

Il risanamento delle pavimentazioni stradali mediante riciclaggio a freddo in sito con bitume schiumato

Il caso della tangenziale di Modena

Enrico Cattini – Ingegnere e Direttore Tecnico del Laboratorio VIATEST srl

Nicola De Marzi – Ingegnere e Tecnico Sperimentatore del Laboratorio VIATEST srl

Lucia de Ferrariis – Ingegnere e consulente dell'API Anonima Petroli spa

Mirca Ferrari – Geometra e Capo della Sezione Tecnica al Servizio Manutenzione Infrastrutture del Comune di Modena

Il presente lavoro descrive due importanti interventi di riciclaggio a freddo con bitume schiumato effettuati nelle estati del 2002 e del 2003 lungo un tratto della tangenziale di Modena, nel quadro dei programmi di manutenzione predisposti dall'Amministrazione Comunale.

La descrizione parte dalle indagini preliminari effettuate per determinare lo stato della pavimentazione, si sofferma sulle modalità esecutive dell'intervento per poi concludersi con i risultati delle prove sulle miscele campionate in corso d'opera e sulla pavimentazione finita.

Il riciclaggio a freddo in sito con impiego di bitume schiumato si va sempre più affermando come una delle tecniche di riqualifica delle pavimentazioni stradali più flessibile e competitiva sotto molteplici punti di vista: tecnico-economico, logistico-produttivo e di compatibilità ambientale.

Ricordiamo brevemente che la schiuma di bitume si ottiene –direttamente in opera- insufflando all'interno di uno speciale ugello (camera di espansione) una piccola percentuale di acqua (tra il 2 e il 3 %) in un idoneo bitume alla temperatura di circa 170°C. La reazione di espansione che ne consegue fa assumere al bitume la consistenza di una schiuma, con un aumento del volume apparente di 20-30 volte rispetto al valore corrispondente allo stato fluido; questo consente di miscelare efficacemente il bitume con un'inerte anche umido e a temperatura ambiente, quale quello ottenibile dalla fresatura a freddo degli strati di pavimentazione.

Prove di laboratorio eseguite su campioni hanno mostrato che se correttamente formulate e poste in opera le miscele riciclate con bitume schiumato raggiungono resistenze e rigidità tipiche dei misti cementati, pur conservando la flessibilità tipica dei conglomerati bituminosi; i risultati preliminari di varie campagne di prove tuttora in corso su pavimentazioni riciclate con tale tecnica attestano un buon comportamento delle miscele con bitume schiumato in termini sia di resistenza a fatica sia di resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti sotto i carichi di esercizio.

La costruzione di uno spesso strato di base avente tali caratteristiche strutturali contribuisce a compensare le carenze strutturali di una fondazione mediocre (ma comunque sufficiente) e ad assicurare un sensibile incremento della vita utile delle pavimentazioni risanate, con un vantaggioso rapporto costi benefici.

Ai mezzi d'opera già presenti sul mercato -ampiamente collaudati ed apprezzati per flessibilità e affidabilità-, vanno affianandosene altri specificamente dedicati al risanamento delle pavimentazioni mediante riciclaggio in sito e sviluppati con l'obiettivo di migliorare la logistica di cantiere; aspetto questo di fondamentale importanza quando ci si trovi ad operare in presenza di traffico, tanto da costituire il discriminante tra il successo e il fallimento di una tecnologia pur teoricamente valida.

L'esperienza di cantiere ha infine dimostrato che un attento monitoraggio in fase esecutiva del treno di riciclaggio e delle operazioni di compattazione delle miscele costituisce la migliore garanzia sulle prestazioni finali dell'opera.

Il caso della tangenziale di Modena

Il Settore Mobilità Urbana, attraverso il Servizio Manutenzione Infrastrutture, si occupa della manutenzione di tutto il patrimonio stradale comunale pari a circa 800 km, oltre alle ciclabili, ai manufatti e a tutte le pavimentazioni pubbliche esterne alla sede riservata al traffico veicolare (parcheggi, marciapiedi, aiuole ecc..).

La tratta di tangenziale attualmente in carico al Comune è pari a circa 7 km; pur rappresentando solo una minima parte del patrimonio totale, il traffico veicolare in attraversamento assume valori non dissimili da un tratto autostradale, imponendo di conseguenza ragguardevoli costi manutentivi.

A fronte del budget che l'Amministrazione Comunale mette a bilancio per la manutenzione delle varie infrastrutture, le priorità sulle quali vengono predisposti i progetti si basano sul principio-cardine stabilito dal Piano della Mobilità del Comune di Modena, della necessità di promuovere la sicurezza per tutti i tipi di mobilità.



Alcuni esempi dello stato di degrado della pavimentazione prima degli interventi di riciclaggio

In questo contesto, la scelta del Comune di Modena di ricorrere al riciclaggio a freddo con bitume schiumato si inquadra - come la precedente esperienza del 2002 - nella ricerca di soluzioni tecniche per la manutenzione strutturale delle pavimentazioni alternative alla tradizionale fresatura e rifacimento del pacchetto dei conglomerati bituminosi; pratica rivelatasi poco affidabile in termini di durata anche per interventi "importanti", su spessori di 15 cm e oltre.

Caratteristiche generali degli interventi

I due interventi in oggetto sono stati effettuati su un tratto della tangenziale della città di Modena che per caratteristiche geometriche e per flussi di traffico si può assimilare ad un tronco autostradale: la piattaforma è del tipo III (carreggiate separate da spartitrattico invalicabile, con due corsie e banchina pavimentata); le stime effettuate sulla base dei dati disponibili indicano un flusso di circa 20 mila veicoli/giorno di cui il 25÷30% pesante.

Il riciclaggio ha interessato entrambe le corsie -di marcia e di sorpasso- su entrambe le carreggiate e più precisamente:

- un tronco di circa 5 km su una larghezza complessiva di 7,20 m, per un totale di circa 72.000 mq (12.000 mc circa), completati in 18 giorni lavorativi tra la fine di luglio e gli inizi di agosto del 2002;
- un tronco di 1150 m su una larghezza complessiva di 8,40 m, per un totale di circa 20.000 mq (4.000 mc), completati in 6 giorni lavorativi nel settembre 2003.

Al lavoro -in entrambe le occasioni- l'impresa VIASTRADE Srl dell'Ing. Luigi Brescia, di Marmirolo (MN), coadiuvata nella delicatissima gestione della segnaletica dall'impresa I.C.A.F. -Impresa Costruzioni Agnini Franco- di Cognento (MO), che ha poi provveduto alla definitiva pavimentazione in conglomerato bituminoso a caldo.

Indagini preliminari: GPR e HWD

Prima di poter formulare una qualsiasi proposta di intervento, si è cercato di individuare quali fossero le cause del degrado della pavimentazione e di verificarne l'entità.

A tale scopo è stata predisposta una campagna di indagini non distruttive sulla pavimentazione in oggetto, consistente in:

1. un'indagine georadar a mezzo GPR (Ground Penetrating Radar) –integrata con carotaggi meccanici di taratura- per la determinazione dello spessore dello strato dei conglomerati e di quello granulare di fondazione;
2. una serie di prove deflettometriche con apparecchiatura HWD (Heavy Falling Weight Deflectometer), per la determinazione della capacità portante della pavimentazione e delle caratteristiche elastiche dei materiali costituenti i singoli strati.



Il GPR



L'HWD

La tecnica radar per l'indagine del sottosuolo consiste nell'interessare quest'ultimo con un'onda elettromagnetica ad alta frequenza e nel registrare i tempi di ritardo tra l'emissione dell'onda e la ricezione dei suoi echi riflessi dalle superfici di discontinuità tra strati con differenti caratteristiche dielettriche, a loro volta associabili a diverse caratteristiche meccaniche e mineralogiche dei materiali costituenti.

L'acquisizione dei dati avviene di norma in modalità cinematica, installando il GPR su un automezzo che si muove all'interno della corrente di traffico, solidalmente ad essa e quindi senza indurvi interferenze.

