

L'analisi reologica dei bitumi stradali secondo i nuovi indirizzi europei: determinazione sperimentale delle temperature di equiviscosità (EVT)

Reological analysis of road bitumen following the new European standards: experimental determination of EVT (Equiviscosity Temperatures)

ANTONIO MONTEPARA, FELICE GIULIANI, FILIPPO MERUSI
Università degli Studi di Parma

PAOLO ITALIA
ENI Spa - Divisione Refining and Marketing, Centro Ricerche

MARIA RITA VALENTINETTI
ENI Spa - Divisione Refining and Marketing, Linea di Prodotto Bitumi

Riassunto

La standardizzazione europea dei test reologici sui bitumi stradali è stata indirizzata verso la definizione di parametri e metodologie diversi da quelli attualmente usati negli Stati Uniti. In particolare, nella generazione di specifiche tecniche *in fieri*, è stato promosso il concetto di Zero-Shear Viscosity (ZSV) per la definizione delle prestazioni dei leganti alle alte temperature di esercizio. In questo articolo, idealmente in continuità col contributo presentato sulla Rassegna del Bitume 52/06 viene esposto un secondo metodo per la determinazione sperimentale della Zero-Shear Viscosity, fondato sulle metodologie proprie dell'indagine dinamica.

I risultati esposti sono relativi ad una più ampia indagine sperimentale condotta da ENI ed Università degli Studi di Parma con l'obiettivo di esaminare in modo globale l'approccio proposto in ambito europeo, evidenziandone l'osatura teorica, nonché le eventuali problematiche operative emerse nella concreta applicazione di laboratorio.

Summary

The European standardization of reological tests on road bitumen is directed to the definition of different parameters and methodologies, different from those used at present in the USA. Particularly, during the formulation of technical standards, the concept of Zero Shear Viscosity is promoted, for the definition of performances of high temperature binders.

This paper, almost a further part of the previous published on the no. 52 of Rassegna, presents a second methodology for the determination of the Zero-Shear Viscosity, based on the dynamic surveys methodology.

The results refer to a wide experimental survey, led by ENI and University of Parma, in order to globally examine the approach proposed in EU, underlining the theoretical base and possible operating problems during the laboratory application.

1. Premessa

La diversità dei carichi esercitati dal traffico veicolare ha da tempo indotto la ricerca sui materiali stradali verso l'applicazione delle metodologie proprie dell'indagine reologica dinamica, caratterizzate dallo studio della risposta meccanica dei materiali sottoposti ad azioni che variano nel tempo con legge armonica di tipo sinusoidale. Le azioni dinamiche sono matematicamente rappresentate da una funzione del tipo: $\tau = \tau_0 \sin(\omega t)$. Le sollecitazioni in regime dinamico sono quindi identificate, oltre che dall'entità del carico (ampiezza, τ_0), anche dalla frequenza con cui esso viene applicato (ω), la quale ne traduce in regime oscillatorio il tempo di applicazione. Il successo dell'analisi dinamica (DMA) nello studio del comportamento meccanico dei materiali in campo stradale è da ricercare nella particolare attitudine che questa ha nell'interpretazione delle proprietà viscoelastiche dei leganti bituminosi.

Lo sviluppo di un sistema di specifiche tecniche, quale quello attualmente in fase di studio in Europa, fondato sulla determinazione delle *performance-related properties* dei leganti non può quindi prescindere anche da una analisi in campo dinamico. Questo concetto risulta importante in particolar modo nella caratterizzazione alle alte temperature di esercizio e nella definizione di proprietà dei leganti bituminosi correlate alla resistenza all'ormaiamento delle pavimentazioni stradali. In quest'ambito si è riconosciuto finora come il contributo parziale del legante nei riguardi di tale tipologia di ammaloramento sia imputabile all'energia dissipata per scorrimento viscoso, rappresentata secondo SHRP, dal parametro $G^*/\sin \delta$ [1].

Recentemente diversi studi hanno però dimostrato l'inadeguatezza che questo indicatore mostra in determinate situazioni, in special modo a fronte dell'immissione sul mercato di bitumi contenenti alte concentrazioni di polimeri. Ciò ha portato ad indirizzare la standardizzazione europea verso la definizione di parametri e metodologie diversi da quelli attualmente usati negli Stati Uniti. In particolare, nella nuova generazione di specifiche tecniche europee, viene proposta l'applicazione del concetto di Zero-Shear Viscosity (ZSV) per la definizione delle prestazioni dei leganti alle alte temperature di esercizio [2]. In questo articolo, viene

esposto il metodo per la determinazione sperimentale della Zero-Shear Viscosity fondato sulle metodologie proprie dell'indagine dinamica, relativo alla proposta di normativa prEN 15325 (*Bitumen and Bituminous binders: Determination of Equiviscous Temperature based on Low Shear Viscosity using a dynamic shear rheometer in low frequency oscillation mode*).

