

La validazione di un conglomerato bituminoso fibrorinforzato

The validation of a fiber-reinforced bituminous mixture

Riassunto

Questo articolo descrive un lavoro eseguito negli USA e riguarda la valutazione delle prestazioni di un CB modificato con polimeri (CBPM) e il medesimo ma rinforzato con fibre aramidiche e poliolefine Forta FI – di seguito denominato CBPM-F – in relazione ai cicli di gelo e disgelo, alla fessurazione termica e all'ormaiamento. L'obiettivo dello studio è stato valutare la corrispondenza delle previsioni prestazionali desunte dai test di laboratorio, con il monitoraggio condotto in cantiere nei due anni successivi al getto. Questa particolare miscela di fibre è stata aggiunta al conglomerato bituminoso modificato con polimeri in quanto ne migliora le proprietà meccaniche, aumentando la duttilità, la resistenza alla deformazione termica e la resistenza alle sollecitazioni top-down e bottom-up.

This article describes a study carried out in the USA evaluating the performance of a standard polymer modified asphalt (CBPM) and the same asphalt reinforced with Forta FI aramid and polyolefin fibers – hereinafter referred to as CBPM-F – with respect to freeze-thaw cycles, thermal cracking, and rutting. The objective of this study was to evaluate the predictions performance from laboratory tests with on-site monitoring carried out for two years following pouring.

This particular fiber blend was added to the polymer-modified asphalt because it improves its mechanical properties, increasing ductility, resistance to thermal deformation, and resistance to top-down and bottom-up stresses.

Summary

(photo credit: Galon da Pexels)

Lo studio di un CB con miscela di fibre aramidiche e poliolefiniche

1. Introduzione

Il lavoro qui presentato conferma un nuovo approccio metodologico per la valutazione delle prestazioni di nuovi materiali inseriti nei CB, quello cioè di confrontare i risultati prestazionali dei test di laboratorio con il comportamento in cantiere attraverso un monitoraggio nel breve periodo delle prestazioni, con particolare riferimento alle fessurazioni termiche, ai cicli di gelo e disgelo e all'ormaiamento. Infine un importante elemento da considerare per valutare l'efficacia di nuovi prodotti o tecnologie, sono le plurienali esperienze di cantiere con differenti mix design, in diversi contesti termoigrometrici e ambientali, certificate da Enti Terzi.

L'intervento è stato eseguito a Flagstaff (Arizona settentrionale), località scelta per le sue avverse condizioni meteorologiche, con nevicate annuali che ammontano mediamente a 270 cm e temperature invernali ad alta quota (2.170 m) estremamente rigide, considerato che la temperatura minima giornaliera è spesso inferiore allo zero.



Fig. 1. Un CB contenente le fibre aramidiche e poliolefiniche

Fibre	Poliammidica aromatica	Poliolefiniche
Densità	1,44 kg/m ³	0,910 kg/ m ³
Densità Lineare	3,250 dTex	-
Resistenza a trazione	2.758 MPa	-
Modulo di Young	81 GPa	-
Temperatura di esercizio	-40 °C: +427 °C	-
Lunghezza	19 mm	19 mm
Forma	Monofilamento	Fibrillate
Resistenza agli alcali/basi	Totale	Totale

Tab. 1. Le proprietà fisiche delle fibre

A distanza di due anni, sono state valutate le prestazioni del CBPM-F con le fibre in confronto al CBPM senza fibre, attraverso test eseguiti presso il laboratorio materiali dell'Arizona State University (ASU) e osservazioni sul campo. Dalle prove di laboratorio si è evinto che tale conglomerato dia prestazioni migliori del CBPM senza fibre. Inoltre, il monitoraggio biennale eseguito sul campo dall'ASU ha dimostrato una corrispondenza prestazionale tra i test di laboratorio (crepe per stress termici) e le verifiche in cantiere in cui viene valutato il danneggiamento cumulativo per fessurazione che per il CB con le fibre è di 3,3 m mentre per quello senza fibre è di 37,8 m.

