

# Studio della reologia alle alte temperature dei bitumi modificati con cere Fischer-Tropsch

## *Bitumen modified with Fischer-Tropsch waxes: rheological investigation of high temperature properties*

FELICE GIULIANI, FILIPPO MERUSI

Università degli Studi di Parma

Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

### Riassunto

La riduzione delle emissioni in atmosfera e dei costi da sostenere durante la produzione e la posa in opera dei conglomerati bituminosi per le costruzioni stradali rappresenta l'esigenza alla base del recente sviluppo delle tecnologie cosiddette strategie warm. Fra le diverse soluzioni tecniche che rientrano in questo ambito, ancora in fase sperimentale o già concrete alternative ai conglomerati tradizionali, vi è l'utilizzo di cere sintetiche in qualità di agenti fluidificanti del bitume, atte pertanto a favorire la lavorabilità delle miscele bituminose. Sebbene ancora non di larga diffusione, l'impiego di cere sintetiche sta assumendo una maggiore visibilità sia nel campo delle applicazioni su strada che nell'ambito degli sviluppi di prodotto in scala di laboratorio. In questo contesto si inserisce la presente esperienza, nella quale viene proposta un'analisi degli effetti delle cere sintetiche sul comportamento reologico dei bitumi nel campo delle alte temperature.

A valle della trattazione di aspetti reometrici legati alla presenza delle cere, si propone una valutazione di laboratorio delle temperature di miscelazione e compattazione di bitumi modificati con cere sintetiche.

Keywords: warm asphalt, cere sintetiche, reologia, temperature di miscelazione e posa in opera.

### Summary

*The Fisher-Tropsch waxes have been proposed as bitumen additives to reduce the temperature of the hot mix production and laying. The present article evaluates the rheological properties of the bitumens containing waxes from 3 to 6% by weight. Fisher-Tropsch waxes are produced during the synthetic crude production from coal. At temperatures higher than their melting point (110-115°), the Fisher-Tropsch waxes reduce the bitumen viscosity and improve its workability.*

## 1. Introduzione

### 1.1. Warm asphalt

Il confezionamento dei conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali richiede il raggiungimento in impianto di temperature elevate, necessarie affinché la miscelazione di bitume ed aggregati lapidei avvenga in modo completo e si giunga in opera ad impasti di adeguata lavorabilità. Oltre agli oneri economici dovuti all'elevato costo dei combustibili, nel bilancio del confezionamento dei conglomerati bituminosi risulta

sempre meno sostenibile il peso rappresentato dalle emissioni in atmosfera e dai conseguenti impatti ambientali. Il contesto sociale e culturale ritiene pertanto indispensabile lo sviluppo di strategie mirate al contenimento delle temperature di produzione, che diventa un tema di interesse congiunto dei settori della ricerca e della produzione industriale. Le tecniche *warm mix asphalt* (WMA) si presentano come repertorio di soluzioni tecnologiche caratterizzate dal comune obiettivo di ridurre le temperature necessarie al confezionamento ed alla posa in opera dei conglomerati »

bituminosi, senza tuttavia limitarne le prestazioni in esercizio, la durabilità su strada.

L'attesa conservazione della lavorabilità degli impasti, anche a temperature inferiori a quelle normalmente mantenute in opera, comporta una riduzione dell'esposizione ai fumi degli addetti alle stesa (Butz, 2004) ed estende il tempo utile di trasferimento del conglomerato dalla centrale di confezionamento al cantiere, oltre a prolungare le stagioni climaticamente favorevoli alle lavorazioni stradali.

Tale insieme di intenti, di particolare interesse pratico ma di non facile attuazione, è stato affrontato considerando diverse strategie, identificate da modifiche dei processi di impianto o da soluzioni agenti sulle caratteristiche termodinamiche dei materiali trattati (Hurley et al., 2006-A, Bonola et al., 2006).

Fra le tecniche più recentemente proposte, alcune di esse si basano sull'introduzione di specifici agenti minerali (zeoliti) in grado di rilasciare vapore acqueo a determinate temperature per agevolare la lavorazione dei conglomerati bituminosi attraverso processi di microschiumatura del legante (Hurley et al., 2005-A, Bocci et al., 2007), mentre altre tecniche prevedono l'uso di agenti chimici che, di fatto, aumentano la lavorabilità attraverso processi di emulsione del bitume (Hurley et al., 2006-B).

Le tecniche che, invece, prevedono l'impiego di additivi organici, categoria alla quale appartengono le cere sintetiche, consentono l'articolazione di processi *warm* basati sul miglioramento delle proprietà di flusso del legante bituminoso quale conseguenza di una transizione di fase delle stesse cere alle temperature maggiormente significative per la realizzazione di pavimentazioni stradali.

## 1.2. Le cere nei bitumi

Col termine cera viene di norma identificata una grande quantità di materiali, sia solidi che liquidi, presenti in natura ed aventi origine animale, vegetale o minerale. Diversi composti chimici quali idrocarburi, alcoli, acidi, esteri, presenti all'interno di materiali cerosi naturali, vengono di norma inclusi nella definizione stessa di cere. Inoltre, per quanto concerne le applicazioni tecniche, vengono considerati cere anche altri composti sintetici che presentano le medesime caratteristiche fisiche (Edwards et al., 2005-A).

Nel campo petrolifero, si osserva che le cere, anche se in quantità variabili a seconda dell'origine dei greggi (0,5% per i venezuelani e fino al 30% per i cinesi), sono tipici componenti costituiti prevalentemente da n-alcani a lunga catena (Redelius et al., 2002). Conseguentemente le cere debbono considerarsi anche componenti naturali dei bitumi, anche se, in questo caso, alla variabilità dei quantitativi propria dell'origine del greggio occorre aggiungere la variabilità legata al procedimento di raffinazione. Si ritrovano pertanto in commercio bitumi completamente privi di componenti cerosi e bitumi che al contrario ne contengono determinati quantitativi che ne influenzano le proprietà fisiche in diversi modi. Le cere nei bitumi sono spesso suddivise in tre classi: macrocristalline (paraffine, <C40), microcristalline (>C40) ed amorfe. In funzione della specifica composizione (contenuto di eteroatomi, composti aliciclici, composti aromatici, ecc.) e della struttura (cristalli, ramificazione delle catene, ecc.) le cere possono manifestare diversi effetti nei bitumi.

Mentre le cere amorfe sembrano ricoprire un ruolo marginale, è un dato di fatto che entrambe le cere di tipo cristallino, oltre che gli altri composti cristallizzanti, debbano essere considerati di particolare interesse nell'ambito degli impieghi stradali del bitume. In conseguenza delle variazioni di temperatura cui le pavimentazioni stradali sono tipicamente soggette durante l'esercizio, nelle cere cristalline si verificano transizioni termodinamiche che si traducono in fenomeni di cristallizzazione/fusione cui corrispondono variazioni delle caratteristiche fisiche dell'intero bitume.

