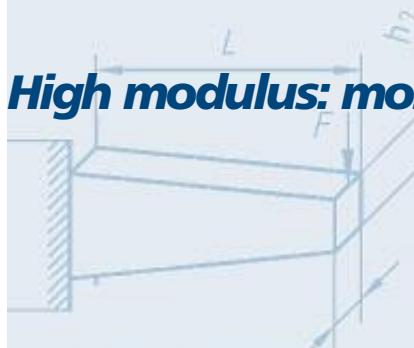


Alto modulo: un po' di chiarezza

High modulus: more clarity



MAURO MASCHIETTO

Consulente

FLAVIANO MERLO

Superbeton S.p.A.

Riassunto

I conglomerati bituminosi ad alto modulo si impongono ogni giorno di più come una scelta progettuale quasi obbligatoria per rispondere alle necessità poste dall'incremento esponenziale dei carichi che transitano sulle nostre strade. L'assenza di un Ente di riferimento tecnico e la conseguente mancanza di una interpretazione univoca del concetto di "alto modulo" fa sì che si stia creando, nel nostro Paese, un po' di confusione, a volte anche artefatta, su tutto l'argomento. Uno sguardo al passato e al percorso fatto all'estero nonché una lettura della Norma UNI EN 12697-26, per la caratterizzazione dei test dinamici, possono offrire uno strumento utile per una migliore comprensione, anche in chiave critica, delle esperienze italiane passate e presenti.

Summary

The planned use of asphalt concrete at high modulus became nowadays even more necessary in order to support the constant increase of cargos on our streets.

In our Country there is at present some confusion on this matter, due to the lack of a referential authority, as well as of an unambiguous interpretation of the concept of "high modulus".

A look at the past and at the international experiences, as well as the analysis of the UNI EN 12697-26, may offer an useful means for a suitable understanding of both present and previous Italian experiences, taking also into consideration the critical viewpoint.

1. Introduzione

Negli ultimi anni il traffico veicolare sulle autostrade italiane ha subito un'impennata dovuta ad un incremento del mercato delle merci (apertura ai Paesi dell'Est) ed alla carenze, ormai croniche, delle infrastrutture che supportano il traffico locale. Basti semplicemente ricordare che negli ultimi 20 anni esso è complessivamente aumentato a seguito di un aumento di +151%, relativamente al traffico commerciale e di un +98% del traffico passeggeri. Questo ha prodotto la necessità di riconsiderare la gestione della manutenzione delle pavimentazioni stradali sia dal punto di vista tecnico (necessità di trovare soluzioni più presta-

zionali per consentire intervalli maggiori di manutenzione) sia dal punto di vista della gestione (cantieri più rapidi per avere minori effetti di disturbo sul traffico). Lo stesso utente, oggi più cosciente ed esigente, e gli organi di informazione, sempre molto attenti alle problematiche relative alla viabilità stradale, hanno imposto queste necessarie riflessioni. Quindi, i tecnici del settore sono stati sempre più coinvolti nella riformulazione di quella che, al giorno d'oggi, possa rispondere alla definizione di sovrastruttura stradale ideale. Sostanzialmente essa dovrà rispondere ai seguenti requisiti:

► **strutturali**: elevatissima capacità portante, quindi in grado di supportare non solo il ripetersi delle solle- ►

citazioni indotte dal traffico attuale ma, soprattutto, dai volumi di traffico previsti per il futuro;

- ▶ **funzionali:** caratteristiche delegate allo strato di rotolamento e che sostanzialmente trovano la propria ragione in un'offerta di confort e sicurezza per l'utente.

In questo scenario si introduce, almeno in Italia, la messa a punto del conglomerato ad alto modulo. Esso nasce sostanzialmente per dare una risposta alla prima necessità: a parità di condizioni di posa, condizioni ambientali esterne e tipo di carico applicato, una pavimentazione caratterizzata da un alto modulo di rigidità trasferisce sul sottofondo i carichi di compressione su un'area più ampia e con un'intensità minore rispetto ad una pavimentazione caratterizzata da un basso modulo di rigidità. Quest'ultima, infatti, non avendo una buona distribuzione dei carichi, causa una compressione sul sottofondo più concentrata, per cui gli sforzi di tensione tendendo a concentrarsi in aree ristrette causano fenomeni di ormaio o di fessurazione negli strati superficiali e che portano a rottura lo strato di sottofondo.

