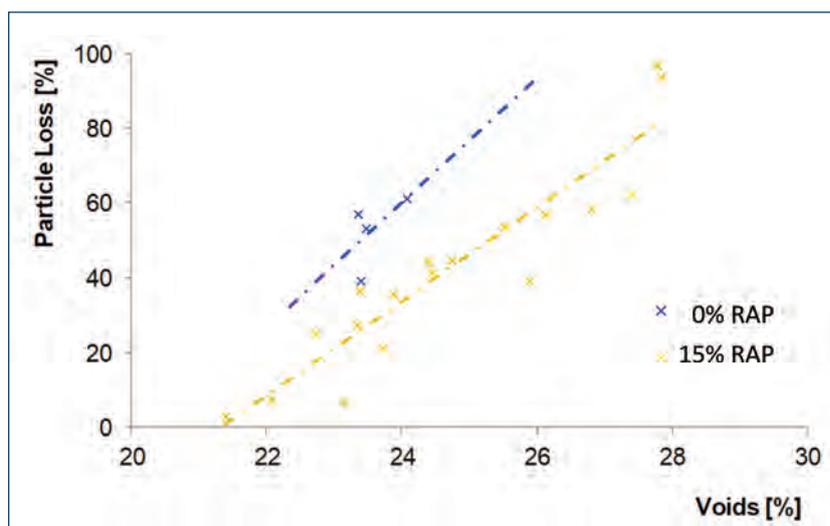


Fig. 14 Correlazione tra percentuale dei vuoti e perdita in peso Cantabro

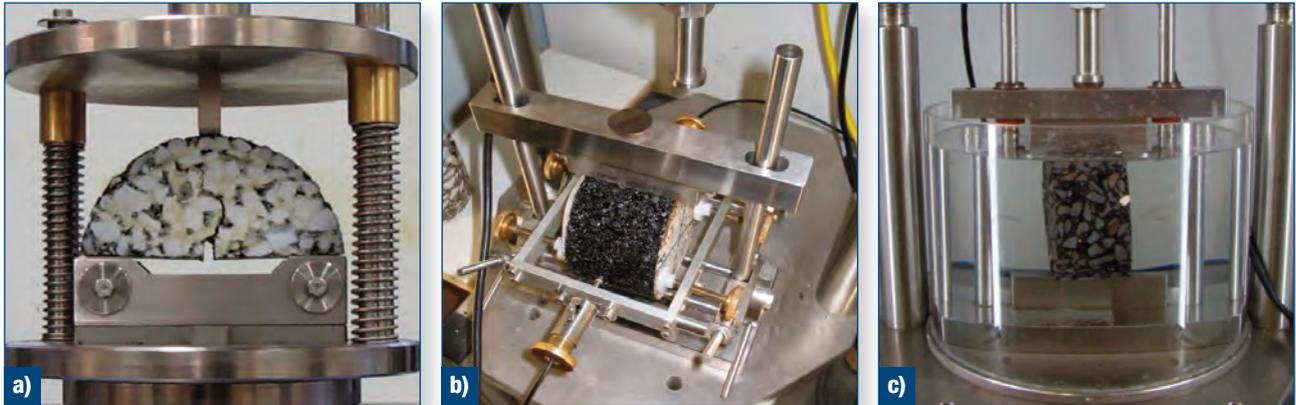


Fig. 15 Prova Semi-Circular Bending SCB a); prove cicliche a trazione indiretta in condizioni bagnate b) e immerse c)

teriale “Particle Loss” al termine della prova) nel caso delle miscele riciclate imputabile alla presenza di aggregati riciclati ricoperti da un sottile strato di bitume. In termini di resistenza alla frattura e di energia dissipata (prove *Semi Circular Bending* SCB – **Fig. 15.a**), le miscele contenenti fresato con adeguati contenuti di legante ($\geq 5.00\%$ - 5.25%) hanno dimostrato prestazioni uguali o addirittura superiori, sia in condizioni asciutte che bagnate rispetto alla miscela di riferimento. Infine, le prova cicliche in configurazione di trazione indiretta svolte sia in condizioni bagnate (**Fig. 15.b**) che immerse (**Fig. 15.c**) hanno evidenziato che le miscele riciclate con con-

tenuti di bitume almeno pari al 5.00% garantiscono una suscettività all’acqua inferiore a quella della miscela vergine.

In sintesi, le miscele drenanti contenenti il 15% di materiale fresato, proveniente dalla rimozione di vecchie miscele drenanti e vagliato in maniera tale da selezionare solamente la frazione grossolana 8/16, hanno dimostrato di essere in grado non solo di soddisfare le prescrizioni di Capitolato previste per le miscele vergini tradizionali ma anche di preservare o addirittura migliorare le caratteristiche di durabilità di queste ultime a patto che si adotti un idoneo quantitativo di bitume totale ($> 5.00\%$). »

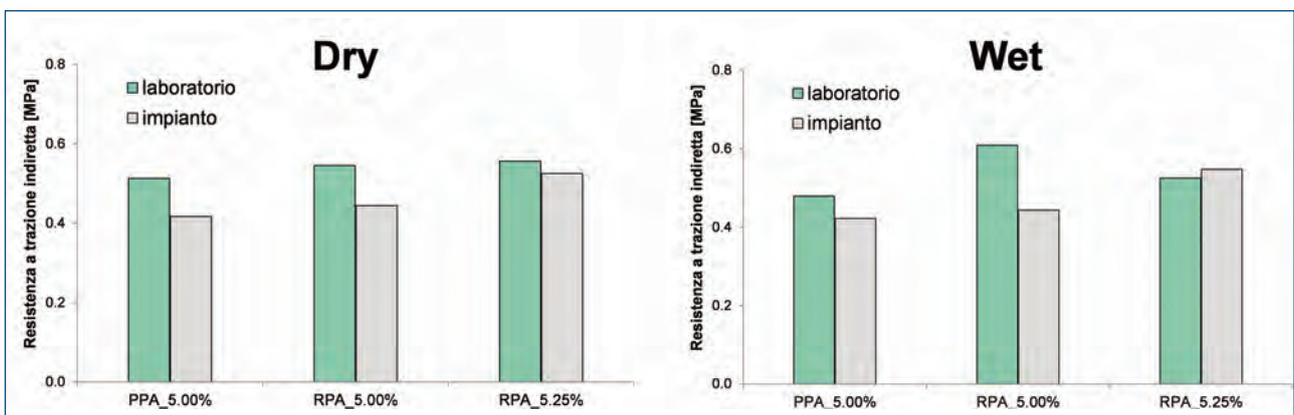


Fig. 16 Confronto resistenza a trazione indiretta miscele con aggregati vergini (PPA) e riciclati (RPA) in condizioni a) asciutte; b) bagnate

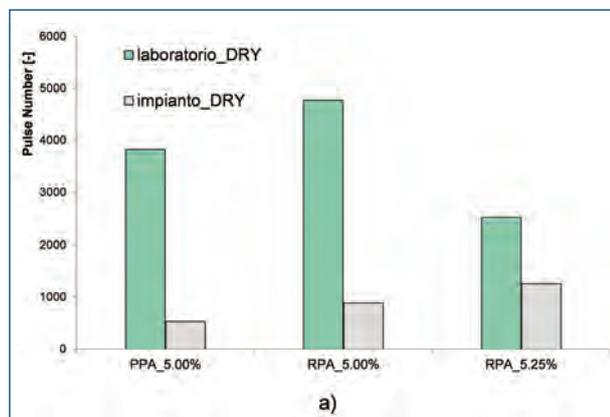


Fig. 17a Confronto resistenza ai carichi ciclici miscele con aggregati vergini (PPA) e riciclati (RPA) in condizioni asciutte

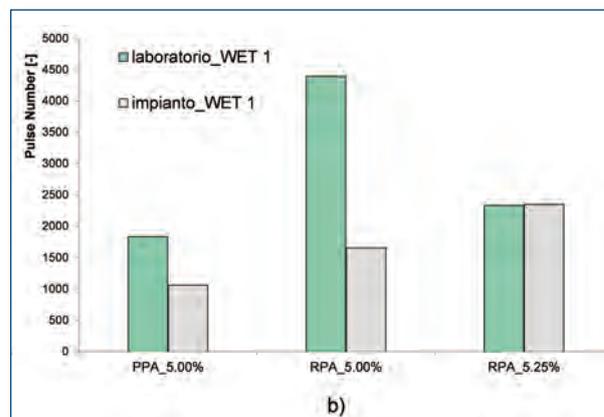


Fig. 17c Confronto resistenza ai carichi ciclici miscele con aggregati vergini (PPA) e riciclati (RPA) in condizioni immerse

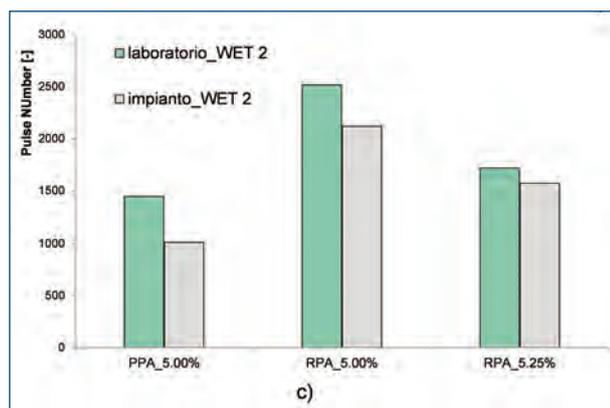


Fig. 17b Confronto resistenza ai carichi ciclici miscele con aggregati vergini (PPA) e riciclati (RPA) in condizioni bagnate

Gli ottimi riscontri prestazionali ottenuti dalle indagini eseguite su miscele confezionate in laboratorio hanno consentito di avviare la verifica delle miscele confezionate presso l’impianto Pavimental di Magliano Sabina per la realizzazione ed il monitoraggio di un tronco pilota lungo l’autostrada A1 al km 545+000 (carreggiata Nord). In tale sperimentazione sono state poste in opera, in tratti omogenei consecutivi, la miscela drenante tradizionale di riferimento e due miscele drenanti riciclate preparate entrambe con il 15% di fresato e, rispettivamente, con

5.00% e 5.25% di bitume. Le prove di laboratorio eseguite sono state esattamente le stesse effettuate nella prima fase della sperimentazione (Fig. 13). I risultati sperimentali così ottenuti sono stati confrontati con quelli emersi nello studio (che si è avvalso anche di una collaborazione con i laboratori federali svizzeri dell’Empa) sulle corrispondenti miscele preparate in laboratorio [5], confermando come l’aggiunta del 15% di fresato (valori RPA in Fig. 16 e Fig. 17) determini nel confronto con le miscele prive di materiale riciclato (valori PPA in Fig. 16 e Fig. 17) un miglioramento delle prestazioni delle miscele prodotte in impianto ancor più accentuato rispetto a quanto emerso per le miscele confezionate in laboratorio, in particolare con una percentuale di bitume totale pari al 5,25%.

Nel corso della sperimentazione in sito, sono state inoltre effettuate delle prove di drenabilità che hanno evidenziato un perfetto allineamento dei valori forniti dalle miscele contenenti RAP rispetto alla miscela di riferimento confezionata soltanto con aggregati vergini.

I risultati incoraggianti ottenuti con il 15% di RAP hanno indotto a valutare gli effetti di un ulteriore incremento della percentuale di fresato nelle miscele

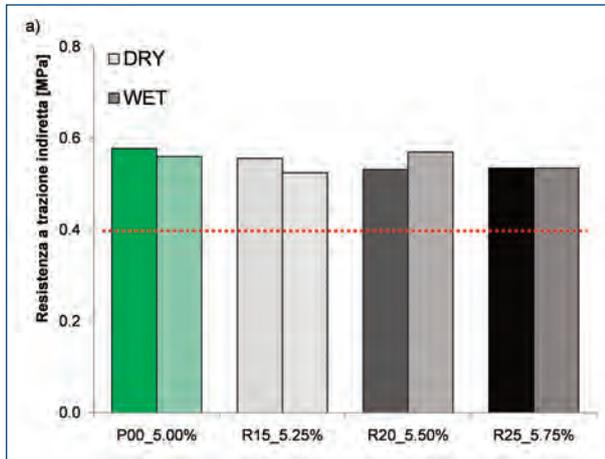


Fig. 18a Confronto miscele con diverse percentuali di freato: resistenza a trazione indiretta

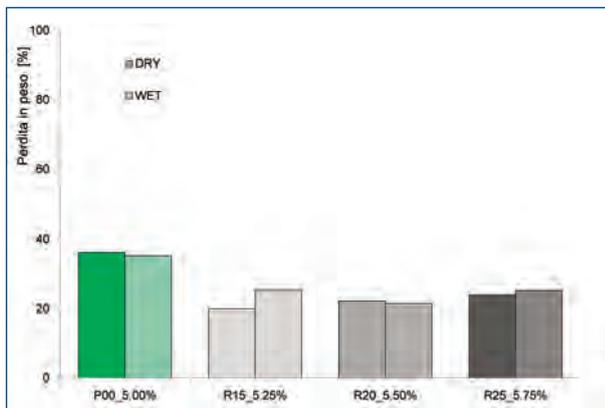


Fig. 18b Confronto miscele con diverse percentuali di freato: perdita in peso Cantabro

aperte per strati di usura drenante. In particolare, da uno studio effettuato in laboratorio su miscele contenenti il 20% ed il 25% di RAP 8/16 mm [6], si sono avute ulteriori conferme del beneficio derivante dalla presenza di granuli pre-bitumati. A tale proposito, alcuni dei principali risultati ottenuti sulle miscele ottimizzate con diverse % di RAP sono riportati in **Fig. 18** in termini di resistenza a trazione indiretta, perdita in peso Cantabro e resistenza alla frattura mediante prova SCB.