Bitume modificato con polimeri	PG 64-28 TR
Dosaggio bitume %	6,9
Bulk specific gravity, Gmb	2,405
Theoretical max. specific gravity, Gmm	2,5
Percent air void, %	Specification range 3,0-5,0
Voids in mineral aggregate filled (VMA), %	19,3
Percent voids filled (VFA), %	77,8

Tab. 2. Il mix design

2. Il mix design del conglomerato bituminoso

È stato utilizzato un CB tipo SMA con Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS) of ½" (12,5 mm) modificato con polimero (CBPM) considerato come riferimento e un CB sempre modificato con lo stesso polimero ma contenente le fibre aramidiche e poliolefiniche (CBPM-F).

Il dosaggio di bitume è 6,9% per entrambi i mix e i vuoti sono rispettivamente 3,8 per il riferimento (mix senza fibre) e 3,5 per il mix con le fibre.

Con riferimento alla **Tabella 2**, G_{mb} (Bulk Specific Gravity) rappresenta il peso di un campione di miscela bituminosa compattata rispetto al peso di un volume uguale di acqua a una temperatura prestabilita, G_{mm} (Maximum Theoretical Specific Gravity) è il Peso Specifico Massimo Teorico della miscela bituminosa, il VMA (Voids in Mineral Aggregate) raffigura il volume intergranulare compreso tra le particelle di aggregato in un conglomerato bituminoso (asfalto) compattato – il cui spazio è occupato dall'aria e dal bitume efficace (non assorbito dall'aggregato) –, mentre il VFA (Percent voids filled) rappresenta la percentuale dello spazio vuoto tra le particelle dell'aggregato minerale che è occupata dal legante bituminoso efficace.

3. La preparazione dei materiali

Il lavoro, eseguito in collaborazione con la città di Flagstaff, ha previsto che le due miscele CBPM e CBPM-F fossero posizionate su una corsia di marcia. I campioni di CB sono stati raccolti al momento della posa sul re-

tro di una finitrice per entrambe le corsie, il cui piano di raccolta dei campioni è illustrato in **Figura 2**.

Tutti i campioni raccolti sono stati successivamente spediti al Laboratorio Materiali della Northern Arizona University (NAU). Altri provini sono stati preparati e spediti al Laboratorio Materiali dell'Arizona State University per i test di modulo dinamico.

4. Test di laboratorio e discussione dei risultati

4.1 Il cracking termico

In questo studio è stato utilizzato il reometro BBR (Bending Beam Rheometer) dispositivo utilizzato per misurare la rigidità, lo scorrimento (creep) e la pendenza della curva di rilassamento (m-value) dei leganti bituminosi a basse temperature, determinandone la resistenza alle fessurazioni termiche.

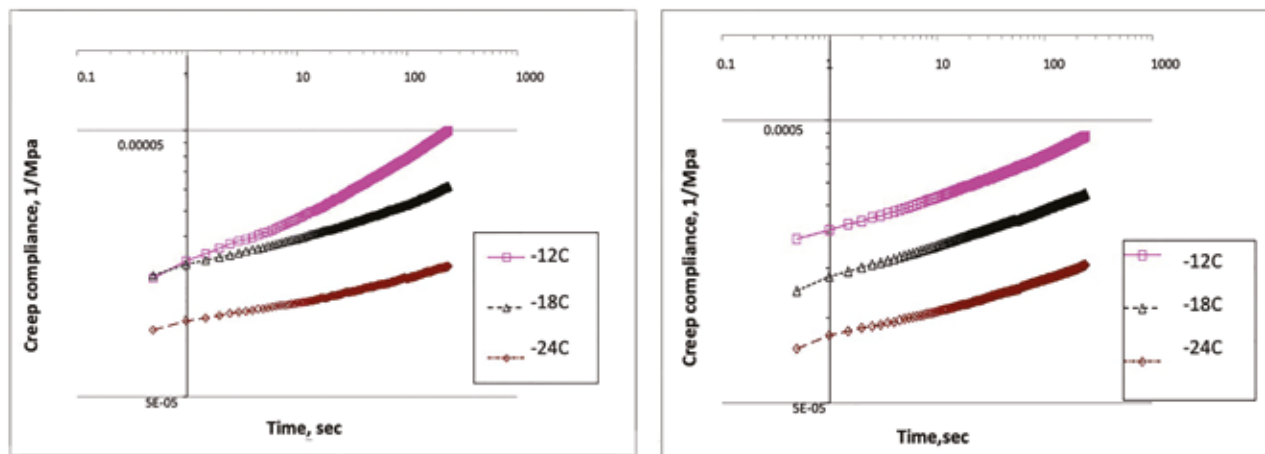
La prova prevede l'applicazione di un carico costante (solitamente 0,98N) al centro di un provino bituminoso immerso in un bagno refrigerato.

