

Dalle prove tradizionali allo Zero Shear Viscosity, la reologia dei leganti bituminosi

From the traditional tests to the development of asphalt rheology

CESARE SANGIORGI, FRANCESCO PETRETTO
DICAM, Università di Bologna

Riassunto

Inizialmente, i test effettuati per la caratterizzazione reologica dei bitumi erano empirici, ovvero basati principalmente sull'esperienza dei tecnici. Questi test tradizionali non erano in grado di misurare le proprietà fisiche del legante bituminoso, direttamente legate alla loro capacità di prestazione in opera. Lo SHRP ha introdotto nuovi test per la cosiddetta *reologia prestazionale*, con lo scopo di misurare le proprietà dei leganti bituminosi, con riferimento diretto alla loro capacità prestazionale, tramite l'applicazione di rigorosi principi ingegneristici.

Summary

At the start of the development of asphalt rheology, the tests applied for the characterization of bitumen were empirical, based primarily on the experience of technicians. These traditional tests were not able to measure the asphalt binder properties directly related to its service life performance. In 1987, the Strategic Highway Research Program (SHRP) brought some new tests for the so called performance rheology aiming at measuring the properties directly related to the field performance, under rigorous engineering principles. However, a number of recent studies have shown that some SHRP parameters are not fully representative of the PmBs rheology.

1. I principi alla base della reologia dei leganti bituminosi

La reologia nasce dalla volontà di descrivere il comportamento di materiali cosiddetti viscoelastici che rispondono alle sollecitazioni in modo viscoso ed elastico in diversa proporzione a seconda delle condizioni in cui tali sollecitazioni sono applicate. La differenza di comportamento nei materiali come il bitume è dovuta alla sensibilità che essi hanno rispetto alla velocità di applicazione dei carichi ed, in maniera altrettanto tangibile, alla temperatura alla quale essi lavorano. Quando i reologisti iniziarono gli studi sui materiali viscoelastici si resero rapidamente conto che le due caratteristiche descritte e cioè la tempo-dipendenza e la termo-dipendenza, risul-

tavano altresì tra loro fortemente interconnesse: in altre parole è possibile riscontrare il medesimo comportamento conducendo la misurazione per lunghi tempi ed a basse temperature, così come per brevi tempi ed alte temperature. È questo il noto "*Principio di Sovrapposizione Tempo Temperatura*" sul quale oggi ci si basa, come si vedrà, per la realizzazione di indagini reologiche di laboratorio e per l'analisi dei dati da esse ottenuti.

Si fornisce di seguito (**Fig. 1**), la descrizione del comportamento dei leganti bituminosi secondo la rappresentazione di F. Olard (2004) per la quale, a seconda dell'ampiezza della deformazione e della temperatura di prova per una data frequenza, si possono verificare diversi domini reologici per uno stesso materiale. La rappresentazione, seppur di carattere qualitativo, è utile per indivi- ➤

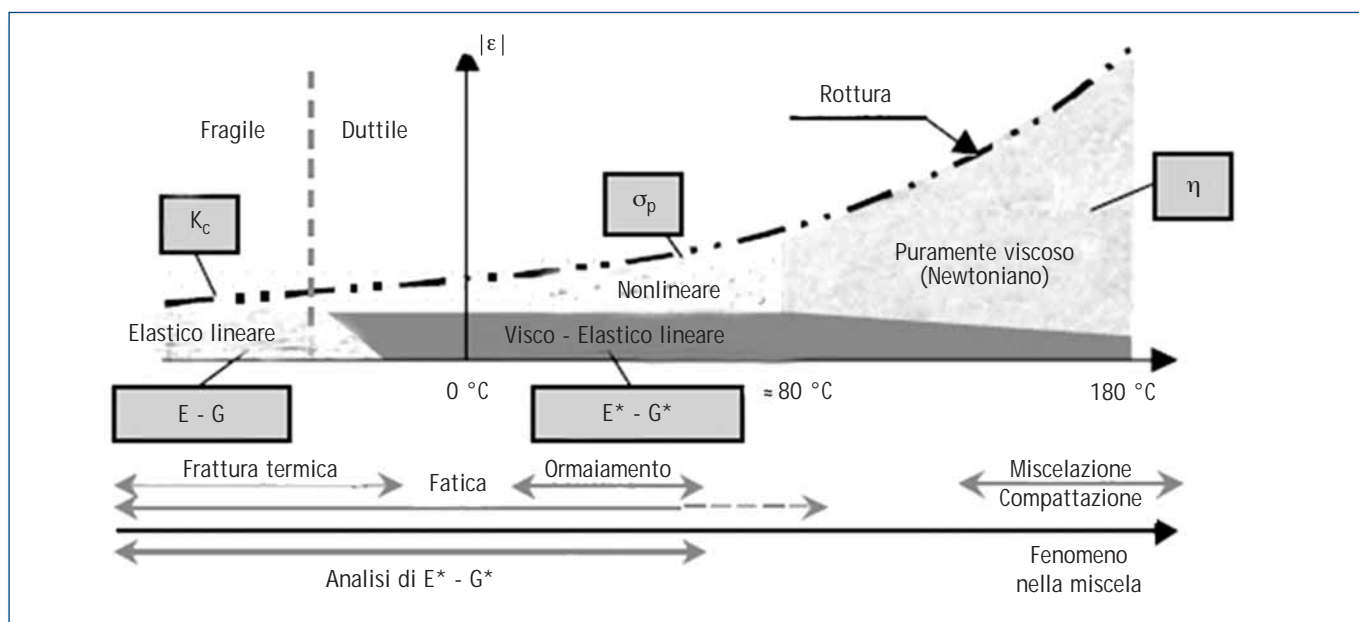


Fig. 1 Comportamenti tipici osservati sui bitumi al variare della temperatura e delle deformazioni specifiche

duare le varie nature del comportamento del bitume con riferimento alle condizioni di impiego in cui esso si trova. Diversi studi hanno evidenziato come i leganti bituminosi in generale, possano essere caratterizzati con riferimento al campo di Viscoelasticità Lineare (LVE) per il quale si riproducono le condizioni tipiche cui tali materiali sono sottoposti in opera, per effetto dei carichi di traffico e della temperatura. Per tale motivo la maggior parte dei modelli reologici che descrivono il comportamento dei leganti bituminosi si limitano alla caratterizzazione LVE, primo fra tutti il modello di D.Anderson et al. proposto nella metodologia Superpave e descritto in seguito.

