

Caratterizzazione prestazionale di miscele trattate con bitume schiumato e cemento

Performance characteristics of mixtures containing foamed bitumen and concrete

STEFANO TATTOLO
STS Mobile Srl

Riassunto

La memoria presenta una sperimentazione condotta dal Servizio Tecnologico Sperimentale della STS Mobile presso il laboratorio di Ancona. Il progetto sperimentale è volto alla migliore comprensione dei principi e dei parametri di espansione di un bitume, partendo dalla caratterizzazione dei leganti utilizzati nei processi di schiumatura, per passare alla verifica delle caratteristiche prestazionali delle miscele trattate con bitume schiumato e allo studio della loro suscettibilità termica.

Summary

The paper presents an overview of an experimental study carried out by the Servizio Tecnologico Sperimentale of STS Mobile in its Ancona laboratory. The purpose of this experimental project is to provide a better comprehension of the bitumen expansion principles and standards, starting from the characterization of the binders used in foamed processes, going through the check of the performance behaviour of the mixtures containing foamed bitumen, up to their heat susceptibility behaviour.

Premessa

Parlare di miscele trattate con bitume schiumato e cemento significa far riferimento ad una famiglia di materiali con caratteristiche compositive e prestazionali che comprendono, come estremi, il misto granulare cementato e il conglomerato bituminoso, materiali rigidi i primi, visco-elasto-plastici e duttili i secondi.

La scelta delle prestazioni offerte può essere controllata mediante variabili compositive degli inerti, ovvero percentuale di fresato da conglomerato bituminoso (fresato bitumato) e percentuale di inerte non bitumato (inerte di cava), nonché con il dosaggio di cemento e bitume di aggiunta.

Tale versatilità richiede di eseguire un'attenta e mirata progettazione tecnologica dei materiali, potendo eseguire, con la stessa tecnica, interventi di stabilizzazione degli strati di fondazione, con *materiali rigidi a*

resistenza a fatica migliorata, e rigenerazione di conglomerato bituminoso per strati più superficiali, con *materiali duttili* a rigidità migliorata.

Lo scopo della sperimentazione è stato quello di quantificare tali prestazioni per poterne valutare le migliori condizioni di utilizzo e una corretta applicazione.

1. La schiumatura del bitume e la miscelazione con gli inerti

Si ritiene di introdurre la presente memoria con un breve cenno ai processi di schiumatura e di miscelazione degli inerti con il bitume nella sua fase transitoria schiumosa.

La tecnica del bitume schiumato si basa sul principio della transizione di energia sotto forma di calore dal bitume all'acqua. Per effetto di processi fisici legati alla

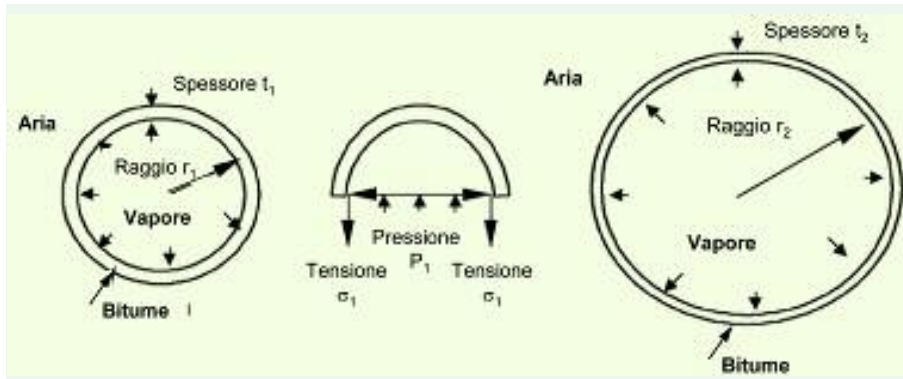


Fig. 1 Grandezze fisiche prese in considerazione (Jenkins et al., 1999)

natura e allo stato del bitume e dell'acqua, il legante a temperature elevate (160 - 190°C) si trasforma in una sostanza schiumosa quando viene miscelato, in apposita camera di espansione, con un idoneo quantitativo di acqua (generalmente dal 1% al 4% in massa). E' possibile studiare il caso isolato di una singola bolla, al fine di una migliore comprensione del comportamento dell'interno sistema colloidale (Fig. 1).

A causa dello scambio termico acqua-bitume, la particella di acqua contenuta nella bolla di bitume aumenta il proprio volume in seguito al processo di evaporazione, esercitando una pressione (indicata in Fig. 1 come Vapore), uniformemente distribuita sulla superficie, superiore alla somma della pressione atmosferica e della coesione interna del legante (indicata in Fig. 1 come Aria). Di conseguenza la singola bolla varia il suo volume espandendo, ovvero incrementando il proprio raggio fino a quando, aumentando la superficie di applicazione della forza di espansione, la pressione applicata risulta essere uguale alla somma della pressione atmosferica e della coesione interna del bitume, situazione in cui dopo un'istantanea ed ideale fase di equilibrio avviene il collasso della bolla.