I campioni di CBPM (miscela di controllo) e CBPM-F sono stati testati secondo lo standard AASHTO T313/TP125 (26) misurando, a tre temperature diverse (-12, -18, -24 C°), le deformazioni viscoelastiche dei travetti di CBPM e CBPM-F (**Figure 3A e 3B**).

La creep compliance (J) (cedevolezza allo scorrimento) è la deformazione divisa per la sollecitazione come misura della deformazione flessionale continua istantanea di un materiale sotto carico statico nel tempo, che si traduce in $J(t) = \gamma(t)/\sigma$.



Fig. 2. La localizzazione dei prelievi in cui le zone gialle si riferiscono ai prelievi eseguiti per il CBPM-F, mentre quelle tratteggiate in blu ai prelievi per il CBPM



Figg. 3A e 3B. La cedevolezza (creep compliance) allo scorrimento di CBPM (3A) e CBPM-F (3B)

Questa proprietà è cruciale per valutare la resistenza a lungo termine e la suscettibilità alla deformazione permanente.

È noto che la resistenza alla fessurazione termica delle miscele di asfalto può essere prevista dal loro modulo di rilassamento utilizzando la teoria della viscoelasticità, come mostrato nell'equazione.

$$E(t) = \frac{1}{D_0 + D_1 \Gamma(n+1)(1.786t)^n} \quad (1)$$

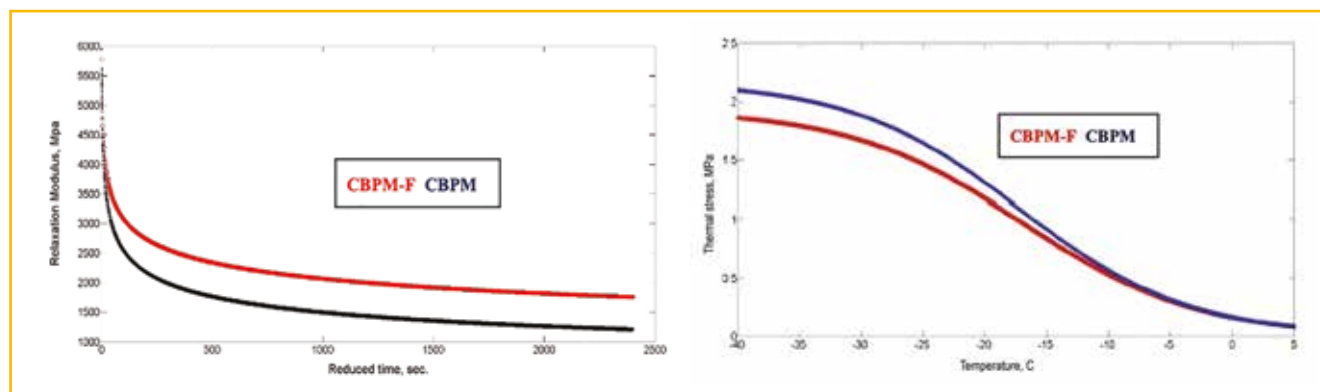
La variazione del modulo di rilassamento è stato documentato da diversi studi [1, 2, 3 e 4] e pertanto non ne riportiamo il calcolo.

Il modulo di rilassamento (relaxation modulus), indicato solitamente con $E(t)$ per la trazione, è una proprietà fondamentale dei materiali viscoelastici che descrive come lo sforzo (stress) diminuisce nel tempo quando il materiale viene mantenuto a una deformazione costante. I valori del modulo di rilas-

samento sono funzione del tempo e diminuiscono man mano che il materiale si rilassa.