Ne consegue che le cere possono produrre effetti macroscopici sulle prestazioni dei pavimenti stradali, la cui entità dipende dall'origine e dalla reologia del bitume, ma che certamente scaturiscono dal quantitativo, dalla composizione chimica e dalla struttura cristallina delle cere stesse (Edwards et al., 2005-B).

Pertanto sia la determinazione del contenuto di cere nei bitumi che gli effetti sulla reologia dei bitumi ad esse riconducibili sono da sempre oggetto di studio ed in generale si prescrive che in un bitume destinato alle costruzioni stradali il contenuto in peso non debba eccedere il 3,0%.

Occorre comunque evidenziare che, nonostante la presenza di numerose ricerche, si assiste ancor oggi alla

manca di prescrizioni univoche, scaturita dall'esistenza di diverse metodologie (Edwards et al., 2005-B). Il CEN a tal proposito contempla due diverse procedure che possono fornire risultati differenti (EN 12606-1, 1999, EN 12606-2, 1999). Interessanti risultano le procedure di individuazione delle cere nei leganti stradali attraverso metodi basati sulle procedure DSC (Differential Scanning Calorimetry) o TLC-FID (Lu et al., 2007). Simile carenza di univocità si ritrova anche quando nell'analisi degli effetti delle cere sul comportamento dei bitumi stradali nelle condizioni di esercizio.

È comunque noto che la presenza di alcune paraffine macrocristalline possono indurre un eccessivo infragilimento del bitume alle basse temperature mentre le stesse tendono a conferire al bitume una dipendenza della reologia dalla temperatura di cristallizzazione. Occorre però osservare che gli effetti negativi tradizionalmente imputati alle cere devono essere più in generale messi in relazione alla natura chimica ed alla struttura interna delle stesse.

Ne consegue pertanto che una maggiore consapevolezza delle relazioni fra proprietà chimico-fisiche delle cere ed effetti sul comportamento meccanico/reologico del bitume possano considerare le cere sintetiche nel novero dei possibili modificanti dei bitumi stradali.

### 1.3. Le cere sintetiche Fischer-Tropsch

Le cere sintetiche Fischer-Tropsch (FT) sono un prodotto secondario dell'omonimo processo il cui obiettivo principale è individuato dalla produzione di idrocarburi liquidi per sintesi di carbone o gas naturale (Sasol, 2004). Quale conseguenza del processo produttivo, le cere FT risultano essere formate da idrocarburi alifatici ad alto peso molecolare (circa 1600 g/mol) caratterizzati da lunghe catene (C40 – C120) e cristalli di piccola dimensione (Edwards, 2005).

Grazie a queste caratteristiche, le cere FT mostrano un elevato punto di fusione (>90°C), utile a favorire una diminuzione della viscosità del bitume proprio alle temperature tipicamente raggiunte nei processi di confezionamento e di posa in opera dei conglomerati, senza una esplicita compromissione della resistenza alle deformazioni permanenti alle temperature di esercizio. La struttura microcristallina di detta cera comporta una limitazione dell'incremento della rigi-

dezza alle basse temperature degli stessi conglomerati (Edwards et al., 2003).

Le cere sintetiche, per la netta distinzione di fase a cavallo del punto di fusione, sono state oggetto di numerose ricerche di settore riguardanti gli effetti sulle caratteristiche di consistenza dei leganti stradali attraverso prove di tipo semiempirico su bitumi e conglomerati bituminosi (CEDEX, 2004, Druschner, 2004, Hurley et al., 2005-B, Diefenderfer et al., 2007) e prove di tipo reologico alle basse temperature (Edwards et al., 2006-A) ed alle alte temperature (Edwards et al., 2006-B). Ciononostante si osserva al momento una latente incertezza nell'ambito della determinazione quantitativa degli effetti delle cere FT su bitumi di varia natura nelle condizioni di temperatura riconducibili alla produzione ed alla stesa dei conglomerati bituminosi.

## 2. Programma sperimentale

### 2.1. Struttura ed obiettivi della ricerca

Da quanto esposto finora si osserva quindi che un corretto impiego delle cere nella formulazione dei *warm asphalt* deve riguardare diversi aspetti. Se infatti da un lato occorre cercare di ottenere una effettiva riduzione della viscosità, dall'altro bisogna garantire che tale riduzione non si rifletta in un decadimento delle resistenze meccaniche alle temperature di esercizio. Conseguentemente solo alcuni tipi di cere possono essere considerati come opportuni modificanti del bitume.

Il lavoro sperimentale presentato in questo articolo si propone pertanto di definire problematiche e vantaggi specificamente connessi alla modifica dei bitumi con cere sintetiche provenienti da processi Fischer-Tropsch, con particolare enfasi sull'analisi della viscosità alle alte temperature.

Inoltre il lavoro sperimentale si propone di valutare aspetti di natura reometrica, oltre che individuare le temperature di miscelazione e compattazione dei bitumi modificati con cere FT.

La ricerca è stata organizzata in due fasi contigue. La prima fase d'indagine ha previsto la determinazione del punto di fusione delle cere Fischer-Tropsch utilizzate nella sperimentazione e la preparazione dei

materiali di prova, ottenuti aggiungendo in laboratorio quantità note di cera ai bitumi di base.

Durante la seconda fase d'indagine sono stati eseguiti i test reometrici, focalizzati sull'individuazione di relazioni fra il contenuto di cera aggiunto al bitume, le misure di viscosità e le temperature teoriche di miscelazione e compattazione.

## 2.2. Strumentazioni

L'analisi della viscosità delle cere in funzione della temperatura è avvenuta tramite misure eseguite con un viscosimetro rotazionale tipo *Brookfield* per diversi valori dello *shear rate* ed internamente all'intervallo di temperatura 90÷150 °C.

Tutte le successive misure sui bitumi sono state invece condotte tramite l'utilizzo di un *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) di ultima generazione, dotato di sistema di sospensione ad aria degli organi di movimento. Grazie a tale caratteristica è stato possibile eseguire misure ad elevata precisione anche alle alte temperature, situazione in cui la coppia torcente applicata deve essere particolarmente ridotta. Le misure sono avvenute utilizzando un sistema piatto-piatto (25 mm) con gap di 2,00 mm ed un sistema piatto-cono (35 mm).