2. Strumenti per la reologia: passato e presente

Le prove classiche

L'impiego di bitume nella costruzione di pavimentazioni risale ad oltre 2000 anni fa ed il sistema di progettazione e costruzione delle vie bitumate fino ai giorni nostri non ha mai necessitato di complessi modelli reologici essendosi basato, in genere, sull'esperienza e sulla sensibilità degli operatori nell'utilizzo di tali materiali. Da una quarantina d'anni a questa parte si è cer-

cato di svincolare dall'empirismo l'applicazione ingegneristica dei leganti bituminosi, affidandosi ad indagini di laboratorio convenzionali. Ecco che le determinazioni reologiche tradizionali per bitumi alle alte, basse e medie temperature sono impiegate ancora oggi nella maggior parte dei Capitolati da costruzione e le prescrizioni imposte sui valori di penetrazione, rammollimento e rottura fanno parte del linguaggio comune dei tecnici stradali.

Resta il fatto che l'entità dei carichi e del traffico cui le moderne pavimentazioni bituminose sono sottoposte sono in continuo aumento, così come inadeguate divengono le caratteristiche meccaniche dei tradizionali leganti bituminosi. Vi è oggi la necessità di costruire pavimentazioni con materiali avanzati che ne aumentino la resistenza al danneggiamento e la vita utile. La comparsa sul mercato di un gran numero di nuovi materiali a base bituminosa e con caratteristiche migliorate ha reso carente le classiche metodologie di caratterizzazione e le indicazioni prescrittive su di esse basate. Penetrazione, rammollimento e rottura non sono infatti in grado di misurare proprietà fisiche dei leganti che siano direttamente correlabili con la prestazione degli stessi in opera per mezzo di principi ingegneristici. La scelta del legante è sempre stata dettata dalla sensibi-

lità del progettista nei confronti di valori numerici di prova che, in base all'esperienza, potessero determinare comportamenti accettabili in esercizio e nel tempo.

Un nuovo approccio

Ciò che i reologisti stanno attualmente facendo è osservare i principali meccanismi di degrado della pavimentazione bituminosa per cercare di definire con esattezza le necessarie proprietà reologiche di un legante che sia adatto a contrastarli nelle condizioni di esercizio in cui si trova. Trattasi dell'approccio Prestazionale di progettazione, i cui indirizzi principali si basano sullo studio degli ormaia alle alte temperature, delle fessurazioni termiche per basse temperature e delle fessurazioni per fatica quali principali forme di degrado per gli strati legati a bitume.

La metodologia di indagine reologica proposta dal Superpave (SHRP) Americano si fonda proprio su quanto appena descritto ed abbandona l'approccio progettuale prescrittivo per i manifestati limiti che le prove tradizionali hanno nel descrivere il comportamento dei leganti bituminosi in opera nel range di condizioni possibili. Il nuovo metodo individua la prestazione che il legante deve avere in sito in base ai carichi ed alle temperature riscontrabili e richiede che siano soddisfatti precisi parametri correlati con la prestazione stessa. Inoltre, l'indagine sperimentale per la progettazione considera le variazioni di

consistenza che si manifestano nel bitume per effetto dei cosiddetti fenomeni di invecchiamento. La prestazione del legante viene dunque anche associata allo stadio di vita in cui esso si trova, a partire dalla miscelazione in impianto e per un certo numero di anni di esercizio.

La Reometria prestazionale moderna

La reologia odierna per la caratterizzazione prestazionale dei leganti bituminosi si basa dunque, sotto l'influsso statunitense, su una precisa gamma di apparecchiature di prova in grado di sollecitare i campioni bituminosi in un ampio intervallo di condizioni in termini di frequenze di carico e di temperature. L'affiancamento di prove di tipo simulativo per l'invecchiamento consente poi di tenere conto anche di questo fondamentale aspetto. Lo schema della figura sottostante correla le moderne apparecchiature Superpave alle prestazioni dei leganti in opera. Come si può osservare oltre al viscosimetro rotazionale (RV) per la valutazione della fluidità del legante per il trasporto ed il pompaggio in impianto, sono di primaria importanza i reometri rotazionali (DSR) e flessionali (BBR) i cui parametri di *output* sono direttamente correlabili con le prestazioni dello stesso legante in termini di resistenza all'ormaiamento ed alle fessurazioni termiche e per fatica. Vi è poi il dispositivo per la trazione diretta (DTT) che assieme al BBR caratterizza i leganti alle basse temperature (Fig. 2).