Di ciò tratteremo nell'articolo, cercando di suggerire un'interpretazione univoca del concetto di conglomerato bituminoso ad alto modulo per il quale attualmente ci sembra manchino alcuni presupposti di chiarezza.

2. I moduli di un conglomerato

Il conglomerato bituminoso è un materiale eterogeneo il cui comportamento è, in analogia con il legante che lo compone, dipendente da temperatura e velocità di applicazione del carico.

Ne consegue che la risposta meccanica di un conglomerato bituminoso all'applicazione di un carico è in parte elastica ed in parte viscosa con comportamenti, sotto l'azione di carichi ripetuti, che danno luogo a deformazioni reversibili (deformazioni elastiche e di tipo visco-elastico) ed irreversibili (deformazioni di tipo visco-plastico e plastiche).

È quindi possibile, pur se i conglomerati bituminosi non hanno comportamento elastico, ricondurre il loro comportamento a quello di un materiale elastico, considerando solo la deformazione recuperabile.

All'interno di un conglomerato bituminoso si instaurano due tipi di rapporto tensione-deformazione riconducibili al tipo di sollecitazione applicata ed alle temperature esistenti.

Al fine di descrivere il comportamento dei materiali attraverso leggi e relazioni è necessario definire i parametri che regolano le variazioni delle deformazioni in funzione delle tensioni applicate. A tale scopo viene introdotto il concetto di modulo come coefficiente che lega le tensioni con le deformazioni secondo una determinata legge. Nel caso dei conglomerati bituminosi si possono definire due tipi di modulo, a seconda del tipo di carico applicato: il modulo statico ed il modulo dinamico. Normalmente si usa definire modulo statico il modulo ricavato da prove sui conglomerati bituminosi con applicazioni del carico costanti nel tempo, e, modulo dinamico, quello caratteristico del comportamento del materiale sotto condizioni di carico dinamiche.

Quest'ultimo, pur nella complessità della sua realizzazione, meglio si adegua a descrivere la risposta del materiale alle sollecitazioni.

A questa tipologia si possono ricondurre i vari tipi di modulo in uso:

- ▶ modulo complesso;
- ▶ modulo di rigidità;
- ▶ modulo resiliente.

Il modulo complesso

Le difficoltà di caratterizzare le reali condizioni di sollecitazione e di simulare il comportamento del conglomerato in esercizio hanno portato all'individuazione, nel cosiddetto modulo complesso, del parametro più idoneo a sintetizzare il comportamento visco-elastico dei conglomerati bituminosi.

Il modulo complesso descrive il comportamento di un materiale visco-elastico sottoposto ad una sollecitazione variabile con legge sinusoidale alla quale corrisponde una deformazione di pari frequenza ma sfasata rispetto alla sollecitazione a causa della viscosità del bitume.

Il modulo complesso è quindi un numero complesso in cui la parte reale esprime la rigidità elastica correlata al lavoro reversibile compiuto (modulo di restituzione); la parte immaginaria rappresenta il comportamento viscoso e riassume il lavoro irreversibile (modulo di dissipazione) (**Fig. 1**).

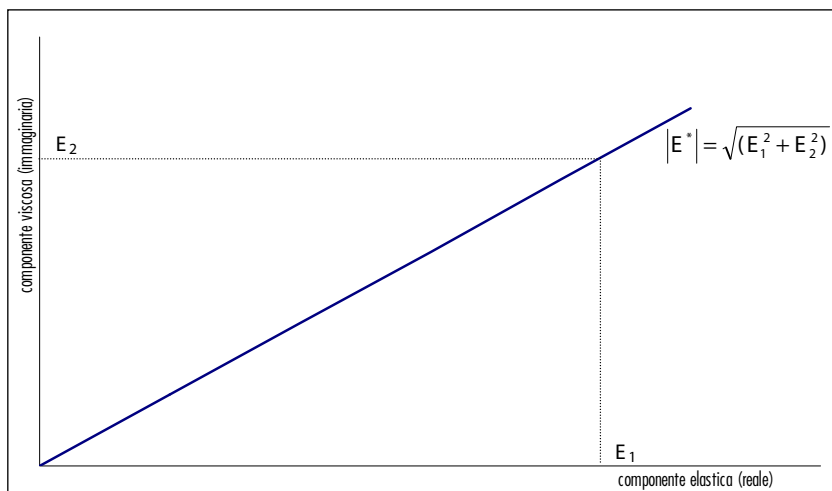


Fig. 1 La componente elastica e la componente viscosa del modulo complesso

Pertanto il modulo complesso può essere rappresentato, in accordo con quanto espresso dalla Norma UNI EN 12697-26, dalla seguente equazione:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E_1 + iE_2$$