Il controllo della temperatura è garantito da una cella Peltier montata direttamente sul reometro, in grado di mantenere la temperatura impostata con uno scostamento massimo di  $\pm 0,01$  °C durante l'intera durata della prova. A monte di ogni test eseguito è stato previsto condizionamento a temperatura costante per 20 minuti, necessario per il raggiungimento dell'equilibrio termico del provino.

## 2.3. Materiali

I materiali di prova sono quattro bitumi di base, di cui tre tradizionali ed uno contenente polimeri, successivamente modificati in laboratorio tramite additivazione con quantitativi di cere Fischer-Tropsch (**Fig. 1**) di produzione Sasol pari al 3,0%, al 4,5% ed al 6,0% rispetto al peso di bitume.

I bitumi tradizionali selezionati sono materiali di usuale impiego nelle costruzioni stradali. Due di essi, sebbene di diversa provenienza, appartengono alla medesima clas-



**Fig. 1** Cere Fischer-Tropsch (sin.) e DSR (destra) utilizzate nella sperimentazione

se di penetrazione (70/100), un terzo appartiene alla classe 50/70. Il bitume modificato è un bitume ad elevata rigidità modificato con un elevato contenuto di elastomeri termoplastici. In **Tab. 1** sono riportate le principali proprietà convenzionali dei bitumi di base utilizzati.

La modifica con le cere è avvenuta in laboratorio secondo una procedura standardizzata in cui è stato previsto un unico riscaldamento dei materiali alla temperatura di  $155 \pm 5$  °C, temperatura ritenuta idonea per la completa dissoluzione delle cere all'interno dello specifico bitume, ed un tempo di miscelazione pari a circa 15 minuti. Tali condizioni operative hanno garantito l'omogeneità dei campioni esaminati.

**Tab. 1** Caratteristiche convenzionali dei bitumi di base

Bitume	Classe	Penetrazione [dmm]	Punto di rammollimento [°C]
B1	Tal quale 70/100	73	-
B2	Tal quale 70/100	71	45,7
B3	Tal quale 50/70	54	49,8
PMB1	Mod. con elastomeri	34	83,2

## 2.4. Metodi

Tutti i test reometrici sono stati eseguiti tramite DSR in controllo di deformazione imponendo, a seconda del tipo di prova, costanti del tasso di scorrimento ( $d\gamma/dt$ ) o variabili secondo legge logaritmica.

Una prima fase di test ha previsto l'esecuzione di curve di flusso, finalizzate a valutare eventuali varia-

zioni nella dipendenza del comportamento dei bitumi dal tasso di scorrimento imputabili alle cere. Le curve di flusso sono state eseguite per tutti i bitumi alle temperature di 80 °C e 120 °C, ovvero a cavallo del punto di fusione delle cere.

Successivamente sono stati eseguiti test per la determinazione delle temperature relative alle viscosità teoriche di riferimento per la miscelazione e compattazione di conglomerati bituminosi (temperature di equiviscosità).

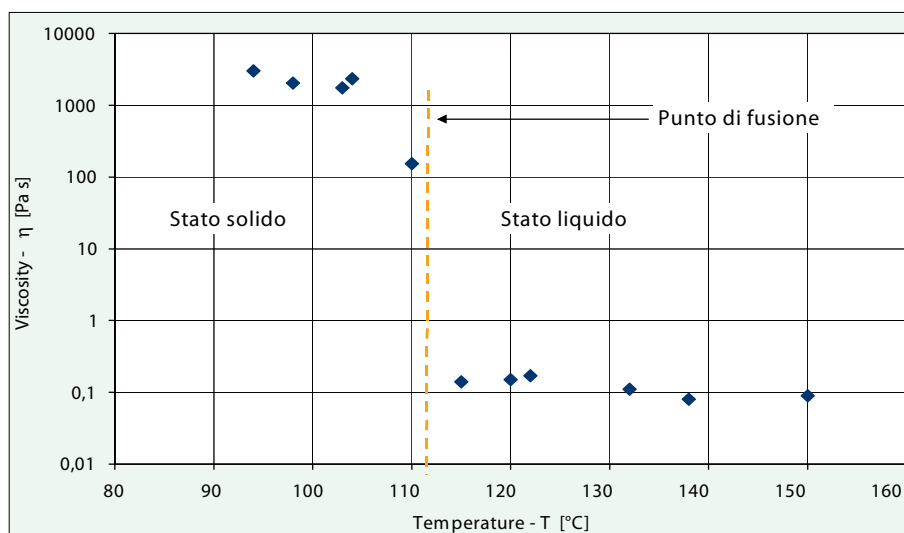
A tal riguardo si è fatto riferimento alle normative statunitensi, le quali prevedono viscosità di riferimento pari a  $0,17 \pm 0,02$  Pa·s per la miscelazione e  $0,28 \pm 0,03$  Pa·s per la compattazione. Come osservato tuttavia in studi sviluppati indipendentemente da Yildirim et al. (2000) e da Khatri et al. (2001), tali valori di viscosità possono portare alle determinazione di temperature eccessive nel caso dei bitumi modificati con polimeri. Per il bitume PMB1 si è pertanto adottato un differente criterio, proposto peraltro nella rivisitazione del sistema Superpave (Bahia et al., 2001), che sulla base del concetto di *low-shear viscosity*, propone di determinare la temperatura di miscelazione in corrispondenza di  $0,75 \pm 0,05$  Pa·s e la temperatura di compattazione in corrispondenza di  $1,40 \pm 0,10$  Pa·s. Sempre sulle basi dei risultati delle esperienze citate, è stato deciso di eseguire le analisi reologiche imponendo un determinato tasso di scorrimento ( $6,8 \text{ s}^{-1}$ ).

### 3. Risultati

#### 3.1. Valutazioni preliminari

L'analisi dell'andamento delle viscosità della cera Fischer-Tropsch ottenuto in funzione della temperatura, mostra la presenza di due regioni a viscosità pressochè costante e di una zona di evidente transizione. Nel diagramma mostrato in **Fig. 2**, i valori numerici assunti dalle viscosità misurate sono particolarmente influenzati dalla sensibilità dello strumento, a fronte di

un materiale che cambia stato fisico in modo repentino, e non forniscono pertanto indicazioni attendibili. Ad ogni modo, l'intervallo di temperatura relativo alla zona di transizione rivela in modo piuttosto chiaro la posizione del punto di fusione della cera, individuabile nell'intervallo 110÷115 °C.



**Fig. 2** Diagramma viscosità-temperatura della cera FT utilizzata per la modifica dei bitumi

#### 3.2. Analisi della viscosità dei bitumi

##### 3.2.1. Dipendenza dal tasso di scorrimento

Curve di flusso a temperatura costante sono state eseguite allo scopo di esaminare gli effetti delle cere sul legame costitutivo dei bitumi, rappresentato in termini di dipendenza della viscosità ( $\eta$ ) dal tasso di scorrimento ( $d\gamma/dt$ ). Con riguardo alle curve di flusso eseguite a 80°C, temperatura al di sotto del punto di fusione delle cere aggiunte, si è ottenuto, per tutti i bitumi, un marcato incremento delle viscosità nell'intero intervallo di misura.