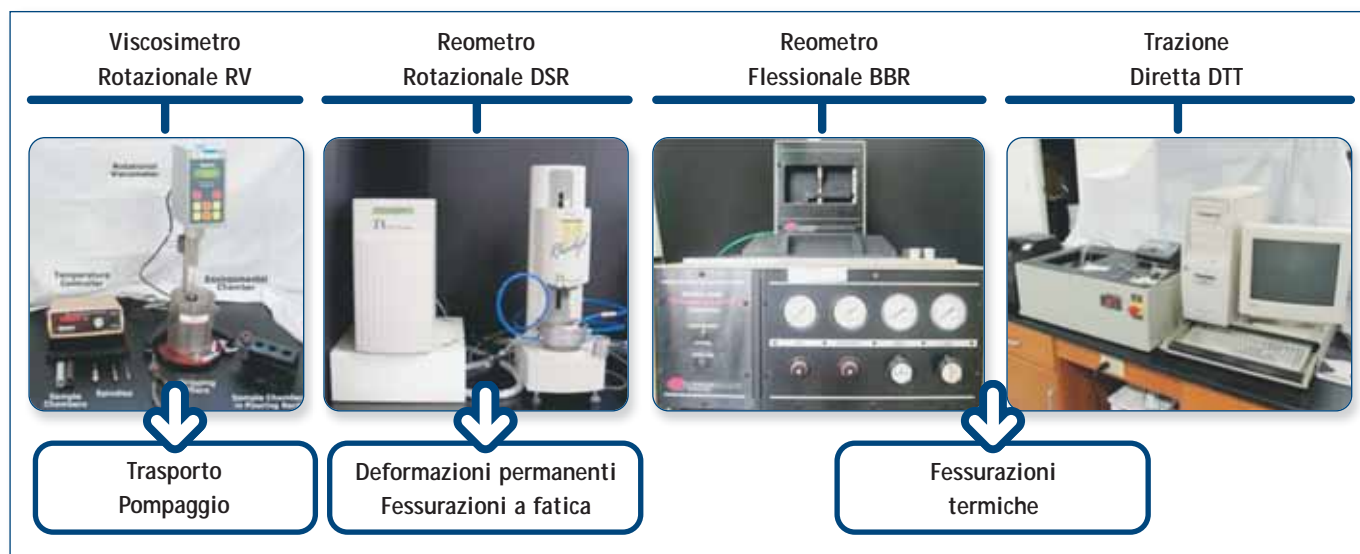


Fig. 2 Legame tra apparecchiature di prova e prestazioni dei leganti

Come detto, la scelta di tali apparecchiature di prova muove dalla semplice considerazione che i materiali viscoelastici, come i leganti bituminosi, necessitano di metodi di indagine che ne studino il comportamento in un ampio range di tempi e temperature. Tali metodi devono anche fornire in output parametri di facile interpretazione, oltre che di chiaro significato fisico per poter essere impiegati, come nel Superpave ad esempio, per il *Performance Grade* dei leganti. I tecnici statunitensi si sono pertanto affidati, con riferimento ai soli aspetti di degrado in opera, a determinazioni di laboratorio di tipo statico a carico costante con flessione su 3 punti (BBR) e ad analisi di tipo dinamico oscillatorio in controllo di tensione o di deformazione (DSR). L'opportunità di adottare due strumentazioni distinte per la caratterizzazione alle basse ed alle medio-alte temperature, è nata dall'entità dei valori di rigidità raggiunti nelle varie condizioni di prova e dalla necessità di scongiurare gli errori di misurazione occorsi per *machine compliance*.

3. La rappresentazione dei parametri reologici

TTSP, Master Curves e Black Diagrams

Come più volte accennato, le prove reometriche dinamiche (DSR) e di creep (BBR) possono essere condotte nel complesso, su un ampio range di frequenze e temperature investigando tutto il campo di condizioni di esercizio possibili per il legante. La rappresentazione e lettura delle grandezze viscoelastiche da esse desunte è agevolata dalla costruzione delle cosiddette *curve maestre* costituite da funzioni matematiche sperimentali che descrivano, per ciascun parametro, la sua dipendenza dal tempo e dalla temperatura. Per costruire tali curve si sfrutta il *Principio di Sovrapposizione Tempo-Temperatura* (TTSP) noto come principio di base della reologia dei leganti bituminosi e anche detto *Metodo delle Variabili Ridotte*. Esso consente, ad esempio, di ricondurre misure ef-

fettuate in un intervallo di frequenze e temperature diverse ad una sola temperatura di riferimento (in genere 0, 20 o 25 °C) tramite i noti *Shift Factors*, che traslano nel tempo (o nella frequenza) i valori ottenuti della grandezza di riferimento fino a creare, da più curve di prova, una unica *curva maestra*. L'entità della traslazione esprime il carattere termo-dipendente del materiale. La rappresentazione del valore applicato dello *Shift Factor* $a(T)$ per ciascuna curva dalla temperatura di prova a quella di riferimento, è generalmente associata alla *curva maestra* e fornisce una indicazione analitica di come le proprietà viscoelastiche del materiale bituminoso cambino al variare della temperatura.

La figura seguente mostra un esempio di curva maestra ottenuta dalla traslazione, secondo l'andamento degli *Shift Factors* associato, di curve di modulo complesso G^* dalla temperatura di prova a quella di riferimento. L'equazione riportata per il calcolo di $a(T)$ è quella proposta da Williams, Landel e Ferry (WLF-1955) in cui C_1 e C_2 sono coefficienti determinati empiricamente (Fig. 3). La comune gestione dei dati ottenuti da prove reometriche con DSR, ad esempio, vede la costruzione di *curve maestre* sia per il Modulo complesso G^* , sia per l'angolo di fase δ in funzione del logaritmo della frequenza di lavoro del reometro che, nei casi di analisi *frequency sweep* più completi, può spaziare dai 10^{-5} ai 10^5 radianti per secondo, mentre per le comuni analisi di routine comprende le frequenze tra i 10^{-2} ai 10^2 radianti per secondo.

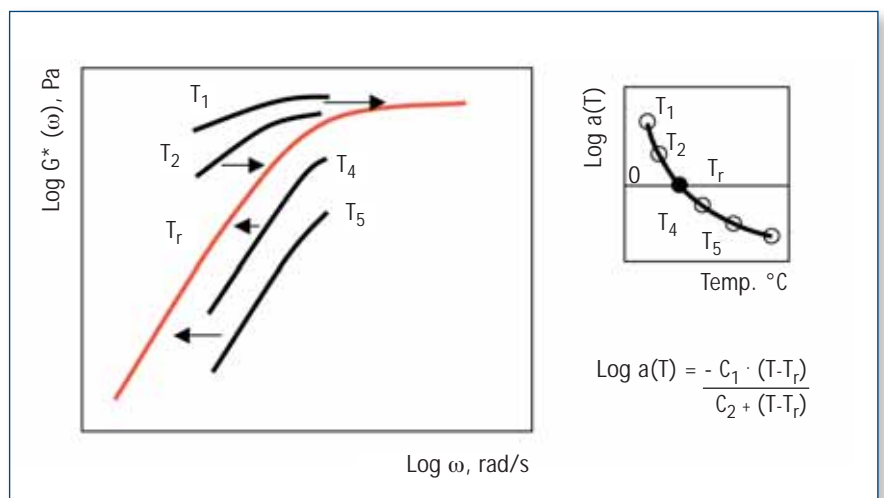


Fig. 3 Costruzione di una curva maestra per G^* e curva degli *Shift Factors*

Nella rappresentazione grafica della **Fig. 4** sono riportati esempi di curve maestre relativi al Modulo complesso G^* ed all'angolo di fase, quest'ultimo nel caso di un bitume puro e di uno modificato. Le curve riportate sono puramente qualitative e forniscono indicazioni circa i tipici andamenti dei parametri descritti.

