



**INDAGINE SULL'INFLUENZA DELLE  
PROPRIETÀ REOLOGICHE DEL LEGANTE  
SUL COMPORTAMENTO MECCANICO  
DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO**

**Gianluca Cerni**

Istituto di Strade e Trasporti - Università degli Studi di Ancona  
Via Brezze Bianche, 60131 Ancona  
Tel: +39 071.2204780 - Fax: +39.071.2204510  
E-mail: strade2@popcsi.unian.it  
E-mail: cerni@libero.it

# INDAGINE SULL'INFLUENZA DELLE PROPRIETÀ REOLOGICHE DEL LEGANTE SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO

GIANLUCA CERNI – Istituto di Strade e Trasporti – Università di Ancona

## SOMMARIO

Viene presentata un'indagine sperimentale volta al confronto fra la reologia del legante e quella del conglomerato bituminoso. Mediante l'impiego di un reometro rotazionale e di una pressa elettro-idraulica sono stati determinati, per varie condizioni di prova, i valori di modulo complesso e di angolo di fase di differenti materiali. L'analisi statistica dei dati ha permesso di ricavare utili espressioni che dimostrano in modo inconfutabile lo stretto legame esistente fra la reologia del legante e il comportamento meccanico delle miscele bituminose.

## ABSTRACT

An experimental research is presented, aimed to compare the binder rheology with that of the asphalt concrete. By means of a rotational rheometer and an electro-hydraulic press, the values of the complex modulus and phase angle of various materials, under different testing conditions, have been determined. The statistical analysis of the data allowed to obtain useful expressions which show, in an irrefutable way, the close connection existing between the binder rheology and the mechanical behaviour of the bituminous mixes.

## 1. INTRODUZIONE

Nel dimensionamento delle pavimentazioni flessibili va sempre più diffondendosi l'impiego dei metodi razionali. L'approccio razionale di calcolo permette di progettare una pavimentazione in relazione ai principali dissesti che essa può subire nel tempo, come il danno a fatica e l'ormaiamento.

L'impiego di tali metodi di calcolo presuppone però la conoscenza dei parametri meccanici delle miscele bituminose, ottenibili in laboratorio sottoponendo il materiale a condizioni il più possibili simili a quelle indotte dai carichi di traffico. L'esecuzione dei test suddetti richiede tuttavia l'impiego di apparecchiature piuttosto complesse e costose, spesso assenti nei laboratori.

Il comportamento meccanico delle miscele bituminose, spesso descritto dal valore del modulo complesso, dipende principalmente da due gruppi di variabili, relativi a

- le condizioni di prova
- la composizione delle miscele.

Al *primo gruppo* appartengono la temperatura di prova e la frequenza di applicazione del carico, parametri che incidono notevolmente sulle variazioni del modulo complesso (fino a due ordini grandezza per variazioni di temperatura comprese fra  $-10$  e  $40^{\circ}\text{C}$ ). Anche variazioni nell'intensità del carico possono produrre cambiamenti del modulo complesso se viene superato il dominio di comportamento lineare delle miscele.

Nel *secondo gruppo* vanno annoverati il tipo ed il contenuto di bitume, la quantità di filler, il tipo di aggregati e il contenuto di vuoti. Generalmente esiste una relazione diretta fra la rigidità del bitume impiegato e quella del conglomerato. Il contenuto di bitume non influisce invece in modo monotono sul modulo complesso, dal momento che si è normalmente riscontrata una crescita della rigidità all'aumentare della percentuale di bitume, a partire da valori piccoli di quest'ultima, ed una decrescita superato un valore ottimale di quantità di bitume.

Se il bitume è presente in quantità non piccole, aumentando il contenuto di filler si produce un miglioramento delle caratteristiche del conglomerato in quanto aumenta lo spessore del mastice che avvolge i granuli. La natura mineralogica e la forma degli aggregati sembrano avere una influenza modesta sulle prestazioni delle miscele, almeno quando il legante è sufficientemente rigido; ovviamente per temperature superiori a 50°C, diventando inefficiente la matrice legante, acquista importanza lo scheletro litico nel comportamento meccanico del conglomerato.