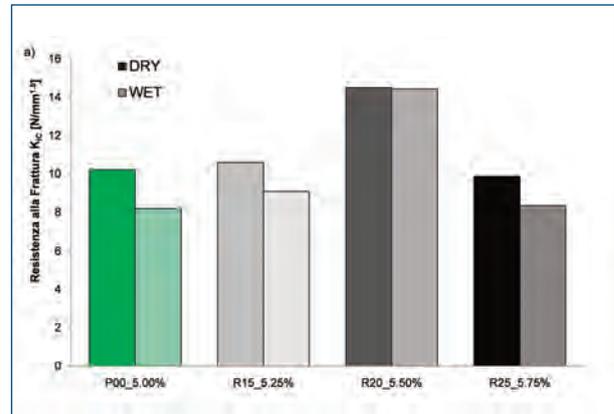


Fig. 18c Confronto miscele con diverse percentuali di freato: resistenza alla frattura

Lo studio di laboratorio delle miscele drenanti contenenti 20% e 25% di materiale freato ha permesso di concludere che tali miscele sono in grado non solo di soddisfare i limiti richiesti da Capitolato previsti per le miscele vergini tradizionali ma anche di preservare le caratteristiche di durabilità di queste ultime a patto che si adotti un quantitativo di bitume totale opportunamente maggiorato. In particolare, dallo studio svolto è emerso che parte del bitume che avvolge gli aggregati riciclati non viene riattivato e, di conseguenza, agisce come “*black aggregate*”. Tale risultato giustifica la necessità di ricorrere a percentuali più elevate di bitume totale per le miscele riciclate a caldo allo scopo di garantire prestazioni uguali o addirittura superiori a quelle della miscela tradizionale con aggregati vergini. Pertanto, incrementando l’apporto di materiale freato, pari a 15%, 20% e 25% di RAP, aumenta anche il quantitativo di legante non riattivato con conseguente incremento della percentuale di bitume totale presente nella miscela ottimizzata, rispettivamente pari a 5,25%, 5,50% e 5,75%.

Sulla base dei risultati conseguiti in laboratorio è stata realizzata una stesa sperimentale in cui sono state studiate tre differenti miscele drenanti: una miscela

tradizionale (senza fresato) contenente 5.00% di bitume e due miscele riciclate con 20% di fresato con bitume dosato rispettivamente al 5.25% e 5.50%. Tali materiali sono stati preparati all’impianto di confezionamento Pavimental di Magliano Sabina (RI) durante i lavori di costruzione di un breve tronco pilota realizzato lungo l’Autostrada A1 all’altezza del km 425+000 (Carreggiata Sud). I risultati delle prove di laboratorio eseguite [7], coincidenti con quelle effettuate nelle precedenti fasi della sperimentazione (Fig. 13), hanno confermato che le miscele confezionate in impianto con il 20% di fresato secondo il mix design precedentemente studiato ed ottimizzato in laboratorio, sono risultate in grado non solo di soddisfare le prescrizioni di Capitolato previste per le miscele vergini tradizionali ma anche di preservare o addirittura migliorare le caratteristiche di durabilità e drenabilità del manto di usura drenante.

4.3. Conglomerati bituminosi chiusi per strati di collegamento riciclati a caldo

Parallelamente allo studio sulle miscele drenanti riciclate a caldo è stata condotta una sperimentazione volta a valutare la possibilità di incrementare la percentuale di RAP anche per le miscele di conglomerato bituminoso chiuso per strati di collegamento. A tale proposito, è opportuno ricordare che le attuali NTA adottate in ambito autostradale autorizzano l’impiego del 25% di fresato e che l’obiettivo dello

studio svolto nell’ambito del progetto ERA è stato quello di valutare se esistono i presupposti tecnico-scientifici per incrementare tale percentuale portandola al 40%.

Dalla letteratura scientifica di settore si rileva un consenso unanime nel ritenere che fino a percentuali di RAP pari al 25% non occorre adottare particolari accorgimenti per la produzione di miscele riciclate a caldo. Per percentuali di RAP superiori subentrano pro-

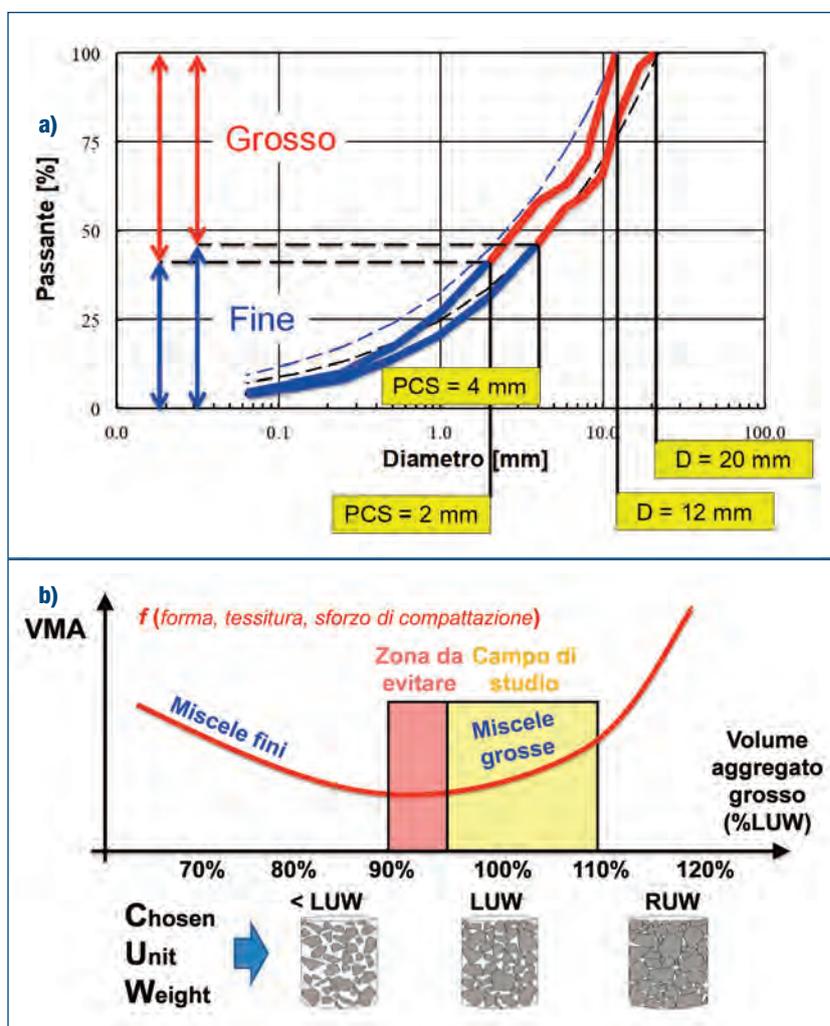


Fig. 19 Esempi di parametri fondamentali del Metodo di Bailey: a) Primary Control Sieve (PCS); b) correlazione tra VMA e parametri volumetrici dell’aggregato grosso

blematiche attinenti la composizione volumetrica del conglomerato bituminoso che ha suggerito la separazione del fresato in due classi distinte (RAP 0/8 mm e RAP 8/16 mm) la cui combinazione con le frazioni vergini di aggregati lapidei è stata ottimizzata sulla base dell'utilizzo dell'innovativo Metodo di Bailey.

Il Metodo di Bailey, concepito nei primi anni '80 da Robert Bailey, fornisce una serie di strumenti che consentono di valutare le caratteristiche di una miscela di aggregati e di comprendere la relazione che intercorre tra la distribuzione degli aggregati e i vuoti presenti nella miscela stessa.

I parametri fondamentali di tale metodo sono direttamente correlabili al parametro VMA (*voids in mineral aggregate*), ai vuoti d'aria e alle proprietà di compattazione della miscela (Fig. 19). Tale metodologia può essere impiegata in abbinamento a qualsiasi metodologia di mix design e permette di progettare miscele aventi uno scheletro litico fortemente resistente e adeguati valori VMA, al fine di ottenere stabilità e durabilità in condizioni di esercizio.

A valle dell'ottimizzazione della curva granulometrica con il Metodo di Bailey, è stata eseguita una indagine di laboratorio su miscele bituminose contenenti il 40% di fresato (25% RAP 0/8 e 15% RAP 8/16) confezionate con due diverse tipologie di bitume vergine modificato con polimeri SBS (soft S e hard H) e due differenti percentuali (5,0 e 5,2%) di bitume totale. Tali miscele sono state messe a confronto con la miscela di riferimento attualmente prodotta da Pavimental con il 25% di fresato indistinto (RAP 0/16), confezionata con bitume modificato hard in modo da ottenere una percentuale totale di legante pari al 4,8%. Il miglior impacchetta-

mento degli aggregati ottenuto con il Metodo di Bailey e il frazionamento del fresato in due pezzature hanno permesso di sopperire ad eventuali effetti negativi dovuti all'aggiunta di fresato. In particolare, è stato osservato che le miscele bituminose con il 40% di fresato ottimizzate mediante il Metodo di Bailey, oltre a garantire il rispetto dei limiti da Capitolato, forniscono prestazioni in laboratorio superiori a quelle della miscela attualmente utilizzata per strati di binder con 25% di fresato indistinto [8].

Nel dettaglio, a valle del programma di prove richiamato in Fig. 20, si sono registrati benefici in termini di compattabilità, resistenza a trazione indiretta, a fatica, alla propagazione delle fessure e all'accumulo delle deformazioni permanenti. Inoltre, con riferimento alla rigidità, il 40% di fresato nella miscela non influenza negativamente le prestazioni rispetto alla miscela attuale. Tale aspetto è stato ulteriormente verificato nell'ambito di una sperimentazione condotta in collaborazione con l'Università del Wisconsin in cui la propensione alla fessurazione è stata indagata eseguendo prove a basse temperature con l'apparecchiatura *Asphalt Thermal Cracking Analyzer (ATCA)*. I risultati ottenuti sono stati sorprenden-

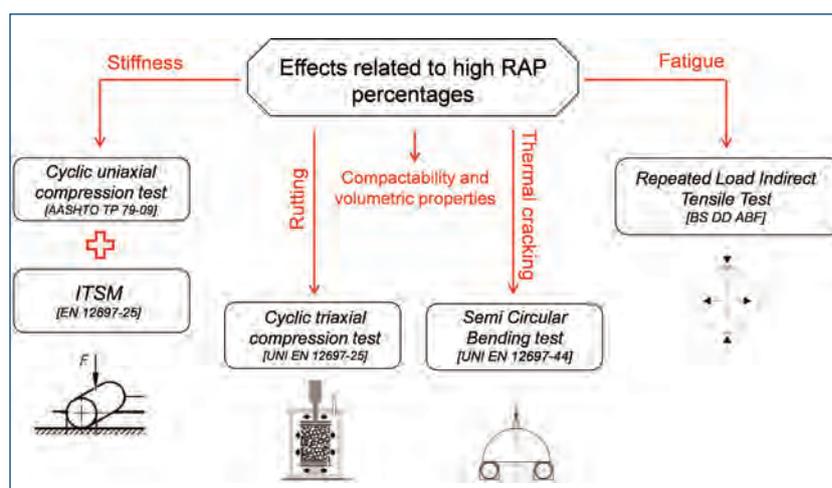


Fig. 20 Schema programma di prove di laboratorio per conglomerati bituminosi chiusi

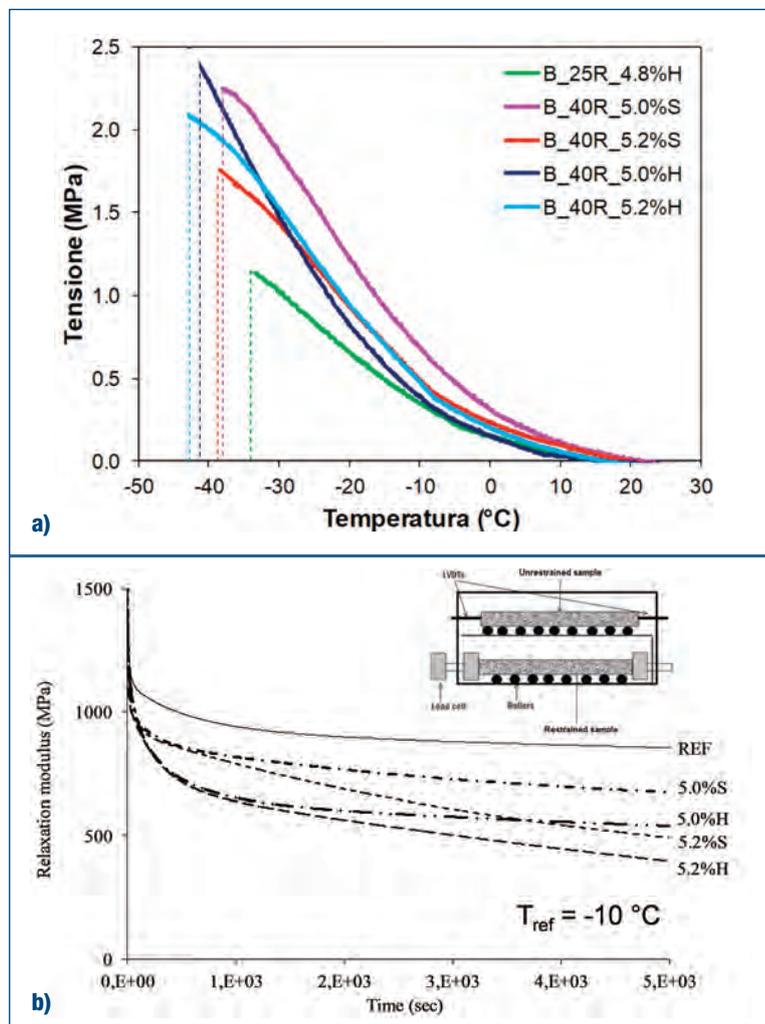


Fig. 21 Risultati prove ATCA per diverse miscele riciclate a caldo: a) temperatura minima di rottura; b) modulo di rilassamento

ti in quanto le miscele contenenti il 40% di RAP hanno mostrato una più elevata resistenza alla fessurazione termica caratterizzata da temperature di rottura inferiori (**Fig. 21**) [9] e da una maggiore capacità di rilassamento (**Fig. 21**) [10].