2. Zero-Shear Viscosity (ZSV), Low-Shear Viscosity (LSV) e Temperature di Equiviscosità (EVT)

La difficoltà di interpretare compiutamente il comportamento reologico di bitumi modificati con alte percentuali di polimero ha indotto gli stessi ricercatori di SHRP ed altri studiosi europei ad individuare le criticità presenti nelle assunzioni del sistema Superpave [3, 4]. Uno degli approcci alternativi, da alcuni anni in fase di studio prevalentemente in Europa, riguarda la definizione della resistenza allo scorrimento del legante, interpretata in termini di viscosità [5]. La viscosità dei leganti bituminosi alle temperature di esercizio su strada non può però essere considerata una grandezza univoca in quanto è fortemente influenzata, oltre che dalla temperatura e dal tempo di carico, anche dalla velocità di deformazione. Nasce così l'esigenza di riferirsi ad un valore limite della viscosità dei materiali, la *Zero-Shear Viscosity*, individuato dall'instaurarsi di uno stato di flusso che avviene per successione di stati prossimi all'equilibrio, in cui la struttura interna del materiale permane inalterata rispetto alla condizione di quiete. La Zero-Shear Viscosity è quindi la viscosità del materiale misurata in condizioni di flusso stazionario ottenuto per basse velocità di deformazione ($dy/dt \rightarrow 0$). Secondo queste ipotesi, la viscosità che si misura è relativa al flusso Newtoniano del materiale ed, in linea teorica, essa è indipendente dagli stati di sollecitazione e di scorrimento. La Zero-Shear Viscosity può pertanto considerarsi una proprietà intrinseca del materiale e come tale essa può fornire le basi per una classificazione di materiali diversi, quali bitumi tradizionali e modificati, oltre che costituire un parametro di correlazione con gli ammaloramenti delle pavimentazioni dovuti ad accumulo di deformazioni irreversibili

[5, 6]. Tale concezione si basa sull'analisi della struttura matematica del modello di Burger (Fig. 1), secondo il quale la deformabilità dei materiali bituminosi alle temperature tipiche dell'esercizio su strada può essere identificata dalla somma di tre contributi: deformabilità elastica (J_e), deformabilità elastica ritardata (J_{de}) e deformabilità viscosa (J_v).

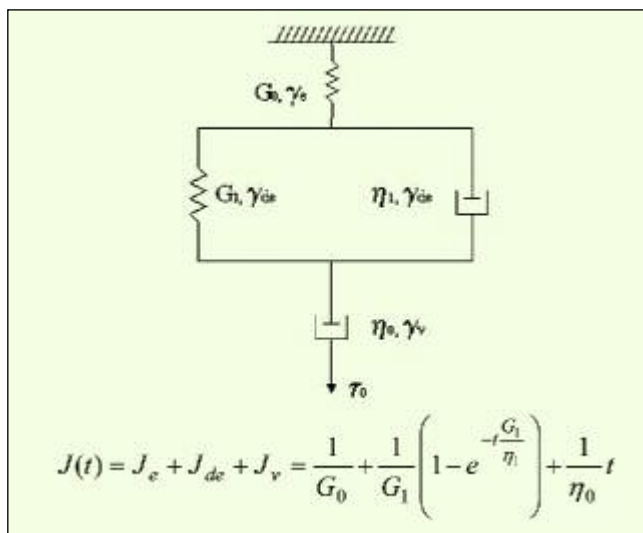


Fig. 1 Il modello di Burger

Secondo gli assunti del modello di Burger, la ZSV è quindi rappresentata dal coefficiente di viscosità η_0 , unico artefice della deformazione non restituibile in seguito alla rimozione del carico. A differenza quindi di valori di viscosità misurati fuori dalle condizioni di stazionarietà del flusso, la ZSV non risente dei fenomeni di elasticità ritardata, rappresentando univocamente, in linea teorica, la resistenza allo scorrimento irreversibile del legante.

Nella rappresentazione della ZSV all'interno del modello di Burger risiede anche la principale differenza di questo parametro rispetto a quello adottato da SHRP. Se si pensa infatti che l'angolo di fase descrive il ritardo della risposta del materiale rispetto al carico, risulta immediato osservare che la misura di $G^*/\sin\delta$ non può essere sempre correlata all'accumulo di deformazione irreversibile. Alcuni bitumi modificati hanno infatti un comportamento meccanico alle temperature di esercizio identificato da una importante componente elastica ritardata della deformazione (γ_{de}) la quale, pur non

essendo in fase con la sollecitazione, è comunque interamente recuperabile. In questi casi, l'ipotesi che la deformabilità non in fase ($J'' = J^* \cdot \sin \delta = (G^*/\sin \delta)^{-1}$) sia integralmente riconducibile alla deformazione permanentemente risulta meno forte. Può allora risultare più corretto fare riferimento alla sola componente viscosa della deformabilità ($J_v = t/\eta_0$), identificata dalla viscosità dello stato stazionario (Zero-Shear Viscosity, η_0).

La ricerca dello stato di flusso stazionario, non esplicitata nella valutazione Superpave della massima temperatura di esercizio, diviene pertanto, con le misure di ZSV, un elemento di fondamentale importanza. La misura sperimentale della ZSV può essere dunque affrontata attraverso due diversi approcci reometrici: *creep flow* alle basse velocità di scorrimento [7] ed analisi dinamica alle basse frequenze [8].