Il modulo di rigidezza

Il modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso caratterizza la capacità di una miscela di deformarsi in conseguenza delle tensioni dovute all'applicazione di un carico ed è il parametro che meglio definisce il comportamento meccanico e reologico dei conglomerati bituminosi. Esso viene espresso sempre secondo la Norma UNI EN 12697-26 come il valore assoluto del modulo complesso:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{(E_r^2 + E_d^2)}$$

Il modulo resiliente

Unitamente al modulo complesso, il modulo resiliente costituisce all'interno delle procedure definite dal progetto SHRP, uno dei parametri rappresentativi delle prestazioni del conglomerato bituminoso. Entrambi descrivono il comportamento del materiale sotto l'azione del traffico ma, mentre il modulo complesso viene determinato considerando la sollecitazione di compressione indotta dal pneumatico nel materiale,

immediatamente sottostante, il modulo resiliente si ottiene analizzando la sollecitazione di trazione indotta dalla coesione interna nel materiale immediatamente adiacente a quello sottoposto a compressione. Il modulo resiliente di un materiale è definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione recuperabile (o resiliente) a seguito della rimozione dello sforzo stesso ed è definito dal rapporto:

$$M_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_r}$$

3. La misura del modulo di rigidezza

Come già accennato la Norma UNI EN 12697-26 "Miscelate bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Rigidezza" si occupa di descrivere le formule e le procedure di prova per la determinazione del modulo di rigidezza.

Negli allegati si forniscono le specifiche relative ai metodi di prova, suddivise in base al tipo di prova ed alla forma del provino (Fig. 2):

- ▶ Allegato A: test di flessione su 2 appoggi per provini trapezoidali (2PB-TR) o a sezione prismatica (2PB-PR);
- ▶ Allegato B: test di flessione su 3 e su 4 appoggi per provini a sezione prismatica;
- ▶ Allegato C: test di trazione indiretta su provini cilindrici (IT-CY);
- ▶ Allegato D: test di trazione-compressione diretta assiale su provini cilindrici (DTC-CY).

Di queste, la tipologia più diffusa in Italia è quella a trazione indiretta - ITSM [che fa riferimento all'allegato C] (Fig. 3) la quale offre alcuni vantaggi:

- ▶ il provino è sottoposto ad uno stato tensionale biasiale che meglio rappresenta le condizioni reali rispetto ai test di flessione;
- ▶ il modulo di rigidezza si ottiene, a meno di un fattore di forma, dal rapporto tra tensione e deformazione;
- ▶ non è una prova distruttiva: il provino rimane disponibile per eventuali altre prove quali fatica, creep ecc.;
- ▶ si possono utilizzare provini anche di piccolo diametro. ▶▶