Gli studi condotti su miscele riciclate a caldo con diversi tenori di fresato, hanno consentito anche di avanzare ipotesi sperimentali sulla quota di legante presente nel RAP che risulta coinvolta nel processo

di produzione delle nuove miscele, partendo dal presupposto che solo una parte del film di legante che riveste i granuli di fresato viene effettivamente riattivata, mentre la quota di legante rimanente agisce da “black aggregate” (**Fig. 22**) [11]. In virtù dell’esito positivo emerso nel corso della sperimentazione eseguita su miscele confezionate in laboratorio è stata avviata anche una campagna sperimentale volta a confrontare i risultati di miscele confezionate in laboratorio con miscele confezionate in impianto. In particolare, è stato previsto il confezionamento e la posa in opera della miscela tradizionale con il 25% di fresato e il 4,8% di bitume totale di tipo Hard (assunta come riferimento) e di due miscele per strati di collegamento, entrambe prodotte con il 40% di fresato e il 5,2% di bitume totale (con bitume vergine di aggiunta rispettivamente di tipo Soft e Hard). Tali miscele sono state preparate direttamente presso l’impianto Pavimental di Magliano Sabina e sono state poste in opera, in tratti omogenei successivi, in un tronco pilota sull’autostrada A1. La verifica delle prestazioni meccaniche di tali materiali, eseguita realizzando il medesimo programma sperimentale adottato per le miscele prodotte in laboratorio illustrate in **Fig. 20**, ha permesso di confermare anche da un punto di vista operativo la concreta possibilità di realizzare in impianto miscele riciclate con elevati tenori di fresato (i.e. 40%) [12,13].

In primo luogo i risultati sulla compattabilità, determinata tramite il parametro *Compaction Energy Index (CEI)* sulla base di prove eseguite con pressa girettoria, evidenziano inaspettatamente una migliore propensione delle miscele con il 40% di fresato al-

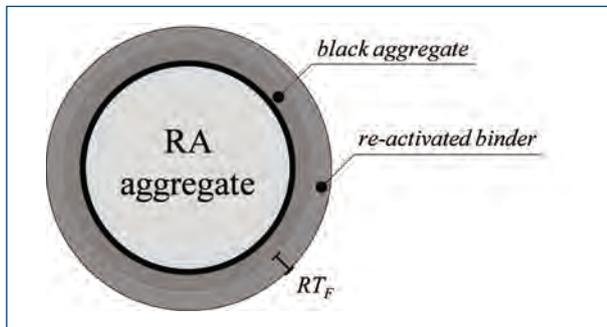


Fig. 22 Distinzione schematica tra bitume riattivato e “black aggregate” nei granuli di freato

l’addensamento rispetto alla miscela di riferimento con il 25% di RAP indifferenziato (**Fig. 23**).

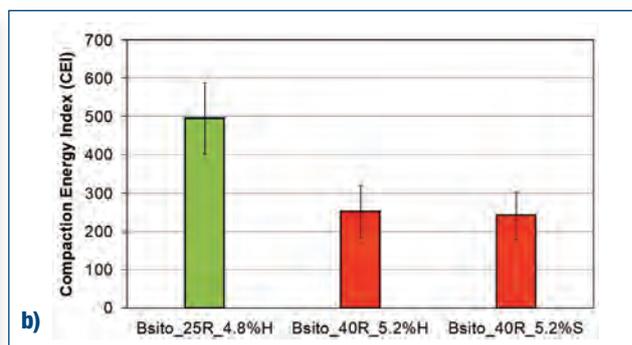
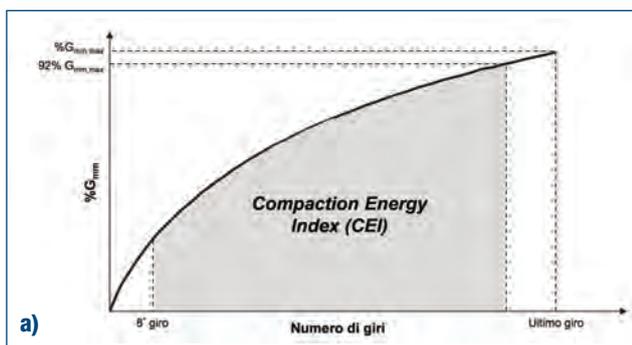


Fig. 23 a) Definizione del Compaction Energy Index; **b)** confronto risultati al variare della percentuale di freato

I risultati delle prove a trazione indiretta hanno evidenziato un primo segnale di eccessiva rigidità nelle miscele riciclate a caldo con il 40% di RAP e confezionate con bitume vergine modificato Hard (**Fig. 24**), per effetto di elevati (eccessivi?) valori sia della resistenza ITS (*Indirect Tensile Strength*) e che del coefficiente di trazione indiretta CTI. Tale riscontro è coerente con i risultati delle prove cicliche monoassiali sulla base delle quali sono state ricavate le curve maestre riportate in **Fig. 25** in cui è evidente, a parità di frequenza, il maggiore valore di modulo che compete alle miscele con il 40% di RAP confezionate con

bitume modificato con polimeri SBS hard. Nella stessa Fig. 25 tale risultato è ulteriormente confermato dal confronto tra i valori del modulo complesso ed il modulo di rigidità ricavato in configurazione di trazione indiretta (*Indirect Tensile Stiffness Modulus ITSM*). Anche i risultati delle prove SCB hanno dato la medesima evidenza sperimentale in termini di energia di frattura (**Fig. 26**) essendo di norma le miscele più rigide quelle caratterizzate da una tendenza ad un comportamento fragile. Analoghe considerazioni possono essere formulate dal confronto della resistenza nei confronti dei carichi ciclici, dalla quale si evince come il migliore comportamento sia quello della miscela confezionata con il 40% di RAP e bitume vergine »

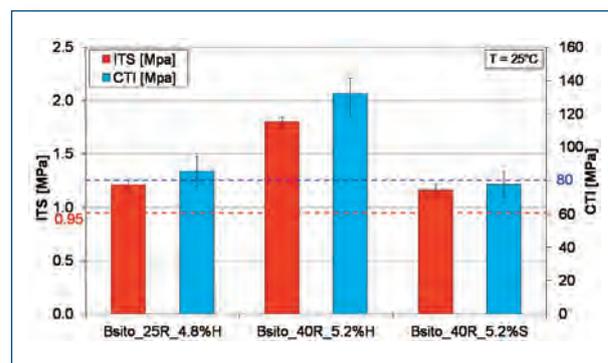


Fig. 24 Confronto risultati prova a trazione indiretta al variare della percentuale di freato

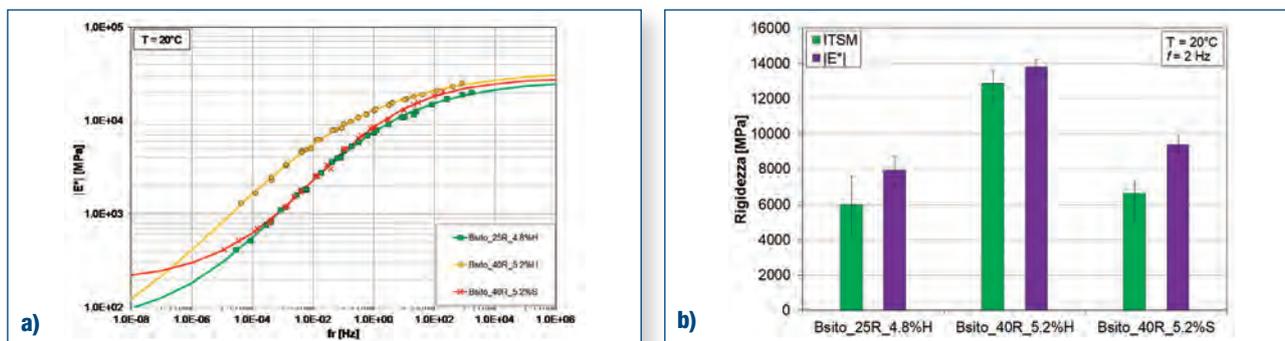


Fig. 25 Confronto rigidezza al variare della percentuale di fresato: a) curve maestre modulo complesso di compressione monoassiale; b) modulo di rigidezza a trazione indiretta

di aggiunta con polimeri SBS e modifica soft.

In definitiva, l'estesa caratterizzazione meccanica di laboratorio eseguita sulle miscele prodotte in impianto ha permesso di confermare che le miscele bituminose per strati di collegamento contenenti una quantità di fresato pari al 40% (25% di RAP 0/8 e 15% di RAP 8/16), ottimizzate in termini granulometrici mediante il Metodo di Bailey e confezionate con bitume modificato con polimeri SBS soft, forniscono complessivamente prestazioni superiori a quelle della miscela di riferimento, attualmente prodotta in ambito autostradale con una percentuale di fresato indistinto (RAP 0/16) pari al 25%.

5. Task 3: riciclaggio tiepido

Lo step successivo al riciclaggio a caldo è rappresentato dai conglomerati bituminosi “tiepidi” comunemente definiti *Warm Mix Asphalt (WMA)* che possono costituire una valida alternativa alle pratiche di riciclaggio a caldo per le quali sussistono problemi di natura tecnica legati alla produzione con elevati quantitativi di fresato. Infatti, nel riciclaggio a caldo sono richieste temperature di produzione molto elevate al fine di produrre una miscela adeguatamente lavorabile e con appropriate caratteristiche volumetriche e prestazionali. Tali aspetti devono essere debitamente tenuti in conto in presenza di elevate

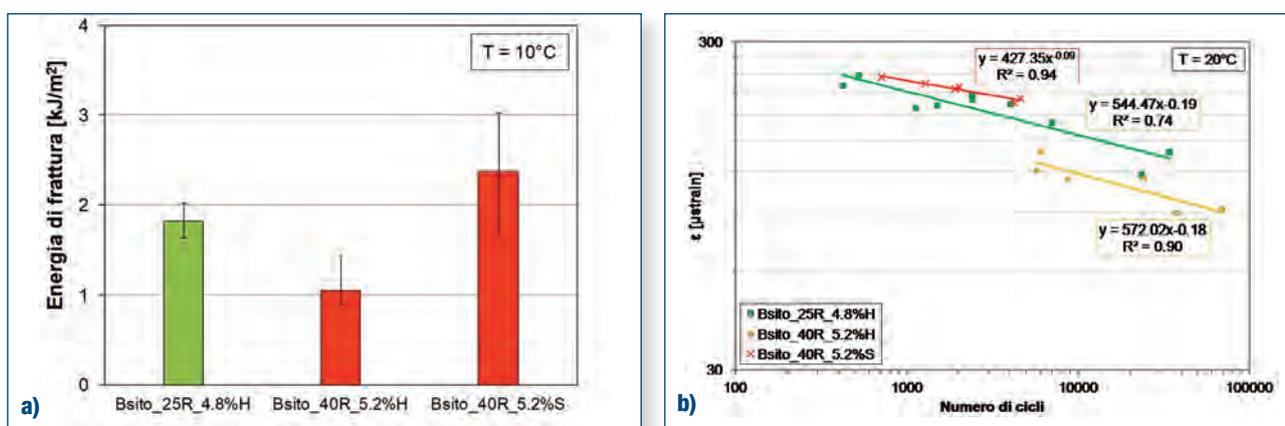


Fig. 26 Confronto rigidezza al variare della percentuale di fresato: a) energia di frattura SCB; b) resistenza ai carichi ciclici in configurazione di trazione indiretta

quantità di fresato, a causa della maggiore rigidità e viscosità del legante invecchiato riattivato durante la produzione. Inoltre, le tecniche di riciclaggio a caldo comportano rilevanti problematiche ambientali (eccessive emissioni in atmosfera di sostanze inquinanti) ed economiche (notevole dispendio energetico).