In particolare, ad alte frequenze il modulo G^* raggiunge un valore prossimo ad 1 GPa identificato come Modulo complesso vetroso. Esso è visto da molti studiosi come una costante per i bitumi e corrisponde a circa un terzo del corrispondente modulo di rigidità ottenuto da prove di tipo estensionale, monoassiali o flessionali. A basse frequenze la pendenza della curva di G^* tende ad una pendenza costante e pari ad 1:1 il che corrisponde al raggiungimento della fluidità viscosa tipica del comportamento Newtoniano dei leganti bituminosi. A temperature intermedie il comportamento del bitume muta gradualmente da quello di un fluido semplice a quello di un solido vetroso. In corrispondenza di tale regione intermedia, approssimativamente centrata sull'intersezione degli asintoti Newtoniano e vetroso, la maggior parte della deformazione è di tipo elastico ritardato.

Per quanto riguarda l'angolo di fase occorre distinguere il comportamento assunto da un bitume puro da quello di un bitume modificato. Nel primo caso l'andamento della curva è marcatamente sinusoidale; l'angolo a basse frequenze è prossimo ai 90° , mentre ad

alte frequenze è quasi nullo. In corrispondenza della frequenza di intersezione degli asintoti Newtoniano e vetroso il valore di δ è pari approssimativamente a 45° . Diverso è il comportamento nel caso di un bitume modificato. La natura del materiale bituminoso è alterata dalle caratteristiche reologiche del polimero modificante che, soprattutto nel confronto alle basse frequenze, mostra le risorse elastiche in suo possesso.

Le rappresentazioni dei parametri reologici condotte tramite le descritte *master curves* corrispondono al tracciamento di curve isoterme ottenute da singole prove di tipo *frequency sweep*. Sempre sulla base del *TTSP* è possibile descrivere il comportamento dei leganti bituminosi tramite curve isocrone, per le quali cioè, si siano ottenute singole curve a frequenza costante in *temperature sweep*, poi traslate tramite *Shift factors*. In quest'ultimo caso, l'andamento tipico del modulo G^* , ad esempio, è decrescente con l'aumentare della temperatura e si riduce anche con la riduzione della frequenza di prova. Si possono pertanto ottenere moduli identici da prove a frequenze e temperature diverse. La rappresentazione isocrona dell'angolo di fase mostra appieno la natura viscosa dei leganti bituminosi per cui, oltre una certa temperatura e in campo certamente Newtoniano, i valori di δ tendono ai 90° indipendentemente dalla frequenza di prova adottata.

Vi è infine un tipo di rappresentazione dei parametri reologici che risulta scevra da indicazioni di frequenze e temperature di carico: trattasi dei cosiddetti *Black Diagrams*.

Questo tipo di grafici mostra l'andamento del modulo complesso G^* , ad esempio, in funzione dell'angolo di fase δ . Resta così agevole il confronto diretto di curve reometriche ottenute per materiali diversi sia nel campo delle basse temperature-alte frequenze, sia in quello delle alte temperature-basse frequenze. Le curve reometriche sul *Black Diagram*, tipicamente più frastagliate ed irregolari di quelle isoterme od isocrone da cui sono derivate, vedono il modulo complesso G^* di un bitume tradizionale diminuire all'aumentare dell'angolo di fase. Diversamente accade per i bitumi modificati, per i quali il ca-

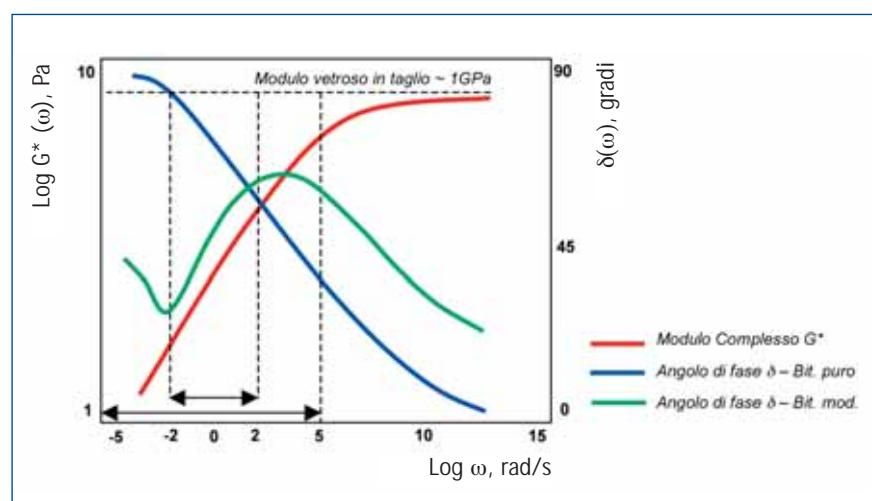


Fig. 4 Curve maestre per G^* e δ in funzione della frequenza ($\text{Log } \omega$)

rattere duplice della loro natura, genera andamenti delle curve marcatamente discontinui con tratti intermedi di *plateau* tipici della transizione dal comportamento governato dalla matrice bituminosa a quello della componente modificante.

Il modello LVE

Per rappresentare in termini di grandezze fondamentali la rigidità del bitume si fa riferimento ad un modello in funzione della velocità di applicazione del carico o della temperatura, il quale presuppone che i bitumi raggiungano un unico valore di rigidità (modulo vetroso) a temperature molto basse (o elevata velocità di applicazione del carico) e si comportino da fluidi Newtoniani alle alte temperature (o bassa velocità di applicazione del carico).

Trattasi del modello di Viscoelasticità Lineare del bitume (LVE) del Superpave citato in precedenza e per il quale si ammette che il legame tensione-deformazione sia lineare per una data temperatura ed un dato tempo di applicazione del carico.

Nel modello LVE del programma SHRP le *curve maestre* di riferimento sono quelle per il Modulo complesso tangenziale $G^*(\omega)$ e per l'angolo di fase $\delta(\omega)$. Da prove reometriche a varie frequenze di carico (*frequency sweep tests*) si ottengono curve traslabili tramite *shift factors* a formare la curva maestra alla temperatura di riferimento desiderata. Gli *shift factors* sono, come detto, espressi in funzione della temperatura e traducono la termodipendenza del bitume; la tempo-dipendenza, invece, si riflette nella forma e posizione della curva maestra.

Il modello LVE del programma SHRP è esprimibile attraverso le relazioni di tempo-dipendenza sotto riportate. La termodipendenza è invece legata alla curva di variazione degli *shift factors* ($\log \alpha(T)$) in funzione della temperatura. La Fig. 5 dà significato ai simboli.