Dopo una serie di analisi di modellazione viscoelastica, nelle **Figure 4A e 4B** sono riportati il modulo di rilassamento e la previsione dello stress termico di ciascuna miscela.

A basse temperature, l'assorbimento e il rilascio dell'energia dovuta al calore, dipendono dalle proprietà del legante bituminoso. Come si può vedere nella **Figura 4A**, il CBPM-F presenta valori di modulo di rilassamento maggiori rispetto al CBPM (miscela di controllo), il che significa che, quando le temperature scendono, il CBPM-F ha prestazioni migliori in relazione alle sollecitazioni indotte dal calore nelle pavimentazioni. Anche dalla **Figura 4B** (previsione di stress termico) si evince che il CBPM-F potrebbe subire una sollecitazione termica inferiore rispetto al CBPM. Il fenomeno osservato nelle figure può essere attribuito alle fibre poliolefiniche precedentemente fuse e deformate plasticamente nel CBPM-F,



Figg. 4A e 4B. Il modulo di rilassamento (4A) e la previsione di stress termici (4B) per entrambe le miscele

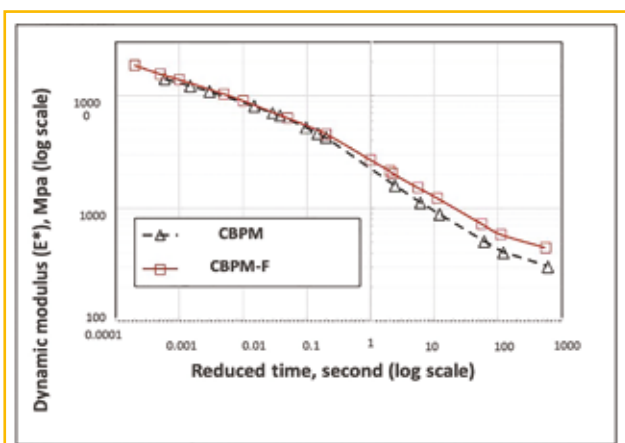


Fig. 5. Le due curve master

che generando una viscosità ritardata, migliorano le prestazioni a bassa temperatura. Sulla base di questa previsione è pertanto possibile che nei mesi invernali le fessurazioni termiche potrebbero essere osservate per la prima volta sulla pavimentazione di controllo (CBPM). Tuttavia, come verrà discusso più avanti nell'articolo, questa previsione necessita di una verifica sul campo.

5. Determinazione del Modulo Dinamico (E^*) e discussione dei risultati

È stato determinato il modulo dinamico (E^*) secondo la Linea Guida AASHTO (5) testando i campioni con un carico sinusoidale continuo a tre temperature e sei frequenze di carico. Le misure sono state eseguite in collaborazione con la ASU sulla miscela di controllo e sul CB con fibre, testati a 4 °C, 21 °C e 38 °C e sottoposti a frequenze di carico di 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz. Infine per indicare correttamente la curva del modulo dinamico per ciascun gruppo di miscela, è stato utilizzato il principio di sovrapposizione tempo-temperatura (frequenza) per costruire una curva master utilizzando 21 °C come temperatura di riferimento.

La **Figura 5** mostra il confronto tra le due curve master (CBPM e CBPM-F): si evince che il CBPM-F presenta un valore di modulo dinamico più elevato rispetto al CBPM dovuto alla differente risposta meccanica di entrambe le miscele all'aumentare della temperatura. Infatti, i leganti bituminosi diventano più morbidi alle alte temperature; pertanto, gli aggregati dominano il comportamento elastico delle