L'incremento di viscosità dovuto all'aggiunta di cere, è funzione della natura del bitume impiegato. L'effetto delle cere è maggiormente rilevante nel caso del bitume tradizionale B1, caso in cui si assiste ad un incremento della viscosità pari a circa due ordini di grandezza, rispetto al bitume modificato con elastomeri (PMB1). Dai diagrammi riportati in **Fig. 3** è anche possibile osservare come per entrambi i bitumi l'effetto

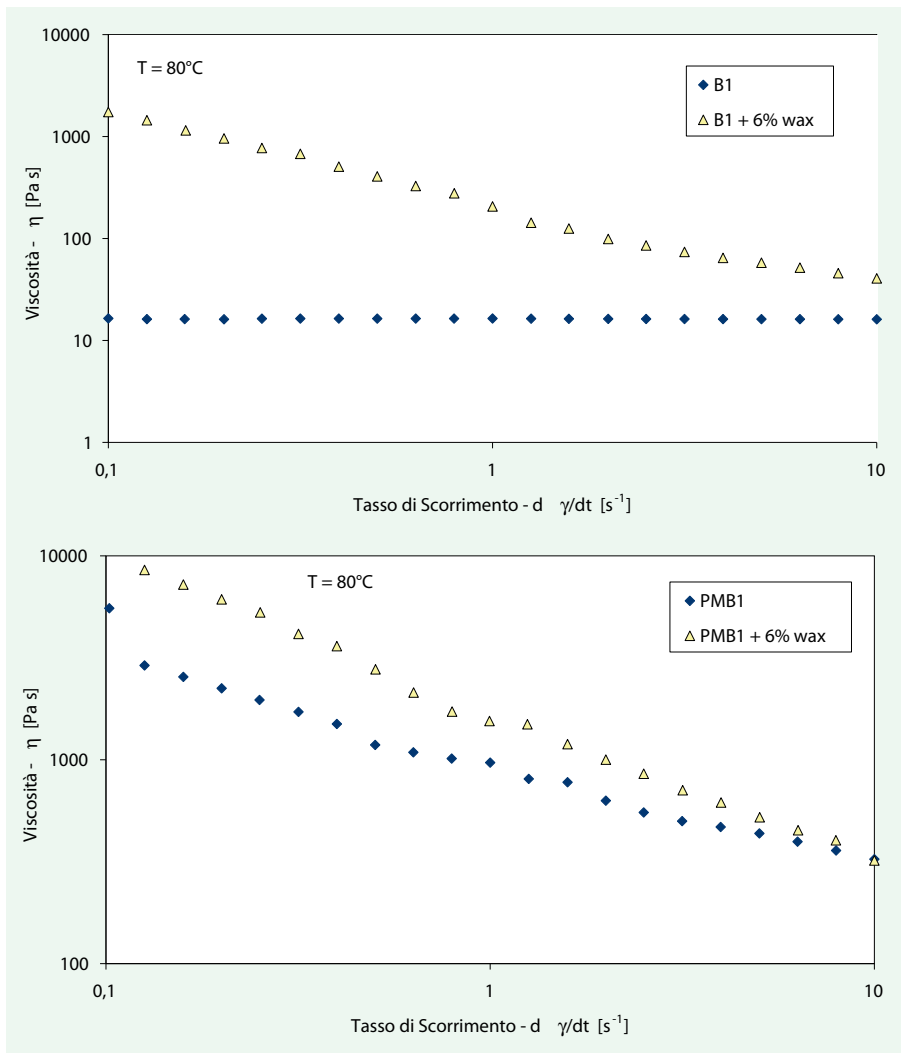


Fig. 3 Curve di viscosità a 80°C (bitumi B1 e PMB1)

delle cere sia maggiormente presente nella regione dei bassi tassi di scorrimento, mentre per tassi di scorrimento più elevati, le curve relative al bitume tal quale ed al bitume contenente il 6,0% di cera tendono ad avvicinarsi (B1) o addirittura a sovrapporsi (PMB1). Nel caso di tutti i bitumi di tipo tradizionale (B1, B2, B3) è stato poi osservato l'insorgere di una marcata dipendenza della viscosità dal tasso di scorrimento. In questi casi risulta quindi chiaro come le cere influenzino il comportamento reologico del legante, che da originario fluido Newtoniano diviene non-Newtoniano.

In Fig. 4 si può osservare il risultato di un *fitting* dei dati sperimentali; per il bitume contenente le cere non è più possibile adottare il modello di Newton e l'interpretazione del comportamento reologico deve avvenire tramite modelli, come ad esempio quello di Cross, rappresentati da relazioni non lineari.

A temperature superiori al punto di fusione delle cere si osserva una situazione completamente diversa. In questo caso, in effetti, le cere

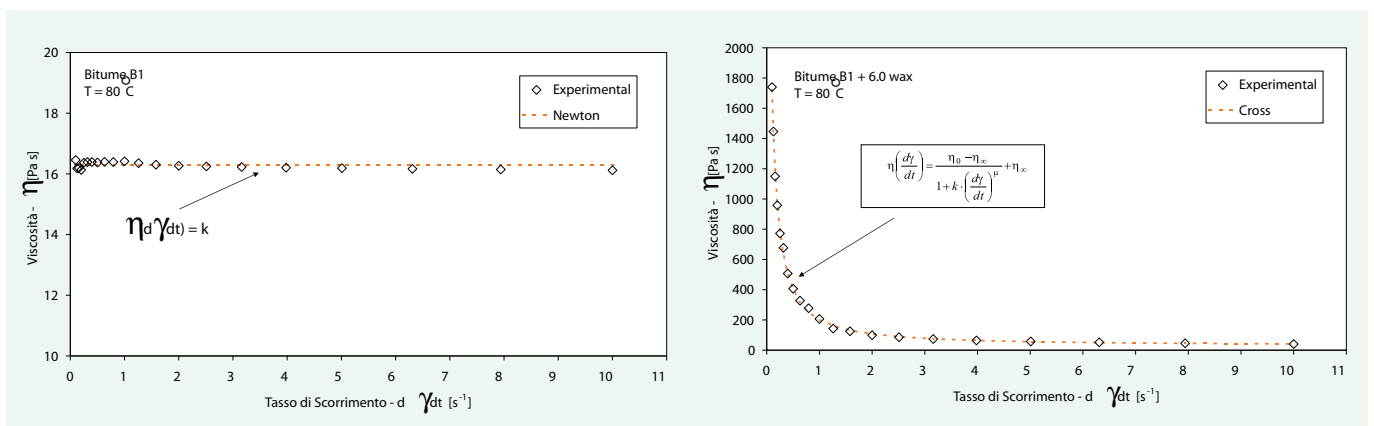


Fig. 4 Interpretazione del comportamento reologico del bitume B1 e del bitume B1 + 6,0% di cera

producono una riduzione della viscosità in tutto il range dei tassi di scorrimento applicati e non si ottiene alcun effetto di mutazione del comportamento reologico che rimane di tipo Newtoniano (**Fig. 5**).