Con lo scopo di stabilire in maniera globale ed esaustiva la capacità di una schiuma di bitume a

miscelarsi con gli aggregati, K. Jenkins ha introdotto per la prima volta un nuovo parametro, l'Indice di schiuma o *Foam Index (FI)*. L'Indice di schiuma mette in relazione ER_{max} (Rapporto di espansione massimo) con $\tau_{1/2}$ (Tempo di dimezzamento) ed è definito come l'area sottesa dalla curva espansione-tempo (Curva di decadimento) (Fig. 2). Lo stesso K. Jenkins utilizza un valore limite del rapporto di espansione (ER_{min}) pari a 4, adottato come minimo valore per il

calcolo dell'area sottesa dalla Curva di decadimento.

FI (Jenkins et al., 1999) è definito dalla seguente espressione matematica (1), tenendo in considerazione sia l'area sottesa dalla curva di decadimento da E_{max} a E_{min} , nell'intervallo di tempo $t = 0 \div t_{min}$ (nota in letteratura come area A_1 di Fig. 2), sia il contributo ottenuto durante il tempo di spruzzaggio $t = -t_s \div 0$ (noto in letteratura come area A_2 , Fig. 2).

$$(1) FI = \frac{-\tau_{1/2}}{\ln 2} \cdot \left(4 - ER_{max} - 4 \cdot \ln \left(\frac{4}{ER_{max}} \right) \right) + \left(\frac{1+c}{2 \cdot c} \right) \cdot ER_{max} \cdot t_s$$

Da notare che in tale formula il parametro c rappresenta il rapporto tra ER_{max} sperimentale e il valore del rapporto di espansione trovato dalla regressione dell'evoluzione dello stesso fino al tempo $t = -t_s$ (ER_a).

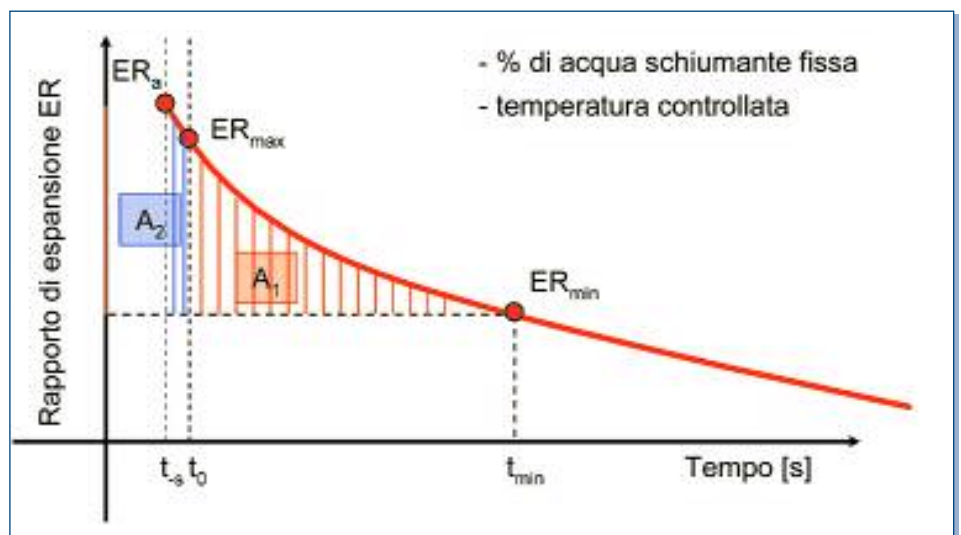


Fig. 2 Rappresentazione grafica delle aree A1 e A2 per il calcolo di FI

Confrontandoci con l'esperienza italiana, facendo riferimento alle Norme Tecniche d'Appalto Prestazionale di Autostrade per l'Italia è stato possibile definire il valore limite di accettabilità $FI_{min} = 450$, per tempi di spruzzaggio $t_s = 5$, $ER_{max} = 20$ e $\tau_{1/2} = 25$.

Il bitume, nello stato transitorio schiumoso, incrementa notevolmente il proprio volume, consentendo una ricopertura omogenea degli aggregati fini, freddi e umidi (cemento e componenti fini presenti nella miscela di inerti), legata alle notevoli proprietà bagnanti della schiuma. Infatti, quando le bolle collassano (scoppiano), le goccioline di bitume si disperdono e aderiscono alla frazione, fine creando un mastice che funge da malta tra gli aggregati grossolani dell'intera miscela (**Fig. 3**).