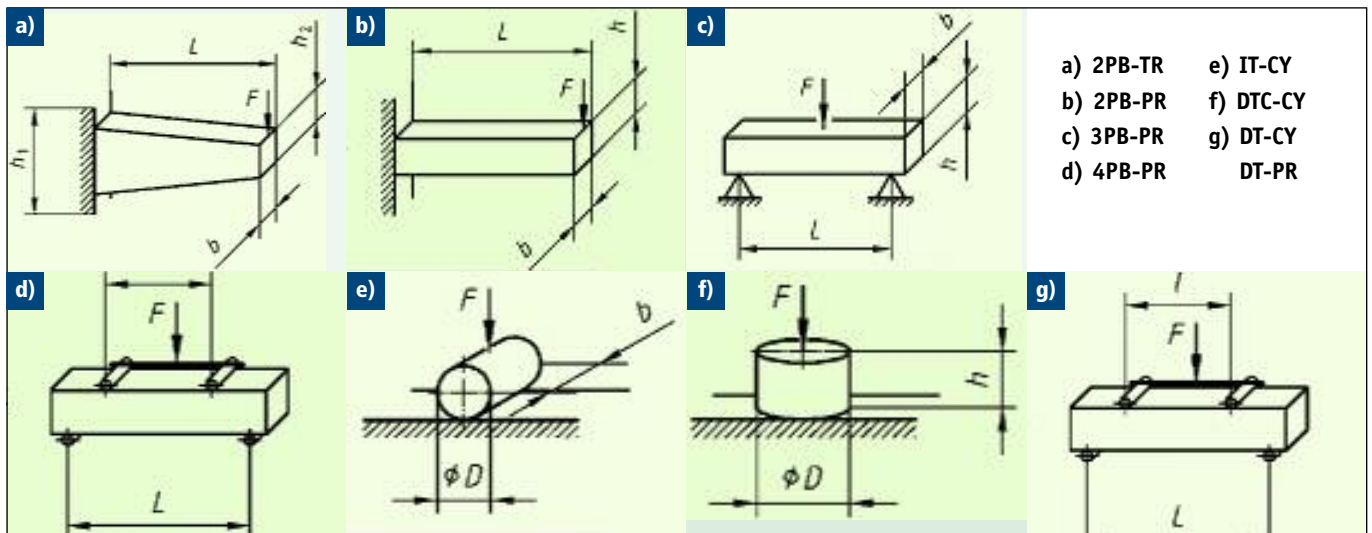
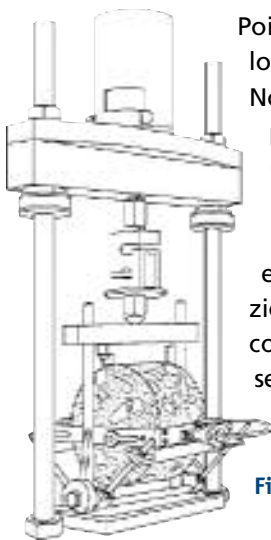


Fig. 2 Configurazioni di prova previste negli allegati alla EN 12697-26



Poiché la determinazione del modulo è suscettibile alla temperatura, la Norma raccomanda di eseguire la prova, per verifiche *standard*, ad una delle seguenti temperature +2 °C, +10 °C, +20 °C, considerato che a temperature più elevate si possono avere deformazioni eccessive fino a raggiungere il collasso del provino. La prassi sembra orientare la temperatura di prova verso +20 °C ± 0,5 °C.

Fig. 3 Apparato per la prova di trazione indiretta

4. Il conglomerato ad alto modulo in Europa

Lo sviluppo significativo nell'applicazione dei bitumi duri, di penetrazione inferiore a 25 dmm, ha portato nel corso degli ultimi 20 anni in Francia alla nascita ed allo sviluppo di nuovi materiali stradali standardizzati sotto il nome di "enrobé à module élevé" (EME) per l'uso in strati di base e di "béton bitumineux à module élevé" (BBME) per strati di base ed usura. L'idea che sta alla base della progettazione di queste miscele è l'utilizzo, in percentuali elevate (attorno al

6%), di un bitume molto duro tale da conferire al conglomerato un modulo elevato che, a parità di spessore dello strato, consenta di ridurre le sollecitazioni trasmesse al sottofondo.

La ricchezza del contenuto di legante permette, altresì, di migliorare gli effetti della compattazione e della resistenza a fatica.

Le Norme AFNOR NF P 98-140 del 1992 e la successiva versione del 1999 prevedono due classi di conglomerati ad alto modulo:

- ▶ EME 2: corrispondente alla prima generazione di questi materiali (e descritto poc'anzi);
- ▶ EME 1: introdotta in tempi successivi (1988) in essa veniva ridotta la percentuale di bitume (4,5÷5%) con una composizione più vicina ad uno strato di base tradizionale utilizzando un bitume duro. A causa della sua scarsa durabilità e resistenza a fatica il suo utilizzo è limitato a strati sormontanti fondazioni e sottofondi di buona portanza ai quali garantisce il vantaggio di una scarsa suscettibilità all'ormaiamento.

Per entrambi gli strati, il modulo complesso, a temperatura T=15 °C e ad una frequenza di carico di 10 Hz richiesto dalla Normativa, risulta di 14000 MPa, variando per essi solo la percentuale di vuoti richiesta e compresa tra 7 e 10% per l'EME 1 e tra 3 e 6% per EME 2.