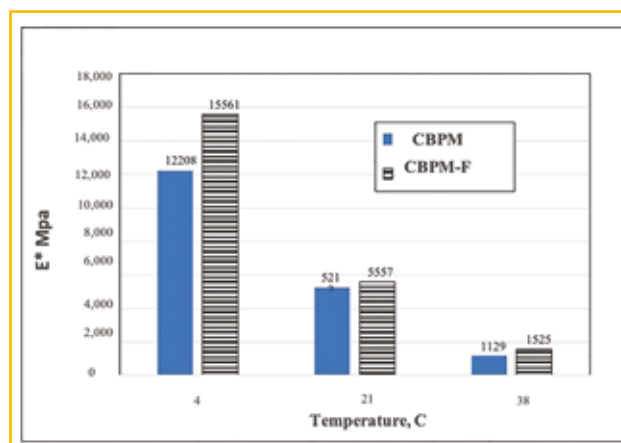


Fig. 6. Il modulo dinamico a 10 Hz

miscele bituminose e l'effetto di rinforzo delle fibre migliora i valori del modulo e consente di resistere alla deformazione (ormaiamento) a temperature più elevate [5]. Per confrontare la resistenza all'ormaiamento, nella **Figura 6** sono stati mostrati i valori del modulo dinamico testati a 10 Hz a tre diverse temperature. Come si può vedere il CBPM-F presenta valori di modulo dinamico maggiori rispetto al CBPM. Tutto quanto discusso fino ad ora, comportamento alla fessurazione termica, i valori di modulo dinamico ecc. si riferiscono a prove di laboratorio che attestano un comportamento prestazionale del CBPM-F migliore del CBPM preso come riferimento. Vediamo ora se queste conclusioni sono confermate dalle osservazioni sul campo e dalle valutazioni delle condizioni in situ.

6. Osservazioni in cantiere e valutazione delle condizioni in situ

Per valutare l'efficacia di nuove tecnologie, oltre ai test di laboratorio, vanno eseguite osservazioni sul campo e valutazioni delle condizioni in situ per avere una visione olistica dell'efficacia delle progettazioni di pavimentazioni stradali con nuovi materiali, offrendo soprattutto l'opportunità di raccogliere informazioni sulle prestazioni del conglomerato per lo sviluppo di future attività di manutenzione e miglioramento. Dopo il completamento del progetto di pavimentazione, il 3 Giugno 2013 sono state programmate per due anni, diverse osservazioni sul campo, eseguendo valutazioni delle condizioni su entrambi i lati delle pavimentazioni.

In particolare sono state valutate e misurate lunghezza e larghezza di ciascuna fessura per un dato periodo di tempo e identificata la relativa modalità di fessurazione. Inoltre prima della stesa, è stato eseguito un rilievo delle condizioni della superficie fresata per confrontare le eventuali crepe identificate durante le osservazioni nel tempo, al fine di evitare qualsiasi interpretazione errata della modalità di fessurazione.

La prima visita in cantiere è stata programmata per il 15 Novembre 2013, dopo la prima neve d'inizio inverno. Su entrambe le pavimentazioni non sono state osservate crepe.

La seconda visita è stata programmata per il 25 Febbraio 2014, dopo che le pavimentazioni avevano subito diversi cicli di gelo-disgelo e temperature rigide. Tuttavia, durante l'osservazione sul campo non sono state rilevate crepe.

All'inizio della primavera del 2014, una tempesta invernale ha colpito la città. Una visita di controllo è stata programmata per l'11 Marzo 2014. Sono state chiaramente osservate in due punti della corsia in CBPM (miscela di controllo) due crepe, contrassegnate come ID 51 e ID 52. È stata misurata la lunghezza iniziale pari a 1,16 m (ID 51) e 1,71 m (ID 52), per una larghezza iniziale di 3 mm, rilevata per entrambe le crepe. Le crepe sono state identificate come crepe termiche poiché si manifestavano perpendicolarmente alla direzione del traffico. Un mese dopo l'osservazione delle crepe termiche, è stata programmata una visita sul campo per il 15 Aprile 2014 per tracciare e monitorare l'avanzamento e la propagazione delle crepe termiche. Durante la visita è stata notata un'altra crepa, indicata come ID 51-1 in quanto si trova tra ID 51 e ID 52. La **Figura 7** mostra una configurazione ravvicinata di queste tre crepe (ID 51, ID 51-1 e ID 52).