Infine un contenuto di vuoti crescente produce una riduzione nella rigidità delle miscele.

## **2. SCOPO DELLA RICERCA**

In letteratura sono presenti diversi studi effettuati con il proposito di correlare le proprietà reologiche del legante con quelle della miscela [1 ÷ 7]. Tale interesse nasce anche dal fatto che, come accennato sopra, le prove per la determinazione del modulo complesso della miscela sono piuttosto dispendiose ed assume quindi rilievo la ricerca di relazioni in grado di stimare tale parametro sulla base di altre grandezze, con un grado di approssimazione sufficiente al dimensionamento delle pavimentazioni.

In un primo approccio al problema si sono ricavate delle relazioni basate sulla composizione della miscela a partire da un tipo di bitume e costanti condizioni di prova (temperatura e frequenza).

Altre relazioni invece si basano sulla conoscenza del comportamento reologico del bitume impiegato, dipendente, come noto, non solo dal tipo di legante, ma anche dalle condizioni di prova.

La presente sperimentazione vuole approfondire tali studi, anche con l'intento di trovare le condizioni più atte ad evidenziare, ed eventualmente migliorare, le relazioni fra le proprietà reologiche del legante e quelle del conglomerato.

In particolare, dato che la resistenza a trazione delle miscele, fondamentale nei fenomeni di rottura delle pavimentazioni, è affidata quasi esclusivamente al legante, si è deciso di studiare il comportamento del conglomerato in condizioni dinamiche di trazione. In effetti, nelle prove dinamiche a compressione viene ingaggiata anche la resistenza dello scheletro litico, pertanto in queste condizioni risulterebbe difficile trovare e separare il contributo dovuto al legante.

Infine nello studio delle proprietà reologiche del legante si è considerato non solo il bitume tal quale, ma anche il mastice filler+bitume, essendo quest'ultimo il vero responsabile dell'unione degli aggregati.

Sulla base degli scopi suesposti il programma sperimentale è stato definito in due distinte fasi, volte ad indagare separatamente il comportamento reologico del conglomerato e quello del legante presente all'interno della miscela.

### **3. PRIMA FASE SPERIMENTALE: STUDIO DEL COMPORTAMENTO REOLOGICO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO**

#### **3.1. Preparazione dei provini**

Le miscele di conglomerato studiate sono state ottenute combinando aggregati e due tipi di bitume aventi penetrazione diversa (40/50 e 80/100).

In particolare è stata impiegata una curva granulometrica degli aggregati tipica per strati di usura, composta da elementi basaltici e calcarei rispettivamente per pezzature superiori ed inferiori a 5 mm.

Le percentuali di bitume impiegate sono state del 4, 5 e 6% rispetto al peso dell'aggregato

Per un corretto e confrontabile confezionamento dei provini, le operazioni di miscelazione e compattazione degli impasti sono state standardizzate operando alle temperature di equiviscosità (corrispondenti rispettivamente alle viscosità di 0.17 Pa•s e 0.28 Pa•s).

Per il costipamento delle miscele è stata impiegata la pressa a taglio giratoria. Si tratta di un'apparecchiatura che consente di preparare in laboratorio dei campioni cilindrici di conglomerato bituminoso aventi caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in situ mediante la compattazione effettuata dai rulli di cantiere. In particolare sono stati realizzati provini di altezza 73.3 mm e di diametro 100 mm, inserendo nelle fustelle quantità diverse di materiale in modo da realizzare due tenori diversi di vuoti (4 e 7%).

In tal modo si sono ottenute dodici diverse tipologie di provini dalla combinazione di 2 tipi di bitume, 3 percentuali di legante e 2 tenori in vuoti differenti.

#### **3.2. Esecuzione delle prove**

Per la determinazione delle caratteristiche meccaniche del conglomerato è stata impiegata una pressa elettro-idraulica capace di applicare al provino carichi di trazione o di compressione in maniera statica o dinamica.

Nella presente sperimentazione sono stati applicati carichi monoassiali di trazione, avendo preventivamente incollato le teste di carico alle facce del provino mediante una resina epossidica.