Secondo le metodologie proprie dell'analisi reologica il concetto di Zero-Shear Viscosity, che nasce come proprietà di flusso e pertanto relativa a condizioni di sollecitazione continua (*creep*), è quindi estendibile al campo delle analisi in regime oscillatorio. In questo caso occorre riferirsi alla misura della viscosità complessa, identificata da una parte reale ed una immaginaria, ($\eta^* = \eta' - i\eta''$). Anche nel caso dinamico devono essere verificate le ipotesi di stazionarietà del flusso e di bassa velocità di deformazione, già definite nel caso statico [6, 7]. La stazionarietà del flusso deve essere garantita tramite l'applicazione del carico per tempi sufficientemente lunghi e pertanto si traduce, nel caso dinamico, con l'imposizione di frequenze di oscillazione particolarmente basse. La rigidità del materiale è allora unicamente riconducibile alla sua sola componente viscosa ($G_v = 1/J_v$), mentre la componente elastica ritardata diviene trascurabile. Il comportamento del materiale è descritto dall'asintoto viscoso della curva maestra (Fig. 2) ed il valore di ZSV è identificato dalla viscosità dello stato stazionario (η_{ss}), definita come limite del rapporto fra modulo complesso (G^*) e frequenza di oscillazione (ω).

$$\eta^* = \frac{|\tau|}{|\dot{\gamma}|} = \frac{|\tau|}{\omega \cdot |\gamma|} = \frac{|G^*|}{\omega}, \quad \omega \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{|G^*|}{\omega} = \frac{|G^*|}{\omega} \rightarrow \frac{|G_v|}{\omega} = \eta_0$$

In campo dinamico si osserva che limiti strumentali e natura stessa di alcune tipologie di bitumi non

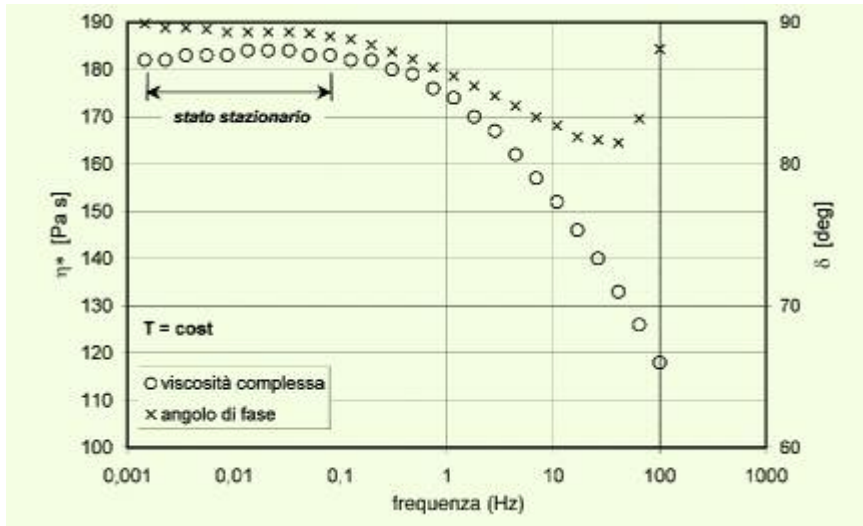


Fig. 2 Dipendenza della viscosità dalla frequenza e raggiungimento dello stato stazionario, identificato anche da valori dell'angolo di fase prossimi a 90°

consentono di soddisfare sempre l'effettiva condizione di *Zero-Shear*. Operativamente occorre far riferimento alla condizione di *Low-Shear*, definita dall'estensione del *range* Newtoniano del materiale verso velocità di deformazione sensibilmente diverse dal valore nullo (Fig. 3).

La *Low-Shear Viscosity (LSV)* è quindi interpretabile come un'approssimazione della ZSV, sostanzialmente indipendente dalla velocità di deformazione e dipendente perciò dalla sola temperatura. Secondo una logica prestaziona-

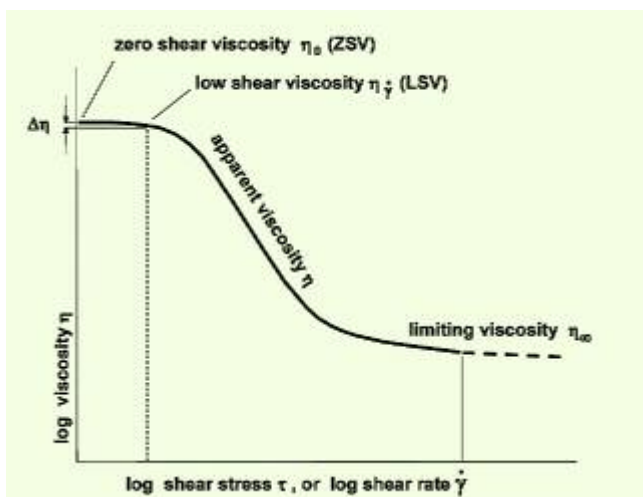


Fig. 3 Dipendenza della viscosità dalla velocità di deformazione. ZSV e LSV [CEN]

le ed analogamente a ciò che accade nel sistema Superpave, è allora possibile stabilire un valore di riferimento di LSV e misurare la temperatura alla quale ogni legante esibisce tale valore. La temperatura così determinata prende il nome di *Temperatura di Equiviscosità (EVT)* e rappresenta un parametro duale alla LSV, in grado di definire una condizione alla quale materiali diversi offrono uno stesso livello di prestazione.