Tale modello è adottabile in un ampio intervallo di temperature e frequenze ed è esten-

ditabile alla regione vetrosa. I simboli assumono il seguente significato:

- ▶ **G_g : Modulo vetroso**, è il valore a cui tendono il Modulo complesso G^* , quello di Immagazzinamento G' e di Rilassamento G'' alle basse temperature ed alte frequenze;
- ▶ **ω_c : Frequenza di crossover**, indica la frequenza per cui, alla temperatura di riferimento, $\tan(\delta) = 1$ e quindi $G' = G''$;
- ▶ **R: Indice reologico**, è pari alla differenza tra il Modulo vetroso G_g ed il modulo complesso $G(\omega_c)$ alla frequenza di crossover. Dal programma SHRP è emerso che tale indice è rappresentativo della tempo-dipendenza del bitume.
- ▶ **η_0 : Viscosità Dinamica**, è il parametro che esprime l'asintoto viscoso Newtoniano per alte temperature e basse frequenze di carico.

La teoria LVE descritta consente di fare uso di correlazioni matematiche tra i parametri caratteristici ricavati da prove di tipo diverso (ed in condizioni di carico diverse) così da modellare in modo più completo il comportamento del bitume su ampi intervalli di temperature e di frequenze di carico. Ad esempio, l'espressione $E^* = 3G^*$ consente di convertire il Modulo complesso tangenziale in Modulo complesso assiale, mentre grazie a Van der Poel è possibile esprimere il modulo complesso dinamico come $G^*(\omega) \sim 1/J(t)$ con $t = 1/\omega$, vale a dire che i valori di G^* si possono valutare come l'inverso della creep compliance al tempo t , per una frequenza pari a $1/t$.

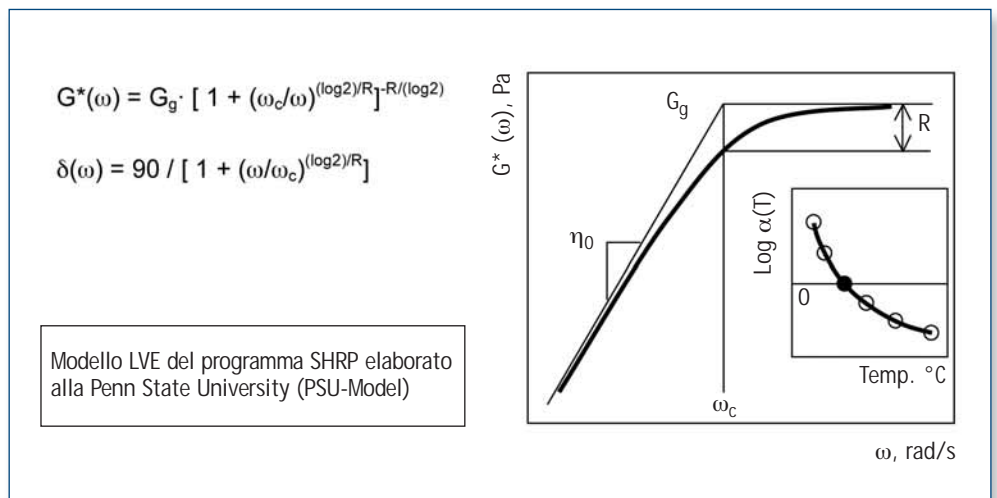


Fig. 5 Modello di viscoelasticità lineare (LVE) del programma SHRP

4. I limiti della reometria attuale

La maggior parte delle difficoltà insite nella caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi è diretta conseguenza dell'estrema variabilità comportamentale che li contraddistingue in relazione ai tempi di carico ed alle temperature di prova. La messa a punto di indagini di laboratorio con strumentazioni altamente sofisticate e sensibili reca con sé l'aleatorietà tipica delle determinazioni condotte sui materiali viscoelastici quali il bitume. Di fondamentale importanza per il miglioramento delle percentuali di ripetibilità e riproducibilità delle misure reometriche, sono certamente la conoscenza dei limiti delle apparecchiature ed il rispetto delle procedure di preparazione dei campioni di prova.

Pur se dotate di controlli elettronici automatici, le moderne apparecchiature reometriche presentano delle inevitabili limitazioni di impiego dovute, in primo luogo, al superamento delle risorse di indeformabilità e rigidità meccanica degli elementi che le costituiscono. Col termine di *machine compliance errors* si identificano gli errori di misurazione dovuti alla deformazione delle parti meccaniche del sistema nel momento in cui se ne superano i limiti di impiego. Ciò può essere dovuto a diverse cause, prima fra tutte l'eccessiva rigidità del campione bituminoso di prova se paragonata a quella delle parti meccaniche; basse temperature e alte frequenze favoriscono l'insorgere di tali problemi, soprattutto in relazione alla geometria di prova scelta, caratterizzata dalla forma e dalle dimensioni degli elementi a contatto col provino: un semplice esempio è la geometria di prova con DSR, ove la scelta del raggio dei piatti o del cono e della loro distanza reciproca condiziona fortemente le sollecitazioni applicabili al campione. Prove di confronto tra reometri diversi e configurazioni di prova diverse hanno mostrato come sia assai facile incorrere in errori di *machine compliance* per effetto di una scorretta scelta della geometria di prova. Tali errori, ad esempio, si riflettono sulla forma delle curve reologiche del modulo complesso e dell'angolo di fase sia che si tratti di curve isoterme, sia di isocrone. Diversi studiosi hanno individuato nei *Black Diagrams* le rappresentazioni reologiche più significative cui fare riferimento per la scelta della geometria di prova con DSR.