L'interpretazione dei dati geofisici –supportata da una serie di carotaggi meccanici di verifica e taratura, utili ma non strettamente necessari- ha consentito di:

- definire l'andamento stratigrafico della pavimentazione, con particolare riguardo allo spessore dei conglomerati bituminosi;
- individuare la presenza di anomalie profonde nello strato di fondazione e nel sottofondo, quali cavità o cedimenti;
- verificare l'eventuale presenza di elementi interrati e non segnalati che potessero essere di ostacolo alla successiva attività di fresatura –quali sottoservizi, attraversamenti, manufatti- e segnalarne la posizione.

L'HWD, o Deflettometro a Massa Battente, è uno strumento ad alto rendimento per la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei singoli strati della pavimentazione e del sottofondo stradale; con esso sono ottenibili i moduli elastici dinamici reali (misurati cioè in situ) dei materiali costituenti la sovrastruttura, che costituiscono a loro volta dati fondamentali di ingresso per uno studio analitico delle “prestazioni” della pavimentazione.

La prova consiste nel rilevare -mediante una serie di geofoni- il bacino di deflessione istantanea della superficie della pavimentazione prodotto da un carico impulsivo standardizzato applicato ad essa, la cui entità e durata sono tarate per simulare quello applicato dal transito di un veicolo pesante. Noti che siano gli spessori degli strati, una post-elaborazione dei dati di deflessione attraverso un modello multistrato elastico semi-indefinito consente di risalire al modulo di ciascuno dei materiali costituenti la sovrastruttura.

La prova è rapida (circa 60 secondi per stazione) e non distruttiva, ma dovendosi eseguire in modalità statica richiede gli opportuni accorgimenti per la sicurezza del traffico e degli operatori durante il breve stazionamento sul punto di prova.

La elaborazione dei dati: analisi dello stato di fatto e dimensionamento dell'intervento di riciclaggio

La campagna di indagini che ha preceduto il primo intervento del 2002 è stata curata dal Laboratorio Mobile VIATEST di Mantova; grazie ad una accorta organizzazione, tutti i rilievi (GPR, carotaggi e HWD) su

entrambe le corsie ed entrambe le direzioni (per complessivi 20 km) sono stati portati a termine in una sola giornata lavorativa (l'11 giugno 2002).



Il treno dei mezzi approntato per l'esecuzione delle indagini preliminari: in primo piano l'HWD, seguito da GPR e carotatrice



Una delle carote estratte dalla pavimentazione

Col rilievo GPR si sono potuti definire gli spessori della sovrastruttura. Per semplificare le elaborazioni successive, sono state poi individuate tratte dove tali spessori potessero assumersi sufficientemente costanti da consentire una elaborazione aggregata dei dati di deflessione.

Per la backcalculation dei dati di deflessione, la pavimentazione è stata schematizzata come un sistema a tre strati:

- pacchetto dei conglomerati bituminosi, con spessore tra i 19 e i 22 cm a seconda delle tratte;
- strato di fondazione in misto granulare di 70 cm;
- sottofondo, assunto semi-infinito per ipotesi di modello).

Per ciascun punto di misura sono stati quindi calcolati i moduli elastici del pacchetto in conglomerato bituminoso (alla temperatura di riferimento di 25°C), della fondazione e del sottofondo.

Definiti spessori degli strati e caratteristiche meccaniche (moduli elastici) dei materiali, si è passati alla analisi prestazionale della pavimentazione esistente, ovvero alla definizione della sua vita utile residua nelle attuali condizioni di esercizio, espressa in numero di passaggi di assi equivalenti (ESA) da 12 ton. A tale scopo la pavimentazione è stata schematizzata mediante un modello tri-strato elastico lineare analogo a quello utilizzato per la post-elaborazione dei dati di deflessione del HWD e ne è stato definito lo stato tensionale e deformativo interno indotto dall'applicazione in superficie di un carico pari ad un ESA. Assunti quindi i due criteri fondamentali di verifica basati rispettivamente sulla limitazione della resistenza a fatica per gli strati in conglomerato bituminoso e sulla limitazione dell'accumulo di deformazioni permanenti (per progressivo addensamento sotto traffico) per lo strato di fondazione e per il sottofondo, è stata determinata la vita utile residua per ciascun punto di prova.

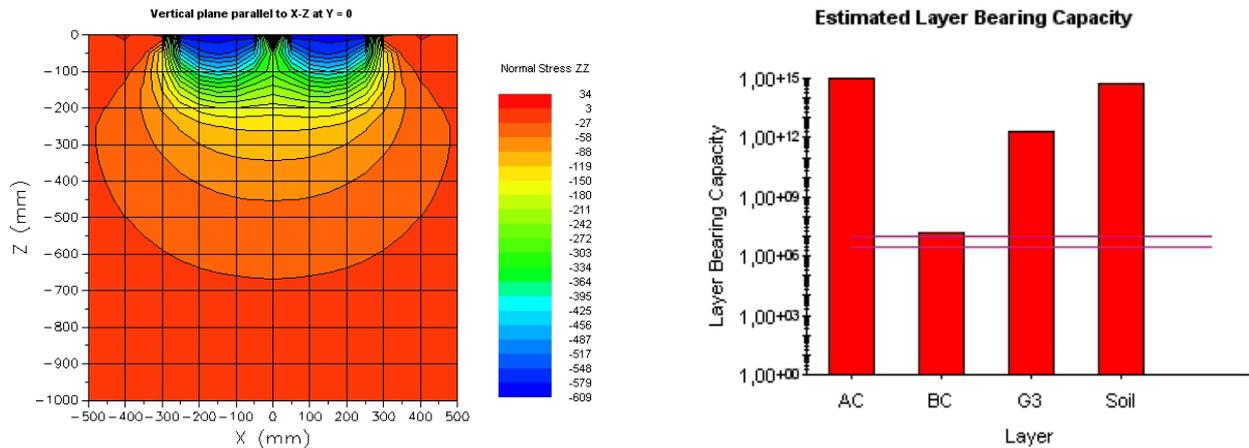
Questa analisi ha permesso di appurare che lo stato di degrado della pavimentazione era assai più diffuso e articolato di quanto non potesse apparire dalla semplice osservazione degli ammaloramenti superficiali: la vita residua risultava pressoché nulla su tratte estese ma discontinue; oltre il 30 % dello strato di fondazione presentava valori di modulo inferiori al limite di sicurezza dei 250 MPa e nella maggior parte del rimanente 70 % i valori risultavano solamente sufficienti; a ciò si aggiungeva una diffusa fessurazione dei conglomerati con conseguente penetrazione d'acqua nella sottostante fondazione.

Il sottofondo mostrava invece ovunque buoni valori di modulo.

Oltre alla rigenerazione del manto superficiale, si sarebbe quindi posta l'esigenza di un consolidamento localizzato della fondazione. L'ipotesi iniziale di bonifiche profonde con sostituzione dei materiali granulari con misto cementato si è subito rivelata economicamente e tecnicamente insostenibile: la limitata estensione dei singoli interventi non avrebbe consentito alcuna economia di scala e i tempi di maturazione richiesti prima di poter procedere alla posa dei conglomerati avrebbero imposto interferenze col traffico non tollerabili per utenza.

L'alternativa proposta è stata un risanamento generalizzato del pacchetto dei conglomerati bituminosi mediante un suo riciclaggio a freddo in sito con bitume schiumato. L'obiettivo era realizzare un nuovo strato di base/fondazione sufficientemente rigido da garantire una adeguata ripartizione dei carichi sulla

fondazione, ma nel contempo dotato di una resistenza a fatica compatibile con lo stato tensionale e deformativo indotto al suo intradosso dalla carenza strutturale della sottostante fondazione.



Un esempio delle verifiche su modello FEM

Posto un obiettivo di 15 milioni di ESA, lo spessore del riciclaggio è stato quindi proporzionato alle caratteristiche meccaniche della fondazione, aumentandolo laddove queste erano inferiori e le sollecitazioni del traffico maggiori:

- sud – marcia : 20 cm
- sud – sorpasso : 15 cm
- nord – marcia : 15 cm (20 cm in alcuni punti localizzati)
- nord – sorpasso : 15 cm

La finitura superficiale è stata realizzata con uno strato di minimo 4 cm in conglomerato bituminoso tradizionale a caldo.