3. Indagine sperimentale e determinazione delle EVT

► Strumentazioni e materiali d'indagine

L'indagine sperimentale è stata svolta tramite l'utilizzo di un *Dynamic Shear Rheometer (DSR)* di ultima generazione, caratterizzato da soluzioni meccaniche avanzate quali la sospensione tramite aria degli organi di rotazione. Questa peculiarità dello strumento, congiuntamente alla capacità di operare sia in controllo delle deformazioni che in controllo delle tensioni, ha permesso lo svolgimento delle misure nelle particolari condizioni previste (Fig. 4).

Il sistema di misura adottato è l'accoppiamento piatto-piatto con diametro di 25 mm e *gap* pari ad 1 mm. La scelta di un'unica geometria di misura è stata possibile in quanto la selezione delle temperature di prova attende rigidzze dei materiali sempre interne ad uno stesso intervallo. La distanza fra i piatti, relativamente ridotta, permette una rapida stabilizzazione dell'equilibrio termico del provino durante i test a variazione di temperatura (*Temperature Ramp*).

I bitumi utilizzati nella sperimentazione appartengono alla produzione ENI e sono caratterizzati da stessa classe di penetrazione (50/70) e diverso grado di modifica con polimero SBS (Tab. 1). La selezione dei materiali effettuata secondo questi due criteri ha permesso di analizzare le capacità delle nuove metodologie nell'evidenziare le qualità dei bitumi modificati, principale criticità riconosciuta alle prove tradizionali.

La ricerca è stata completata dalla ripetizione delle



Fig. 4 Provino di bitume sul piatto inferiore del Dynamic Shear Rheometer (DSR) e configurazione di prova

Tab. 1 Caratteristiche convenzionali e Performance Grade (PG) dei materiali di prova

Bitume	Nome commerciale	Tipologia	Penetrazione (dmm)	T P&A [°C]	Performance grade PG
B50/70	AGIP 50/70	Tradizionale	52	49,5	64-22
PMB50/70-57.5	AGIP ELIFLEX SF	Modificato Soft	56	57,5	70-22
PMB50/70-93.5	AGIP ELIFLEX HD	Modificato Hard	55	93,5	82-22

prove su campioni preliminarmente sottoposti ad azioni di invecchiamento accelerato. Questo ha permesso di effettuare uno studio dell'evoluzione delle proprietà reologiche dei tre materiali, considerando anche la fase di confezionamento e posa in opera del conglomerato, simulato in laboratorio tramite la prova di RTFOT, approccio, quest'ultimo, non espressamente contemplato dalla normativa in discussione.

► Metodologia d'esecuzione dei test.

Determinazione del limite lineare

La complessità del comportamento reologico che caratterizza i materiali bituminosi, porta a distinguere la risposta meccanica in due regioni: lineare e non-lineare. A monte di ogni indagine reologica in campo dinamico, occorre quindi definire l'ampiezza della regione viscoelastica lineare, in modo da poter correttamente selezionare le ampiezze di deformazione (o di tensione) a cui eseguire le misure.

L'approccio seguito per la determinazione del limite della regione di comportamento lineare deriva da un'applicazione della metodologia SHRP, in cui la valu-

tazione del decadimento del modulo complesso G^* è stata sostituita da quella del modulo di immagazzinamento G' che, secondo recenti indirizzi, porta a risultati più restrittivi. Seguendo il metodo sviluppato in ambito SHRP, il limite del campo di linearità è stato convenzionalmente posto in corrispon-

denza dell'ampiezza di deformazione che causa il decadimento del modulo G' al 95% del suo valore asintotico [9]. La valutazione dell'ampiezza limite di deformazione γ_{lim} avviene tramite specifico software di analisi dei dati sperimentali ottenuti (Fig. 5).

In Tab. 2, l'ultima colonna riporta l'ampiezza di deformazione selezionata per l'esecuzione dei test di determinazione delle EVT. Nella determinazione del limite di viscoelasticità lineare, le temperature e le frequenze di

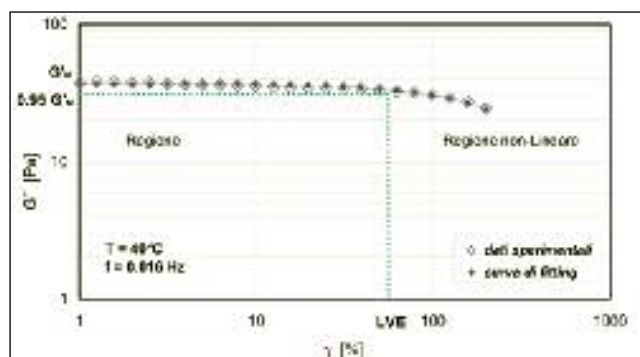


Fig. 5 Determinazione del limite della regione viscoelastica lineare (B 50/70)

Tab. 2 Limiti di linearità ed ampiezze di deformazione selezionate per l'esecuzione delle misure di EVT

Bitume	Frequenza F [Hz]	Temperatura T [°C]	Limite di linearità [%]	Deformazione selezionata
B 50/70	0,016	40	55	10
B 50/70 RTFOT	0,016	40	55	10
PMB 50/70-57,5	0,016	60	66	10
PMB 50/70-57,5 RTFOT	0,016	60	65	10
PMB 50/70-93,5	0,016	60	78	10
PMB 50/70-93,5 RTFOT	0,016	60	65	10

prova vengono selezionate sulla base dei rispettivi valori richiesti dalla proposta di norma per la successiva determinazione delle EVT, in modo da ottenere coerenza fra le condizioni di prova relative ai due test.