Altri autori hanno poi valutato l'affidabilità di misure reometriche condotte da un medesimo operatore con apparecchiature diverse, nel rispetto dei loro limiti e delle procedure di preparazione e di prova dei campioni. È stato dimostrato che anche piccole variazioni di peso delle parti meccaniche sollecitanti, possono indurre a significative differenze nelle determinazioni reologiche sui leganti bituminosi, suggerendo nel contempo la necessità di uniformare le calibrazioni degli strumenti in commercio e di favorire i round robin inter-laboratori. Uno degli aspetti più significativi nella realizzazione di indagini reometriche è certamente la procedura di preparazione del campione di prova ed, in particolare, il percorso termico da esso subito, soprattutto se costituito da un legante modificato. Diversi sono gli studi condotti in tal senso da ricercatori in tutto il mondo al fine di individuare, a scopi normativi, una procedura univoca che non infici la bontà dei risultati reometrici e che, al limite, riproduca l'effettiva storia termica del legante in opera. Si è visto che, non solo il modo di produrre e posizionare il materiale sullo strumento sono importanti, ma anche e soprattutto, la temperatura da esso raggiunta in tale fase. La natura macromolecolare del legante bituminoso comporta la rottura di legami chimici all'innalzamento della temperatura e la formazione o meno, di configurazioni strutturate o non strutturate durante il raffreddamento; ciò è esaltato dalla presenza di polimeri e dall'invecchiamento subito. In altre parole, ad esempio, per bitumi che mostrino una struttura reticolare povera, è emerso come lo scambio chimico tra bitume e polimero in fase di modifica dia luogo ad una strutturazione del campione che diviene così più sensibile alla storia termica cui è sottoposto e ciò è tanto più vero quanto più è cristallino il polimero.

Il fatto che le indagini reometriche attuali si basino su modelli rappresentativi di tipo viscoelastico lineare (LVE), limita le misurazioni a tale campo. È pertanto necessario individuare quando il limite del comportamento lineare del legante è raggiunto, per non eccedere nell'applicazione di tensioni e deformazioni. In pratica, si tratta di capire quanto ed a che velocità è possibile allungare il provino prima che esso non si comporti più in modo LVE. Gli studiosi SHRP, a tale proposito, hanno condotto una serie di misurazioni a deformazioni control- ➤

late crescenti in un range di temperature e frequenze prefissate. Il risultato è una serie di curve in cui il modulo complesso resta costante e pari ad un valore massimo al variare della deformazione imposta, fino ad un valore limite oltre il quale il modulo decresce. Si è osservato che una netta distinzione tra campo lineare e non lineare non è sempre individuabile e, pertanto, il limite di deformazione può essere convenzionalmente fissato nella riduzione dal 5% del modulo di immagazzinamento G' . Il limite di deformazione LVE aumenta con il crescere della temperatura e dell'angolo di fase. L'andamento in funzione del modulo complesso G^* è invece decrescente.

5. L'analisi reologica secondo i nuovi indirizzi europei: ZSV, LSV ed EVT

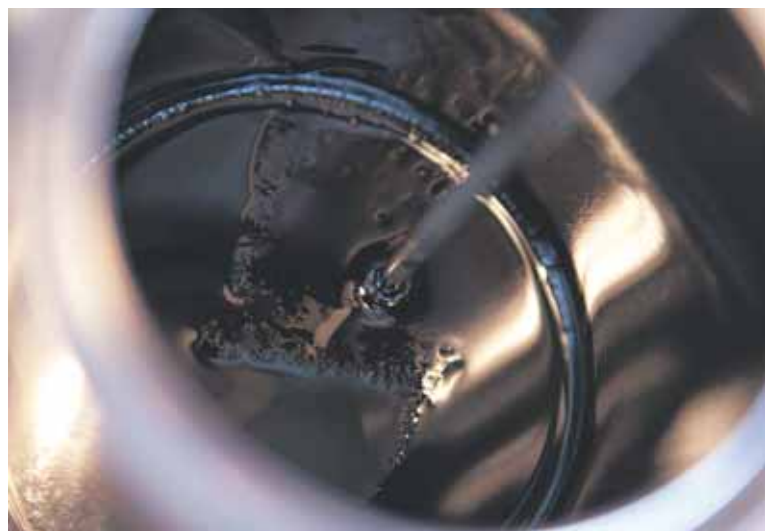
La sempre maggiore diffusione dei bitumi modificati nelle moderne costruzioni stradali ha messo in luce l'inadeguatezza dell'attuale sistema di caratterizzazione prestazionale dei leganti bituminosi. Esso, infatti, non rileva le reali proprietà dei bitumi modificati le cui qualità sono state effettivamente apprezzate solo nell'osservazione diretta in esercizio.

Per tali motivi il CEN dal 2002 ha avviato un programma di normazione europeo per migliorare le caratterizzazioni progettuali ed incrementare le prestazioni e la vita utile delle sovrastrutture stradali. Le caratteristiche tecniche prese in esame dal nuovo sistema europeo sono suddivise in tre categorie a seconda del campo di indagine cui si riferiscono e della strumentazione indicata per la caratterizzazione:

- ▶ *alte temperature* di esercizio tramite DSR;
- ▶ *basse temperature* di esercizio tramite BBR;
- ▶ *invecchiamento* tramite RTFOT e PAV.

A seguire si forniscono alcune delucidazioni in merito ai nuovi dettami normativi per la caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi alle *alte temperature* tramite Dynamic Shear Rheometer (DSR). In particolare, si considera il concetto di Zero Shear Viscosity (ZSV) quale parametro reologico in grado di definire le prestazioni dei leganti bituminosi, anche modificati, alle alte temperature di esercizio e nei confronti dei fenomeni di degrado delle pavimentazioni per deformazioni permanenti degli strati bituminosi.

Dal programma SHRP si è sempre riconosciuto come il contributo parziale del legante nei riguardi delle ormaie, fosse imputabile all'energia dissipata per scorrimento viscoso, identificata col fattore $G^*/\sin\delta$. Tale caratterizzazione prestazionale è risultata tuttavia carente nel caso dei leganti bituminosi modificati con polimeri, per i quali la misura di $G^*/\sin\delta$ non può essere sempre correlata all'accumulo di deformazioni irreversibili. Alcuni bitumi modificati hanno infatti un comportamento meccanico alle temperature di esercizio caratterizzato da un'importante *componente elastica ritardata della deformazione* che, in quanto tale, può essere recuperata pur non essendo in fase con la sollecitazione. Da quanto descritto è nato l'approccio reologico-prestazionale europeo basato sulla resistenza allo scorrimento del legante ed interpretata, come detto, in termini di viscosità. La viscosità considerata, detta appunto Zero Shear Viscosity (ZSV), è quella individuata all'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. Essa è misurabile a bassissime velocità di deformazione ($d\gamma/dt \rightarrow 0$), nell'ipotesi di flusso Newtoniano ed è indipendente dallo stato di sollecitazione esterno. In sostanza, la ZSV non risente dei fenomeni di elasticità ritardata che affliggono il $G^*/\sin\delta$, rappresentando univocamente, in linea teorica, la resistenza allo scorrimento irreversibile del legante.