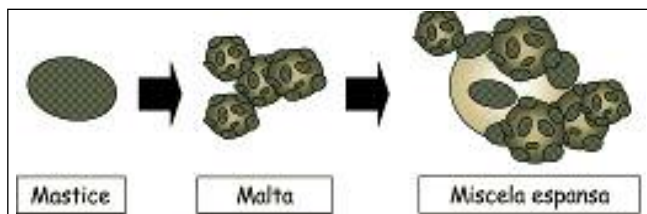


Fig. 3 Schema del processo di miscelazione del bitume schiumato con gli aggregati

2. Programma sperimentale

Vista la complessità delle variabili in gioco, si è ritenuto opportuno fissare delle condizioni al contorno e identificare alcuni parametri come strumento analitico. A tal proposito si è considerata la Legge di Fatica, al fine di poter individuare le variazioni di durabilità dei differenti materiali, e il Modulo di rigidità a diverse temperature per poter evidenziare la variazione di rigidità tra le miscele e la loro differente suscettività termica, parametro utile per offrire indicazioni nella messa a punto di appropriate leggi di traslazione modulo/temperatura. Si sono realizzate 6 miscele, variando il tipo di bitume, la percentuale di inerte di cava e di fresato bitumato a

Tab. 2 Caratteristiche dei bitumi oggetto di studio

Tipo di bitume	Penetrazione EN1426 [dmm]	Punto di rammollimento EN 1427 [°C]	Viscosità EN 13702-2 [mPa*s]				
			160°	140°	120°	100°	80°
70/100 Superfoam	84	48	90	210	900	2100	6000
30/50 Superfoam Hard	42	86	60	100	280	2300	22000

Tab. 1 Composizione delle miscele e codifica

Formulato	Codice Miscela
Miscele rigide	
20% fresato 80% inerte di cava 1,5% bitume 70/100 Superfoam 3,0% cemento	20%f - 1,5%B100 - 3,0%C
20% fresato 80% inerte di cava 1,5% bitume 30/50 Superfoam Hard 3,0% cemento	20%f - 1,5%B50H - 3,0%C
Miscele duttili	
20% inerte di cava 80% fresato 3,0% bitume 70/100 Superfoam 1,5% cemento	20%i - 3,0%B100 - 1,5%C
20% inerte di cava 80% fresato 3,0% bitume 30/50 Superfoam Hard 1,5% cemento	20%i - 3,0%B50H - 1,5%C
20% inerte di cava 80% fresato 4,0% bitume 70/100 Superfoam 1,8% cemento	20%i - 4,0%B100 - 1,8%C
20% inerte di cava 80% fresato 4,0% bitume 30/50 Superfoam Hard 1,8% cemento	20%i - 4,0%B50H - 1,8%C

parità di assortimento globale del mix, con tre differenti dosaggi di legante idraulico e bituminoso.

La scelta delle particolari composizioni deriva da un precedente studio di caratterizzazione empirica, eseguito su molteplici miscele per l'individuazione di formulati particolarmente *rigidi e duttili*. Per semplicità di presentazione le miscele sono state codificate come illustrato in **Tab. 1**.

2.1. I materiali impiegati

2.1.1 I bitumi

Sono stati utilizzati due tipi di bitume (**Tab. 2**): 70/100 Superfoam e 30/50 Superfoam Hard, quest'ultimo studiato e messo a punto per ottimizzare la suscettibilità termica e le prestazioni meccaniche delle miscele alle alte