► Determinazione delle Temperature di Equiviscosità (EVT)

Partendo da basi esclusivamente teoriche, la misura di EVT potrebbe essere portata a termine eseguendo una rampa di temperatura in condizioni di Low-Shear. Il verificarsi della condizione di Low-Shear comporta però, per la maggior parte dei leganti, un'eccessiva durata di prova, oltre che l'avvicinarsi ai limiti di sensibilità dello strumento. Per evitare questi problemi la misura di EVT viene scomposta in due fasi, operativamente rappresentate da una Temperature Ramp (misura delle proprietà reologiche del materiale al variare della temperatura) e da una Frequency Sweep (misura delle proprietà reologiche del materiale al variare delle frequenze).

FASE 1 – Prova di Temperature Ramp (EVT1)

Nella prova di Temperature Ramp, la frequenza di oscillazione è costante mentre la temperatura varia con legge lineare in un intervallo predefinito, di ampiezza pari a 20 °C ed estremi variabili in funzione del tipo di bitume. I valori degli estremi sono stati selezionati in modo tale da contenere sempre le rigidità entro valori compatibili con il sistema di misura prescelto e mantenere la viscosità in un intorno del valore sele-

zionato come riferimento per la misura di EVT (Tab. 3).

Il risultato dei test di *temperature ramp* così configurati è rappresentato dai diagrammi isocroni della viscosità complessa.

L'analisi degli andamenti ottenuti e la regressione eseguita sui punti ricavati sperimentalmente forniscono la forma esplicita della funzione $\eta^*(T)$ per l'intervallo di temperature considerato,

$$\log(\eta^*) = aT + b$$

in cui η^* è la viscosità complessa espressa in Pa·s, T e la temperatura espressa in °C, a e b sono i coefficienti di interpolazione, dipendenti dal tipo di bitume.

Imponendo nell'equazione la condizione $\eta^* = \bar{\eta}$, dove $\bar{\eta}$ è il valore della viscosità di riferimento, posto pari a 2 kPa·s, si ottiene la determinazione della temperatura di equiviscosità EVT1 (Fig. 6).

$$EVT1 = \frac{\log(\bar{\eta}) - b}{a}$$

Gli andamenti ottenuti in questa prima fase dell'indagine sono risultati estremamente simili per tutti i tre bitumi ed

Tab. 3 Parametri di prova per l'esecuzione delle Temperature Ramp

Bitume	Ampiezza di deformazione [%]	Frequenza f [Hz]	Intervallo di Temperatura T [°C]
B 50/70	10	0,016	30÷50
PMB 50/70-57,5	10	0,016	50÷70
PMB 50/70-93,5	10	0,016	50÷70

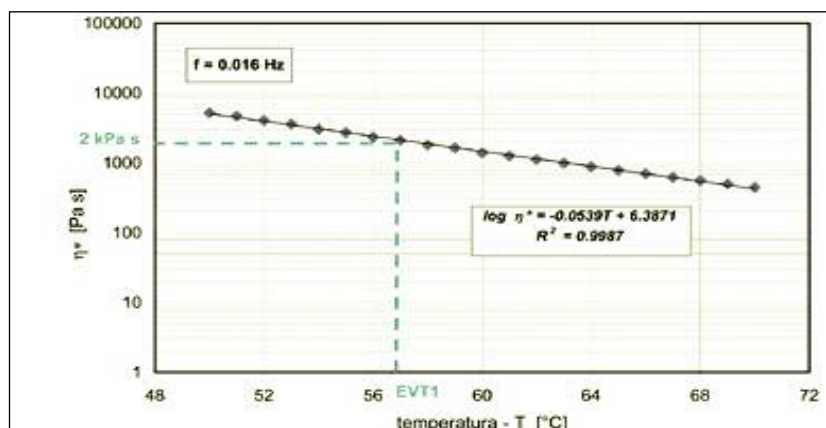


Fig. 6 Diagramma isocrono e determinazione di EVT1 (PMB 50/70-57,5)

in ottimo accordo con l'equazione proposta, come mostrato dai valori del coefficiente di regressione R² (Tab. 4).

Tab. 4 Risultati della determinazione di EVT1 (h* = 2 kPa·s)

Bitume	a	b	R ²	EVT1 [°C]
B B 50/70	-0,0865	7,5886	0,9996	49,6
B 50/70 RTFOT	-0,0917	8,2973	0,9993	54,5
PMB 50/70-57,5	-0,0539	6,3871	0,9987	57,3
PMB 50/70-57,5 RTFOT	-0,0569	6,7271	0,9989	60,2
PMB 50/70-93,5	-0,0376	5,7121	0,9927	64,1
PMB 50/70-93,5 RTFOT	-0,0434	6,2133	0,9964	67,1

La temperatura EVT1 determinata tramite il test di temperature ramp non rappresenta però in generale la temperatura di equiviscosità cercata. Le condizioni di prova non possono infatti essere considerate sufficienti per il verificarsi della condizione di low-shear. La frequenza proposta di 0,016 Hz consente infatti lo svolgimento della prova in tempi relativamente rapidi che possono però comportare velocità di deformazione lontane dal valore nullo per alcune tipologie di bitumi. La temperatura EVT1 deve quindi essere corretta attraverso una successiva prova di frequency sweep, anch'essa contemplata nella metodologia proposta, in modo tale da riportare le condizioni di prova a quelle di low-shear.