Per la progettazione del secondo intervento, i dati messi a disposizione della VIATEST erano costituiti dai risultati di una campagna di prove deflettometriche eseguite con passo di 20 m mediante apparecchiatura HWD; mancava invece un rilievo continuo degli spessori della sovrastruttura mediante GPR.

Non essendo possibile associare ad ogni singolo bacino di deflessione gli spessori degli strati rilevati nel punto di prova, non è stato possibile verificare a priori lo stato della pavimentazione in termini di vita residua, essendo la sua stima affetta da un errore tanto maggiore quanto più lo spessore ipotizzato si discosta da quello reale.

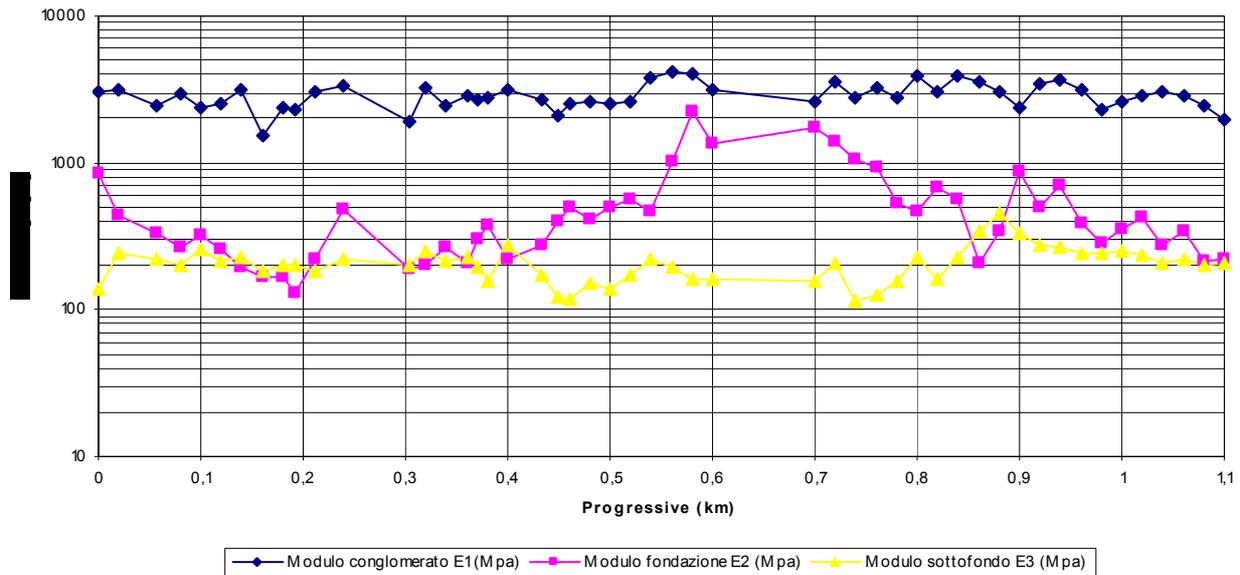
Tuttavia, la disponibilità dei dati grezzi delle singole prove HWD –ovvero i cedimenti misurati da ciascun geofono per ciascun punto di prova- ha consentito una valutazione a posteriori dello stato di fatto della pavimentazione sulla base dei soli moduli elastici, per confronto con quelli prima assunti in fase di dimensionamento e poi misurati in opera sulla pavimentazione finita e in esercizio (grazie ad una ulteriore campagna di indagini).

Per ciascun punto di misura -assunta per la pavimentazione esistente un tristrato elastico lineare- sono stati quindi calcolati i seguenti moduli elastici:

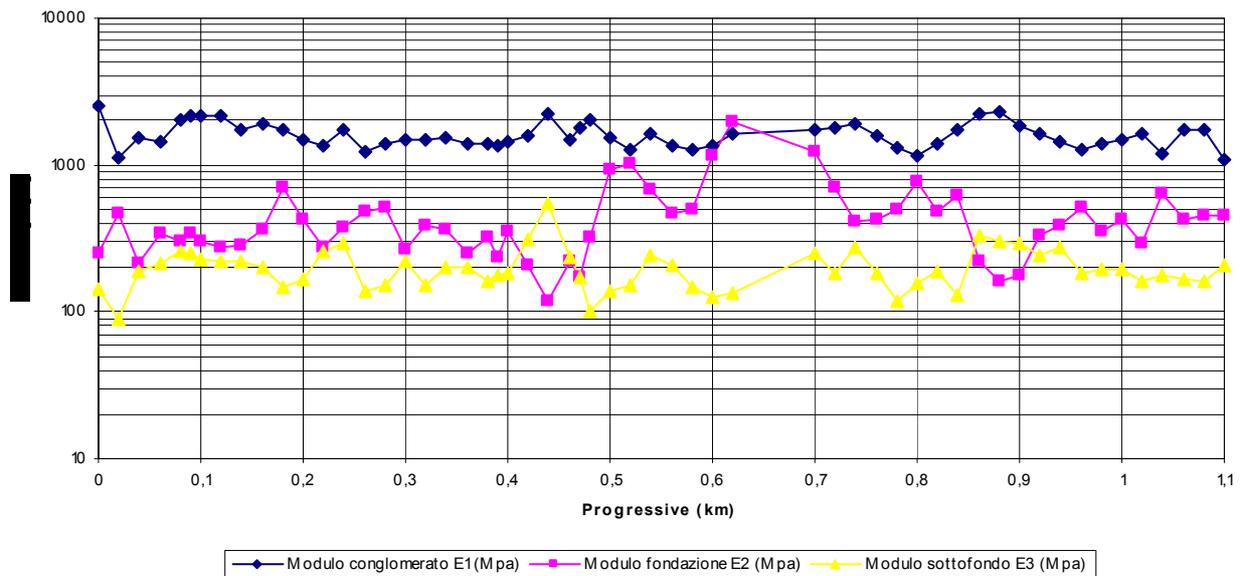
- modulo E1 dei primi 20 cm della pavimentazione esistente (costituiti principalmente da conglomerato bituminoso, riportato alla temperatura di riferimento di 25°C), corrispondenti alla porzione di sovrastruttura sulla quale il dimensionamento avrebbe poi indicato essere necessario intervenire col riciclaggio;
- modulo E2 dello strato di fondazione in misto granulare, spessore medio 50 cm;
- modulo E3 del sottofondo, spessore indefinito.

I grafici seguenti sono relativi alle due corsie di marcia lenta che si presentavano visibilmente più degradate con sfondamenti e fessurazioni diffuse. Essi evidenziano una situazione sostanzialmente analoga a quella già rilevata nel 2002: i conglomerati - visibilmente ammalorati - avevano moduli mediamente inferiori ai 3000 MPa in direzione Sassuolo e appena 1600 MPa in direzione Modena; quasi il 30% della fondazione presentava moduli inferiori ai 250 MPa, con una media di 350 MPa e una significativa dispersione nei valori; il sottofondo era invece in buone condizioni.

Moduli elastici della pavimentazione esistente - corsia di marcia lenta, direzione Sassuolo



Moduli elastici della pavimentazione esistente - corsia di marcia lenta, direzione Modena



La disponibilità dei dati grezzi di HWD ha anzi suggerito un diverso approccio al dimensionamento dello spessore di riciclaggio: invece di definire gli effettivi moduli dei singoli strati della sovrastruttura esistente, si è cercato di definire la “portanza” della strada alla quota di imposta del nuovo strato che si sarebbe creato a seguito dell’operazione di riciclaggio. I moduli E1 (strato superiore) e E2 (fondazione) sopra citati non sono quindi da intendersi come moduli reali, bensì come moduli di strati fittizi costituenti una sovrastruttura meccanicamente equivalente a quella reale, avente cioè la medesima risposta deformativa a una sollecitazione meccanica esterna, quale quella indotta dall’HWD.