Nella **Tab. 1** sono rappresentate le principali richieste poste a carico dei conglomerati ad alto modulo dalla normativa.

Tab. 1 Requisiti del conglomerato ad alto modulo

	EME 1	EME 2
Modulo di ricchezza del legante	≥ 2,5	≥ 3,4
Resistenza all'ormaiamento (60 °C, 30.000 cicli)	" 7,5%	
Modulo di rigidità (15 °C, 10 Hz)	14.000 MPa	
Resistenza a fatica ϵ_6 (10^{-6}) (15 °C, 25 Hz)	≥ 100	≥ 130

L'uso dei conglomerati bituminosi ad alto modulo in Spagna è databile agli inizi degli anni '90 ma si rifà alle stesse formulazioni messe a punto dai francesi. Nel corso degli anni si è diffuso come *standard* nelle applicazioni di risanamento e rinforzo.

5. La situazione in Italia

L'assenza di un preciso punto di riferimento tecnico e normativo in grado di indirizzare gli sforzi verso un obiettivo comune (quale LCPC in Francia, CEDEX in Spagna) ha prodotto in Italia, anche per i conglomerati ad alto modulo, un iniziale ritardo rispetto agli altri Paesi europei nonché una confusione dettata soprattutto dal personalismo di ogni intuizione.

Inizialmente le spinte maggiori sono venute dai settori tecnici dei produttori di bitume d'oltralpe, i quali, forti della loro preparazione ed estrazione culturale e sull'onda dei nuovi metodi di valutazione importati dalla tecnologia statunitense legata al progetto SHRP, contribuirono ad individuare nel modulo complesso del bitume il parametro responsabile delle miglie apportabili ai conglomerati con esso confezionati.

Questo, se pur parzialmente vero in quanto costituisce condizione necessaria ma non sufficiente, contribuì a spostare il tiro da un parametro oggettivo e strutturale dato dal modulo del conglomerato ad uno molto più variabile e soggetto a scelte e logiche di mercato. Per meglio comprendere la stortura è come immaginare di elevare i coefficiente di aderenza con il semplice utilizzo di pietrisco porfirico: può andar bene ma non basta (forma ed appiattimento, Los Angeles e CLA possono aiutare a meglio caratterizzare il materiale da impegnare).

In effetti si poté assistere, grazie anche all'apparire in quei tempi dei primi leganti modificati, ad applicazioni di conglomerati a base di bitumi modificati con EMA (A24 Roma-L'Aquila), con EVA (tangenziale est e Corso Garibaldi a Padova) e valutazioni con utilizzo di bitumi SBS. Di buono in tutto questo fiorire di sperimentazioni ci fu il fatto di eseguire inconsapevolmente una scelta importante quale quella di sostituire il bitume tal quale con un più idoneo legante modificato, questo avrebbe permesso di dar luogo ad una via italiana dell'alto modulo.

A metà degli anni '90 presso i laboratori del Centro Ricerche Stradali di Palmanova si sceglieva di intraprendere una strada basata sullo sviluppo delle prestazioni, individuando nelle caratteristiche elastiche legate al modulo del conglomerato, il parametro principale da ottimizzare.

Poiché, come abbiamo visto, il modulo di rigidità di un conglomerato è dato dal rapporto tra l'ampiezza della tensione applicata rispetto alla deformazione corrispondente, valori elevati si possono ottenere (semplificando il ragionamento) in due modi:

- ▶ diminuendo la deformazione a sollecitazione costante;
- ▶ aumentando la sollecitazione a deformazione costante.

Nel primo caso si avrà un conglomerato con comportamento rigido, nel quale le caratteristiche di modulo sono offerte soprattutto dagli attriti interni (conglomerato tipo EME 1); nel secondo caso si avrà un conglomerato più elastico ed in grado di meglio adattarsi alle sollecitazioni dinamiche imposte dai carichi veicolari (conglomerato tipo EME 2).

Un conglomerato, inoltre, sarà tanto più durevole quanto maggiore sarà la sua capacità di restituire la deformazione e quindi quanto maggiore sarà la componente elastica del suo modulo. Infatti anche in questo caso è possibile ottenere i medesimi risultati con diversi valori delle componenti elastica (reale) e viscosa (immaginaria) del modulo del conglomerato (tutti gli infiniti vettori che individuano l'arco di cerchio di raggio $|E^*|$ ed angolo $\phi=90^\circ$).