Sono state imposte le seguenti condizioni di prova:

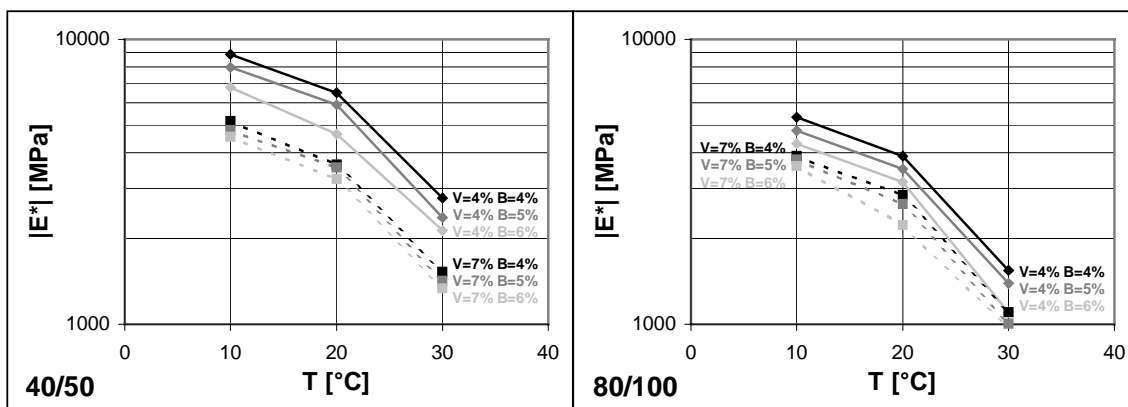
- 9 frequenze (10.00, 6.81, 4.64, 3.16, 2.15, 1.47, 1.00, 0.681, 0.464 Hz);
- 3 temperature (10, 20 e 30°C).

La prova è stata eseguita imponendo al materiale una serie di onde di carico sinusoidali di trazione per un tempo di 45 secondi. Il carico applicato è stato scelto per ogni condizione tale da produrre deformazioni inferiori a  $10^{-4}$ , in modo da rimanere approssimativamente all'interno del campo lineare di risposta meccanica delle miscele.

Dall'elaborazione dei valori di deformazione misurati con due estensimetri, incollati sulla superficie laterale del provino in posizione diametralmente opposta, si sono potuti ottenere i valori di modulo complesso e angolo di fase per ogni condizione imposta.

#### **3.3. Risultati della sperimentazione**

In figura 1 si possono osservare due grafici in cui sono riportati i valori medi del modulo complesso a trazione (relativi a due provini) in funzione della temperatura, ottenuti sui conglomerati confezionati con i due tipi di bitume e sottoposti ad una frequenza di carico di 1.47 Hz (prossima a quella presa come riferimento dallo SHRP).



**Figura 1 – Andamento del modulo complesso a trazione ( $f=1.47$  Hz) in funzione della temperatura, per i conglomerati confezionati con i bitumi 40/50 e 80/100**

Nella figura si evidenziano diversi comportamenti del materiale al variare dei parametri investigati:

- innanzitutto, come noto, un aumento di temperatura provoca una riduzione consistente del modulo complesso, dovuta certamente alla diminuzione di rigidità del legante;
- sia i vuoti che la percentuale di bitume producono gli stessi effetti: un loro aumento riduce la rigidità del conglomerato; le motivazioni possono consistere nel fatto che aumentando i vuoti la struttura è meno compatta e quindi più deformabile; quest'ultimo effetto si ha anche all'aumentare del bitume, che rappresenta l'elemento deformabile della miscela (ovviamente quando esso è presente in quantità superiore a quella necessaria a ricoprire e tenere uniti gli aggregati).

Infine, come noto in letteratura, un aumento (o una riduzione) della frequenza di carico ha comportato in tutte le miscele un incremento (o una diminuzione) del modulo complesso.