Tab. 5 Parametri di prova per l'esecuzione della Frequency Sweep

Bitume	Ampiezza di deformazione [%]	Frequenza f [Hz]	Intervallo di [°C]
B 50/70	10	da 1 a 0,003	EVT1
PMB 50/70-57,5	10	da 1 a 0,003	EVT1
PMB 50/70-93,5	10	da 1 a 0,003	EVT1

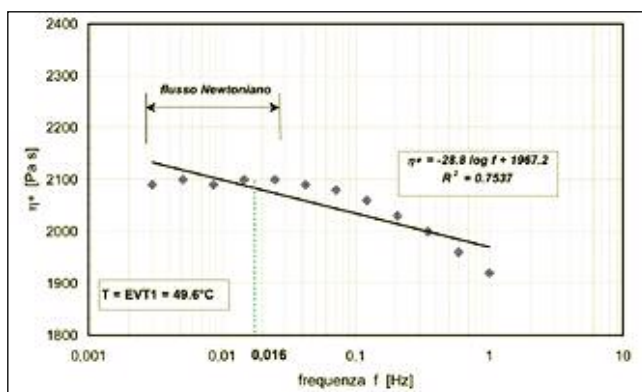


Fig. 7 Diagramma isoterma della viscosità complessa alla temperatura EVT1 (B 50/70)

FASE 2 – Prova di Frequency Sweep (EVT2)

La correzione del valore di EVT1 deve avvenire riportando le condizioni di prova verso quelle teoriche che definiscono il concetto *Low-Shear Viscosity* (LSV). In virtù del principio di sovrapposizione tempo-temperatura è possibile correggere EVT1 con un incremento di temperatura ΔT che estende la misura eseguita ad un campo di frequenze più basse di quelle effettivamente raggiunte.

Il risultato di questa seconda fase è quindi rappresentato dai diagrammi isotermi della viscosità complessa (Fig. 7 e 8) alla temperatura di prova EVT1. L'analisi degli andamenti ottenuti e la regressione eseguita sui punti ricavati sperimentalmente forniscono la forma esplicita della funzione η*(f) relativamente alle basse frequenze di oscillazione,

$$\eta^* = c \log f + d$$

in cui η* è la viscosità complessa, f è la frequenza in Hz, c e d sono i coefficienti di regressione, dipendenti dal tipo di bitume.

Tramite l'equazione ricavata è possibile risalire con una certa approssimazione a valori della viscosità misurati per frequenze inferiori di quelle raggiunte sperimentalmente. In particolare l'equazione viene utilizzata per ricavare la viscosità relativa a 10⁻⁴ Hz, valore di frequenza ritenuto idoneo a rappresentare la condizione teorica di *low-shear* per tutte le tipolo-

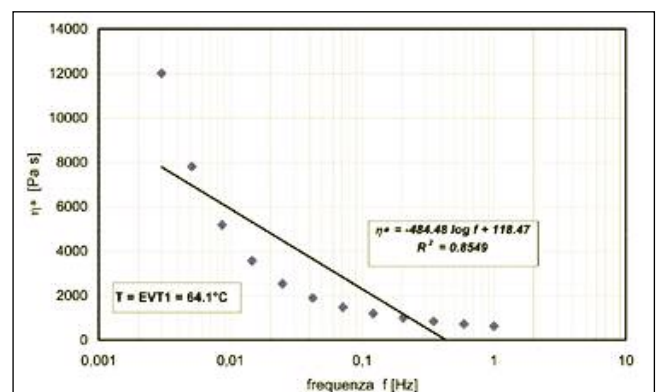


Fig. 8 Diagramma isoterma della viscosità complessa alla temperatura EVT1 (PMB 50/70-93,5)

gie di bitumi stradali. Definiti allora $\eta_{\dot{\gamma}_1}$ ed $\eta_{\dot{\gamma}_2}$ i valori che la viscosità assume in corrispondenza rispettivamente delle frequenze di *low-shear* (10^{-4} Hz) e di esecuzione delle temperature ramp ($0,016$ Hz) si può ricavare l'incremento di temperatura ΔT che corregge il valore di EVT1 tramite la seguente equazione:

$$\Delta T = \frac{\Delta \log(\eta^*)}{a} = \frac{\log \eta_{\dot{\gamma}_1} - \log \eta_{\dot{\gamma}_2}}{a} = \frac{\log \frac{\eta_{\dot{\gamma}_1}}{\eta_{\dot{\gamma}_2}}}{a}$$

dove:

$\eta_{\dot{\gamma}_1} = \eta^*$ calcolata a $0,0001$ Hz [Pa·s]

$\eta_{\dot{\gamma}_2} = \eta^*$ calcolata a $0,016$ Hz [Pa·s]

$a =$ coefficiente angolare dell'equazione ricavata dalla temperature ramp.