Da tutto ciò consegue che un conglomerato ad alto modulo si può "costruire" in tanti modi i quali non possono e non devono avere come unico obiettivo il raggiungimento del semplice valore del modulo di rigidità, in

tal caso basterà abbondare in utilizzo di fessato ed essere parchi in quantità di legante; esso dovrà avere come primo obiettivo la capacità di ridurre le tensioni trasmesse agli strati inferiori senza fessurarsi (eccesso di rigidità) né deformarsi (eccesso di plasticità) garantendo un aumento significativo della vita utile della sovrastruttura. Sulla base di questi ragionamenti si operarono le seguenti scelte per l'inizio della sperimentazione e delle prove di laboratorio per la definizione del conglomerato bituminoso ad alto modulo che permettesse di ottenere le migliori prestazioni meccaniche possibili:

- ▶ percentuali di legante superiori al 5,5%;
- ▶ percentuali di vuoti inferiori al 4%;
- ▶ uso di leganti modificati ad alta viscosità derivati dalla modifica complessa di bitumi di distillazione diretta a bassa penetrazione e tale da incrementare l'intervallo di elasticità del conglomerato;
- ▶ valori di modulo elastico di almeno 8000 MPa alla temperatura di 20 °C ed alla frequenza di 10 Hz.

Venne, quindi, individuata una granulometria di riferimento ricca in parti finissime allo scopo di stabilizzare l'alta percentuale di bitume attraverso l'aumento della superficie specifica delle particelle, in questo modo si sarebbe ottenuta anche una maggior quantità di malta bituminosa di rivestimento degli aggregati.

La qualità di questa malta sarebbe, poi, stata fondamentale, nel permettere gli scorrimenti elastici del conglomerato e pertanto andava ottimizzata attraverso l'uso di un legante estremamente selezionato il quale avrebbe dovuto conferire alla malta una rigidità tale da non permettere fenomeni plastici della miscela e nello stesso tempo un'adeguata elasticità per impedire situazioni di rottura a fatica e favorire i fenomeni di autoriparazione del conglomerato.

La scelta fu indirizzata su un legante costituito da un bitume di base a bassa penetrazione (pen. 20/30) modificato

con una miscela di polimeri termoplastici atti a conferire al legante finale una più elevata suscettibilità termica, ed una migliore adesività. Le varie mescole di prova furono ottimizzate attraverso l'uso di una pressa universale di tipo ITSM in grado di sottoporre i provini tanto a prove di modulo quanto a prove di creep e fatica.

I migliori risultati a cui si pervenne furono ottenuti usando la curva granulometrica successivamente illustrata (**Fig. 2**) ed utilizzando un legante modificato dalle seguenti caratteristiche (**Tab. 2**):