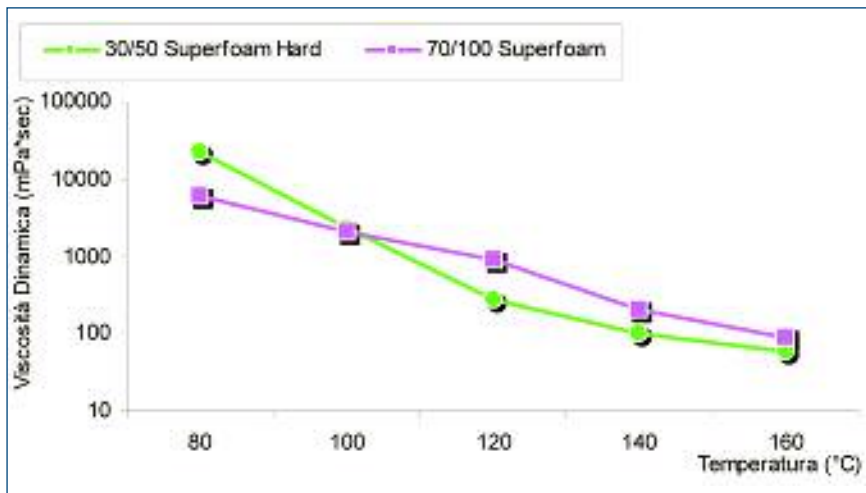


Fig. 4 Viscosità al variare della temperatura dei bitumi oggetto di studio

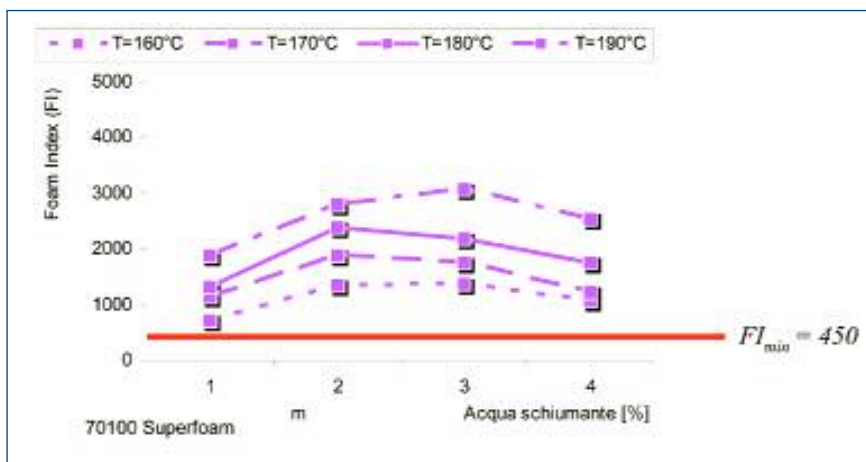


Fig. 5 Proprietà schiumogene del bitume 70/100 Superfoam

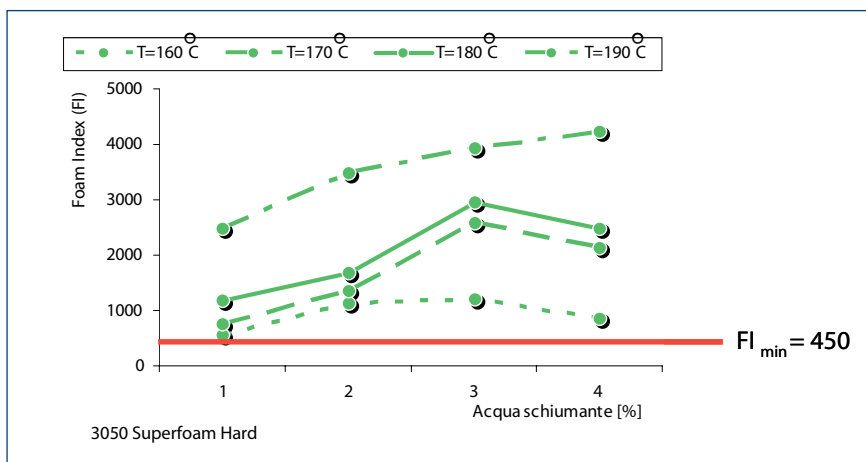


Fig. 6 Proprietà schiumogene del bitume 30/50 Superfoam Hard

temperature di esercizio. Per valutare le caratteristiche di ogni singolo bitume, sono state eseguite prove per la determinazione della Penetrazione (EN1426), del Punto di rammollimento (EN1427) e prove di Viscosità (EN13702-2).

Il bitume 30/50 Superfoam Hard è stato appositamente progettato in modo da esibire basse penetrazioni, alte temperature di rammollimento (minima suscettibilità termica e alta stabilità alle alte temperature) e una particolare viscosimetria (Fig. 4), caratterizzata da elevata viscosità alle temperature di esercizio, bassa viscosità alle temperature di attuazione dei processi di schiumatura. La viscosità è stata tarata in modo da essere inferiore a 160°C rispetto a quanto misurato sul bitume 70/100 Superfoam, in modo da ottenere un'ottimizzazione dei processi di schiumatura pur non rinunciando alla stabilità termica del bitume (alta temperatura di rammollimento pari mediamente a 86 °C).

Si sono determinate in laboratorio, mediante la Foamlab WLB 10, le principali proprietà schiumogene dei bitumi selezionati, individuate di seguito mediante una rappresentazione di FI alle differenti temperature e percentuali di acqua di schiumaggio indagate (Figg. 5-6).

Nei grafici si evidenzia come i bitumi analizzati abbiano mostrato conformità alle succitate Norme Tecniche d'Appalto Prestazionale di Autostrade per l'Italia (limite di accettabilità $FI_{min} = 450$).

2.1.2 La composizione granulometrica delle miscele

Si è ritenuto opportuno selezionare sia il fresato bitumato che l'inerte di cava tramite una suddivisione in classi granulometriche ristrette (10/25, 5/10, 0/5) al fine di ottenere, combinando le

singole pezzature, la stessa distribuzione granulometrica in tutti i campioni realizzati.

In questo modo è stata ridotta la dispersione dei risultati dovuti a diversi assortimenti granulometrici componenti provini di differenti impasti.

Si sono realizzate due differenti miscele, una contenente una correzione di fresato bitumato 0/5 pari al 20%, con 80% di inerte di cava, l'altra contenente una correzione di inerte di cava 0/5 pari al 20%, con 80% di fresato bitumato.

L'assortimento granulometrico globale è stato caratterizzato da una elevata percentuale di elementi grossolani e fini, per conferire consistenza e rigidezza alla miscela, oltre che garantire una efficace reattività con i prodotti leganti e un ottimale stato di addensamento. La curva di progetto è stata rappresentata e messa a confronto con il fuso per strati di base delle Norme Tecniche d'Appalto Prestazionale di Autostrade per l'Italia (**Fig. 7**).