La misura sperimentale della ZSV può essere affrontata attraverso due distinti approcci reometrici:

- ▶ il *creep flow* in condizioni statiche;
- ▶ l'analisi dinamica alle basse frequenze in condizioni oscillatorie.

L'approccio reologico di tipo statico per la determinazione della ZSV prevede l'imposizione di una sollecitazione di creep finalizzata all'instaurazione di una condizione di flusso stazionario nel bitume. La normativa impone di effettuare la misurazione a partire dal modulo di compliance ($J = \gamma/\tau$) rappresentativo della deformabilità del materiale in flusso stazionario ottenuto per un lungo tempo di carico e a temperatura costante. La ZSV risulta dalla variazione di J negli ultimi 15 minuti di prova dopo un periodo da 1 a 4 ore di sollecitazione costante:

$$ZSV = \Delta t/\Delta J = 900 / (J_f - J_{15}) \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}]$$

dove:

- ▶ J_{15} è il modulo di compliance [Pa^{-1}] rilevato a 900 secondi dal termine della prova;
- ▶ J_f è quello al termine della prova.

La prova secondo la Normativa Europea UNI CEN-TS 15325/2008 deve essere realizzata con una configurazione piatto-piatto di 25 mm e *gap* di 2 mm ad una temperatura fissa di 60 °C.

Essa si compone di due step. Nel primo step, opzionale, si attua una curva di flusso ottenendo informazioni circa la natura stessa del legante: in pratica si investiga l'eventuale comportamento non-Newtoniano tipico dei bitumi modificati (viscosità non costante al variare della tensione).

La determinazione vera e propria della ZSV avviene nel secondo step in cui il bitume è sollecitato con una tensione costante il cui valore è, a seconda dei bitumi, piccolo a tal punto da rientrare nella linearità del legame costitutivo delle condizioni di flusso: per i bitumi normali la norma fissa 50 Pa, mentre indica l'intervallo 10-50 Pa per i bitumi modificati. Anche il tempo di prova varia a seconda del tipo di bitume ed in genere è pari ad 1 ora per i bitumi normali e fino ad un massimo di 4 ore per i modificati.

La Fig. 6 mostra i tipici andamenti del-

le funzioni $J(t)$ e $\eta(t)$ per bitumi puri e modificati e l'intervallo di misurazione della ZSV pari a 900 secondi. Nel caso dei bitumi puri è facilmente raggiungibile la condizione di flusso stazionario individuata dall'andamento lineare del modulo di compliance; la viscosità è pressoché costante ed il suo valore corrisponde alla ZSV cercata.

Nel caso dei bitumi ad elevata modifica il valore della viscosità non si stabilizza e l'effettivo stato stazionario non è evidente (tratto a puntini). Per essi tuttavia, l'andamento di J è continuo e a pendenza costante all'interno dell'intervallo di calcolo, per tale motivo la ZSV risulta determinata univocamente con la formula citata per mezzo dei valori di J_{15} e J_{15} .

Da quanto descritto finora si comprende come la ZSV sia in grado di fornire utili indicazioni circa la natura ed il comportamento del legante bituminoso. Il valore stesso della ZSV è discriminante tra leganti puri e modificati e si dimostra anche sensibile all'entità della modifica stessa, divenendo così consistente nella correlazione tra i parametri reologici dei leganti e le prestazioni in opera. Essa traduce in termini numerici la resistenza allo scorrimento viscoso del legante che contrasta le deformazioni permanenti.

Il concetto di Zero Shear Viscosity è estendibile anche al campo dell'analisi reologica in regime oscillatorio dinamico facendo riferimento alla viscosità complessa η^* . Per definire la ZSV occorrono, al pari del caso statico, le condizioni di stazionarietà del flusso e di basse velocità di deformazione e, pertanto, i carichi sono applicati co-

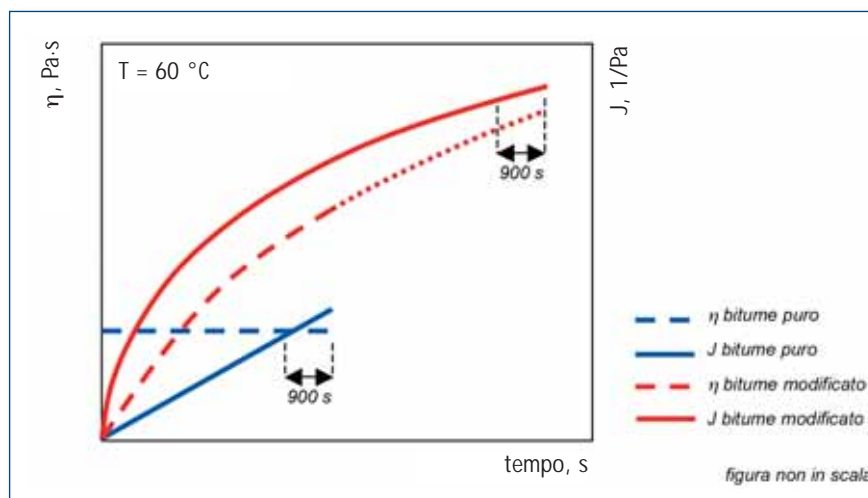


Fig. 6 Andamenti di Viscosità e Modulo di Compliance per leganti bituminosi

unque per un lungo tempo conducendo l'oscillazione a frequenze particolarmente basse. In tal maniera, la rigidità del materiale è unicamente riconducibile alla sola componente viscosa, divenendo trascurabile quella elastica ritardata. In pratica, per frequenze tendenti a zero il rapporto $|G^*|/\omega$ tende a $|G''|/\omega$ ovvero, essendo $|G''| \sim |G_V|$, tende a η_0 , ossia ZSV.

Essendo talvolta difficilmente praticabile la condizione di Zero Shear la normativa europea UNI CEN-TS 15324 indica nella Low Shear l'estensione del range Newtoniano del materiale per velocità di deformazione non effettivamente nulle. La Low Shear Viscosity (LSV) determinabile nel campo delle basse velocità di deformazione è una valida approssimazione della ZSV, indipendente dalla velocità di deformazione e dipendente solo dalla temperatura. In termini progettuali è quindi possibile stabilire un valore prestazionale di riferimento della LSV e misurare a quale temperatura ogni legante esibisce tale valore. Si tratta della Temperatura di Equiviscosità (EVT) ed è un parametro duale della LSV – e quindi della ZSV – in grado di definire una condizione alla quale materiali diversi offrono uno stesso livello di prestazione.