## **4. SECONDA FASE SPERIMENTALE: STUDIO DEL COMPORTAMENTO REOLOGICO DEL LEGANTE**

### **4.1. Preparazione dei campioni di prova**

L'indagine reologica condotta sui leganti ha preso in considerazione non solo i due bitumi tal quali, ma anche i vari mastici (filler+bitume) presenti all'interno delle miscele di conglomerato. La scelta di studiare i mastici è avvenuta sulla base del fatto che la resistenza a trazione del conglomerato, dipendente soprattutto dall'unione degli aggregati, è affidata al legante che riveste i singoli granuli, cioè l'insieme filler+bitume.

A tal proposito va ricordato che nelle miscele di conglomerato è stata impiegata una curva granulometrica fissa, quindi una precisa percentuale di filler (4.5% rispetto al peso agli aggregati), e tre percentuali di bitume (4, 5 e 6% rispetto al peso degli aggregati). Quindi per ogni tipo di bitume sono stati preparati anche tre mastici differenti fra loro per il diverso rapporto filler/bitume (1.125, 0.90 e 0.75).

In definitiva sono stati preparati otto leganti da sottoporre alle prove: due bitumi tal quali e sei mastici ottenuti dalla combinazione di due tipi di bitume e tre differenti rapporti filler/bitume. I leganti sono stati indicati nei successivi grafici con le seguenti sigle B 40/50, M 40/50-1.12, M 40/50-0.90, M 40/50-0.75, B 80/100, M 80/100-1.12, M 80/100-0.90 e M 80/100-0.75.

## 4.2. Esecuzione delle prove

Le proprietà reologiche dei leganti sono state rilevate per mezzo di un Dynamic Shear Rheometer impiegato in una configurazione piatto-piatto. In particolare il materiale è stato sottoposto a sforzi di taglio sinusoidali di intensità tale da non far superare il limite di comportamento lineare (preventivamente determinato con prove apposite).

Al fine di confrontare i valori di modulo conseguiti nella prima fase sperimentale con quelli di modulo complesso a taglio ottenuti con il DSR, in questa seconda fase si sono adottate le stesse condizioni di temperatura e frequenza di carico imposte nella prima.

## 4.3. Risultati della sperimentazione

In figura 2 vengono mostrati due grafici in cui, in analogia con la figura 1, sono riportati i valori medi del modulo complesso a taglio in funzione della temperatura ottenuti sugli otto leganti analizzati alla frequenza di 1.47 Hz.

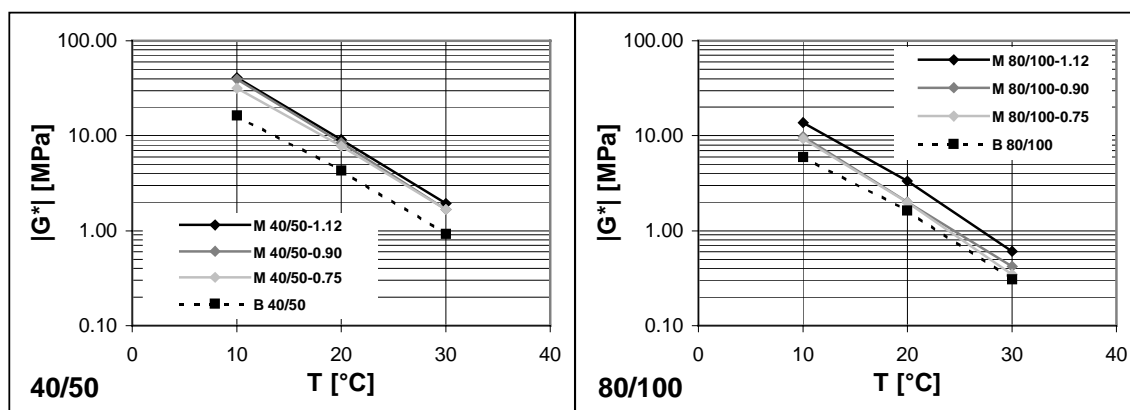


Figura 2 - Andamento del modulo complesso a taglio ( $f=1.47$  Hz) in funzione della temperatura per i leganti (bitumi e mastici)

In essi è possibile osservare la nota riduzione del modulo dei leganti all'aumentare della temperatura.