Il valore della temperatura di equiviscosità cercato (EVT2), che rappresenta il risultato finale del test, si ottiene infine sommando il ΔT ricavato alla temperatura EVT1:

$$EVT2 = EVT1 + \Delta T$$

Nel caso del bitume tradizionale l'esecuzione del test di *frequency sweep* ha mostrato che l'andamento sperimentale si discosta da quello previsto dall'equazione di interpolazione suggerita dalla metodologia proposta. In questo caso infatti si osserva come l'andamento ottenuto mostri l'esistenza di una marcata regione a carattere Newtoniano già raggiunta per le frequenze di misura. Se ne deduce quindi che il bitume B 50/70 verifica già nella prima fase, sollecitato alla frequenza di $0,016$ Hz, la condizione di *low-shear* e, pertanto, la temperatura EVT1 può già considerarsi la temperatura di equiviscosità cercata (Tab. 6).

Tab. 6 Risultati della determinazione di EVT2

Bitume	c	d	R ²	$\eta_{\dot{\gamma}_2}$ [Pa·s]	ΔT [°C]	EVT2 [°C]
B 50/70	-28,80	1967,20	0,7537	2232	0,34	49,9
B 50/70 RTFOT	-41,64	2069,90	0,8072	2453	0,43	54,9
PMB 50/70-57,5	-263,45	801,63	0,9825	3228	4,31	61,6
PMB 50/70-57,5 RTFOT	-249,53	941,08	0,9979	3239	3,78	64,0
PMB 50/70-93,5	-484,48	118,47	0,8549	4581	8,89	73,0
PMB 50/70-93,5 RTFOT	-487,21	204,65	0,8908	4692	8,65	75,7

Nel caso dei bitumi modificati è stato invece messo in luce, in accordo con quanto già riscontrato tramite i test di creep [10], che il comportamento di questi materiali non permette l'instaurarsi di uno stato stazionario alle basse velocità di deformazione.

I test in regime dinamico dimostrano che la viscosità complessa aumenta al diminuire della frequenza secondo una legge non-lineare anche nel piano semi-logaritmico (Fig. 8).

Quanto osservato traduce l'impossibilità di stabilire effettive condizioni di *low-shear* per i bitumi ad alta modifica, dovuta essenzialmente alla natura intrinseca di questi materiali. I risultati mostrano quindi che non è possibile stabilire un valore univoco della *low-shear* viscosity in linea con gli stessi principi teorici che la definiscono.

A fronte delle criticità riscontrate occorre però osservare che i risultati ottenuti, anche se non propriamente rispondenti alle assunzioni teoriche, risultano essere sensibili alla natura del materiale ed al suo livello di modifica.

All'incremento della percentuale di polimero presente nel legante viene infatti associata una specifica variazione della temperatura EVT2 che cresce, identificando un netto incremento del livello prestazionale alle alte temperature di esercizio.

La prova consente di mettere in evidenza effetti sul comportamento dovuti all'invecchiamento rispetto ad effetti dovuti al grado di modifica.

Il valore assunto da ΔT infatti, a differenza di ciò che accade per le temperature EVT1 ed EVT2, non cresce in seguito all'aging, mentre assume valori sempre più elevati al crescere della concentrazione di polimero (Fig. 9).

La presenza di polimeri risulta quindi associata ad elevati valori di ΔT , riconducibili univocamente ad un comportamento meccanico tipico dei bitumi modificati.