2.2. Attività di laboratorio

I campioni sono stati realizzati in laboratorio mediante mescolatore e Foamlab WLB 10, compattati con pressa giratoria (UNI EN 12697-31) utilizzando una fustella forata con diametro 150 mm, sottoposti successivamente a maturazione per 28 giorni a 25°C in ambiente saturo, al fine di ottenere la massima maturazione delle miscele e quindi confrontare dati sperimentali rappresentativi della massima e intrinseca prestazione offerta. D'altra parte una maturazione parziale avrebbe inficiato il confronto prestazionale di

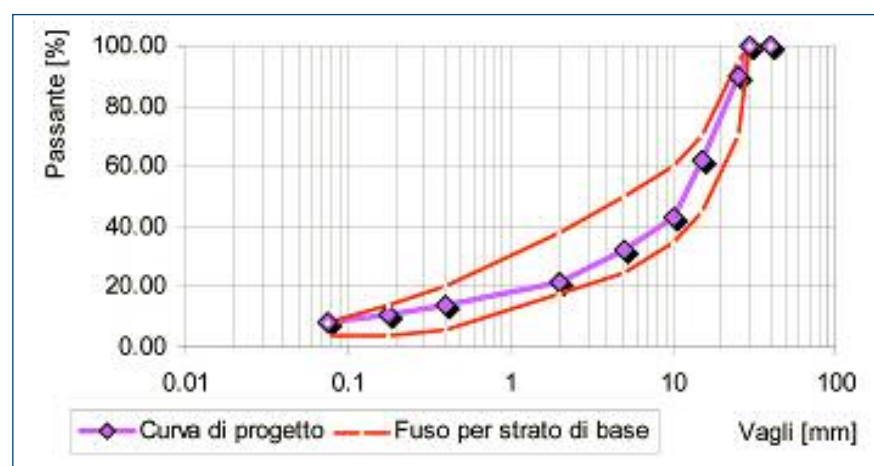


Fig. 7 Curva granulometrica di progetto

materiali testati in tempi differenti (le prove di fatica in modo particolare richiedono tempi di esecuzione evidentemente lunghi).

I campioni così ottenuti sono stati rettificati secondo quanto indicato dalla UNI EN 12697-26 annesso C, per la misura del Modulo di rigidezza a 0°C, 20°C, 40°C, e dalla BS DD ABF-97 per la verifica delle Resistenze a fatica a 20°C.

Il modulo di Rigidezza per ciascuna temperatura è stato ottenuto con la media di 10 campioni per ciascuna miscela, mentre il valore del singolo campione è stato mediato su due prove eseguite sulle diametrali ortogonali. La prova di modulo di rigidezza viene eseguita in modalità non distruttiva, sollecitando il provino nel proprio campo elastico, per cui i test ripetuti a diverse temperature (dopo almeno 4 ore di condizionamento alla temperatura di prova) sono stati eseguiti sempre lungo gli stessi diametri, così come la verifica di Resistenza a fatica è stata eseguita su uno dei due diametri, al fine di ottenere dati direttamente confrontabili. Le prove sono state eseguite dal Servizio Tecnologico Sperimentale della STS Mobile presso il laboratorio di Ancona (**Fig. 8**).

3. Analisi dei risultati

3.1. Modulo di rigidezza e suscettività termica

In fase di elaborazione si è rappresentata la variazione del modulo di rigidezza in funzione della temperatura di prova (**Figg. 9, 10, 11**), con definizione della linea di tendenza secondo la funzione esponenziale del tipo:

$$(2) \quad M = a \times e^{-bT}$$

dove b , suscettività termica, rappresenta la pendenza della curva modulo di rigidezza-temperatura su scala semilogaritmica naturale (velocità di variazione del modulo di rigidezza in funzione della temperatura).

Nonostante la dispersione del bitume non sia omogenea come nei conglomerati bituminosi e nonostante l'aggiunta »