La produzione di conglomerati bituminosi tiepidi offre la possibilità di superare tali problematiche abbattendo le temperature di lavorazione (miscelazione e compattazione), senza pregiudicare la possibilità di impiego di elevati quantitativi di RAP. Tuttavia, tali tecnologie sono state introdotte sul mercato solamente negli ultimi anni e non sono pertanto disponibili molti dati riguardo l'effettiva efficacia dei prodotti in commercio, soprattutto nel caso di miscele prodotte con bitumi modificati.

Al fine di verificare eventuali criticità connesse all'utilizzo delle miscele riciclate tiepide, in termini operativi e prestazionali, è stato messo a punto uno specifico task sperimentale nell'ambito del progetto ERA finalizzato a verificare le potenzialità dei conglomerati bituminosi, sia chiusi che aperti, confezionati con tecnologia WMA.

Inizialmente sono state indagate miscele di conglo-

merato bituminoso per strati di collegamento contenenti il 25% di materiale fresato confezionate a temperature ridotte grazie all'adozione di diverse tipologie di additivi WMA, ciascuno appartenente a una delle tre principali categorie di presenti attualmente sul mercato (additivi *chimici*, *organici* e *zeoliti*), previa verifica delle proprietà reologiche del legante modificato con polimeri SBS hard in presenza di tali additivi.

5.1. Analisi della fase legante

Il primo risultato rilevante emerso nel corso del Progetto ERA sui conglomerati tiepidi [14] consiste nella dimostrazione che a governare la riduzione delle temperature di lavorazione delle miscele di conglomerato bituminoso non è un meccanismo legato ad una riduzione della viscosità del bitume, a parità di temperatura, in presenza di additivi WMA (Fig. 27-a). Tale risultato è stato confermato anche dai risultati ottenuti sul legante modificato con e senza additivi in termini di curve maestre del modulo complesso G^* dalle quali si rileva che le proprietà reologiche del bitume di partenza non risultano alterate significativamente dall'aggiunta degli additivi WMA (Fig. 27-b).

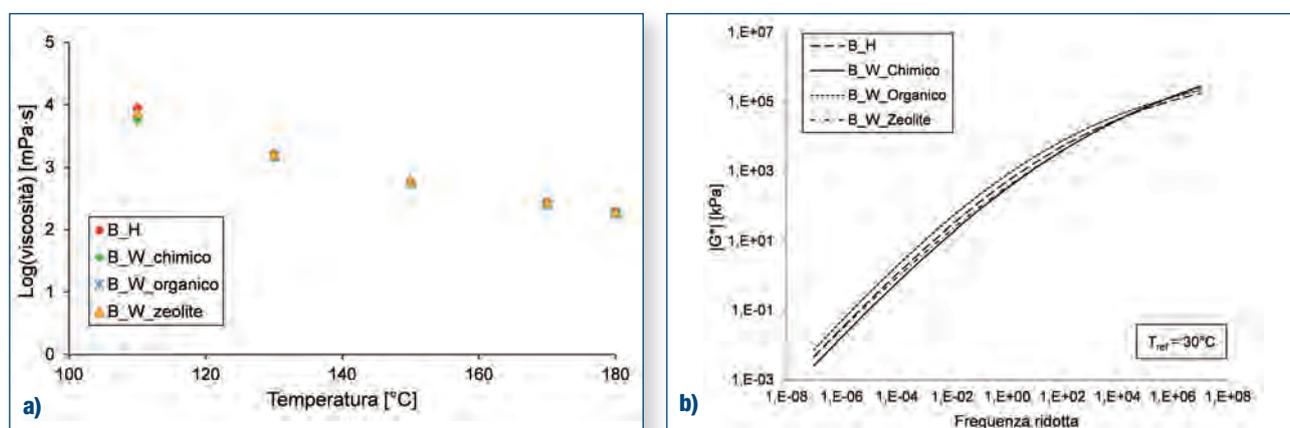


Fig. 27 Confronto comportamento reologico con e senza additivi WMA: a) viscosità al variare della temperatura; b) curva maestra modulo complesso

Gli effetti degli additivi WMA sono stati indagati anche in termini di adesione valutata sia nei confronti di aggregati vergini che riciclati (rivestiti cioè da un film di bitume invecchiato), in condizioni sia asciutte che bagnate [15]. I risultati sperimentali ottenuti hanno consentito di verificare che la produzione di conglomerati a temperature di lavorazione inferiori rispetto a quelle di un tradizionale conglomerato a caldo potrebbe causare perdite di adesione all'interfaccia bitume-aggregati, con una penalizzazione ulteriore anche in termini di sensibilità all'acqua. Ciononostante, la presenza di materiale fresato aiuta a compensare tale gap prestazionale, soprattutto in presenza di additivo chimico e aggregato calcareo (Fig. 28), con benefici riscontrabili anche in termini di sensibilità all'acqua, che tende a diminuire in presenza di materiale fresato.

Risulta invece sconsigliabile l'impiego di additivo di tipo organico laddove siano necessarie buone caratteristiche di adesione tra fase legante e lapidea e, quindi, in particolar modo per strati di usura drenante riciclati con tecnologia tiepida WMA.

5.2. Conglomerati bituminosi chiusi per strati di collegamento riciclati tiepidi

La sperimentazione di laboratorio su conglomerati per strati di collegamento, è stata eseguita su mi-

scele con diversi tipi di additivo WMA (chimico, organico, zeolite) confezionate in laboratorio sulla base del mix design (granulometria, contenuto e tipologia di bitume totale, percentuale di fresato) della miscela attualmente prodotta da Pavimental per strati di collegamento a temperature standard, assunta quest'ultima come miscela di riferimento a titolo comparativo.

Il punto di partenza è stato quello di assumere un valore prefissato di riduzione delle temperature di produzione e stesa. In particolare, sulla base delle letterature scientifica esistente, è stato ritenuto congruo un abbassamento di 40°C (miscele convenzionali: produzione 170°C e stesa 160°C; miscele tiepide: produzione 130°C e stesa 120°C) al fine di poter contare su benefici ambientali di ecosostenibilità tangibili.

Le prestazioni dei conglomerati prodotti sono state quindi esaminate tramite l'esecuzione di prove di laboratorio (Fig. 20) che hanno permesso di analizzare la risposta dei conglomerati nei confronti delle principali cause di ammaloramento tipiche di pavimentazioni flessibili e di affrontare problematiche specifiche più strettamente connesse all'utilizzo delle tecnologie tiepide (e.g. compattabilità, ornaimento). Inoltre, è stata sottoposta al medesimo programma sperimentale anche una miscela preparata alle stesse tem-

perature ridotte delle miscele tiepide, ma senza l'aggiunta di alcun additivo WMA, al fine di valutare se eventuali differenze prestazionali rispetto alla miscela di riferimento siano da attribuirsi solo alla riduzione delle temperature di miscelazione e compattazione oppure agli effetti degli additivi WMA.

Lo studio condotto ha permesso di far emergere vantaggi e svantaggi delle diverse tecnologie per con-

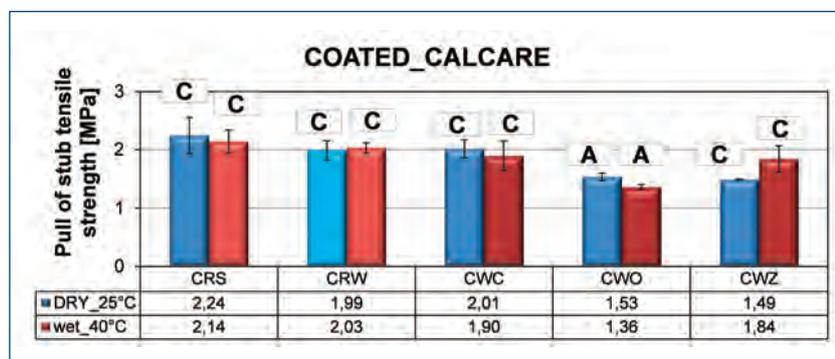


Fig. 28 Risultati prove di adesione Bitumen Bond Strength BBS in condizioni asciutte e bagnate per aggregati calcarei pre-bitumati

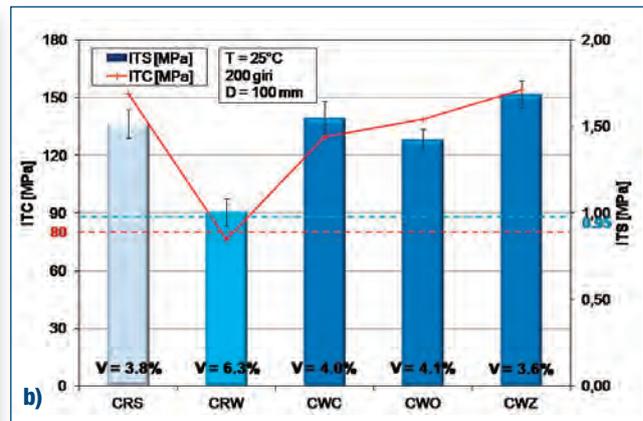
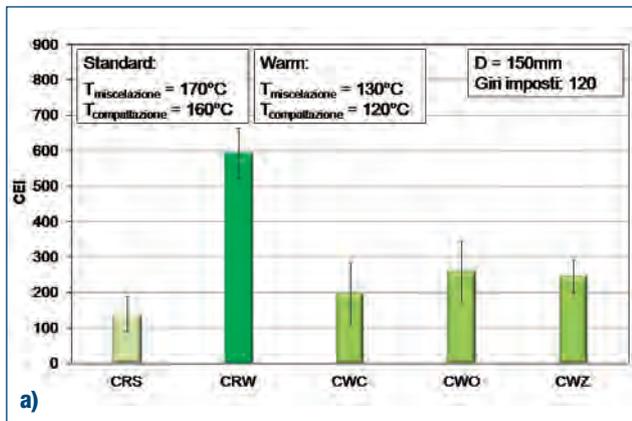


Fig. 29 Confronto miscele chiuse confezionate con diversi additivi: a) compatibilità; b) prova a trazione indiretta

glomerati tiepidi rispetto alle miscele attualmente in uso nella pavimentazioni, evidenziando punti di forza e debolezze delle miscele prodotte a temperature di lavorazione ridotte e permettendo l'identificazione della tipologia di additivi WMA più appropriata. In particolare, dai risultati sperimentali [14] è emerso chiaramente che la miscela confezionata a temperature tiepide ma senza additivi (CRW in Fig. 29) risulta penalizzata in termini di lavorabilità e prestazioni, come confermato a titolo di esempio dai dati relativi all'energia di compattazione e di resistenza a trazione indiretta riportati in Fig. 29.

Gli effetti della produzione a temperature inferiori sono chiaramente evidenziati dai valori di modulo misurati sia in condizioni di compressione monoassiale (curva maestra Fig. 30-a) che nel corso di prove di rigidità in configurazione di trazione indiretta (ITSM Fig. 30-b), in cui le miscele "CRS" prodotte a temperature convenzionali (170°) evidenziano valori di modulo sempre superiori a causa del maggiore invecchiamento subito dal legante sia vergine che presente nel fresato. Un ottimo comportamento delle miscele riciclate tiepide confezionate è stato confermato nel corso di prove cicliche a rottura (Fig. 31-a), »

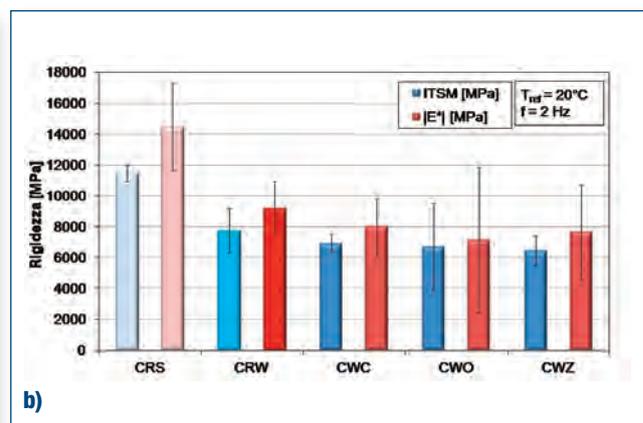
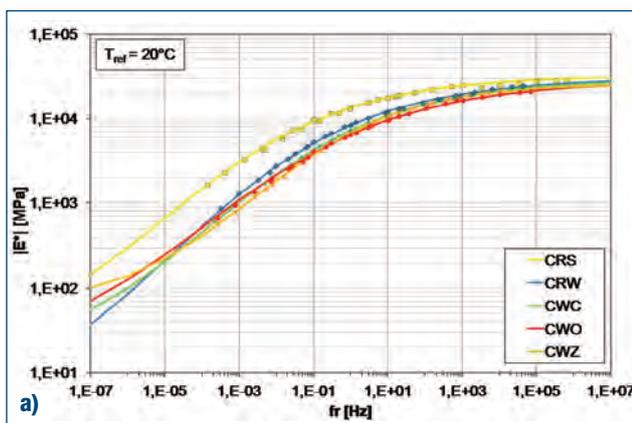