### 3.2.2. Dipendenza dal tempo

Ulteriori analisi inerenti la misura della viscosità dei leganti modificati con cere sintetiche hanno riguardato l'effetto delle stesse cere nei riguardi della dipendenza dal tempo di carico in condizioni di tasso di scorrimento e temperatura costanti.

Come è possibile osservare in **Fig. 6**, in seguito alla modifica dei bitumi con le cere FT, lo stato di flusso diviene dipendente dal tempo ed un regime stazionario si ottiene solo a seguito di tempi di carico prolungati ( $T = 80^\circ\text{C}$ ).

In conseguenza della modifica con le cere si instaura pertanto un comportamento di tipo tixotropico, assen-

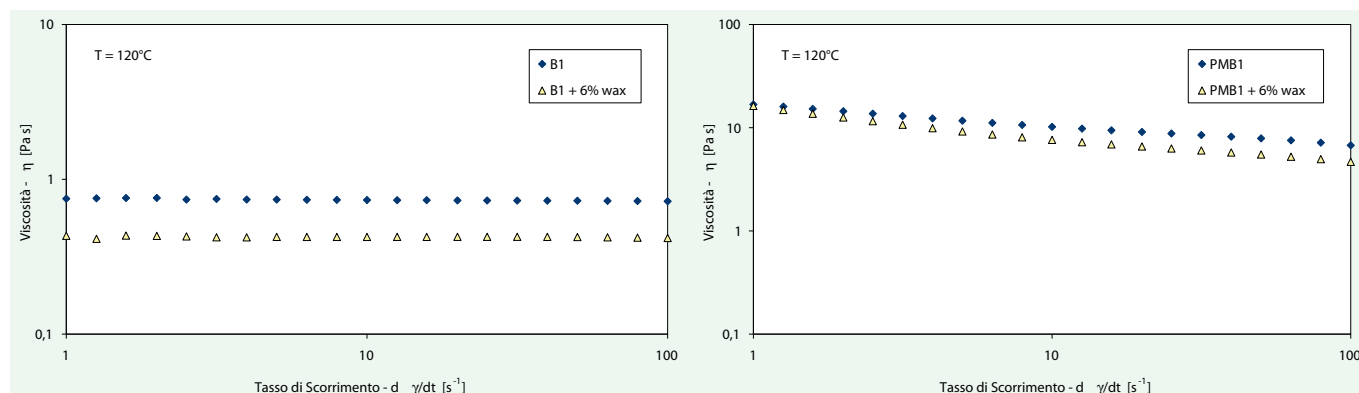
te nel bitume di base. Inoltre, per tutti i bitumi testati, l'effetto tixotropico derivante dalle cere pare essere di maggiore entità quando i tassi di scorrimento assumono valori contenuti.

In **Fig. 7** vengono proposti i risultati dei test eseguiti a  $120^\circ\text{C}$ . È immediato osservare come, in questo caso, in condizioni di temperatura superiore al punto di fusione della cera, non sia più presente alcun effetto di tixotropia.

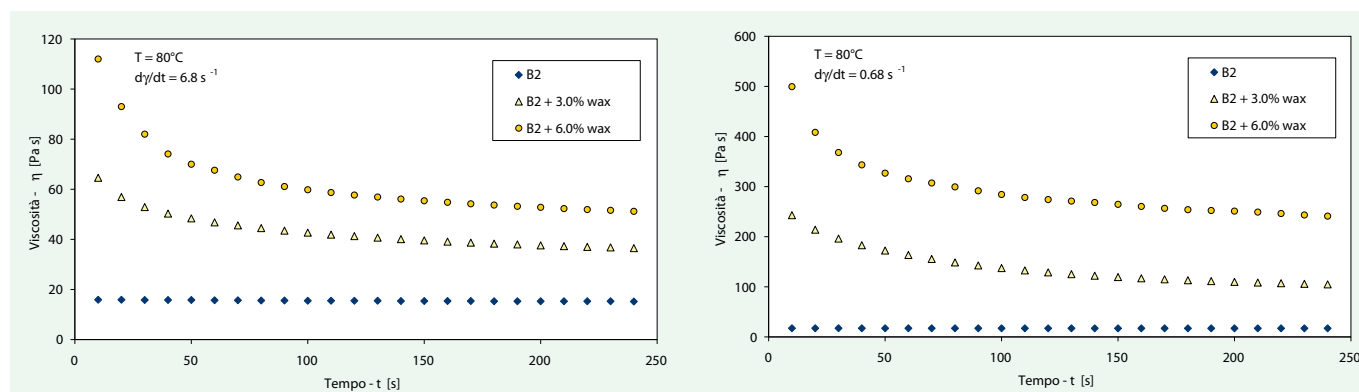
Simili risultati si sono ottenuti per tutti i quattro bitumi analizzati. Occorre però precisare che nel caso del bitume PMB1, la cera ha solamente accentuato la dipendenza della viscosità dal tempo, già introdotta dalla presenza della componente elastomerica.

### 3.2.3. Influenza del tempo di stoccaggio

Risultati di recenti studi condotti da Soenen et al. (2006), hanno dimostrato come alcuni bitumi, ed in