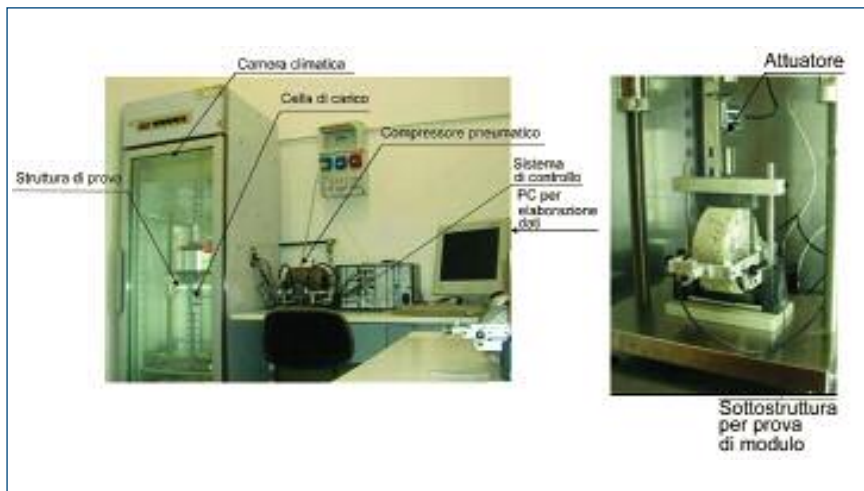


Fig. 8 Universal Testing Machine UTM-5P della STS Mobile

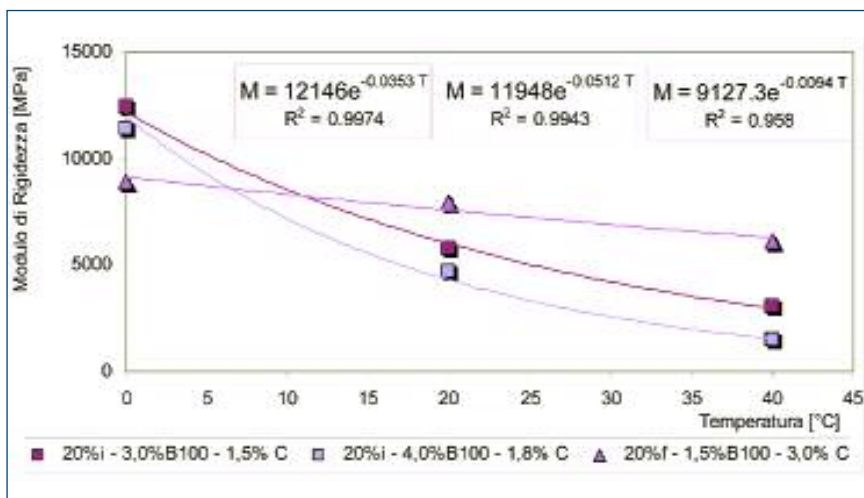


Fig. 9 Modulo di rigidezza - Temperatura per miscele con bitume 70/100 Superfoam

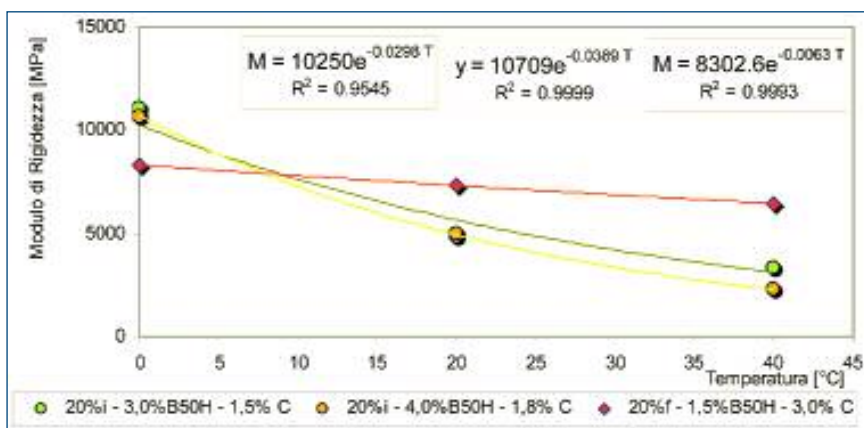


Fig. 10 Modulo di rigidezza - Temperatura per miscele con bitume 30/50 Superfoam Hard

di un legante rigido quale il cemento, le prove di modulo di rigidezza hanno permesso di verificare il cambiamento di prestazioni meccaniche in funzione della temperatura. Infatti in tutte le miscele analizzate si è registrata una riduzione della rigidezza all'aumentare della temperatura di prova, comportamento dovuto alla presenza di un componente termo-sensibile come il bitume che cambia le sue proprietà passando da una condizione rigida a una duttile.

La suscettività termica è risultata minore nelle miscele rigide rispetto alle duttili, unitamente a maggiori moduli di rigidezza (ad eccezione di 0°C), indipendentemente dal tipo di bitume utilizzato, in ragione del contributo irrigidente del legante idraulico, predominante su quello del bitume e del limitato dosaggio di fresato bitumato.

La variazione della suscettività termica in funzione del tipo di bitume è risultata trascurabile nelle miscele rigide. Nelle miscele duttili il bitume 30/50 Superfoam Hard ha garantito una riduzione della suscettività termica della miscela rispetto al bitume 70/100 Superfoam fino ad un massimo del 24%.

Al fine di avere una concreta percezione dell'importanza quantitativa delle variazioni parametriche espone si è ritenuto opportuno confrontare le risultanze ottenute con materiali di riferimento di cui si possiede maggiore conoscenza storica in termini di comportamento prestazionale. Quindi si è analizzata la variazione del modulo di rigidezza in funzione della temperatura per una Base Hard 20% Fresato, conforme alle Norme Tecniche d'Appalto Prestazionale di Autostrade per l'Italia e una Base Anas realizzata con bitume 50/70 (banca dati STS Mobile), determinandone la suscettività termica.

Tutte le miscele analizzate, rigide e duttili, hanno manifestato una minore Suscettività Termica rispetto al conglomerato bituminoso tipo Base Hard 20% Fresato e Base Anas, in modo particolare la miscela duttile con bitume 30/50 Superfoam Hard ha confermato un miglioramento massimo della suscettività termica pari al 48% rispetto alla Base Hard 20% Fresato, pari al 64% rispetto alla Base Anas (Fig. 12).