Fig. 30 Confronto miscele chiuse confezionate con diversi additivi: a) curve maestre modulo complesso di compressione monoassiale; b) modulo di rigidità a trazione indiretta

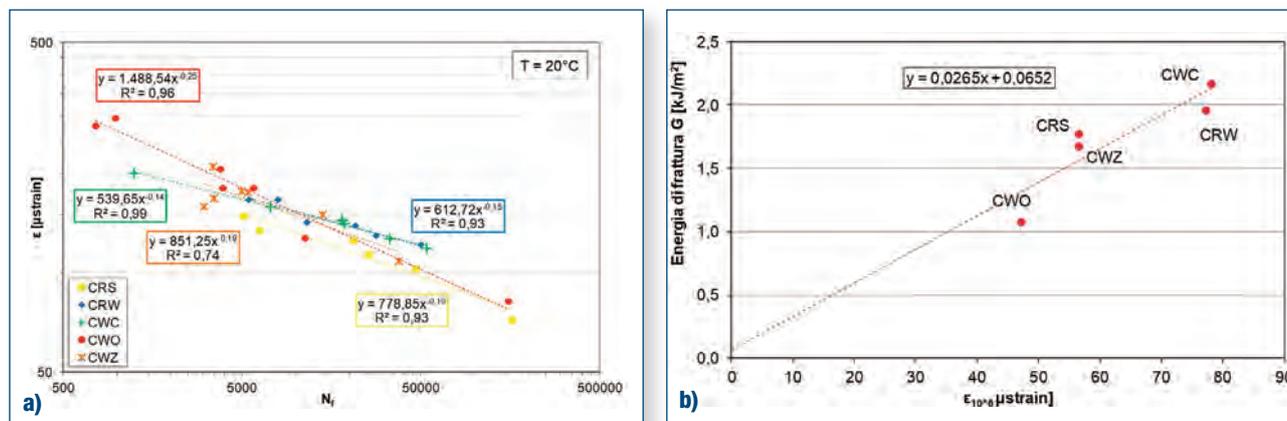


Fig. 31 Confronto miscele chiuse confezionate con diversi additivi: a) resistenza ai carichi ciclici in configurazione di trazione indiretta; b) correlazione tra resistenza ai carichi ciclici ed energia di frattura

confrontate anche con i risultati di prove SCB in termini di energia di frattura (Fig. 31-b).

In particolare, l’additivo chimico (miscele CWC) è quello che complessivamente ha dimostrato le migliori potenzialità per la produzione di conglomerati riciclati tiepidi nei confronti di tutte le principali caratteristiche richieste a una pavimentazione di tipo flessibile. Per tale motivo, nelle successive fasi di validazione in impianto e realizzazione di tronchi prova, è stato utilizzato tale tipologia di additivo per il confronto con le miscele tradizionali confezionate a caldo.

I risultati promettenti acquisiti in laboratorio hanno indotto a proseguire ed approfondire l’indagine sui conglomerati tiepidi tramite la realizzazione di una stesa sperimentale in vera grandezza con miscele riciclate prodotte in impianto a temperature ridotte tramite l’impiego di diversi additivi di tipo chimico selezionati tra i prodotti reperibili sul mercato.

Lo studio delle miscele per strati di collegamento prodotte in impianto ha previsto una percentuale di materiale fresato pari al 25% attualmente consentita dalle NTA. Oltre alle miscele tiepide realizzate con

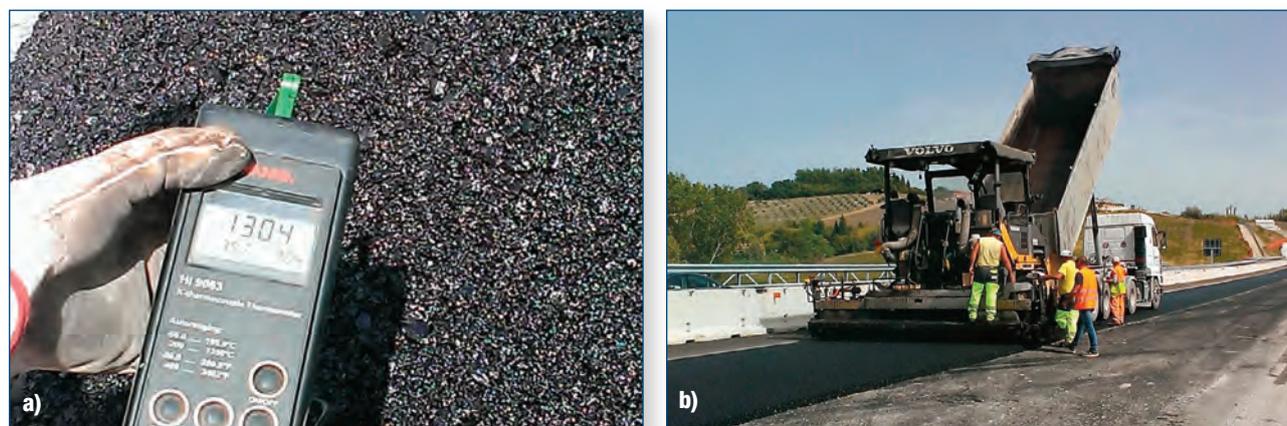


Fig. 32 Cantiere pilota miscele tiepide sull’autostrada A14: a) temperatura all’impianto; b) stesa in sito

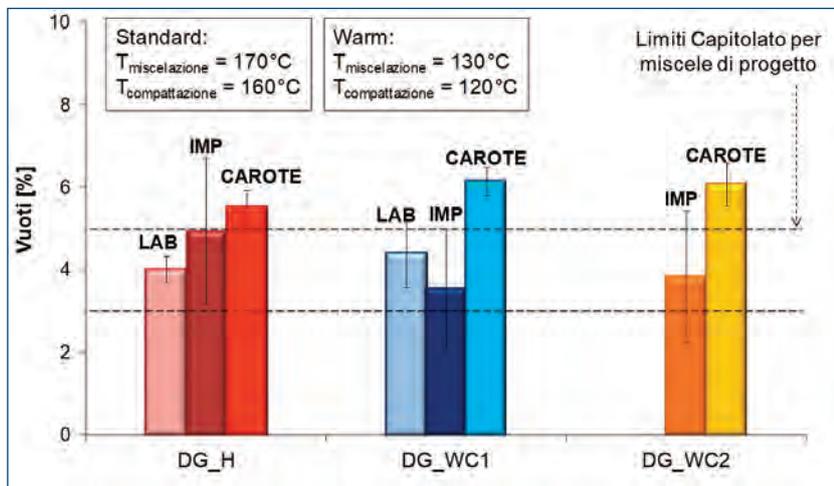


Fig. 33 Confronto percentuale dei vuoti tra miscele chiuse tiepide e convenzionali

l'aggiunta di due diversi additivi chimici (denominati C1 e C2), è stata confezionata anche una miscela a caldo di riferimento preparata a temperatura standard. Tali materiali, prodotti presso l'impianto Pavimental di Loreto (AN) previa modifica e calibrazione dell'impianto, sono stati impiegati per la stesa di sezioni sperimentali in vera grandezza avvenuta su un tratto dell'Autostrada A14 (Fig. 32). Le temperature di produzione all'impianto e di stesa in sito sono state rispettivamente pari a 170/160 °C per la miscela di riferimento e 130/120 °C per le miscele tiepide. Le prestazioni dei conglomerati per strato di collegamento sono state valutate tramite l'esecuzione di specifiche prove meccaniche che hanno permesso di analizzare [16] la risposta dei conglomerati nei confronti delle principali cause di ammaloramento secondo lo schema illustrato in Fig. 20.

La parte più interessante dello studio condotto ha riguardato il con-

fronto tra i risultati ottenuti sulle miscele prodotte e compattate in laboratorio (denominate "Lab", non disponibili per le miscele confezionate con l'additivo C2), i risultati delle miscele prodotte in impianto e compattate in laboratorio (denominate "Imp") ed i risultati delle miscele prodotte in impianto e compattate in sito (denominate "Carote"). Innanzi tutto, si è constatata la capacità delle miscele tiepide di garantire livelli di addensamento in sito in grado di soddisfare le prescrizioni delle NTA (densità in sito

≥ 96% densità di progetto), permettendo di ottenere valori di vuoti residui analoghi a quelli delle miscele di riferimento prodotte a temperature più elevate (Fig. 33).

Ulteriori conferme degli effetti derivanti da una produzione delle miscele a temperature più basse sono fornite dal confronto dei moduli di rigidezza a trazione indiretta dal quale emerge come la minore os- ➤

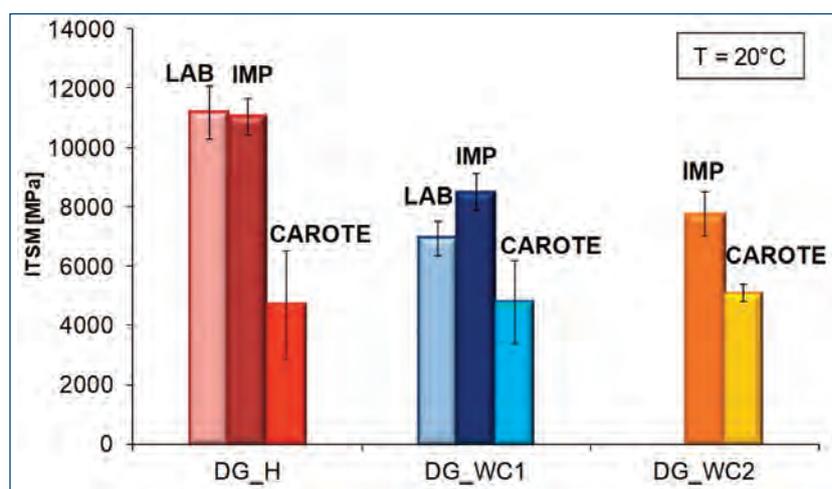


Fig. 34 Confronto modulo di rigidezza a trazione indiretta tra miscele chiuse tiepide e convenzionali

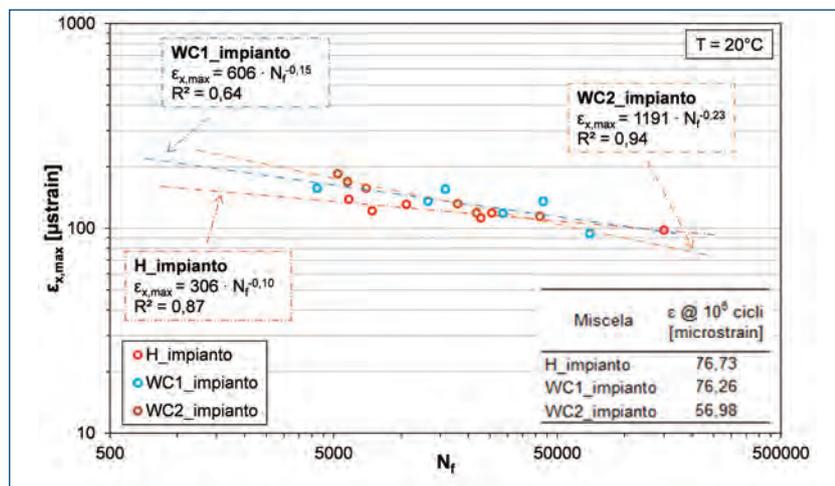


Fig. 35 Confronto resistenza ai carichi ciclici tra miscele chiuse tiepide e convenzionali confezionate in impianto

sidazione del legante abbia ripercussioni in termini di valori più bassi misurati per le miscele tiepide (Fig. 34), con benefici che traducono in una minore fragilità e propensione alla fessurazione.

Per quanto concerne le prestazioni nei confronti dei carichi ciclici, i risultati ottenuti mettono in evidenza la capacità anche in questo caso delle miscele tiepide di ottenere risultati perfettamente in linea con quelli delle miscele di riferimento, sebbene l’additivo C2 mostri un lieve gap sia nel confronto tra miscele prodotte in impianto e compattate in laboratorio (Fig. 35), sia in quello relativo ai risultati ottenuti dalle carote prelevate in sito (Fig. 36).

Infine, anche con riferimento all’accumulo delle deformazioni permanenti, le miscele confezionate a temperature inferiori di 40°C grazie all’impiego di specifici additivi, non hanno manifestato alcuna riduzione di prestazioni, come documen-

tato dai risultati di prove cicliche di compressione in cella triassiale ottenuti su carote (Fig. 37).

Nel suo complesso, quindi, l’indagine sperimentale condotta sulle miscele tiepide per strati di collegamento indica che è possibile pianificare una produzione di routine in grado di garantire buone caratteristiche volumetriche e prestazionali senza necessità di apportare sostanziali modifiche ai processi produttivi e di posa in opera attualmente utilizzati.