Un'ulteriore esame della figura mette in evidenza come la rigidezza dei mastici risulti sempre superiore a quella del bitume tal quale di provenienza. Inoltre per gli stessi mastici è riscontrabile una tendenza all'aumento del modulo al crescere del rapporto filler/bitume.

I risultati sono facilmente interpretabili in quanto l'aumento di modulo prodotto dall'introduzione del filler è sicuramente imputabile alla natura più rigida di quest'ultimo rispetto a quella del bitume.

Anche in questa seconda fase dell'indagine la frequenza di carico ha prodotto sul materiale gli stessi effetti evidenziati nella prima fase.

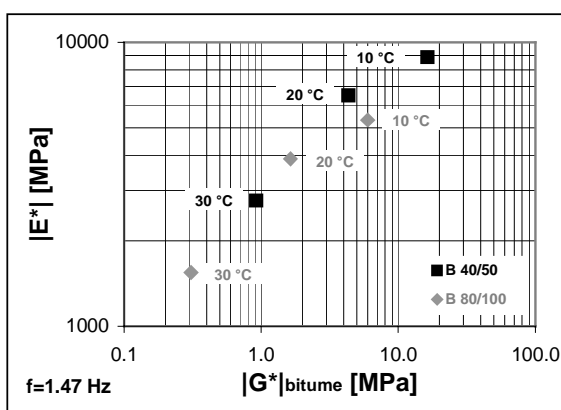
## 5. CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI NELLE DUE FASI

Le osservazioni più interessanti che si possono trarre in questo studio sono quelle che derivano dal confronto dei risultati sperimentali ottenuti nelle due fasi.

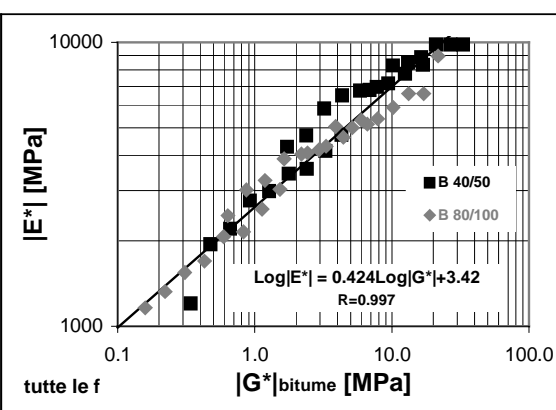
Come si evince da entrambe le figure 1 e 2, la temperatura gioca lo stesso ruolo nel conglomerato e nel legante, quindi in un primo momento si è pensato di mettere a confronto i due moduli complessi, sebbene diversi in quanto rilevati in condizioni di trazione e di taglio, ottenuti a temperature diverse. In particolare in figura 3 sono

riportati i valori di modulo ottenuti sui bitumi 40/50 e 80/100 e sui rispettivi conglomerati confezionati con il 4% di vuoti e il 4% di bitume. Sebbene i dati non siano numerosi, la figura sembra mostrare l'esistenza di una relazione fra i due moduli complessi messi a confronto, legame che deriva da un intuibile e coerente concetto: una variazione di temperatura induce un cambiamento di rigidità del bitume che a sua volta si riflette in una modificazione del comportamento meccanico del conglomerato.

Inoltre, considerando che anche la frequenza agisce su entrambi i moduli nello stesso modo, (in particolare ad un aumento della frequenza corrisponde un incremento di rigidità in ambedue i materiali), si sono voluti introdurre nel confronto i dati ottenuti a tutte le frequenze di prova (vedi figura 4). L'esame della figura indica chiaramente una tendenza univoca, a prescindere dal tipo di legante utilizzato, fra il modulo complesso del legante e quello del conglomerato, per una data composizione di quest'ultimo. In particolare la relazione risulta circa di tipo lineare in un piano bilogarithmico, come già riscontrato in altri studi [2]. In figura 4 è riportata la linea di tendenza fra le due variabili e la sua espressione algebrica.