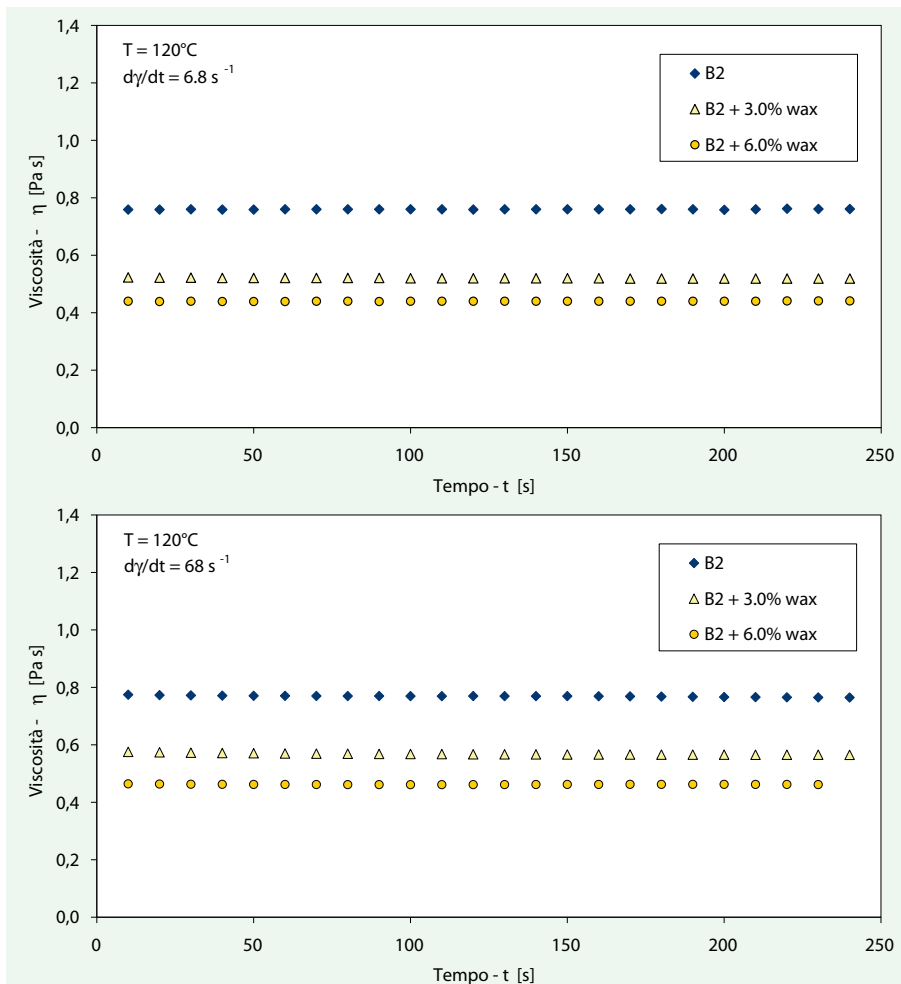


**Fig. 5** Curve di viscosità a  $120^\circ\text{C}$  (bitumi B1 e PMB1)



**Fig. 6** Dipendenza della viscosità dal tempo di carico a  $80^\circ\text{C}$  per tassi di scorrimento pari a  $0,68\text{ s}^{-1}$  e  $6,8\text{ s}^{-1}$  (bitumi B2 e B2 modificati con cere)





**Fig. 7** Dipendenza della viscosità dal tempo di carico a 120°C per tassi di scorrimento pari a 6,8 s<sup>-1</sup> e 68 s<sup>-1</sup> (bitumi B2 e B2 modificati con cere)

particolare quelli contenenti una certa quantità di paraffine, siano soggetti a mutamenti delle proprietà reologiche in conseguenza della variazione della storia termica dei provini. Tale risultato trova inoltre riscontro in Lu et al. (2005), i quali hanno dimostrato come la morfologia dei cristalli di paraffina all'interno dei bitumi dipenda invece dalle temperature di conservazione e manipolazione dei campioni. Al fine di valutare l'influenza di tali variabili nella misura delle proprietà reologiche dei bitumi contenenti cere FT, sono state pertanto eseguite misure su provini di bitume sottoposti a differenti tempi di stoccaggio a temperatura ambiente (*t<sub>sr</sub>*), intendendo con questo termine il tempo intercorso fra l'omogeneizzazione a

155 ± 5°C del provino e l'esecuzione della misura.

In **Fig. 8** sono mostrati i diversi andamenti della viscosità ottenuti per i bitumi B3 e B3 + 6,0% di cere FT sottoposti a tempi di stoccaggio differenti. In particolare è possibile osservare come il bitume contenente cere e proveniente da un tempo di stoccaggio nullo (prova condotta al termine della preparazione del provino), mostri una viscosità superiore rispetto allo stesso bitume mantenuto a riposo a temperatura ambiente per 24 ore.

### 3.3. Determinazione delle temperature di miscelazione e compattazione

A diverse temperature sono state determinate le temperature di equiviscosità per la compattazione e la miscelazione dei conglomerati. Sulla base di quanto esposto precedentemente, per ogni singola misura è stata condotta su provini a tempo di stoccaggio nullo e dopo l'instaurarsi dello stato di flusso stazionario. In **Fig. 9** è rappresentato il diagramma viscosità-temperatura ottenuto per il bitume di base B1 tal quale e modificato con il 4,5% di cera. Come è possibile osservare, l'andamento della curva delle viscosità del bitume evidenzia una variazione di pendenza in corrispondenza dell'intervallo di fusione della cera precedentemente individuato. Per temperature inferiori al punto di fusione, il contenuto di cera comporta un incremento della suscettività termica del bitume, testimoniato dalla maggiore pendenza della curva η(T). Al contrario per temperature superiori al punto di fusione, le cere provocano una diminuzione di viscosità pur mantenendo invariata la pendenza della curva η(T) rispetto a quella del bitume tal quale.

Le temperature teoriche di miscelazione dei conglomerati, definite secondo il criterio di equiviscosità,