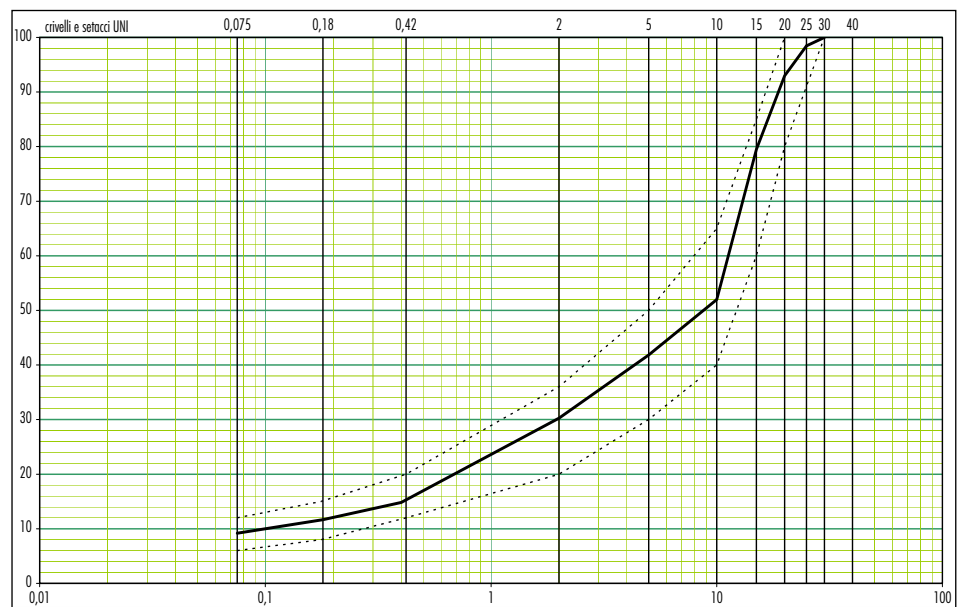


Fig. 2 Curva ottimale del conglomerato ad alto modulo

Tab. 2 Caratteristiche del legante

Penetrazione a 25 °C	26 dmm
Punto di rammollimento P.A.	93 °C
Viscosità a 100 °C	175 Pa x s
Viscosità a 160 °C	0,89 Pa x s
Stabilità allo stoccaggio a caldo (Tuben Test)	1 °C

Le misure di modulo di rigidità dettero luogo ai seguenti risultati (**Tab. 3**):

Tab. 3 Relazione Temperatura/Frequenza dei moduli complessi

temperatura di prova/frequenza	1 Hz	10 Hz
10° C	8500 ÷ 9500 Mpa	11500 ÷ 12500 Mpa
20° C	4000 ÷ 5000 Mpa	7500 ÷ 8500 Mpa
30° C	2500 ÷ 3500 Mpa	5500 ÷ 6500 Mpa

La bontà del lavoro svolto era quindi confermata dai dati di laboratorio e successivamente dalle applicazioni sul campo, che inizialmente avvennero lungo l'Autostrada A4 Venezia-Trieste.

Successivi affinamenti e miglioramenti delle caratteristiche del legante portarono ad ottenere moduli a 20 °C e 10 Hz di frequenza dell'ordine di 10.000÷12.000 Mpa. Campioni di conglomerato per strato di binder provenienti dalla costruzione del Passante Autostradale di Mestre sottoposti alla determinazione del modulo di rigidità mediante prova IT-CY alla temperatura di 20 °C hanno fornito valori attorno ad 11.000 MPa.

Ad oggi questo tipo di conglomerato sempre nella stessa versione è diventato di uso ed accezione comune presso i maggiori Enti concessionari stradali del Nord Est quali: Autovie Venete, Autostrada Venezia-Padova, Veneto Strade ed ANAS sulla rete stradale delle quali grava un traffico particolarmente pesante, sia in termini di assi che di frequenza di carico.

In tempi più recenti ulteriori sperimentazioni e realizzazioni hanno portato ad abbinare il conglomerato bituminoso ad alto modulo con reti metalliche per risolvere particolari esigenze di portanza (es. la terza corsia dinamica della Tangenziale di Mestre) e ad introdurre nella miscela fibre di vetro per contrastare con maggiore efficacia le deformazioni plastiche che in determinate condizioni legate alla ripetizione di carichi pesanti ad elevata frequenza (treni di carichi).

6. Conclusioni

Purtroppo come già accennato precedentemente l'Italia brilla a livello internazionale per la totale assenza dai consessi e dalle commissioni che articolano norme e formano raccomandazioni nel campo della costruzione e manutenzione stradale. Il risultato è un processo normativo insufficiente, subito e non partecipato e del

quale se ne avvantaggiano tutte quelle componenti che preferiscono l'assenza dei controlli sulla loro attività.

Quindi molto spesso ci si ritrova a disquisire su argomenti e tecniche utilizzando parametri assolutamente incongruenti tra di loro allo scopo di affermare, più che una valenza tecnica, una superiorità commerciale. È anche il caso del conglomerato ad alto modulo.

Vale la pena, quindi di ricordare che i fattori che influenzano in maniera significativa il modulo di rigidità sono:

- ▶ la temperatura;
- ▶ la frequenza;
- ▶ l'ampiezza della tensione;
- ▶ la consistenza ed il modulo del bitume.

Si osservi che, fra tutti questi fattori, la temperatura del provino è il più importante in quanto una sua piccola variazione modifica notevolmente il modulo di rigidità come illustrato nel grafico sottostante (**Fig. 3**).

Il modulo di rigidità è invece meno sensibile alla frequenza di carico, particolarmente nell'intervallo 0,1 a 10 Hz (tipico del carico del traffico).