**Figura 3 – Confronto dei moduli complessi a taglio dei bitumi e trazione dei conglomerati confezionati con il 4% di bitume e 4% di vuoti**



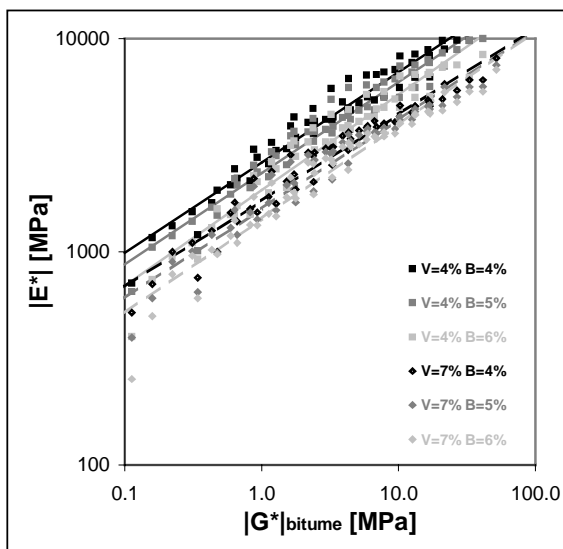
**Figura 4 – Relazione fra i moduli complessi a taglio dei bitumi e trazione dei conglomerati confezionati con il 4% di bitume e 4% di vuoti**

L'elevato coefficiente di correlazione indica una relazione forte fra i moduli complessi, pur tenendo presente che l'espressione è valida per una data composizione del conglomerato.

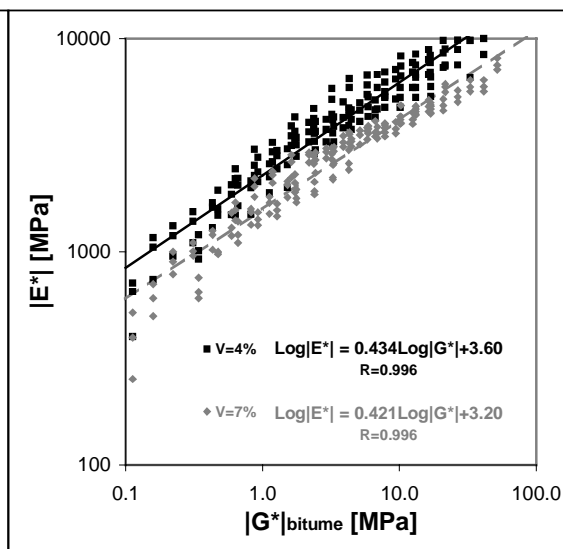
Per verificare l'influenza della composizione della miscela sulla relazione fra le due variabili ( $|G^*|$  e  $|E^*|$ ), in figura 5 sono stati riportati tutti i dati ottenuti per le varie percentuali di bitume e di vuoti indagate. Come era prevedibile, le rette di regressione risultano differenti, in particolare traslate verso il basso, in quanto per uno stesso bitume, cioè per un dato  $|G^*|$ , si ottengono valori di  $|E^*|$  via via decrescenti all'aumentare della percentuale di bitume e di vuoti.

Da un attento esame è però possibile evidenziare che i dati sono raggruppabili in due terne abbastanza distinte, come in figura 1, riferite alle due percentuali di vuoti (4 e 7%). Tale asserzione risulta più evidente dall'osservazione della figura 6, nella quale sono riportati i due gruppi di dati e le relative regressioni. Le due equazioni mostrano chiaramente che il legame fra il modulo complesso a taglio del bitume e quello del conglomerato è indipendente non solo dal tipo di bitume, dalla temperatura e dalla frequenza di carico, ma approssimativamente anche dal quantitativo di bitume

impiegato nella miscela. L'errore commesso è minimo, come si evince dagli elevati coefficienti di correlazione ottenuti dalla regressione dei due gruppi di dati riferiti alle due percentuali di vuoti.