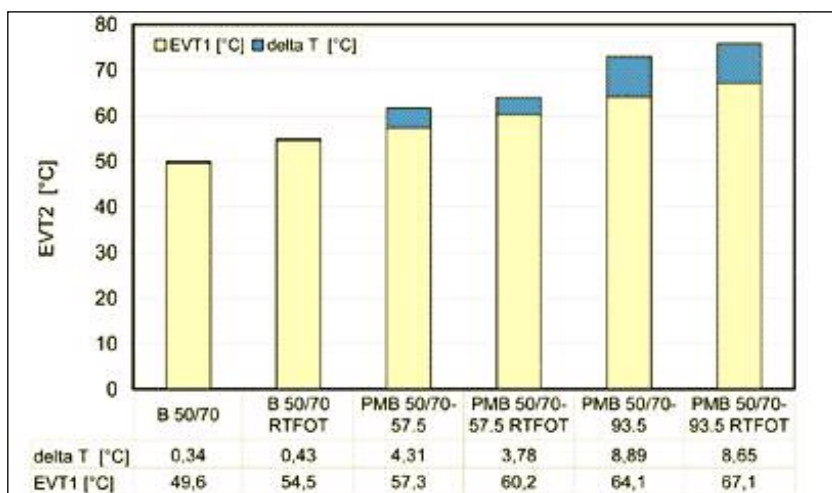


Fig. 9 Confronto risultati EVT1, ΔT, EVT2

4. Conclusioni

Lo sviluppo della nuova generazione di specifiche tecniche europee per i bitumi stradali prevede l'introduzione di nuovi indicatori di prestazione dei materiali. Nel caso delle alte temperature di esercizio la viscosità misurata in particolari condizioni (*low-shear viscosity*) è stata proposta come indicatore della resistenza all'ormaiamento. Nel presente articolo vengono descritti i presupposti teorici e le metodologie sperimentali alla base della determinazione della LSV in regime dinamico dei bitumi stradali e delle relative *temperature di equiviscosità*, cioè le temperature a cui diversi materiali esibiscono uno stesso valore di *low-shear viscosity*. Al fine di ottenere elementi utili ad una verifica ed uno sviluppo del metodo, è stata condotta un'analisi su tre bitumi, di cui uno tradizionale e due modificati con differenti concentrazioni di polimero di tipo SBS. Tale selezione dei materiali ha permesso di valutare la capacità del test di quantificare il livello prestazionale dei bitumi sia tradizionali che modificati, mettendo in evidenza alcune criticità del metodo.

Tab. 7 Temperature di Equiviscosità EVT ottenute per i tre bitumi oggetto d'indagine

Bitume	Tipologia	Performance Grade	Zero-Shear Viscosity (<i>creep</i>)	EVT1 [°C]	EVT2 [°C]
B50/70	Tradizionale	64-22	257	49,6	49,9
PMB50/70-57,5	Modificato soft	70-22	1.320	57,3	61,6
PMB50/70-93,5	Modificato hard	82-22	1.635.034	64,1	73,0

È stato quindi dimostrato che:

1. la misura delle EVT fondata sulla determinazione della *low-shear viscosity* in regime dinamico rappresenta un sintetico indice prestazionale espresso in unità fondamentali, in grado di fornire importanti indicazioni sia sulla natura che sul comportamento in esercizio delle diverse tipologie di bitumi (Tab. 7);
2. il test proposto ha il merito di fornire un'unica metodologia di analisi che, a meno di alcune approssimazioni, sembra poter essere considerata valida per tutte le tipologie di bitumi.

A valle dell'indagine condotta, prima esperienza di studio su una misura reologica in fase di completa validazione teorico-sperimentale, si può quindi affermare che, a patto di definire un valore della viscosità di riferimento, effettivamente correlato all'instaurarsi di fenomeni di ormaiamento, la misura di EVT può rappresentare una temperatura indicativa per la selezione dei bitumi in condizioni di esercizio a prevalente clima caldo.

I valori ottenuti mostrano infine come l'analisi reologica, pur necessitando di un ulteriore sviluppo delle metodologie d'indagine, sia utile per un corretto posizionamento prestazionale dei bitumi modificati.

In questo senso ulteriori studi saranno effettuati nel tentativo di affinare le metodologie di prova ed ampliare le conoscenze relative alle correlazioni fra i parametri reologici dei leganti e le prestazioni delle pavimentazioni riportate in letteratura.

In ultimo, con il presente articolo, si è voluto contribuire alla raccolta di esperienze in questo particolare ambito scientifico ed evidenziare alcune chiavi di lettura del corpo della norma che a breve entrerà nel novero dei documenti tecnici di riferimento per gli operatori del settore stradale.

5. Riferimenti Bibliografici

- [1] Bahia H. U., Anderson D. A., *"The new proposed rheological properties of asphalt cement binders: why are they required and how do they compare to conventional properties"*, ASTM STP – Physical properties of asphalt cement binders, Philadelphia, USA, 1995.
- [2] Stawiarski A., Beuving E., Soraas K., Teugels W., *"European BITSpec Seminars 2002-2003: a communication project to support the development of the European Bitumen Standardisation"*, Atti di Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 12-14 maggio 2004.
- [3] Marasteanu M. O., Clyne T. R., McGraw J., Li, X., Velasquez R., *"High temperature rheological properties of asphalt binders"*, Transportation Research Board, Washington D.C., USA., 2005.
- [4] Sybilski D., *"Zero-Shear Viscosity: phenomenons at measurement, interpretation and relation to permanent deformation"*, Atti di Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasburgo, Francia, 1996.
- [5] Phillips M., *"Module 2: Stiffness and Permanent Deformation"*, Eurobitume Workshop '99 Performance Related Properties for Bituminous Binders, Lussemburgo, 3-6 maggio 1999.
- [6] Phillips M., Robertus C., *"Binder Rheology and Asphaltic Pavement Permanent Deformation; The Zero Shear Viscosity Concept"*, Atti di Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasburgo, Francia, 7-10 maggio 1996.
- [7] Desmazes C., Lecomte M., Lesueur D., Phillips M., *"A Protocol for reliable measurement of Zero-Shear Viscosity in order to evaluate the anti-rutting performance of binders"*, Atti di Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, 2000.
- [8] Binard C., Anderson D., Lapalu L., Planche J.P., *"Zero Shear Viscosity of Modified and Unmodified Binders"*, Atti di Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 12-14 maggio 2004.
- [9] Marasteanu M.O., Anderson D.A., *"Establishing linear viscoelastic conditions for asphalt binders"*, Transportation Research Record 2000, TRB, Washington D.C., USA, 2000.
- [10] Montepara A., Giuliani F., Merusi F., Italia P. *"L'analisi reologica dei bitumi stradali secondo i nuovi indirizzi Europei: determinazione sperimentale della Zero-Shear Viscosity"*, Rassegna del bitume n° 52, Roma, Italia, 2006. ■