Inoltre si evidenzia come le miscele duttili rispetto alle rigide presentino una maggiore sensibilità alle variazioni termica avvicinandosi quindi al tipico comportamento dei conglomerati bituminosi. Infatti il mastice che avvolge le pezzature più grossolane (vedi Fig. 3) è in gradi di generare ponti duttili di contatto tra la matrice litica in maniera analoga a quanto accade per i conglomerati bituminosi.

3.2. La Resistenza a fatica

La sperimentazione si è conclusa con il confronto della resistenza a fatica della miscela duttile risultata meno termosuscettiva (3% bitume 30/50 Superfoam Hard + 1,5% cemento) con il conglomerato bituminoso tipo Base Hard 20% Fresato e Base Anas.

Noto il modulo di rigidezza e definito il livello di carico della prova, è stato possibile ricavare la deformazione di trazione media lungo il diametro orizzontale (ϵ_t) tramite la seguente formula:

$$(3) \quad \epsilon_t = \frac{1000 \cdot \sigma_t \cdot (1 + 3 \cdot \nu)}{M}$$

dove ϵ_t è la tensione di trazione lungo il diametro orizzontale espressa in kPa, ν è il coefficiente di Poisson e M è il modulo di rigidezza del provino stesso. La resistenza a fatica è stata rappresentata mediante la correlazione tra il