Si può così procedere ad un dimensionamento per via iterativa.

Assunto uno spessore di riciclaggio di prima approssimazione, grazie ai dati di deflessione si determinano le caratteristiche meccaniche della sovrastruttura residua (moduli E2 e E3); si assegna poi allo strato riciclato il suo modulo di progetto e si procede alla verifica prestazionale della pavimentazione, come sopra descritto per l’intervento del 2002.

La soluzione proposta è stata anche in questa seconda occasione la formazione di un nuovo strato di base con funzione portante da costruirsi mediante il riciclaggio in sito di 20 cm della pavimentazione preesistente, con successiva posa di un tappeto di 5 cm in conglomerato chiuso tipo binder confezionato a caldo con bitume modificato.

La vita utile attesa a seguito di tale intervento di “ristrutturazione” è di 15 milioni di ESA da 12 t, pari a 4÷5 anni di esercizio.

Composizione media delle miscele poste in opera

In entrambi gli interventi il riciclaggio è stato condotto mediante la granulazione dello strato superiore della pavimentazione (costituito essenzialmente dai conglomerati bituminosi ammalorati) e la sua contemporanea stabilizzazione con bitume schiumato e cemento (sempre impiegato quale additivo), senza alcuna integrazione di materiale vergine di correzione.

I dosaggi medi posti in opera sono stati i seguenti:

	<i>1° intervento (2002)</i>	<i>2° intervento (2003)</i>
<i>bitume</i>	3	2.5
<i>acqua di schiumatura (% riferita al peso del bitume)</i>	3÷4	2.5÷3
<i>cemento Portland 32.5 R</i>	1.5÷2	2÷2.4
<i>acqua di costipamento</i>	3÷4	4÷4.5

Le caratteristiche di espansione del bitume, verificate direttamente in opera mediante prova di schiumatura dall'apposito ugello installato sulle riciclatrici, sono risultate le seguenti:

	<i>1° intervento (2002)</i>	<i>2° intervento (2003)</i>
<i>Rapporto di espansione (rapporto tra il volume della schiuma e quello del corrispondente bitume allo stato liquido)</i>	22	18
<i>Tempo di semitrasformazione (tempo che la schiuma impiega a dimezzare il proprio volume)</i>	35	46

Mezzi d'opera impiegati

Limitatamente alle operazioni di riciclaggio, sono state impiegate le seguenti attrezzature:

1° intervento (2002)

- Fresa/riciclatrice WR 2500 Wirtgen
- Mescolatore di slurry WM 1000 Wirtgen (per la produzione della boiaccia di cemento)
- Autocisterna del bitume caldo
- Autocisterna per il rifornimento dell'acqua di costipamento
- Rullo vibrante monotamburo HAMM 3520 da 20 ton
- Rullo vibrante tandem HAMM HD110 da 11 ton
- Motorgrader
- Scarificatrice Dynapac

2° intervento (2003)

- Fresa/riciclatrice WR 4200 Wirtgen (dotata di banco di stesa AB 500);
- Slurry-mixer WM 1000 Wirtgen (per la produzione della boiaccia di cemento);
- Autocisterna del bitume caldo;
- Autocisterna per il rifornimento dell'acqua (acqua di schiumatura e acqua per la produzione della boiaccia cementizia);
- Rullo vibrante monotamburo Hamm 3520 da 21 t;
- Rullo vibrante tandem Bomag 184 da 14 t.



2002: il treno di riciclaggio al completo (riciclatrice WR 2500)



Il treno di riciclaggio al completo (riciclatrice WR 4200)

Organizzazione e gestione del cantiere

1° intervento (2002)

Le lavorazioni erano state inizialmente programmate in orario esclusivamente notturno per i timori di eccessive interferenze col traffico diurno, normalmente molto sostenuto. Già dalla prima giornata lavorativa –protratta fino alla tarda mattinata del giorno seguente- la Direzione Lavori aveva però potuto constatare come l'organizzazione del cantiere fosse tale da rendere comunque accettabili tali interferenze; le successive lavorazioni sono quindi state autorizzate anche in orario diurno.



Avvio del cantiere in notturna

Il treno di riciclaggio era composto dalla WR 2500 accoppiata (come spintore) al WM 1000 e all'autocisterna del bitume, per una lunghezza complessiva di circa 40 m.

La sequenza –oramai codificata dall'esperienza- delle operazioni di riciclaggio è stata la seguente:

1. fresatura della pavimentazione e sua contemporanea stabilizzazione mediante iniezione direttamente sul tamburo di fresatura della schiuma di bitume e dello slurry di cemento;
2. compattazione iniziale della miscela riciclata mediante rullo vibrante monotamburo;
3. regolarizzazione e sagomatura dello strato secondo la pendenza trasversale di progetto, mediante motorgrader;
4. compattazione finale e finitura superficiale mediante rullo vibrante tandem.

Il riciclaggio di ciascuna carreggiata –per un larghezza complessiva di 7,20 m, coperta con tre tagli longitudinali di 2,50 m in parziale sovrapposizione- è avvenuto in due fasi, impegnandone col cantiere una sola metà alla volta e lasciando l'altra costantemente aperta alla circolazione: per prima è stata riciclata la corsia di marcia, passando poi alla corsia di sorpasso solamente dopo la stesa del tappeto d'usura e la riapertura al traffico della corsia di marcia.



Il riciclaggio della corsia di sorpasso, con quella di marcia già pavimentata e riaperta al traffico ordinario

Il riciclaggio della corsia di marcia in corrispondenza di uno degli svincoli

Durante il riciclaggio delle corsie di marcia in corrispondenza degli svincoli, la chiusura in ingresso e in uscita si è limitata ai pochi minuti necessari al transito del treno e alla compattazione iniziale della miscela; per un più rapido smaltimento degli incolonnamenti, il deflusso dei veicoli è stato autorizzato già dopo la compattazione iniziale e prima della regolarizzazione. Lo strato riciclato è stato poi riaperto al transito senza limitazioni immediatamente dopo il termine delle operazioni di costipamento, senza rischio alcuno né per i veicoli né per l'integrità strutturale dello strato, che anzi ha beneficiato dell'ulteriore azione costipante dei pneumatici.

Essendo consentita una sopraelevazione del piano viario preesistente pari al solo spessore del successivo strato d'usura, per compensare l'aumento di volume della miscela riciclata –il cui peso specifico a termine compattazione è mediamente inferiore del 10% rispetto a quello dei conglomerati che si vanno a riciclare- si è reso necessario provvedere preventivamente ad asportare circa 2 cm dalla pavimentazione, mediante scarifica superficiale eseguita immediatamente prima dell'operazione di riciclaggio.

Per ottenere una migliore finitura superficiale dello strato, lo spessore della pre-scarifica è stato tale da garantire che il raggiungimento della quota finita avvenisse comunque con un modesto eccesso di materiale, successivamente raccolto in cordolo dal motorgrader e caricato su autocarro utilizzando ancora la scarificatrice.



La scarifica superficiale per la conservazione della quota preesistente



La regolarizzazione della miscela con motorgrader

La posa dello strato di usura in conglomerato tradizionale a caldo –curata dalla I.C.A.F.- è avvenuta di norma a 24 ore dal termine delle operazioni di riciclaggio, previa rimozione a mezzo spazzolatrice del materiale granulare depositatosi sulla superficie (essenzialmente quell’eccesso in cordolo che la scarificatrice non riusciva a raccogliere da terra) e applicazione di una mano d’attacco in emulsione bituminosa.

2° intervento (2003)

La lavorazione è stata condotta in orario sia notturno sia diurno.

Il riciclaggio di ciascuna carreggiata - su una larghezza complessiva di 8,40m - è avvenuto in due fasi: prima si è intervenuti sulla metà interna per 4,20 m dal margine interno, ovvero sulla corsia di sorpasso e su parte della corsia di marcia, con deviazione del traffico in banchina; successivamente, si è passati al riciclaggio della parte rimanente della corsia di marcia e della banchina per ulteriori 4,20 m, con deviazione del traffico sulla parte di carreggiata interna precedentemente riciclata.