La procedura reometrica per il raggiungimento dinamico della LSV e la determinazione della EVT è piuttosto articolata e prevede diverse fasi, per prima, la determinazione del limite della regione a comportamento viscoelastico lineare del legante in modo da poter correttamente selezionare lo stato tenso-deformativo cui sollecitare il campione. Sulla base dell'approccio SHRP anche le norme europee stabiliscono il limite lineare in corrispondenza dell'ampiezza di deformazione che causa il decadimento del modulo di immagazzinamento G' al 95% del suo valore asintotico.

Selezionata la massima deformazione applicabile la procedura prevede l'esecuzione di una cosiddetta *temperature sweep* (fase 1) e di una *frequency sweep* (fase 2). Il fatto che il raggiungimento della Low-Shear possa richiedere molto tempo, infatti, impone la misurazione di EVT in due tempi. Nella prima fase la frequenza di oscillazione è costante e pari ad un valore prossimo a 10^{-2} Hz, mentre la temperatura varia su un campo di 20 °C scelto in funzione del tipo di bitume. Dalla curva isocrona della viscosità complessa η^* si individua la temperatura per la quale è raggiunto il valore convenzionale di 2 kPa·s e si determina univocamente la EVT1. Tale temperatura non

costituisce la EVT cercata in quanto ottenuta, in genere, fuori dalle condizioni di Low-Shear. Per tale motivo la EVT1 deve essere corretta tramite un ΔT calcolato per mezzo della seconda fase di prova eseguita in *frequency sweep* (da 1 a 0,003 Hz) che riporti le condizioni di prova in Low-Shear. Grazie al *TTSP* si può dunque correggere EVT1 con un ΔT che estenda la misura eseguita in un campo di frequenze più basse. Dalla curva isoterma η^* -*frequenza* condotta alla temperatura EVT1 si può calcolare per estrapolazione il valore della viscosità a 10^{-4} Hz ritenuto idoneo per rappresentare la Low-Shear ed il valore della viscosità corrispondente alla frequenza della fase 1 di *temperature sweep*. Con le seguenti espressioni è così possibile calcolare il ΔT di correzione e la EVT cercata:

$$\Delta T = \Delta \log \eta^* / a \qquad \text{EVT} = \text{EVT1} + \Delta T$$

con a coefficiente angolare della curva di *temperature sweep*.

Si può concludere che la misura della EVT fondata sulla determinazione della Low Shear Viscosity (LSV) in regime dinamico rappresenta un indice prestazionale sintetico espresso in unità fondamentali in grado di fornire indicazioni sia sulla natura del legante, sia sul suo comportamento in esercizio. A patto di definire un valore della viscosità di riferimento effettivamente correlabile all'ormaiamento, la EVT può rappresentare una temperatura indicativa per la selezione dei bitumi in condizioni di esercizio a prevalente clima caldo.

5. Conclusioni

Le esigenze del mondo infrastrutturale stradale in termini di prestazioni dei materiali costituenti divengono sempre più pressanti ed urgenti alla luce degli aspetti di sicurezza, economia ed ambiente connessi con l'esercizio viario. Lo sfruttamento di materiali vergini, lo scadimento funzionale delle pavimentazioni, la mancanza di manutenzione lasciano sempre più al progettista stradale il compito di scegliere con oculatezza i materiali con cui realizzare i conglomerati bituminosi, primo fra tutti il legante bituminoso.

Diventa così fondamentale per il tecnico poter correlare il risultati delle prove di laboratorio con le prestazio-

ni del materiale in opera. Per tale motivo, negli anni, la caratterizzazione dei bitumi è passata da pratica di cantiere a scienza di laboratorio: la reologia.

Conoscere il comportamento del materiale in relazione alle condizioni di temperatura e carico cui è sottoposto è oggi di grande importanza per la scelta progettuale. I risultati delle prove di caratterizzazione reologica, infatti, consentono concretamente di arrivare a parametri di progetto delle sovrastrutture che ne interpretino la resistenza nei riguardi dei più frequenti fenomeni di degrado in relazione al clima.

L'impianto normativo e le metodologie di indagine per i leganti bituminosi è in continua evoluzione, basti pensare che, a causa del diffuso impiego di bitumi modificati, alcune indicazioni SHRP circa i parametri prestazionali da valutare nei confronti dell'ormaiamento risultano già insufficienti a pochi anni dalla loro concezione. La Comunità Europea ha attualmente al vaglio una serie di nuove disposizioni normative con le quali, forte dell'esperienza americana, conta di trasformare l'approccio prescrittivo tradizionale in *performance-related*, facendo uso delle note strumentazioni SHRP.

Infine, occorre sottolineare come la caratterizzazione reologica prestazionale non possa prescindere dalle modifiche chimico-strutturali che intervengono nei leganti bituminosi in opera sotto l'azione del clima e del traffico. Le prove di invecchiamento simulato, spesso non conside-

rate importanti, sono ora alla base del quadro normativo europeo in quanto ci si è resi conto che molti degli errori progettuali passati erano dettati da caratterizzazioni reologiche condotte su bitumi nuovi, che non tenevano conto della variazione nel tempo della loro consistenza.

Bibliografia

- ▶ **Olard F., Di Benedetto H., Dony A., Vaniscote J.C.**, *Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics*, *Materials and Structures*, 38 (January-February 2005), pp. 121-126.
- ▶ **Anderson D. et al.**, *Binder Characterization and Evaluation*, Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Washington D.C. 1994.
- ▶ **Bocci M., Cardone F., Cerni G., Santagata E.**, *Rheological Characterization of the Fatigue Resistance of Asphalt Binders*, 10th International Conference on Asphalt Pavements, Québec City, Canada 12-17 August, 2006, Vol. I, pp. 506-516.
- ▶ **Merusi F.**, *Metodi reologici avanzati per l'analisi del comportamento dei bitumi stradali negli strati critici di esercizio*, Tesi di Dottorato - Tutore Prof. Ing. F. Giuliani, Parma 2009.
- ▶ **Montepara A., Giuliani F., Italia P.**, *L'analisi reologica dei bitumi stradali secondo i nuovi indirizzi europei: determinazione sperimentale della Zero Shear Viscosity*, *La Rassegna del Bitume*, No. 52/2006. ■