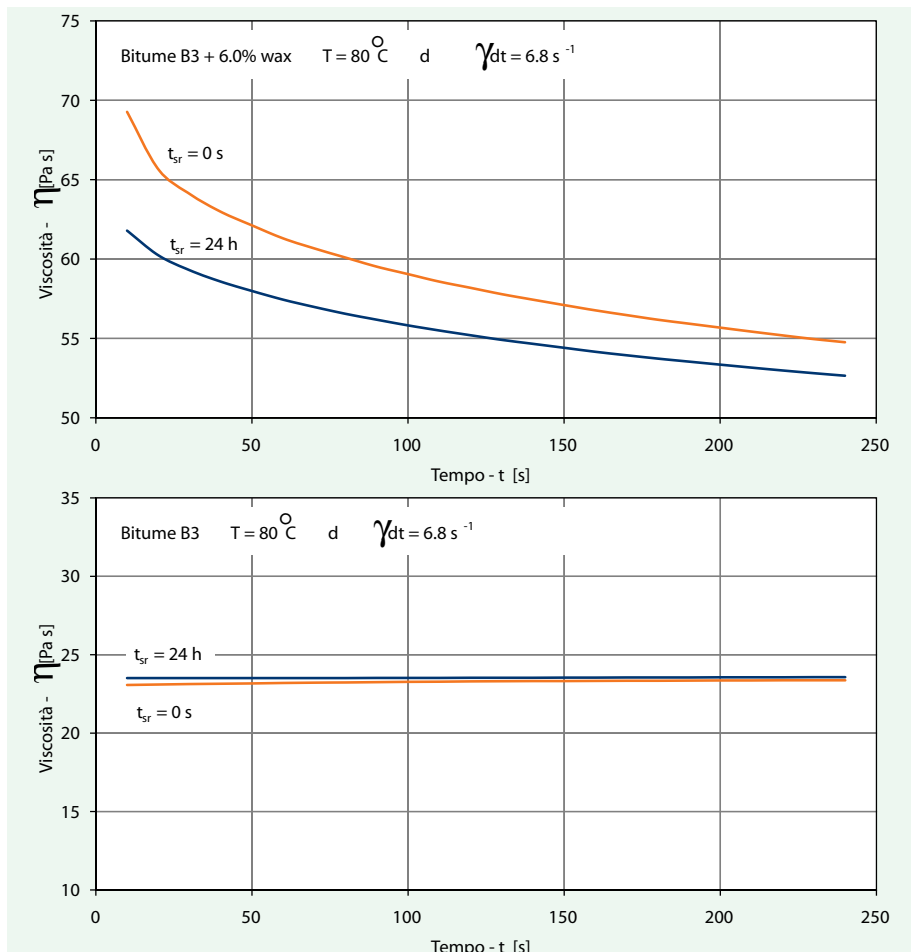


Fig. 8 Confronto fra le viscosità misurate su campioni sottoposti a diversi tempi di stoccaggio

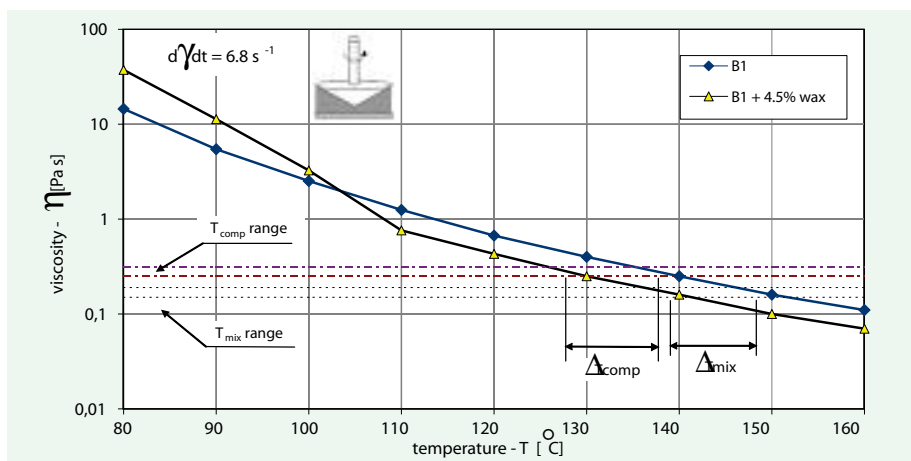


Fig. 9 Andamento della viscosità in funzione della temperatura per i bitumi B1 e B1 + 4,5% di cere FT

sono state determinate tramite un'analisi delle curve  $\eta(T)$  in corrispondenza della viscosità di 0,17 Pa·s nel caso dei bitumi B1, B2 e B3 e di 0,75 Pa·s nel caso del bitume PMB1 (Fig. 10).

Allo stesso modo sono state determinate le temperature teoriche di compattazione. In questo caso, i limiti di viscosità cui riferire le temperature sono pari a 0,28 Pa·s per i bitumi B1, B2 e B3 ed a 1,40 Pa·s per il bitume PMB1 (Fig. 11).

In entrambi i casi si osserva che la modifica con cere sintetiche Fischer-Tropsch produce un effettiva riduzione delle temperature operative. In particolare i grafici mostrano che l'entità della riduzione ottenuta è sensibile al quantitativo di cera utilizzato sebbene alti dosaggi appaiano, per i bitumi analizzati, non particolarmente influenti.

#### 4. Conclusioni

A fronte della recente diffusione della tecnica di modifica dei bitumi stradali con cere Fischer-Tropsch in impianto, l'esperienza di laboratorio consente di apprezzare maggiormente il ruolo che dette cere possono svolgere nell'economia del ciclo di produzione dei conglomerati bituminosi. Ponendo sempre la massima attenzione alle condizioni di prova ed alle specifiche problematiche reometriche, le misure su bitumi contenenti cere FT hanno consentito di quantificare i vantaggi operativi che le stesse potenzialmente comportano nel processo di confezionamento e stesa dei conglomerati bituminosi. »