Il treno di riciclaggio era composto dalla WR 4200 accoppiata (come spintore) al WM 1000 e all’autocisterna del bitume, per una lunghezza complessiva di circa 50 m.

La sequenza delle operazioni di riciclaggio è stata la seguente:

1. Fresatura della pavimentazione, sua contemporanea stabilizzazione con schiuma di bitume e cemento e stesa in sagoma della miscela riciclata, ad opera della WR 4200;
2. Compattazione della miscela mediante rullo vibrante monotamburo e rullo vibrante tandem.



Il riciclaggio della corsia di sorpasso col traffico deviato in banchina; fase del costipamento della miscela riciclata e stesa



Il riciclaggio a ridosso delle barriere di sicurezza dello spartitraffico

Da evidenziare, rispetto al treno di mezzi impiegati nel precedente intervento del 2002, l’assenza del motorgrader: la nuova riciclatrice WR 4200 Wirtgen è infatti dotata di un banco che consente l’immediata stesa della miscela riciclata secondo la sagoma di progetto e una sua omogenea precompattazione.



La stesa col banco della WR 4200

Al termine delle operazioni di costipamento lo strato riciclato si presentava perfettamente idoneo ad essere transitato in condizioni di sicurezza: la stesa con banco piuttosto che con motorgrader ha infatti consentito di realizzare una superficie ben chiusa e priva di sgranamenti.

Diversamente da quanto avvenuto nel 2002, dopo una breve fase di maturazione iniziale non superiore a 24 ore, lo strato riciclato è stato quindi riaperto al traffico ordinario per 1÷2 giorni prima della sua definitiva pavimentazione; come già osservato in occasione del precedente intervento, limitatamente alle tratte in corrispondenza degli svincoli, l'azione del traffico non ha indotto alcun danneggiamento dello strato ma piuttosto una ulteriore positiva azione di costipamento ad opera dei pneumatici.

Controlli in corso d'opera e sulla pavimentazione finita

La qualità del prodotto finale è stata garantita indirettamente attraverso una serie di accurati controlli sulla lavorazione, e in particolare:

- controllo visivo frequente della qualità della schiuma (attraverso l'ugello di prova installato sulla macchina riciclatrice)
- monitoraggio continuo della omogeneità della miscela;
- verifica del rispetto del dosaggio dei leganti (bitume e cemento) e dell'acqua di schiumatura e di costipamento, eseguito periodicamente sulla base delle quantità effettivamente erogate e del volume di materiale lavorato (ovvero della distanza percorsa);
- controllo della profondità di lavorazione;
- controllo del grado di addensamento e della sua omogeneità spaziale attraverso prove di portanza dinamica con LDWT (Light Drop Weight Tester)

L'esperienza ha dimostrato come tali controlli di semplice e rapida esecuzione offrano -rispetto alle più consuete verifiche a campione- la possibilità di monitorare in tempo reale il prodotto, di individuare immediatamente quegli scostamenti dalle condizioni medie che potrebbero metterne a rischio le prestazioni finali e quindi di modificare di conseguenza il processo produttivo per poter rientrare nei limiti di accettazione. Diversamente, i tempi tecnicamente necessari alla esecuzione di una prova in condizioni normalizzate e controllate su un campione di prodotto fanno sì che essa possa assumere solo valenza di test di accettazione finale, risultando quindi di scarsa utilità pratica ai fini della corretta realizzazione dell'opera. L'efficienza di tale sistema di controllo è stata del resto confermata sia dalle buone caratteristiche meccaniche delle miscele riciclate campionate in opera sia dai risultati delle prove HWD effettuate sulla pavimentazione finita.

Infatti, come ormai consuetudine presso l'impresa VIASTRADE, gli interventi di riciclaggio sulla tangenziale di Modena hanno costituito l'occasione per acquisire nuove conoscenze relativamente alle caratteristiche meccaniche delle miscele con bitume schiumato.

A tale scopo il Laboratorio Mobile VIATEST ha provveduto ad una serie di campionamenti di miscele prodotte in opera, prelevate direttamente a tergo della riciclatrice e utilizzate per il confezionamento di provini secondo protocollo Duriez (CNR 130/89), che - ricordiamo - prevede la compattazione statica di 3.500 g di miscela entro fustelle di 12 cm di diametro sotto un carico di 12 t per 5 minuti.



Il Laboratorio Mobile VIATEST durante la prima notte di lavorazioni



Una parte dei provini Duriez confezionati in sito

Stante la ragguardevole esperienza maturata dal Laboratorio VIATEST sulla base dei numerosi cantieri già monitorati in precedenza (Marmirolo, Collesferro, Valmontone, Cattolica ...), in occasione del primo intervento del 2002 si è deciso di andare oltre i test “normalizzati” per testare le caratteristiche meccaniche delle miscele in condizioni limite, e in particolare: a medio e lungo termine; dopo prolungata esposizione all’acqua; alle basse e alte temperature, rispettivamente 10°C e 40°C.

I provini sono quindi stati sottoposti a stagionatura prolungata (> 180 giorni), una parte di essi in aria libera, un’altra costantemente immersa in acqua, in entrambi i casi a temperatura ambiente; le prove sono invece state eseguite tutte su provino asciutto, dopo opportuno condizionamento. Su di essi, oltre alle consuete determinazioni delle caratteristiche volumetriche, sono state poi determinate la resistenza a trazione indiretta e il modulo complesso di cui riassumiamo i valori medi (il dettaglio delle prove viene riportato in allegato):

- *peso specifico apparente dei provini:* 2.21 gr/cm³ (2.14÷2.28)
- *resistenza a trazione indiretta R_t a 10°C:* 1.86 MPa (1.63÷2.25) per i provini stagionati a secco, 1.81 MPa (1.54÷2.18) per quelli stagionati in immersione
- *resistenza a trazione indiretta R_t a 40°C:* 0.37 MPa (0.20÷0.47) per i provini stagionati a secco, 0.31 MPa (0.21÷0.45) per quelli stagionati in immersione
- *modulo complesso E a 10°C e 5 Hz (valore assoluto):* 7236 MPa per i provini stagionati a secco, 5983 MPa per quelli stagionati in immersione

Resistenza a trazione indiretta alla temperatura di prova di 10°C (MPa)

<i>set</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
<i>stagionatura a secco</i>	1,88	1,64	1,63	1,94	1,58	2,08	2,25
<i>stagionatura in immersione</i>	-	1,69	1,54	1,86	1,60	1,97	2,18

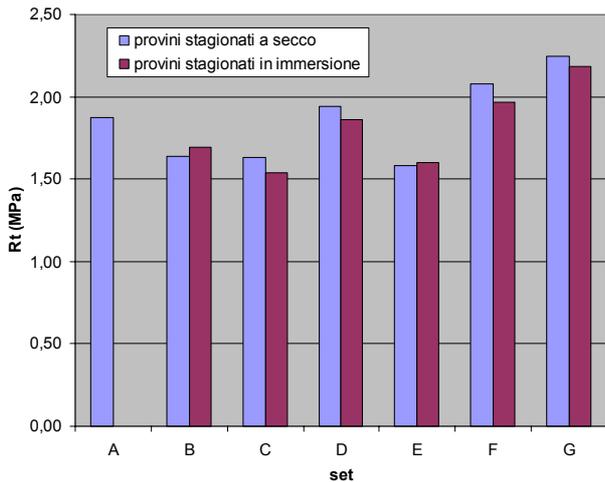
Resistenza a trazione indiretta alla temperatura di prova di 40°C (MPa)

<i>set</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
<i>stagionatura a secco</i>	0,47	0,47	0,34	0,40	0,20	0,31	0,39
<i>stagionatura in immersione</i>	-	0,45	0,28	0,33	0,21	0,22	0,40