I buoni risultati conseguiti hanno indotto, inoltre, a ritenere possibile un

incremento della percentuale di fresato. In tal senso, al fine di ottimizzare i benefici in termini ambientali ed economici, è stata predisposta una sperimentazione di laboratorio su conglomerati tiepidi confezionati con due tipologie di additivi chimici (C1 e C3) e con una più elevata percentuale di materiale riciclato (i.e. 40% in peso rispetto agli aggregati). Tali miscele sono sta-

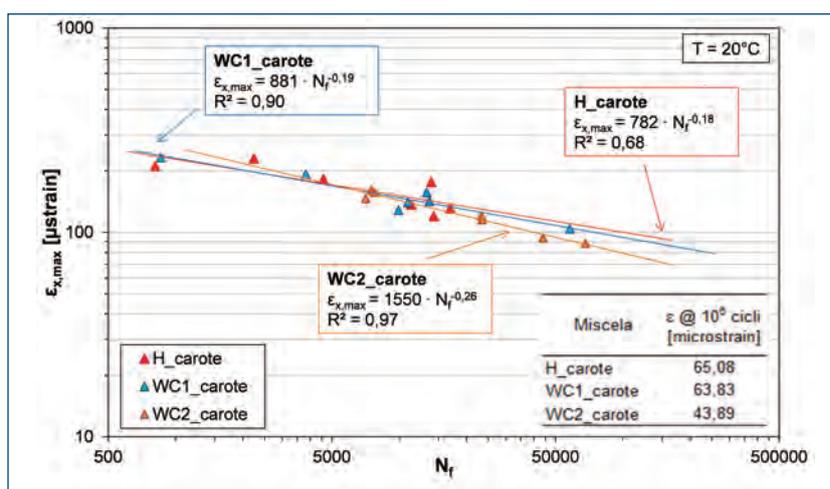


Fig. 36 Confronto resistenza ai carichi ciclici tra miscele chiuse tiepide e convenzionali su provini carotati in sito

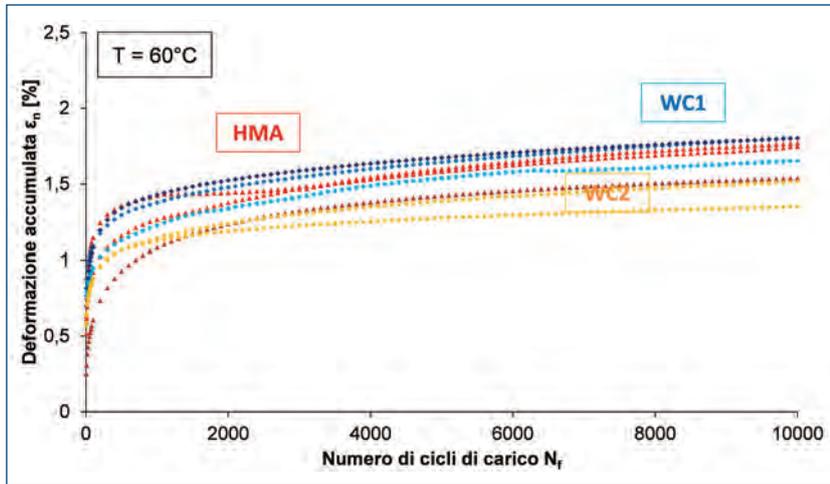


Fig. 37 Confronto resistenza all'accumulo delle deformazioni permanenti tra miscele chiuse tiepide e convenzionali

te confrontate quelle prodotte a temperatura più elevata contenenti il 25% ed il 40 % di RAP.

Inizialmente, ci si è soffermati sulla lavorabilità delle miscele, aspetto cruciale sia per produzioni a temperature ridotte che in presenza di elevati quantitativi di fresato. I risultati ottenuti mostrano che gli additivi chimici impiegati sono in grado di sopperire con efficacia alla maggiore percentuale di fresato e alle ridotte temperature di lavorazione, restituendo

miscele con caratteristiche volumetriche e di compattabilità soddisfacenti, in linea con la miscela attualmente prodotta con 25% di fresato e nel rispetto dei limiti prescritti da Capitolato. A tale risultato ha contribuito il miglior impacchettamento degli aggregati ricavato tramite l'applicazione del Metodo di Bailey e il miglior controllo della curva granulometrica raggiunto grazie alla suddivisione del fresato in due pezzature distinte.

I risultati della rigidezza, misurata con prove di compressione assiale e in configurazione di trazione indiretta, suggeriscono che l'adozione di tecnologie tiepide nel caso di conglomerati prodotti con elevati tenori di fresato può risultare particolarmente utile per compensare l'atteso incremento di rigidezza dovuto al rilascio da parte del RAP di bitume invecchiato più rigido. Ciò in virtù sia del ridotto invecchiamento a breve termine subito dalle miscele tiepide che del minor grado di riattivazione del bitume presente nel RAP (**Fig. 38**).

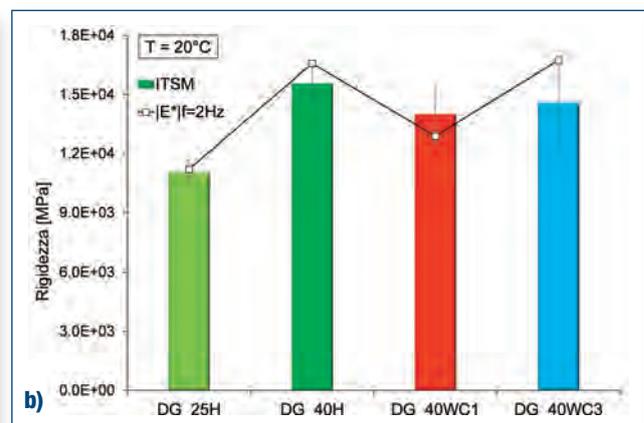
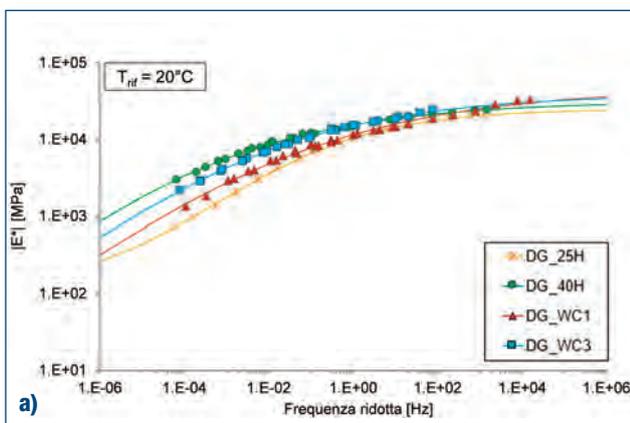


Fig. 38 Confronto tra miscele chiuse tiepide e convenzionali al variare della percentuale di fresato: a) curva maestra modulo complesso di compressione monoassiale; b) modulo di rigidezza a trazione indiretta

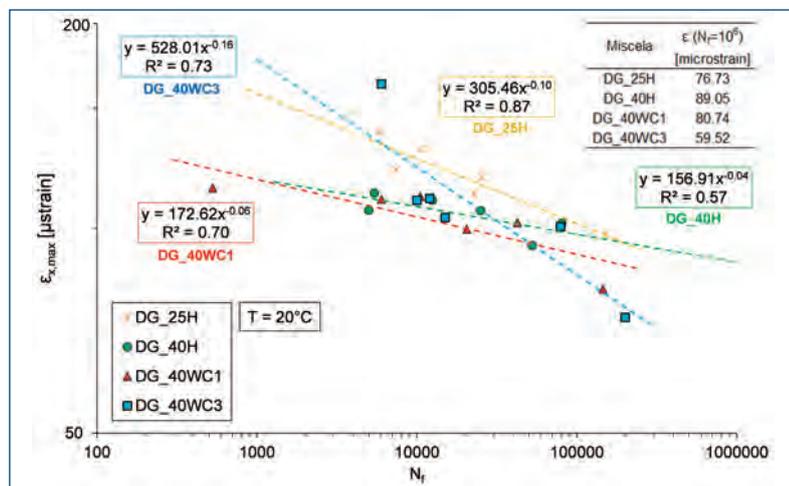


Fig. 39 Confronto tra miscele chiuse tiepide e convenzionali al variare della percentuale di fresato in termini di resistenza ai carichi ciclici

Sulla base dei risultati acquisiti tramite le prove SCB è stato possibile valutare la resistenza del materiale alla propagazione delle fessure. Dall'analisi dei dati è emerso che l'aggiunta del 15% di materiale fresato rispetto alla miscela di riferimento, così come l'adozione di temperature di produzione ridotte, non comporta significative variazioni prestazionali.

Anche le prove di carico ciclico a trazione indiretta (**Fig. 39**) hanno dimostrato che miscele con elevati tenori di fresato non sono penalizzate in termini di resistenza a fatica, a dimostrazione dell'efficacia del Metodo di Bailey adottato per il mix design. Nell'interpretazione dei risultati si deve, inoltre, considerare la migliore adesione che si può sviluppare tra legante vergine e aggregati pre-bitumati del RAP, con conseguente miglior distribuzione degli sforzi.

I risultati ottenuti suggeriscono che tale adesione possa venir meno nel caso delle miscele tiepide in ragione del minor grado di riattivazione del bitume presente nel fresato. Particolare importanza assume quindi la scelta della tipologia di additivo WMA, come già precedentemente sottolineato. Infatti, l'additivo C1, contenente attivanti di adesione, ha permesso di garantire ottime prestazioni, al

contrario della miscela con additivo C3 che ha esibito la peggior resistenza alla fessurazione.

Infine, i risultati relativi alla resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti hanno dimostrato che l'ottimizzazione granulometrica effettuata tramite il Metodo di Bailey e il frazionamento del RAP in due pezzature distinte è risultata particolarmente efficace per migliorare le prestazioni, in accordo con la maggior rigidità riscontrata per tutte le miscele con 40% RAP rispetto alla miscela di riferimento.

Alla luce delle considerazioni sopra riportate, è possibile ritenere percorribile la produzione di miscele bituminose chiuse a temperature significativamente inferiori rispetto a quelle standard includendo al contempo elevati quantitativi di materiale fresato senza penalizzazioni in termini prestazionali e di lavorabilità.

La combinazione delle due tecniche produttive (i.e. riciclaggio e tecnologia WMA) sembra in grado di restituire miscele con prestazioni addirittura migliorate rispetto alla miscela attualmente prodotta per strati di collegamento con 25% di materiale fresato indistinto. Ciò purché si proceda preliminarmente a un attento mix design volto ad ottimizzare la struttura dello scheletro litico e il grado di impacchettamento degli aggregati, che possono risultare fondamentali per lo sviluppo di una buona interazione con la fase legante.

Al contempo, particolare attenzione va prestata alla tipologia di additivo WMA impiegato per la produzione a temperature ridotte. La composizione chimica e il principio di funzionamento del prodotto incidono infatti significativamente sulle prestazioni del conglomerato finale. In particolare, additivi contenenti attivanti di adesione dovrebbero permettere di

sopperire più efficacemente al minor grado di riattivazione del bitume, garantendo un'adeguata interazione tra componente lapidea e legante.

5.3. Conglomerati bituminosi aperti per strati di usura drenante riciclati tiepidi

Anche per le miscele aperte per strati di usura drenante sono stati presi inizialmente in considerazione diversi tipi di additivo WMA (chimico "C", organico "O", zeolite "Z"). Con tali additivi sono stati confezionati in laboratorio i conglomerati bituminosi tiepidi adottando il mix design (granulometria, contenuto e tipologia di bitume totale, percentuale di fessato pari al 15%) della miscela prodotta a temperature di lavorazione standard, assunta quest'ultima come miscela di riferimento a titolo comparativo. Analogamente alle miscele tiepide per strati di collegamento, è stato assunto un valore prefissato di riduzione delle temperature di produzione e stesa pari a 40°C (miscele convenzionali: produzione 170°C e stesa 160°C; miscele tiepide: produzione 130°C e stesa 120°C) al fine di poter contare su benefici ambientali di ecosostenibilità tangibili. Le prestazioni dei conglomerati prodotti sono state esaminate tramite l'esecuzione di prove di laborato-

rio che hanno permesso di analizzare la risposta nei confronti delle principali cause di ammaloramento tipiche di pavimentazioni flessibili in condizioni asciutte e bagnate, al fine di valutare sia le prestazioni assolute che le perdite relative dovute alla suscettività all'acqua secondo lo schema riportato in Fig. 13. Inoltre, è stata sottoposta al medesimo programma sperimentale anche una miscela preparata alle stesse temperature ridotte delle miscele tiepide, ma senza l'aggiunta di alcun additivo WMA, al fine di valutare se eventuali differenze prestazionali rispetto alla miscela di riferimento siano da attribuirsi solo alla riduzione delle temperature di miscelazione e compattezza oppure agli effetti degli additivi WMA.

Lo studio condotto ha permesso di far emergere vantaggi e svantaggi delle diverse tecnologie per la produzione di conglomerati tiepidi, evidenziando punti di forza e debolezze delle miscele prodotte a temperature di lavorazione ridotte e permettendo l'identificazione della tipologia di additivi WMA più appropriata per il confezionamento di conglomerati riciclati per strati di binder.