Il 3 Giugno 2014 è stata effettuata una nuova visita sul campo. Non sono state osservate ulteriori crepe. È stato tuttavia notato che tutte e tre le crepe esistenti progredivano verso il centro della strada, ma si fermavano alla fine della corsia CBPM. Sul lato di CBPM-F, dopo un anno, non è stata rilevata

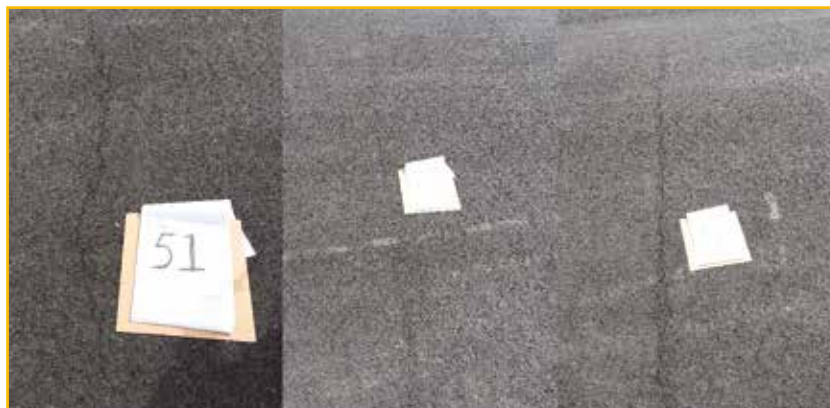


Fig. 7. Descrizione delle tre crepe termiche durante la visita del 15 Aprile 2014

alcuna crepa e non sono state riscontrate né solchi né deterioramenti strutturali (ad esempio, dovuti a fenomeni di fatica).

Per il secondo anno sono state programmate quattro visite sul campo, verificando che oltre alle tre crepe termiche esistenti, sono state rilevate altre tredici crepe, tra cui crepe termiche e fessurazioni a blocchi, sulla corsia CBPM (miscela di controllo). Sono state osservate per la prima volta tre crepe nell'ambito della corsia CBPM-F e sono state contrassegnate come ID 2 (lunghezza 1,37 m, larghezza 5 mm), ID 3 (lunghezza 2,13 m, larghezza 5 mm) e ID 4 (lunghezza 2,13 m, larghezza 2 mm). Per entrambe le corsie nei due anni non sono state riscontrate ormaie.

Tutte le osservazioni sul campo delle visite biennali sono state registrate, contrassegnate e riportate nelle **Tabella 3A e 3B**, dove si può osservare che la maggior parte delle crepe è stata identificata come fessurazione termica.

Al 31 Giugno 2015, risultano effettuate dieci visite in campo per valutare le prestazioni di CBPM-F in confronto a CBPM. Complessivamente sono state identificate 19 crepe sulla pavimentazione CBPM, mentre solo tre crepe sono state osservate sulla pavimentazione CBPM-F. Inoltre durante le visite, sono state riscontrate alcune crepe registrate nei mesi precedenti, ma poi scomparse. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che la pavimentazione fessurata si trovava al di sotto del range di elasticità, quindi con l'aumento della temperatura, le crepe si sono rimarginate.

La **Figura 8** illustra ulteriormente l'andamento e la propagazione della lunghezza cumulativa delle crepe e la sua relazione con il numero di crepe mensili sia per CBPM che per CBPM-F.

Apparentemente, sia il numero che l'avanzamento delle crepe aumentano significativamente dopo il 17° mese (Dicembre 2014). Questo comportamento fornisce informazioni dell'effetto climatico sulle prestazioni delle miscele CBPM e CBPM-F.

Come accennato in precedenza, Flagstaff si trova a 2130 metri di altitudine ed è soggetta a circa 200

cicli annuali di gelo-disgelo che hanno causato gravi danni alle pavimentazioni locali. Secondo i dati meteorologici, Flagstaff ha subito 364 cicli di gelo-disgelo durante gli anni 2014-2015. L'effetto di gelo e disgelo del primo anno ha generato una certa quantità di crepe sulla pavimentazione CBPM. Tuttavia, dopo i cicli di gelo e disgelo del secondo anno, entrambi le corsie