Nell'immediato futuro sarà opportuno concentrare l'attenzione sui concetti espressi dalla norma EN12697-26, relativamente alla rigidità dei conglomerati bituminosi, anche in considerazione della possibile valenza che potrebbero avere all'interno del processo di realizza-

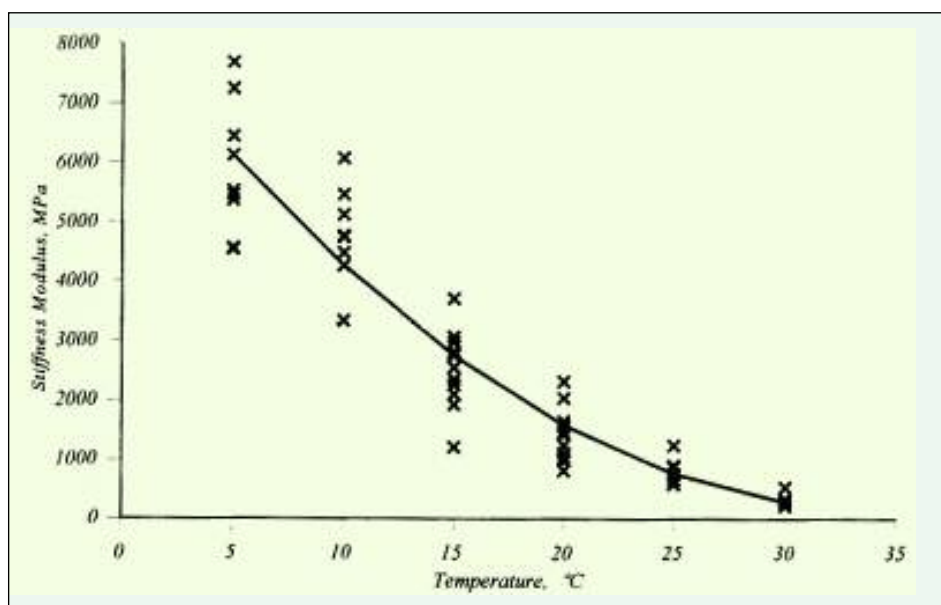


Fig. 3 Relazione Modulo/Temperatura

zione della marcatura CE dei conglomerati bituminosi. Inoltre l'uso del conglomerato ad alto modulo bene si accoppia al concetto di pavimentazione perpetua che molta considerazione raccoglie attorno a sé negli Stati Uniti, verso il quale ci si dovrà orientare anche in Italia nel rispetto della conservazione delle risorse naturali e degli investimenti effettuati attraverso un aumento della vita utile della pavimentazione, nonché della riduzione delle manutenzioni.

ramento delle caratteristiche di portanza delle pavimentazioni stradali - Giornata di studio su "Applicazioni dei bitumi modificati per la viabilità ordinaria" - Garda, 10 ottobre 1997

- ▶ A. Madella - *Pavimentazioni stradali ad alto modulo complesso* - Le Strade 9/94
- ▶ F. Bizzarri, V. Pataria - *Semirigida è meglio*, Le Strade 9/96
- ▶ APA Asphalt Pavement Alliance - *Perpetual Pavements - A Synthesis* - APA 101 (2002) ■

7. Bibliografia

- ▶ UNI EN 2697-26:2004 - *Miscela bituminosa - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 26: Rigidezza*
- ▶ A. Montepara, G. Tebaldi, A. Costa - *Caratterizzazione prestazionale del conglomerato bituminoso mediante il modulo resiliente* - XIII Convegno Nazionale S.I.I.V. - Padova - 30/31 ottobre 2003
- ▶ F. Picariello, S. Tattolo - *La caratterizzazione dei conglomerati bituminosi mediante i moduli dinamici*, Strade & Autostrade 6/2006
- ▶ Y. Brosseau - *Les enrobés à module élevé: bilan de l'expérience de française et transfert de technologie* - Revue générale des routes et des aérodromes, 854/2006
- ▶ J. F. Corté - *Development and uses of hard-grade asphalt and of high-modulus asphalt mixes in France* - Transportation Research Board TRB: Circular No. 503 - Dicembre 2001
- ▶ M. Pasetto - *Contributo dei bitumi ad alto modulo complesso al miglio-*