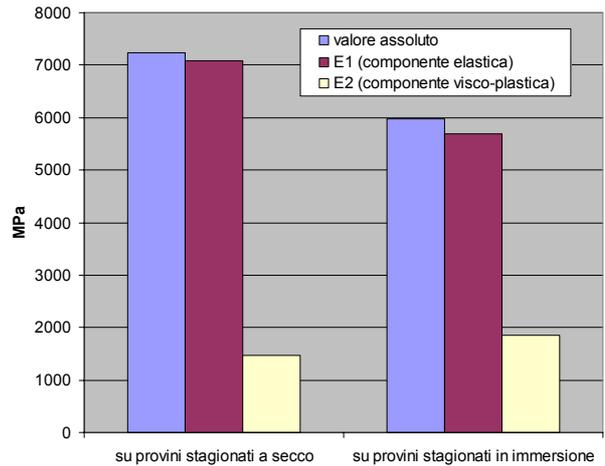
Modulo complesso a 10°C e 5 Hz (MPa)

	<i>valore assoluto</i>	<i>componente elastica</i>	<i>componente visco-plastica</i>	<i>sfasamento (deg)</i>
		<i>E1</i>	<i>E2</i>	
<i>su provini stagionati a secco</i>	7236	7086	1470	11,72
<i>su provini stagionati in immersione</i>	5983	5687	1858	18,09

Resistenza a trazione indiretta (Rt) a 10°C



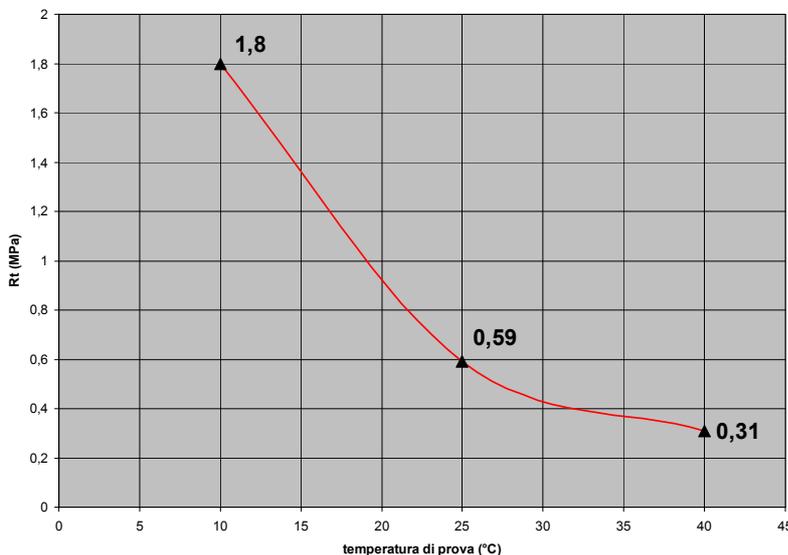
Modulo complesso



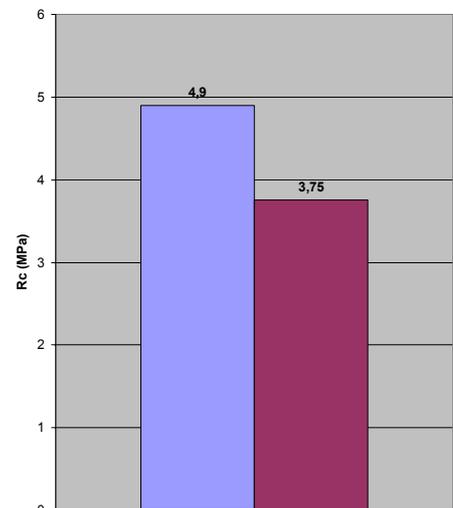
Anche in occasione dell'intervento del 2003 il Laboratorio Mobile VIATEST ha curato campionamenti e confezionamento dei provini, sui quali i test hanno dato esiti in linea con quelli del 2002:

- *Peso specifico apparente dei provini:* 2.152 g/cm³ (2.11÷2.19);
- *Resistenza a trazione indiretta Rt (su provini stagionati a secco):* 1,80 MPa a 10°C; 0,59 MPa a 25°C; 0,31 MPa a 40°C
- *Resistenza a compressione semplice Rc a 20°C:* 4,90 MPa per i provini stagionati a secco, 3,75 MPa per quelli stagionati in immersione
- *Suscettibilità all'acqua della Rc a 20°C* (rapporto tra la Rc su provino immerso e la Rc su provino asciutto): 0,76

Resistenza a trazione indiretta (Rt)



Suscettibilità all'acqua della resistenza a compressione semplice (Rc) a 20°C



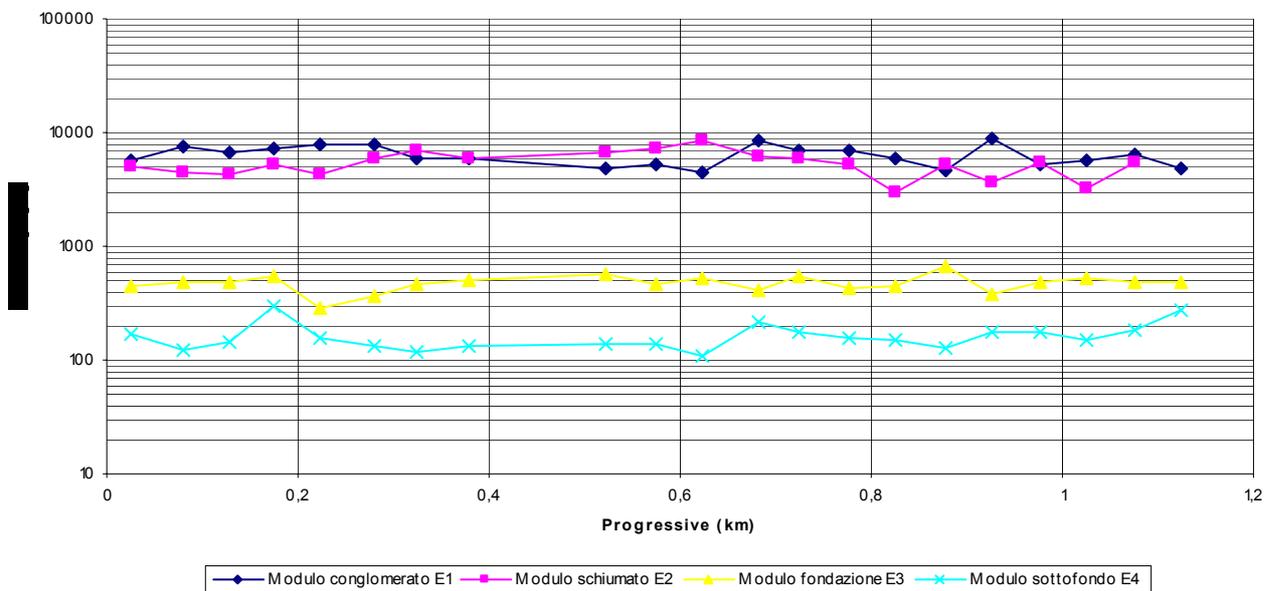
Quale ultima verifica, il Laboratorio Mobile VIATEST ha infine provveduto a effettuare una seconda campagna di prove deflettometriche con HWD sulla pavimentazione finita, che ha consentito di determinare i moduli del nuovo pacchetto legato ottenuto mediante il riciclaggio con bitume schiumato.

Dal confronto tra i grafici seguenti e quelli relativi allo stato pre-intervento appare evidente l'efficacia della soluzione proposta e realizzata.