Lunghezza/ampiezza delle fessure per per ogni visita											
Prelievo	Miscela	Data	Tipo di fessurazione	11/03/2014		15/04/2014		03/06/2014		13/11/2014	
				Lunghezza (m)	Ampiezza (mm)	Lunghezza (m)	Ampiezza (mm)	Lunghezza (m)	Ampiezza (mm)	Lunghezza (m)	Ampiezza (mm)
51	CBPM	11/03/14	Termica	1,1	3	1,34	3,5	1,34	5	1,64	7
51-1	CBPM	15/04/14	Termica			3,08	4	3,08	4		
51-2	CBPM	13/11/14	Termica							0,64	2
52	CBPM	11/03/14	Termica	1,7	3	2,26	2	3,05	5	2,44	7
Somma delle fessure di CBPM				2,8	6	6,68	9,5	7,47	14	4,72	16

Lunghezza/ampiezza delle fessure per per ogni visita									
Prelievo	Miscela	Data	Tipo di fessurazione	29/01/2015		05/03/2015		03/06/2015	
				Lunghezza (m)	Ampiezza (mm)	Lunghezza (m)	Ampiezza (mm)	Lunghezza (m)	Ampiezza (mm)
51	CBPM	11/03/14	Termica	2,26	6	2,2	12	1,92	12
51-1	CBPM	15/04/14	Termica	3,2	2	3,1	10	3,26	10
51-2	CBPM	13/11/14	Termica	2,81	2	2,7	10	3,1	10
51-3	CBPM	05/03/15	Termica			3,2	15	3,45	15
52	CBPM	11/03/14	Termica	3,2	5	2,95	10	1,8	6
52-1	CBPM	29/01/15	Termica	0,5	1	0,5	3	0,7	3
52-2	CBPM	29/01/15	Termica	0,67	1	0,65	3	0,7	4
52-3	CBPM	29/01/15	Termica	0,55	1	0,55	2	0,7	2
55	CBPM	29/01/15	Termica	1,75	1	1,8	8	1,61	8
55-1	CBPM	05/03/15	Termica			1,5	1	1,95	1
56	CBPM	29/01/15	in blocco	4,58	1	6	7	3,72	5
56-1	CBPM	05/03/15	Termica			1	1	1,47	1
57	CBPM	05/03/15	Termica	2,5	2	2,5	8	1,47	6
58	CBPM	29/01/15	Termica			0,71	1	1,92	4
1	CBPM	15/04/14	Longitudinale	3,67	10	6,8	10	5,73	10
1-1	CBPM	29/01/15	Trasversale	1,22	6	1,22	6	1	6
1-2	CBPM	29/01/15	Trasversale	1,22	10	1,22	10	1,2	10
1-3	CBPM	29/01/15	Trasversale	2	10	2	10	1,85	10
Somma delle fessure di CBPM				30,13	58	38,8	127	37,55	123
2	CBPM-F	29/01/15	Termica	1,4	5	1,5	7	1,43	10
3	CBPM-F	29/01/15	Termica	2,1	5	2,4	7	1,25	5
4	CBPM-F	29/01/15	Termica	2,1	2	1,8	5	0,86	1
Somma delle fessure di CBPM-F				5,6	12	5,7	19	3,54	16

Tabb. 3A e 3B. I dati delle osservazioni sul campo. Si consideri che non sono state osservate le crepe durante le due visite del Novembre 2013 e del Febbraio 2014

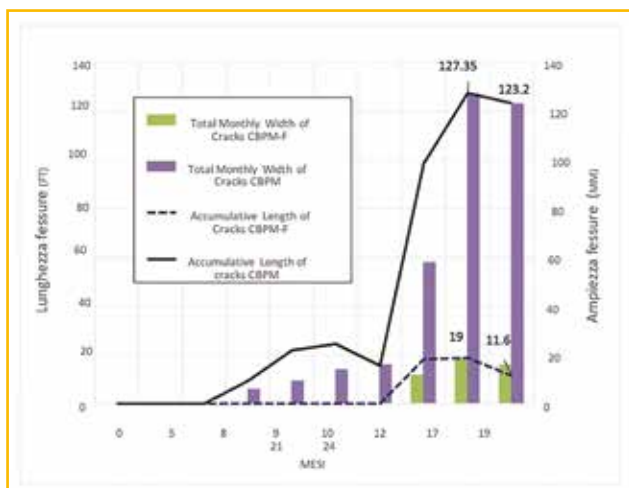


Fig. 8. La propagazione delle fessure in funzione del tempo dopo due anni dal getto