**Figura 5 – Confronto dei moduli complessi a taglio dei bitumi e trazione dei conglomerati confezionati con varie percentuali di bitumi e vuoti**



**Figura 6 – Relazione fra i moduli complessi a taglio dei bitumi e trazione dei conglomerati confezionati con il 4 e 7% di vuoti**

Ovviamente è possibile effettuare anche una regressione estesa a tutti i dati in modo da esprimere il legame fra i due moduli complessi per mezzo di un'unica relazione indipendente da tutti i parametri oggetto di studio. L'analisi statistica ha fornito la seguente espressione:

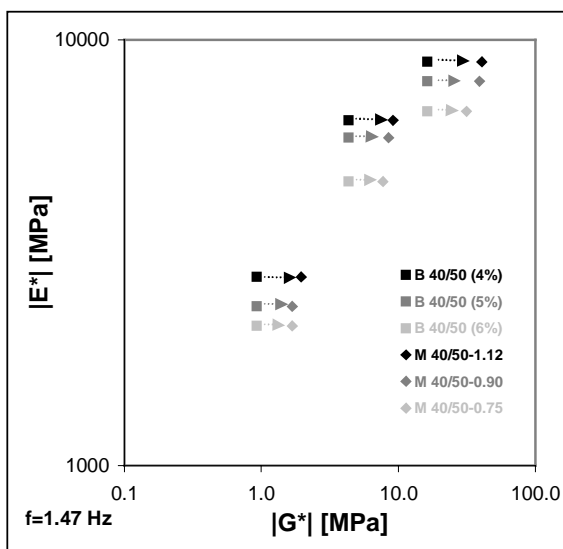
$$\log |E^*| = 0.427 \log |G^*|_{\text{bitume}} + 3.28 \quad (1)$$

chiaramente con un coefficiente di correlazione lievemente minore (0.992) rispetto alle altre due regressioni.

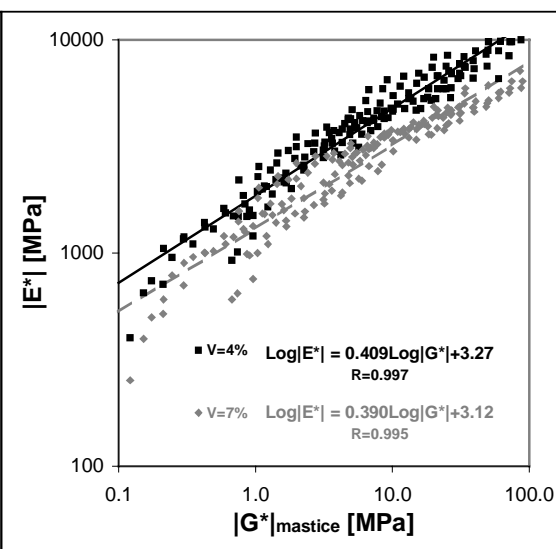
Come accennato al paragrafo 2, si è pensato di mettere a confronto il modulo complesso del conglomerato non solo con quello del bitume tal quale ma anche con quello del mastice filler+bitume. La scelta non dipende solo dal fatto che l'effettiva unione degli aggregati è dovuta al film di bitume+filler che riveste gli aggregati stessi, ma anche da un'ulteriore considerazione. Come si può osservare in figura 7, a parità di condizioni di prova, nel confronto di 3 miscele aventi percentuali diverse di bitume si avrebbero 3 coppie di valori ( $|G^*|$ ,  $|E^*|$ ) aventi tutte lo stesso valore  $|G^*|$  e 3 valori differenti di  $|E^*|$ . Infatti, a parità di condizioni di prova, il bitume è sempre lo stesso e quindi reologicamente è descritto da un unico valore di modulo complesso, mentre le miscele di conglomerato bituminoso contenenti 3 diverse percentuali di bitume hanno un comportamento meccanico differente (cfr. 3.3). L'impiego del modulo a taglio del mastice sembra poter migliorare la relazione con il modulo complesso del conglomerato, in quanto al variare della percentuale di bitume si hanno differenti valori del modulo sia per il conglomerato (cfr. 3.3) che per il mastice (cfr. 4.3). In particolare un aumento della percentuale di bitume comporta una riduzione di entrambi i moduli e



quindi produce una disposizione delle coppie ( $|G^*|$ ,  $|E^*|$ ) non più in verticale, bensì inclinata nella direzione delle linee di tendenza prima ricavate. A tale scopo in figura 8 sono messi a confronto i moduli complessi del mastice con quelli del conglomerato; nello stesso grafico sono state anche aggiunte le nuove linee di tendenza. L'analisi dei dati non mostra particolari miglioramenti della correlazione fra le variabili: si ha un lieve aumento del coefficiente di correlazione per i dati relativi al 4 % di vuoti e una leggera riduzione per quelli relativi al 7%.