In particolare, dai risultati sperimentali [17] è emerso chiaramente che la miscela confezionata a temperature tiepide ma senza additivi (PA_W) risulta pena-

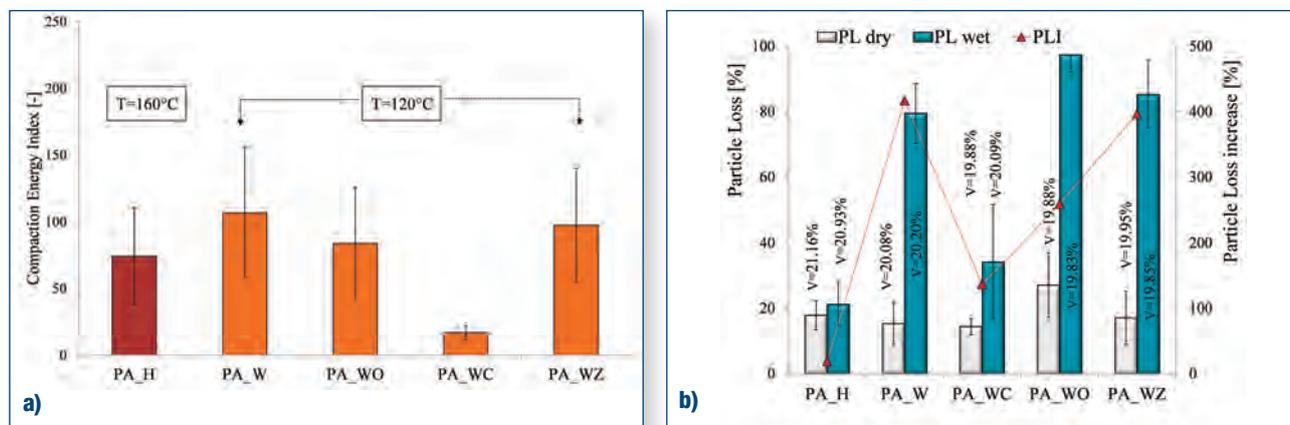


Fig. 40 Confronto tra miscele aperte tiepide e convenzionali: a) compattabilità; b) perdita in peso Cantabro

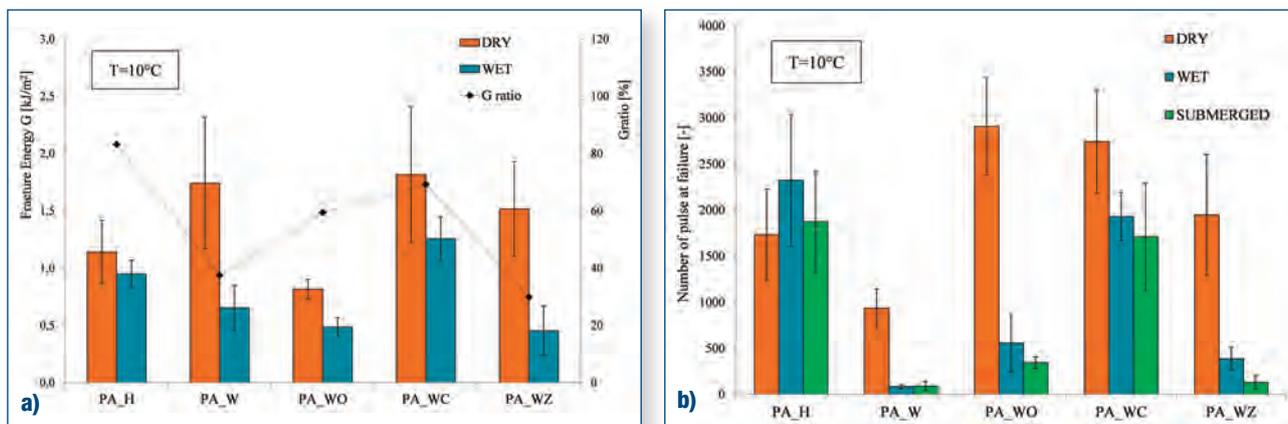


Fig. 41 Confronto tra miscele aperte tiepide e convenzionali: a) energia di frattura SCB; b) resistenza ai carichi ciclici in condizioni asciutte, bagnate e immerse

lizzata in termini di lavorabilità e prestazioni, come confermato a titolo di esempio dai dati relativi all'energia di compattazione e di perdita in peso Cantabro in condizioni bagnate (Fig. 40). Quest'ultimo dato mette in particolare risalto, inoltre, le carenze prestazionali dell'additivo organico e della zeolite che non risultano in grado di assicurare adeguati livelli di coesione alla miscela in condizioni bagnate "wet". Ulteriori interessanti osservazioni sono deducibili dai dati ottenuti nel corso delle prove SCB (Fig. 41-a) e di resistenza ai carichi ripetuti a trazione indiretta (Fig. 41-b) dai quali emerge incontrovertibilmente la supremazia dell'additivo chimico, specialmente in

presenza di acqua. Tale riscontro ha portato alla scelta dell'additivo chimico per lo studio delle miscele prodotte in impianto per la verifica delle prestazioni in sito.

Come previsto nella impostazione generale del progetto ERA (Fig. 2), alla caratterizzazione delle miscele prodotte in laboratorio ha fatto seguito la messa a punto e lo studio delle miscele prodotte in impianto. A tale proposito è stata realizzata una stesa sperimentale in vera grandezza con miscele aperte riciclate tiepide per strati di usura drenante confezionate con due diversi additivi di tipo chimico (denominati C1 e C2 le cui caratteristiche esaminate con metodo FT-IR sono illustrate in Fig. 42) e contenenti una percentuale di materiale fresato pari al 15%.

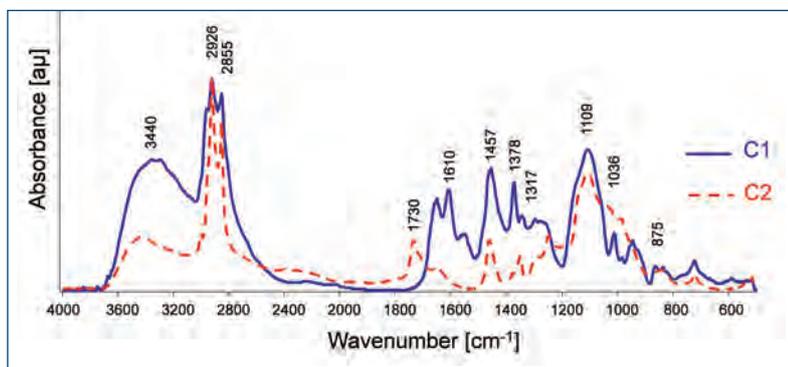


Fig. 42 Analisi FT-IR di diversi additivi chimici

con metodo FT-IR sono illustrate in Fig. 42) e contenenti una percentuale di materiale fresato pari al 15%.

Oltre alle miscele tiepide è stata confezionata anche una miscela a caldo di riferimento avente la medesima composizione preparata alle temperature standard. Tali materiali, prodotti presso l'impianto Pavimental di Loreto (AN), sono stati impiegati per la stesa di sezioni sperimentali in vera grandezza avvenuta su un tratto dell'Autostrada A14. Le

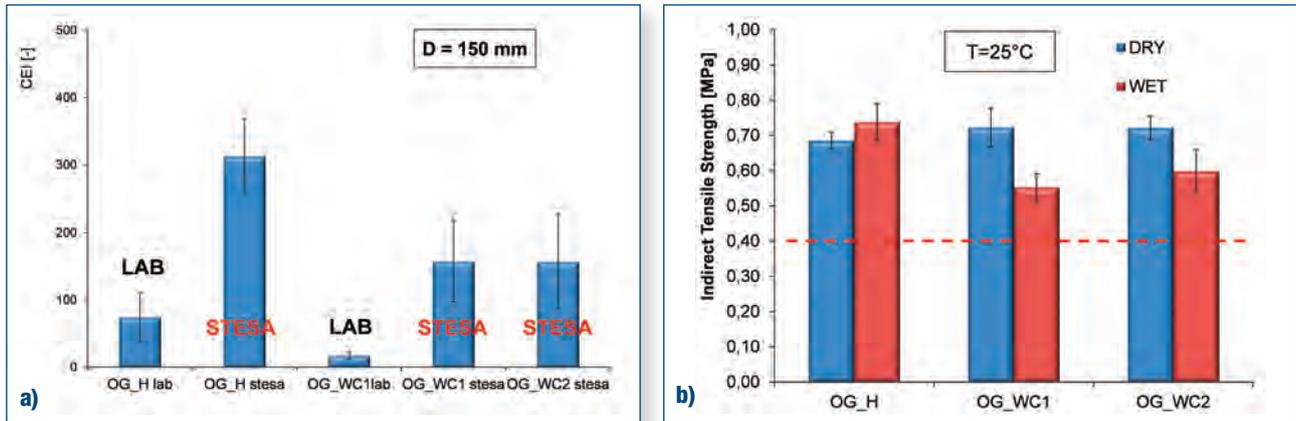


Fig. 43 Confronto tra miscele aperte tiepide e convenzionali: a) compattabilità miscele confezionate in laboratorio ed in impianto; b) resistenza a trazione indiretta in condizioni asciutte e bagnate

temperature di produzione all’impianto e di stesa in sito sono state rispettivamente pari a 170/160 °C per la miscela di riferimento e 130/120 °C per le miscele tiepide.

Le prestazioni dei conglomerati aperti per strati di usura drenante sono state determinate tramite l’esecuzione di specifiche prove meccaniche, secondo lo schema illustrato in Fig. 13, al fine di analizzarne la risposta nei confronti delle principali cause di ammaloramento.

I risultati sperimentali ottenuti sulle miscele prodotte in impianto e compattate in laboratorio sono stati confrontati con quelli precedentemente ricavati sulle stesse miscele confezionate e compattate in laboratorio (denominate “Lab”, non disponibili per le miscele contenenti l’additivo C2) [18].

Dall’analisi dei dati forniti da prove con pressa girettoria è emerso che l’impiego degli additivi chimici consente di mantenere una elevata lavorabilità (i.e. bassi valori dell’indice CEI), addirittura superiore alla miscela di riferimento, anche adottando temperature di produzione inferiori di 40 °C (**Fig. 43-a**). Analoghe conferme si sono registrate dalle prove di resistenza a trazione indiretta che hanno restituito valori sempre superiori al limite di capitolato per mi-

scelce aperte (0,4 MPa) anche in condizioni bagnate (**Fig. 43-b**).

Riscontri soddisfacenti sono stati ottenuti anche in termini di coesione delle miscele, determinata tramite l’esecuzione di prove Cantabro, sia in condizioni asciutte che bagnate. In quest’ultimo caso si registra per le miscele confezionate in impianto una performance dell’additivo C1 superiore a quella dell’additivo C2, addirittura migliore rispetto ai valori ottenuti per le stesse miscele prodotte in laboratorio (**Fig. 44-a**). Relativamente alla resistenza alla frattura, i risultati della prova SCB indicano un netto miglioramento dei valori ottenuti dalla produzione in impianto rispetto a quelli riferiti a miscele confezionate in laboratorio (**Fig. 44-b**), avendo ulteriore conferma delle migliori prestazioni dell’additivo C1 rispetto a C2.

In considerazione dei risultati ottenuti, anche nel caso di miscele aperte per strati di usura drenante è possibile ritenere percorribile la produzione a temperature significativamente inferiori rispetto a quelle standard, includendo al contempo una quota pari al 15% di materiale fresato, senza penalizzazioni prestazionali e in termini di lavorabilità.

La combinazione delle due tecniche produttive (i.e. »

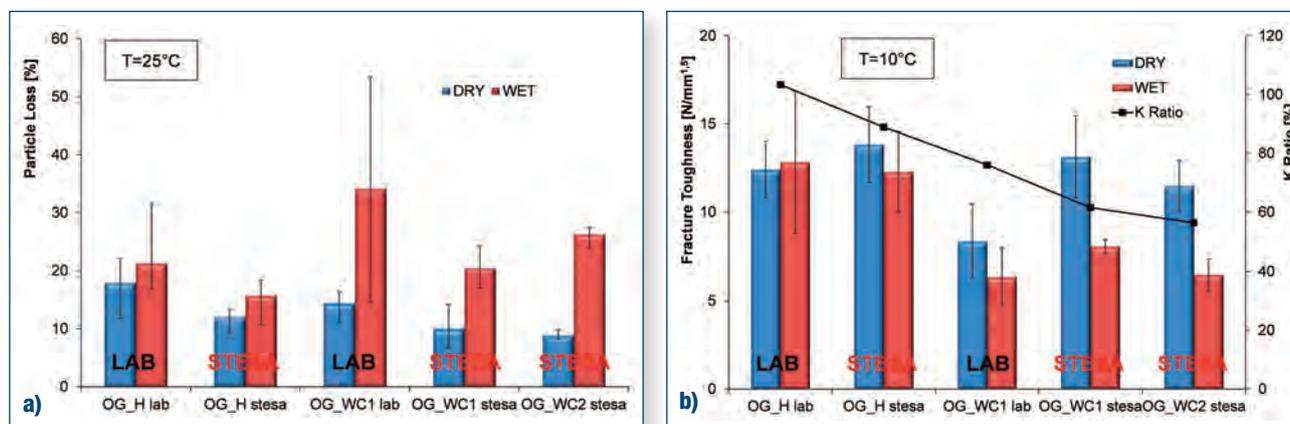


Fig. 44 Confronto tra miscele aperte tiepide e convenzionali confezionate in laboratorio ed in impianto: a) perdita in peso Cantabro miscele; b) resistenza alla frattura

riciclaggio e tecnologia WMA) richiede tuttavia un attento mix design ed una oculata scelta della tipologia di additivo WMA impiegato per la produzione a temperature ridotte. La composizione chimica e il principio di funzionamento dell’additivo incidono infatti significativamente sulle prestazioni del conglomerato finale. In particolare, additivi contenenti attivanti di adesione dovrebbero permettere di superare più efficacemente al minor grado di riattivazione del bitume, garantendo un’adeguata interazione tra componente lapidea e legante anche in presenza di acqua.