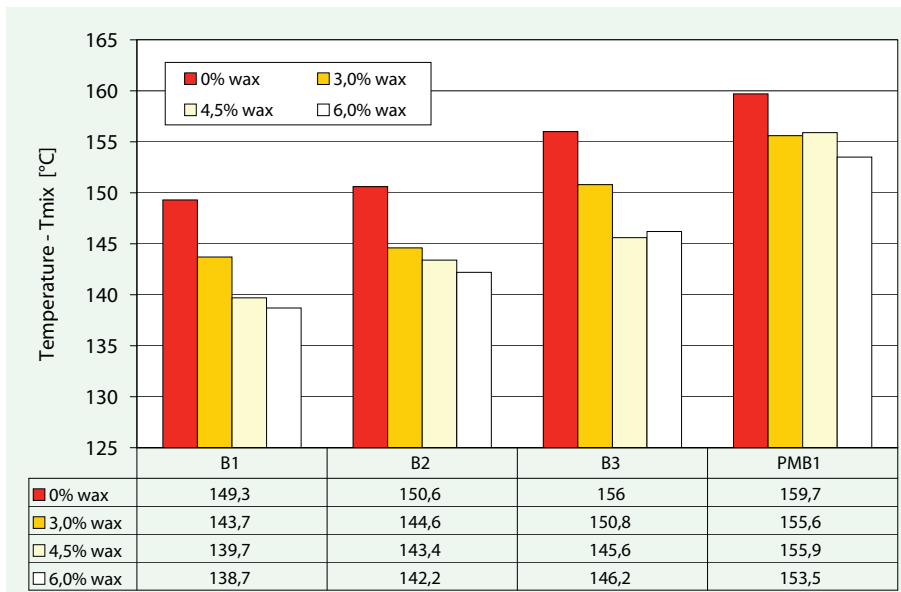


Fig. 10 Temperature di miscelazione

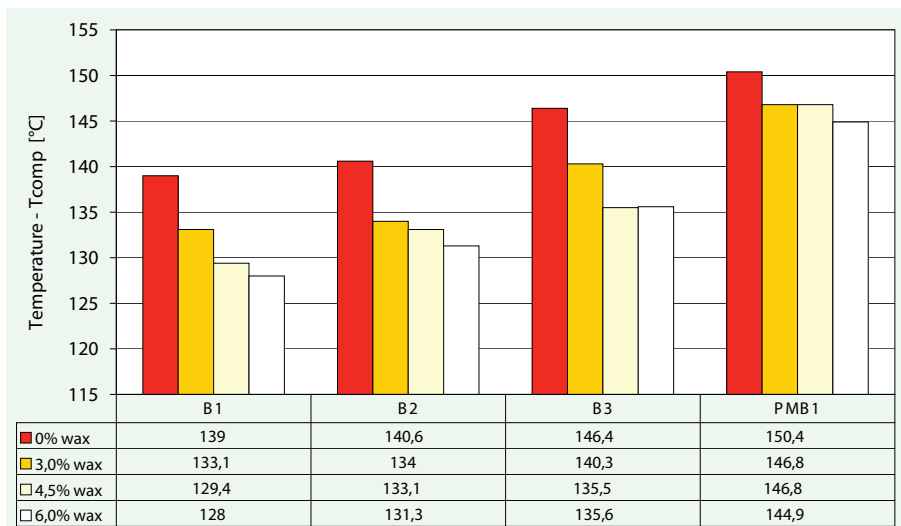


Fig. 11 Temperature di compattazione

I risultati ottenuti hanno mostrato che la modifica con cere FT provoca diversi effetti sul comportamento reologico dei bitumi in relazione alla temperatura, sia al di sotto che al di sopra del punto di fusione delle stesse. Per temperature inferiori al punto di fusione è stato dimostrato come, in presenza di cere, la viscosità dei bitumi divenga dipendente dal tasso di scorrimento, evidenziando un mutamento del comportamento reologico da Newtoniano a non-Newtoniano. Si è

osservato inoltre che le stesse cere provocano anche l'insorgere di fenomeni di dipendenza della viscosità dal tempo di carico (comportamento tixotropico).

Per temperature superiori al punto di fusione, la viscosità dei bitumi subisce una sensibile riduzione, che si riflette in un corrispondente abbassamento delle temperature di miscelazione e compattazione del conglomerato, quantificate sulla base di specifici criteri teorici.

## Bibliografia

- ▶ Bahia H.U., Hanson D.I., Zeng M., Zhai H., Khatri M.A., Anderson R.M. - "Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design", *NCHRP 9-10 project*, Transportation Research Board, National Research Council, 2001.
- ▶ Bocci M., Virgili A., Grilli A., Pannunzio V. - "Experimental analysis of the potentialities and limits of asphalt mixtures by adding zeolite", *4th International SIV Congress*, Palermo, Italy, 2007.
- ▶ Bonola M., De Ferrariis L. "Conglomerati bituminosi a bassa energia. Lo stato dell'arte", *Rassegna del Bitume* 54/06, 2006.
- ▶ Butz T. - "Warm Asphalt Mix - Technologies, researches and experience", *Polish Road Congress*, 2004.
- ▶ CEDEX - "Influencia de la utilizacion de betunes asfálticos modificados con Sasobit en la mezclas bituminosas", *Centro de Estudio y Experimentacion de obras publicas*, Madrid, 2004.
- ▶ Diefenderfer S.D., McGhee K.K., Donaldson B.M. "Installation of warm mix asphalt projects in Virginia", *Virginia Transportation Research Council*, 2007.

- ▶ Druschner L. - "Low temperature asphalt - experience in rolled asphalt", *Proceedings of the 3rd Euroasphalt and Eurobitume Congress*, Vienna, Austria, 2004.
- ▶ Edwards Y., Redelius P. - "Rheological effects of waxes in bitumen", *Energy and Fuels*, Vol.17, No. 3, 2003.
- ▶ Edwards Y., Isacsson U., (2005-A) - "Wax in bitumen part 1", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 6, No. 3/2005.
- ▶ Edwards Y., Isacsson U., (2005-B) - "Wax in bitumen part 2", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 6, No. 4/2005.
- ▶ Edwards Y., (2005) - "Influence of waxes on bitumen and asphalt concrete mixture performance", Ph.D. Thesis, *KTH Architecture and the Built Environment*, 2005.
- ▶ Edwards Y., Tasdemir Y., Isacsson U., (2006-A) "Rheological effects of commercial waxes and poly-phosphoric acids in bitumen 160/220 - low temperature performance", *Fuel*, Vol.85, 2006.
- ▶ Edwards Y., Tasdemir Y., Isacsson U., (2006-B) "Rheological effects of commercial waxes and poly-phosphoric acid in bitumen 160/220 - high and medium temperature performance", *Construction and Building Materials*, 2006.
- ▶ European Standard EN12606-1, Bitumen and bituminous binders - Determination of the paraffin wax content - Part 1: Method by distillation, 1999.
- ▶ European Standard EN12606-2, Bitumen and bituminous binders - Determination of the paraffin wax content - Part 2: Method by extraction, 1999.
- ▶ Hurley G.C., Prowell B.D., (2005-A) - "Evaluation of Asphamin zeolite for use in warm mix asphalt", *National Center for Asphalt Technology*, NCAT Report 05-04, 2005.
- ▶ Hurley G.C., Prowell B.D., (2005-B) - "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt", *National Center for Asphalt Technology*, NCAT Report 05-06, 2005.
- ▶ Hurley G.C., Prowell B.D., (2006-A) - "Evaluation of evotherm for use in warm mix asphalt", *National Center for Asphalt Technology*, NCAT Report 06-02, 2006.
- ▶ Hurley G.C., Prowell B.D., (2006-B) - "Evaluation of potential process for use in warm mix asphalt", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, 2006.
- ▶ Khatri A., Bahia H.U., Hanson D. - "Mixing and compaction temperatures for modified binders using the Superpave gyratory compactor", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 70, 2001.
- ▶ Lu X., Langton M., Olofsson P., Redelius P. "Wax morphology in bitumen", *Journal of Materials Science*, Vol.40, 2005.
- ▶ Lu X., Kalman B., Redelius P. - "A new test method for determination of wax content in crude oils, residues and bitumen", *Fuel*, 2007.
- ▶ Sasol GmbH, (2004) - "Sasobit - The versatile modifier for asphalt".
- ▶ Soenen H., De Vicscher J., Vanelstraete A., Redelius P. "Influence of thermal history on rheological properties of various bitumen", *Rheologica Acta*, Vol.45, 2006.
- ▶ Redelius P., Isacsson U. - "Non-classical wax in bitumen", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 3, No. 1/2002.
- ▶ Yildirim Y., Solaimanian M., Kennedy W. - "Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete", *South Central Superpave Center*, Research Report 1250-5, 2000. ■