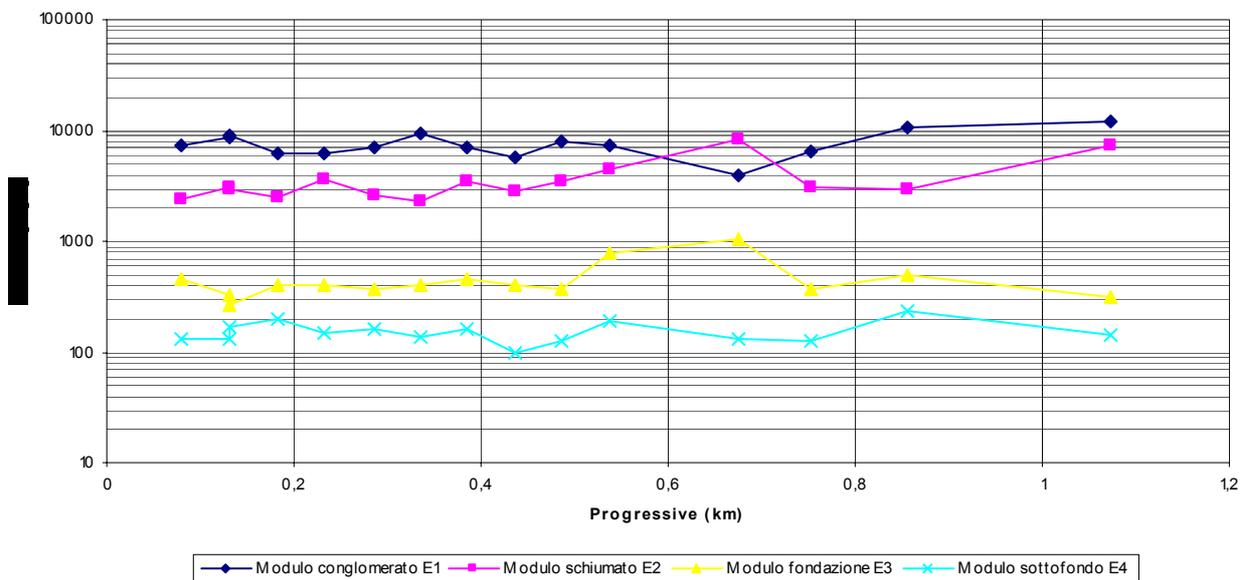
I moduli della miscela riciclata con bitume schiumato sono ovunque superiori al limite dei 2.500 Mpa assunto in sede di dimensionamento del pacchetto, eccezion fatta per due zone localizzate in direzione Modena in cui la riciclatrice aveva manifestato problemi di funzionamento (quale ulteriore conferma dell'affidabilità del HWD, anche come strumento di verifica post-opera). In direzione Sassuolo la migliore qualità dell'aggregato riscontrata già in corso d'opera ha consentito anzi di raggiungere un valor medio di

5.400 Mpa, superiore a quello atteso per un conglomerato a caldo di tipo tradizionale. L'azione dei rulli si è fatta sentire anche sulla fondazione, il cui modulo elastico medio è stato incrementato dai 350 Mpa precedenti a 450 Mpa, con una apprezzabile riduzione della dispersione dei valori; inalterato invece il sottofondo, posto ad una profondità eccessiva per poter risentire dell'azione di compattazione in superficie. Il modulo del conglomerato a caldo (oltre i 7000Mpa) rientra nel campo di quelli attesi dall'impiego di un bitume modificato.

Moduli elastici della pavimentazione riciclata - corsia di marcia lenta direzione Sassuolo



Moduli elastici della pavimentazione riciclata - corsia di marcia lenta direzione Modena



Conclusioni

Il successo del primo intervento (2002), attestato sia dalle buone caratteristiche meccaniche riscontrate sui provini sia dal perfetto stato della pavimentazione dopo più di un anno di esercizio, ha oramai dimostrato la validità della tecnica del bitume schiumato e l'efficienza della tecnologia operativa per la sua posa in opera. Il secondo intervento (2003) è stato quindi l'occasione per un nuovo passo avanti nella tecnologia applicativa e nella progettazione e pianificazione della manutenzione.

Sulla scorta della precedente esperienza, è stata offerta la possibilità di affinare ulteriormente le procedure per l'analisi dello stato di fatto di una sovrastruttura, la diagnosi delle cause del suo degrado e il progetto del suo risanamento. L'HWD si è confermato essere un potente ed affidabile strumento di indagine a servizio del progettista; unitamente al georadar per il rilievo -continuo e non distruttivo - degli spessori, esso consente di analizzare in modo esteso un'intera rete stradale e quindi di pianificarne la manutenzione nel medio-lungo termine, individuando le priorità di intervento in ragione delle risorse disponibili.

Per quanto attiene la tecnologia applicata, le peculiarità della WR 4200 sono la larghezza di lavorazione variabile e la stesa mediante banco. La possibilità di raggiungere una larghezza di lavoro di 4,20 m e di poterla modificare anche in movimento consente il riciclaggio di un'intera corsia in un'unica passata, compreso l'eventuale allargamento in curva; si minimizzano quindi le sovrapposizioni sui giunti longitudinali e si riducono le interferenze col traffico. La presenza di un banco garantisce poi una immediata stesa secondo la sagoma desiderata e una precompattazione omogenea della miscela che rendono più semplice e rapido il lavoro dei rulli, offrendo una superficie finita ben chiusa ed esente dai tipici sgranamenti superficiali conseguenti all'azione del motorgrader, quindi immediatamente transitabile senza necessità di protezione superficiale, anche per periodi prolungati prima della finitura con tappeto d'usura; inoltre, l'eliminazione del motorgrader ha portato una semplificazione delle operazioni e una riduzione della lunghezza del cantiere, con notevoli vantaggi sia in termini di sicurezza sia di qualità delle lavorazioni: tutte le fasi (dosaggio dei leganti, schiumatura, miscelazione, stesa e compattazione) sono ora concentrate in una zona ristretta, quindi più facilmente controllabili dal personale tecnico di cantiere.



Il rullo a ridosso del banco di stesa



Uno dei due tamburi laterali estensibili

Il diverso sistema di miscelazione, con la schiumatura all'interno di un mescolatore orizzontale a doppio albero (twin-shaft) piuttosto che sul tamburo di fresatura, sebbene già collaudato su altre macchine, rappresentava forse una delle maggiori incognite della nuova riciclatrice; le caratteristiche meccaniche delle miscele misurate sia su campioni (resistenze a trazione e a compressione) sia sulla pavimentazione finita (moduli elastici) hanno invece confermato la sua affidabilità.

Naturalmente, la tangenziale di Modena diverrà - assieme a tutti gli altri lavori condotti a termine dalla VIASTRADE - un "campo prova" su cui testare sia il comportamento a medio e lungo termine delle miscele riciclate sia la correttezza o meno dei metodi di analisi e dimensionamento delle pavimentazioni.

Ringraziamenti

Il Comune di Modena, nelle persone dell'ing. Nabil e della geom. Ferrari, per l'interesse e la disponibilità dimostrati nella ricerca di soluzioni alternative e innovative per la manutenzione delle strade.

L'impresa I.C.A.F. sas, nelle persone del dott. Agnini e del geom. Leonelli, per il prezioso supporto logistico garantito in ogni momento per tutta la durata dei lavori.

Allegato A – Resistenze misurate sui provini confezionati in opera (Modena, 2002)