5.4. Valutazione dei risvolti ambientali derivanti dalla produzione di miscele tiepide

I promettenti risultati derivanti dalle sperimentazioni richiamate e la volontà di estendere la produzione di miscele tiepide alle normali pratiche operative nel campo della manutenzione stradale hanno spinto ad estendere ulteriormente il filone di ricerca. A tale proposito è stata pianificata la realizzazione di un’ulteriore stesa sperimentale con miscele prodotte a temperature ridotte in un diverso impianto Pavimental di Magliano Sabina prevedendo l’impiego di diverse tipologie di aggregato disponibili presso

l’impianto in oggetto, rispetto a quelle utilizzate presso l’impianto di Loreto.

La stesa sperimentale, ubicata nel tratto tra Orte e Fiano Romano dell’Autostrada A1, ha uno sviluppo maggiore rispetto al precedente e coinvolge tre diversi additivi WMA, tutti di tipo chimico. Sono state pertanto realizzate tre diverse miscele tiepide oltre alla miscela di riferimento prodotta a temperature convenzionale per ciascuno strato interessato dall’intervento di risanamento profondo (strato di base, strato di collegamento e strato di usura drenante). La scelta di procedere con un’ulteriore stesa sperimentale è scaturita da molteplici esigenze. Innanzitutto, si è voluto allargare l’indagine a un più ampio set di additivi chimici per verificarne costi ed efficacia, valutando contestualmente la produzione eseguita con un altro impianto produttivo e materiali di origine differente. Inoltre, essendo il tratto in esame più esteso, è stato possibile prolungare la durata delle produzioni a temperature ridotte. In tal caso è stato previsto il monitoraggio delle emissioni inquinanti in atmosfera durante la produzione in impianto a temperature ridotte e a temperature convenzionali, avendo la possibilità di effettuare un confronto diretto tra i dati acquisiti a parità di tutte le condizioni

al contorno (e.g. temperatura dell'aria, direzione e intensità del vento, umidità) che potrebbero significativamente incidere sui risultati. I risultati della sperimentazione [19] relativa al monitoraggio delle emissioni riportati in **Tabella 1** indicano mediamente una riduzione della temperatura al camino (-14.3°C), delle concentrazioni di ossidi di azoto NOX (-18%) e dei Composti Organici Volatili COV (-23%).

L'analisi delle altre sostanze inquinanti non ha invece permesso di dedurre considerazioni rilevanti, in quanto la concentrazione delle polveri (miscele tiepide: 11.5 mg/Nmc, miscela a caldo: 11.8 mg/Nmc), degli ossidi di zolfo SOX (miscele tiepide: 126.5 mg/Nmc, miscela a caldo: 129 mg/Nmc) e dei monossidi di carbonio CO (miscele tiepide: 1173 mg/Nmc, miscela a caldo: 1021 mg/Nmc) hanno restituito mediamente variazioni trascurabili tra le miscele tiepide e la miscela a caldo. In egual modo, gli IPA sono risultati praticamente assenti per tutte le produzioni (< 0.067 mg/Nmc). In ogni caso, i dati sopra riportati relativi al monitoraggio delle emissioni in atmosfera permettono di concludere che la produzione di conglomerati a temperature ridotte può apportare significativi benefici in termini di impatto ambientale, permettendo un abbattimento rilevante delle emissioni in fase produttiva delle sostanze considerate maggiormente pericolose dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico.

Tab. 1 Monitoraggio delle emissioni

Parametri chimici [mg/Nmc]	Concentrazione Limite [mg/Nmc]	Campionamento			
		1	2	3	4
		BASE_WC3	DG_WC2	DG_WC1	DG_H
POLVERI	20	9,58	12,3	12,6	11,8
CO	-	1228	1210	1081	1021
NO _X	500	47,4	52,4	57,4	61,8
SO _X	1700	128	168	83,5	129
COV	-	6,7	8,09	10,5	10,4
IPA	0,1	< 0,067	< 0,067	< 0,067	< 0,067
Temperatura rilevata [°C]	-	91	90	97	107

6. Attività di disseminazione dei risultati e di divulgazione della cultura scientifica

Lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo svolte nell'ambito del progetto ERA sono state anche una occasione da parte di Pavimental per realizzare iniziative a sostegno della diffusione delle conoscenze nel settore dei materiali stradali.

Tali iniziative sono state rivolte sia al personale tecnico delle società del gruppo Atlantia, sia alla comunità scientifica nazionale ed internazionale di settore. In particolare, nel 2015 è stato organizzato un seminario presso la sede Pavimental in cui sono stati presentati i risultati conseguiti nel corso del progetto ERA sul riciclaggio a caldo delle miscele bituminose.

Nello stesso anno, in occasione del RILEM *International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable & Innovative Bituminous Materials*, Pavimental ha fornito il proprio sostegno per l'organizzazione di un pre-conference workshop avente come tema il riciclaggio tiepido di miscele bituminose. Nel corso di tale iniziativa hanno fornito il proprio contributo illustri relatori internazionali provenienti da Francia, Polonia, Stati Uniti, Svizzera e, naturalmente, Italia, alle cui presentazioni hanno assistito partecipanti del mondo accademico e non.

Grazie al confronto scaturito per effetto dello scam- ➤

bio di esperienze maturate in Paesi ed in condizioni climatiche diverse, c'è stata la possibilità di maturare la certezza di procedere con maggiore convinzione nelle attività riguardanti il task 3 del progetto ERA relativo al riciclaggio tiepido delle miscele bituminose.

7. Sperimentazioni in corso e sviluppi futuri

Al momento è attiva una ricerca rientrante nel progetto ERA finalizzata a valutare come evolvono le prestazioni nel tempo di miscele riciclate tiepide a confronto con le corrispondenti miscele tradizionali attualmente impiegate in ambito autostradale.

Tale studio, iniziato nel 2016 con la realizzazione di un tronco pilota lungo 1 km costituito da 4 sezioni interessate da un risanamento profondo (base, binder ed usura drenante), di cui 3 eseguite con tecnologia tiepida grazie all'impiego di diversi additivi chimici, permetterà attraverso un duplice confronto di fornire risposte molto preziose sul comportamento sotto traffico dei conglomerati riciclati tiepidi.

Risultati di questo tipo sono, infatti, estremamente preziosi in quanto la tecnologia dei conglomerati tiepidi è relativamente giovane e non esiste ancora un background sufficiente per prevederne le prestazioni a lungo termine. Inoltre, l'elemento che rende ancor più interessante lo studio a livello internazionale, essendo pochi i riferimenti disponibili nella letteratura scientifica, consiste nella tipologia di legante vergine e contenuto nel fresato che risulta essere di tipo modificato con polimeri SBS. Le attività di tale sperimentazione è previsto che si concludano nel 2020 ed i risultati saranno presentati agli stakeholder presso le sedi ed i canali di informazione opportuni.

Un ulteriore sviluppo che Pavimental intende portare avanti in collaborazione con l'Università Politec-

nica delle Marche per la valutazione dei materiali innovativi ecosostenibili, non solo rientranti nel progetto ERA ma anche di ultima generazione, consiste nell'adozione di metodi e modelli sperimentali di ultima generazione (es. *Visco-Elastic Continuum Damage model*).

Tale strategia sarà sviluppata coerentemente ad una politica coordinata tra i vari partner interni ed esterni del gruppo Atlantia di cui Pavimental è stata promotrice ed attrice protagonista, come testimoniano i risultati conseguiti nell'ambito del progetto ERA illustrati nel presente articolo.

Riferimenti bibliografici pubblicati su riviste scientifiche ed atti di conferenze internazionali, basati sui risultati del Progetto ERA

- [1] A. Stimilli, G. Ferrotti, A. Graziani, F. Canestrari, “*Performance Evaluation of Cold Recycled Mixture Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt*”, Road Materials and Pavement Design, Vol. 14, No. S1, pp. 149-161, 2013.
- [2] A. Stimilli, G. Ferrotti, C. Conti, G. Tosi, F. Canestrari, “*Chemical and rheological characterization of virgin modified bitumen blended with ‘artificial reclaimed’ bitumen*”, Construction and Building Materials, Vol. 63, pp. 1-10, 2014.
- [3] F. Canestrari, G. Ferrotti, F. Cardone, A. Stimilli, “*Innovative testing protocol for the evaluation of binder-reclaimed aggregate bond strength*”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board of the National Academies, ISSN 0361-1981, Vol. 2444, pp. 63-70, 2014.
- [4] F. Frigio, E. Pasquini, G. Ferrotti, F. Canestrari, “*Improved durability of recycled porous asphalt*”, Construction and Building Materials, vol. 48, pp. 755-763, 2013.
- [5] F. Frigio, E. Pasquini, M. N. Partl, F. Canestrari, “*Use of reclaimed asphalt in porous asphalt mixtures: laboratory and field evaluations*”, ASCE Journal of Materials

- in Civil Engineering, Vol. 27, No. 7, 2015.
- [6] F. Frigio, E. Pasquini, F. Canestrari, "Laboratory Study to Evaluate the Influence of Reclaimed Asphalt Content on Performance of Recycled Porous Asphalt", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 43, Issue 6, pp. 1308-1322, 2015.
- [7] F. Frigio, A. Virgili, F. Canestrari, "Field validation of hot-recycled porous asphalt containing 20% RAP", *Proceedings of 6th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*, pp. 597-605, Thessaloniki, Nikolaidis (Ed.), Taylor & Francis Group, London, 2015.
- [8] A. Stimilli, G. Ferrotti, D. Radicioni, F. Canestrari, "Performance evaluation of hot-recycled mixtures containing SBS modified binder", *Proc. 6th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*, pp. 607-616, Thessaloniki, Nikolaidis (Ed.), Taylor & Francis Group, London, 2015.
- [9] A. Stimilli, F. Canestrari, P. Teymourpour, H. U. Bahia, "Low-Temperature Mechanics of Hot Recycled Mixtures through Asphalt Thermal Cracking Analyzer (ATCA)", *Construction and Building Materials*. Vol. 84, pp. 54-65, 2015.
- [10] F. Canestrari, A. Stimilli, H. U. Bahia, A. Virgili, "Pseudo-variables method to calculate HMA relaxation modulus through low-temperature induced stress/strain", *Materials and Design*, Vol. 76, pp. 141-149, 2015.
- [11] A. Stimilli, A. Virgili, F. Canestrari, "New Method to Estimate the «Re-Activated» Binder Amount in Recycled HMA", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, pp. 442-459, 2015.
- [12] A. Stimilli, A. Virgili, F. Giuliani, F. Canestrari, "In Plant Production of Hot Recycled Mixtures with High Reclaimed Asphalt Pavement Content: A Performance Evaluation", *8th International RILEM Symposium on Testing and Characterization of Sustainable & Innovative Bituminous Materials*, RILEM Bookseries, pp. 927-939, Ancona, 2016.
- [13] A. Stimilli, A. Virgili, F. Giuliani, F. Canestrari, "Mix design validation through performance-related analysis of in plant asphalt mixtures containing high RAP content", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Volume 10, Issue 1, pp. 23-37, 2017.
- [14] A. Stimilli, A. Virgili, F. Canestrari, "Warm recycling of flexible pavements: effectiveness of WMA additives on SBS modified bitumen and mixture performance", *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pp. 911-922, 2017.
- [15] F. Frigio, A. Stimilli, M. Bocci, F. Canestrari, "Adhesion properties of warm recycled mixtures produced with different WMA additives", *4th International Chinese European Workshop (CEW) on Functional Pavement Design*, Delft, 2016.
- [16] A. Stimilli, F. Frigio, F. Cardone, F. Canestrari, "Performance of warm recycled mixtures in field trial sections", *10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA)*, 2017.
- [17] F. Frigio, F. Canestrari, "Characterization of warm recycled porous asphalt mixtures prepared with different WMA additives", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 22, Issue 1, pp. 82-98, 2018.
- [18] F. Frigio, A. Stimilli, A. Virgili, F. Canestrari, "Performance Assessment of In-Plant-Produced Warm Recycled Mixtures for Open-Graded Wearing Courses", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2633, pp. 16-24, 2017.
- [19] A. Stimilli, F. Frigio, S. Sciolette, F. Canestrari, "In-plant production of warm recycled mixtures produced with SBS modified bitumen: a case study", *AIIT International Conference on Transport Infrastructure and Systems (TIS2017)*, Rome, 2017.