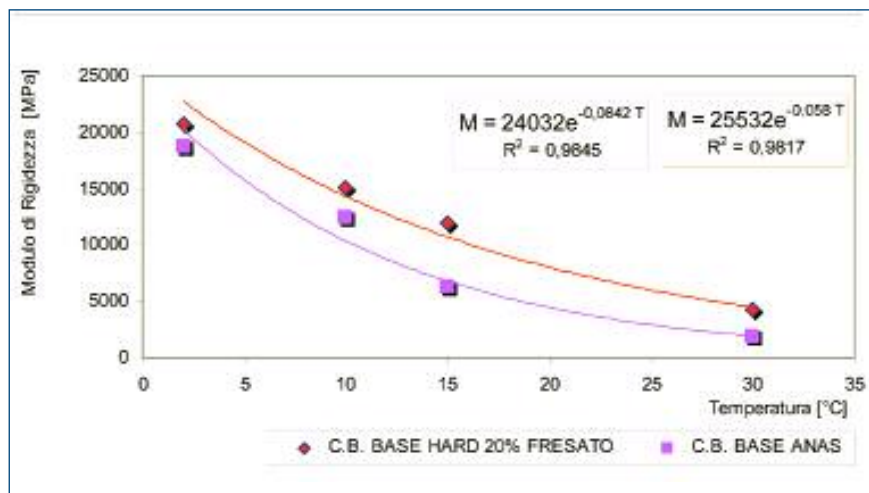


Fig. 11 Modulo di rigidezza – Temperatura per Base Hard 20% Fresato e Base ANAS

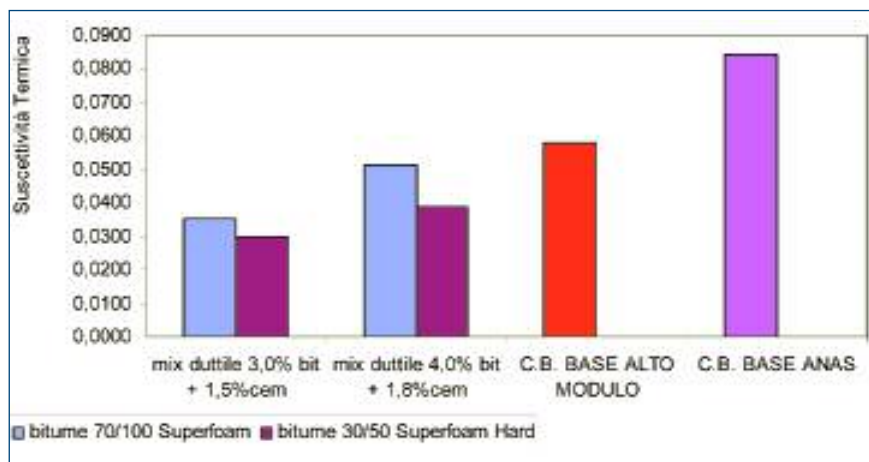


Fig. 12 Variazione della suscettività termica

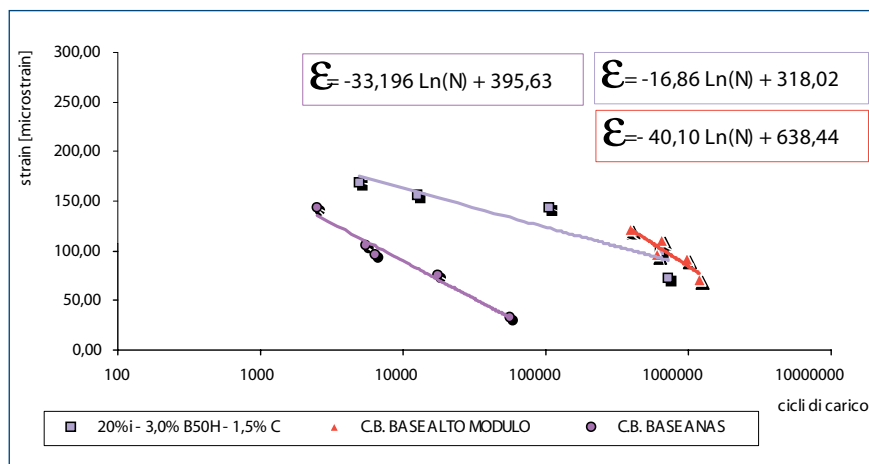


Fig. 13 Confronto delle curve di resistenza a fatica

numero di cicli di deformazione imposta al singolo campione fino alla rottura e la stessa deformazione orizzontale, per 5 differenti provini con altrettanti differenti livelli di deformazione.

I risultati sono associati ad una linea di tendenza con funzione logaritmica del tipo:

$$(4) \quad \varepsilon_1 = a \ln(N) + b$$

Il conglomerato tipo Base Hard 20% Fresato ha esibito una resistenza a fatica nettamente superiore rispetto alla Base Anas, mentre, estrapolando i risultati rappresentati graficamente, la miscela indicata come duttile, realizzata con 3% bitume 30/50 Superfoam Hard e 1,5% cemento, ha manifestato una maggiore prestazione a fatica rispetto alla Base Hard 20% Fresato per deformazioni inferiori a circa 90 $\mu\epsilon$, rispetto alla Base Anas per deformazioni inferiori a circa 250 $\mu\epsilon$.

4. Conclusioni

La presente memoria evidenzia la possibilità di ottenere, con la stessa tecnica, materiali con differenti prestazioni e campi di applicazione. In modo particolare la tecnologia del bitume schiumato può offrire prestazioni che spaziano dai misti cementati ai conglomerati bituminosi, salvo verificare le condizioni tenso-deformative di esercizio e concepire un *mix design* coerente alle necessità strutturali contingenti. Tale metodologia è necessariamente associata ad una conoscenza del comportamento tenso-deformativo della sovrastruttura e delle condizioni di carico, in linea con un approccio razionale alla progettazione stradale.

In relazione ai dati sperimentali ottenuti, che necessitano evidentemente di ulteriori approfondimenti e cautela di applicazione, appare chiaro come, entro ben definiti limiti tenso-deformativi, miscele trattate con bitume schiumato, opportunamente composte, possano esibire migliori resistenze a fatica dei tradizionali conglomerati bituminosi a caldo, oltre ad una minore suscettività termica con adeguato modulo di rigidità. Servirà evidentemente approfondire la sperimentazione per ottenere una opportuna banca dati sperimentale, a conferma di quanto esposto, e supportare

concretamente le scelte progettuali dei materiali con dati prestazionali statisticamente consolidati e allargati a casistiche di studio più ampie.

Si evidenzia che lo studio sulla termo-dipendenza di tali miscele ha offerto altresì un ottimo spunto per l'approfondimento e la determinazione di leggi di traslazione modulo/temperatura applicabili per via pratica in fase di verifica con il FWD.

Concludendo si ricorda che le risultanze sperimentali esposte sono state ottenute mediante una attenta scelta dei leganti, dei relativi dosaggi e un'ottimale assortimento granulometrico, reso possibile solo dopo una selezione dimensionale in classi ristrette degli inerti di cava e soprattutto del fresato bitumato, materiale di risulta molto variamente assortito. Ai fini di un riscontro pratico di cantiere ne consegue la necessità di dover eseguire una selezione opportuna del fresato bitumato e la possibilità di poter disporre di impianti di produzione tali da consentire l'utilizzo di almeno tre classi granulometriche.

Bibliografia

- ▶ Autostrade per l'Italia S.p.A., *Norme Tecniche d'Appalto Prestazionali*, Manutenzione e Costruzione delle Pavimentazioni, 2004.
- ▶ Jenkins K. J., Van de Ven M. F. C., de Groot J. L. A., *Characterisation of foamed bitumen*, 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 1999.
- ▶ Jenkins K. J., Long F. M., Ebels L. J., *Foamed bitumen mixes = shear performance?*, International Journal of Pavement Engineering, June 2007.
- ▶ Jenkins K. J., *Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen*, PhD Dissertation, University of Stellenbosch, 2000.
- ▶ *Manuale del riciclaggio a freddo Wirtgen*, seconda edizione, 2004.
- ▶ Smith W., *Foamed bitumen stabilisation project – Warwick, QLD*, Joint Transport South Australia/Aust-Stab Seminar on 15th April 99.
- ▶ Tattolo S., *Il confronto prestazionale tra bitumi tradizionali e leganti ad alta schiumosità*, Strade & Autostrade, Vol. 2, 2008. ■