set	provino	modalità di stagionatura	temperatura di prova (°C)	diametro (cm)	altezza (cm)	volume (cm ³)	peso (gr)	peso di volume (gr/cm ³)	carico di rottura (daN)	Rt (daN/cm ²)	Rt (MPa)
A	A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A2	secco	10	11,97	13,44	1512,18	3344,6	2,212	4964,13	19,65	1,926
	A3	secco	10	11,97	13,46	1513,68	3353,2	2,215	4733,10	18,71	1,834
	A4	secco	10	11,97	13,48	1516,43	3357,5	2,214	4820,36	19,02	1,865
	A5	secco	40	11,96	13,51	1518,28	3348,5	2,205	1181,52	4,65	0,456
	A6	secco	40	11,97	13,49	1518,06	3350,4	2,207	1178,39	4,65	0,455
	A7	secco	40	11,96	13,45	1512,05	3347,7	2,214	1272,42	5,03	0,494
	A8	secco	-	11,97	13,48	1516,24	3343,1	2,205	-	-	-
	A9	secco	-	11,98	13,53	1523,78	3355,2	2,202	-	-	-
B	B1	umido	10	11,98	13,50	1520,71	3359,9	2,209	4772,69	18,79	1,842
	B2	secco	10	11,97	13,48	1515,93	3334,2	2,199	4311,42	17,02	1,668
	B3	umido	10	11,97	13,52	1520,93	3354,8	2,206	4427,07	17,42	1,708
	B4	secco	10	11,97	13,52	1521,44	3327,6	2,187	4457,28	17,53	1,719
	B5	umido	10	11,98	13,58	1530,49	3356,9	2,193	4021,28	15,74	1,543
	B6	secco	10	11,96	13,59	1527,02	3329,1	2,180	3979,86	15,59	1,528
	B7	umido	40	11,98	13,55	1526,85	3350,5	2,194	1276,58	5,01	0,491
	B8	secco	40	11,97	13,58	1528,19	3331,4	2,180	1207,04	4,73	0,463
	B9	umido	40	11,97	13,62	1532,95	3363,2	2,194	1162,63	4,54	0,445
	B10	secco	40	11,97	13,57	1527,32	3324,1	2,176	1210,95	4,75	0,465
	B11	umido	40	11,97	13,65	1535,56	3350,9	2,182	1050,51	4,09	0,401
	B12	secco	40	11,96	13,62	1530,65	3327,8	2,174	1274,37	4,98	0,488
	B13	umido	-	11,97	13,67	1537,81	3356,1	2,182	-	-	-
	B14	secco	-	11,97	13,68	1538,96	3332,6	2,165	-	-	-
	B15	secco	-	11,96	13,65	1534,05	3314,8	2,161	-	-	-
	B16	secco	-	11,97	13,52	1522,65	3263,8	2,143	-	-	-
C	C1	secco	10	11,97	13,47	1514,80	3324,6	2,195	4423,94	17,47	1,713
	C2	secco	10	11,97	13,55	1523,54	3326,4	2,183	4041,07	15,87	1,556
	C3	umido	10	11,97	13,55	1525,58	3352,8	2,198	4050,71	15,90	1,558
	C4	secco	40	11,97	13,50	1519,44	3316,2	2,182	860,37	3,39	0,332
	C5	umido	10	11,98	13,56	1529,00	3336,2	2,182	3961,37	15,52	1,522
	C6	secco	40	11,97	13,63	1534,33	3322,5	2,165	914,55	3,57	0,350
	C7	umido	40	11,98	13,64	1536,48	3349,3	2,180	724,03	2,82	0,277
	C8	secco	-	11,97	13,61	1531,31	3328,7	2,174	-	-	-
	C9	secco	-	11,97	13,51	1520,09	3316,4	2,182	-	-	-
	C10	umido	-	11,98	13,67	1541,69	3346,7	2,171	-	-	-
D	D1	umido	10	11,97	13,48	1516,18	3388,0	2,235	4817,23	19,01	1,864
	D2	umido	40	11,98	13,54	1525,73	3394,9	2,225	850,48	3,34	0,327
	D3	umido	-	11,97	13,60	1530,76	3387,0	2,213	-	-	-
	D4	secco	10	11,97	13,52	1521,95	3365,1	2,211	5144,84	20,24	1,984
	D5	secco	10	11,97	13,51	1520,82	3374,0	2,219	4927,66	19,40	1,902
	D6	secco	40	11,97	13,51	1520,82	3371,6	2,217	1012,87	3,99	0,391
	D7	secco	40	11,97	13,53	1522,31	3379,5	2,220	1037,22	4,08	0,400
	D8	secco	-	11,97	13,69	1541,94	3382,9	2,194	-	-	-

set	provino	modalità di stagionatura	temperatura di prova (°C)	diametro (cm)	altezza (cm)	volume (cm ³)	peso (gr)	peso di volume (gr/cm ³)	carico di rottura (daN)	Rt (daN/cm ²)	Rt (MPa)
E	E1	umido	10	11,97	13,80	1553,73	3403,7	2,191	4133,53	15,93	1,561
	E2	secco	10	11,96	13,65	1534,02	3385,8	2,207	4080,14	15,91	1,560
	E3	secco	10	11,97	13,79	1551,56	3393,8	2,187	3979,60	15,35	1,505
	E4	umido	10	11,99	13,66	1542,08	3411,0	2,212	4296,58	16,70	1,637
	E5	secco	10	11,98	13,68	1542,02	3390,8	2,199	4435,14	17,23	1,689
	E6	umido	40	11,99	13,63	1538,18	3407,0	2,215	539,10	2,10	0,206
	E7	secco	40	11,97	13,70	1542,47	3403,5	2,207	562,93	2,18	0,214
	E8	umido	-	11,98	13,70	1545,05	3418,7	2,213	-	-	-
	E9	secco	40	11,96	13,69	1538,77	3390,6	2,203	495,74	1,93	0,189
	E10	secco	40	11,96	13,74	1544,39	3395,1	2,198	519,70	2,01	0,197
	E11	secco	-	11,96	13,81	1551,70	3395,3	2,188	-	-	-
	E12	secco	-	11,97	13,57	1527,38	3352,0	2,195	-	-	-
	E13	secco	-	11,98	13,61	1532,54	3369,8	2,199	-	-	-
F	F1	umido	10	11,96	13,64	1533,15	3389,0	2,210	5462,60	21,31	2,089
	F2	secco	10	11,97	13,48	1516,18	3378,7	2,228	5639,71	22,26	2,182
	F3	umido	10	11,98	13,62	1536,02	3404,8	2,217	4815,67	18,78	1,842
	F4	secco	10	11,97	13,56	1526,71	3377,5	2,212	5459,99	21,41	2,099
	F5	secco	10	11,97	13,61	1531,31	3380,1	2,207	5097,96	19,92	1,953
	F6	umido	40	11,97	13,61	1531,31	3400,3	2,221	582,99	2,28	0,223
	F7	secco	40	11,97	13,75	1547,06	3384,7	2,188	690,04	2,67	0,262
	F8	secco	40	11,96	13,42	1508,42	3367,1	2,232	681,83	2,70	0,265
	F9	secco	40	11,96	13,45	1512,05	3339,1	2,208	1060,27	4,19	0,411
	F10	secco	-	11,97	13,40	1506,37	3339,9	2,217	-	-	-
	F11	secco	-	11,97	13,52	1520,17	3351,7	2,205	-	-	-
	F12	umido	-	11,97	13,51	1518,74	3371,2	2,220	-	-	-
G	G1	secco	10	11,97	13,18	1483,67	3384,4	2,281	5892,87	23,78	2,331
	G2	umido	10	11,97	13,23	1488,81	3405,3	2,287	5617,83	22,58	2,214
	G3	secco	10	11,98	13,28	1495,68	3390,6	2,267	5989,76	23,98	2,351
	G4	umido	10	11,98	13,32	1501,44	3413,7	2,274	5494,37	21,92	2,149
	G5	umido	40	11,97	13,27	1494,06	3411,0	2,283	1024,46	4,10	0,402
	G6	secco	10	11,98	13,30	1498,18	3396,0	2,267	5258,40	21,02	2,060
	G7	secco	40	11,98	13,20	1486,67	3379,1	2,273	965,47	3,89	0,381
	G8	secco	40	11,98	13,27	1494,80	3382,7	2,263	988,65	3,96	0,388
	G9	umido	-	11,98	13,34	1503,83	3413,5	2,270	-	-	-
	G10	secco	40	11,98	13,34	1503,69	3397,0	2,259	1059,23	4,22	0,414
	G11	secco	-	11,98	13,33	1502,00	3379,4	2,250	-	-	-
	G12	secco	-	11,98	13,33	1503,46	3384,3	2,251	-	-	-

Allegato B – Resistenze misurate sui provini confezionati in opera (Modena, 2003)

provino	peso di volume (gr/cm³)	modalità di stagionatura	temperatura di prova (°C)	Rt (MPa)	Rc (MPa)
A1	2,11	secco	10	1,78	-
A2	2,19	secco	10	1,82	-
A3	2,14	secco	25	0,61	-
A4	2,16	secco	25	0,57	-
A5	2,14	secco	40	0,34	-
A6	2,18	secco	40	0,28	-
B1	2,16	secco	20	-	5,03
B2	2,15	secco	20	-	4,78
B3	2,12	umido	20	-	3,61
B4	2,17	umido	20	-	3,89