delle pavimentazioni (CBPM e CBPM-F) hanno presentato diverse crepe, in particolare con un aumento significativo sulla corsia CBPM. Tuttavia, la quantità di crepe sulla corsia CBPM-F è stata considerata meno significativa, il che indica che CBPM-F rappresenta una buona soluzione progettuale per resistere all'impatto dei cicli di gelo-disgelo. Alla fine di Giugno 2015, la lunghezza cumulativa delle crepe sulla corsia CBPM era di 38,1 m, mentre il lato CBPM-F presentava una lunghezza cumulativa di crepe di 3,5 m. In conclusione, sulla base dei test di laboratorio e osservazioni/valutazioni sul campo, il conglomerato bituminoso rinforzato con fibre (CBPM-F) ha dimostrato la sua capacità di resistere alla fessurazione termica, ai cicli di gelo-disgelo e alla deformazione da ormaio.

7. Conclusioni

Questo articolo descrive il comportamento del conglomerato bituminoso modificato con polimeri e rinforzato con fibre aramidiche e poliolefiniche (CBPM-F) in confronto a quello del conglomerato bituminoso modificato con polimeri (CBPM). In collaborazione con la città di Flagstaff e l'Università dell'Arizona, il 3 Giugno

2013 è stato avviato un progetto di pavimentazione in asfalto e una serie di prove sui materiali.

Dai test di laboratorio e dalle osservazioni sul campo, si traggono le seguenti conclusioni:

- sulla base dei risultati dei test di cracking termico, le miscele di asfalto modificato con polimeri e rinforzato con le fibre, presentano valori di modulo di rilassamento maggiori rispetto alle miscele di controllo (CBPM) a basse temperature. Ciò è favorito dalle fibre poliolefiniche precedentemente fuse e deformate plasticamente, che contribuiscono alla viscosità ritardante, migliorando così le prestazioni di cracking termico delle miscele di asfalto;
- sulla base dei risultati dei test di modulo dinamico, le miscele di asfalto modificato con polimeri e rinforzato con fibre presentano valori di modulo dinamico maggiori rispetto alle miscele di controllo ad alte temperature. Ciò è favorito dall'effetto di rinforzo delle fibre aramidiche, che migliorano i valori del modulo dinamico e la resistenza alla deformazione (ormai);
- negli ultimi due anni sono state programmate nove visite sul campo per effettuare valutazioni delle condizioni sia per CBPM-F che per CBPM. Nel biennio 2014-2015, l'Arizona settentrionale ha subito 368 cicli di gelo-disgelo. Al 31 Giugno 2015, la lunghezza cumulativa delle crepe sulla corsia CBPM era di 37,2 m, mentre sulla corsia CBPM-F si registrava una lunghezza cumulativa di crepe di 3,5 m. Ciò indica che il CBPM-F sembra essere una buona soluzione progettuale per resistere alle diverse condizioni termoigrometriche con particolare riferimento agli stress, con particolare riferimento ai cicli di gelo e disgelo. Le revisioni biennali e le visite sul campo hanno confermato inoltre la previsione e convalidano le analisi viscoelastiche e dinamiche sia per CBPM che per CBPM-F.



⁽¹⁾ CEO & Technical Manager di Mahac Srl

BIBLIOGRAFIA

- [1]. W.N. Findley, J.S. Lai, K. Onaran – "Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials", Dover Publications Inc., New York, 1989.
- [2]. R.M. Christensen – "Theory of viscoelasticity", 2nd edition, Dover Publications Inc., New York, 2003.
- [3]. G.R. Chehab, Y.R. Kim – "Interrelationships among asphalt concrete stiffness", Kim Y.R. Eds, Modeling of Asphalt Concrete, McGraw-Hill Construction, pp.139-159, 2008.
- [4]. Y.R. Kim, D.N. Little – "Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 16, No. 2, pp.122-132, 2004.
- [5]. K.E. Kaloush, K.P. Bilgiri, W.A. Zeiada, M.C. Rodezno, J.X. Reed – "Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests", Journal of Testing and Evaluation, vol. 38, No. 4, pp. 1-12, 2010.