**Figura 7 – Confronto delle coppie ( $|G^*|$ ,  $|E^*|$ ) ottenute considerando i bitumi e i mastici**



**Figura 8 – Relazione fra i moduli complessi a taglio dei mastici e trazione dei conglomerati confezionati con il 4 e 7% di vuoti**

Anche in questo caso è possibile effettuare una regressione estesa a tutti i dati in modo da esprimere il legame fra i due moduli complessi per mezzo di un'unica relazione indipendente da tutti i parametri di progetto della miscela. L'analisi statistica ha fornito la seguente espressione:

$$\log |E^*| = 0.400 \log |G^*|_{\text{mastice}} + 3.19 \quad (2)$$

con un coefficiente di correlazione lievemente superiore a quello ottenuto nella (1) solo per la quinta cifra decimale.

Un'ipotesi migliorativa, tutta da verificare, potrebbe essere quella che considera come legante il bitume miscelato non solo con il filler ma anche con qualche frazione di aggregati fini. Ovviamente gli elementi devono essere piuttosto piccoli affinché si abbia una miscela omogenea, tale da poter essere ugualmente indagata con il reometro. In effetti la traslazione delle coppie verso destra ottenuta con i mastici a diverso rapporto filler/bitume (figura 7) non è sufficiente a disporre le coppie con la stessa inclinazione della legge di regressione; inoltre il vero legante che circonda i granuli è più verosimilmente rappresentato da un mastice filler+bitume che ingloba al suo interno anche frazioni di sabbia fina.

Infine, nell'analisi del confronto fra le proprietà reologiche del legante e quelle del conglomerato si è posto in relazione lo sfasamento fra tensione e deformazione avutosi

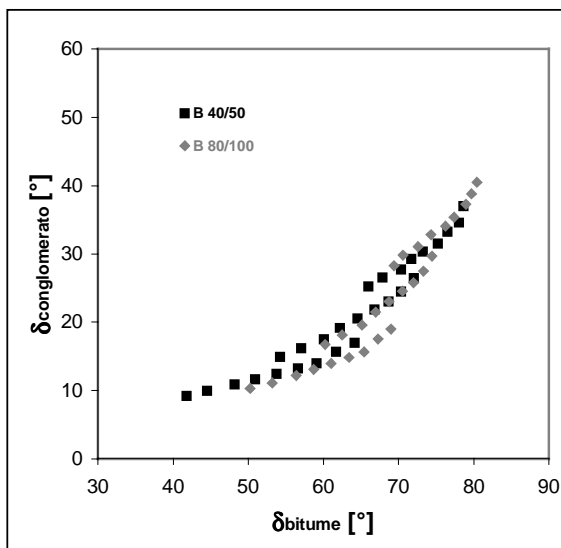
per i due materiali. In particolare in figura 9 sono riportati gli angoli di fase ottenuti per i bitumi e per i conglomerati confezionati con il 4% di bitume e 4% di vuoti. I dati appaiono abbastanza continui, a prescindere del tipo di legante utilizzato, anche se appare un leggero scostamento per le 3 serie riferite alle 3 temperature di prova. Trascorrendo tale discontinuità l'esame della figura indica una tendenza univoca fra la fase del legante e quella del conglomerato, per una data composizione di quest'ultimo.

Nel considerare le varie miscele di conglomerato non si sono avute apprezzabili differenze nei valori della fase, a differenza di quanto si è avuto per il modulo complesso. Ciò può essere constatato dall'osservazione della figura 10, in cui sono riportati i valori rilevati per tutte le condizioni di prova e i materiali studiati. I dati sono abbastanza raggruppati e non si notano sostanziali differenze, come invece si è visto in figura 6, fra conglomerati costipati in modo diverso.

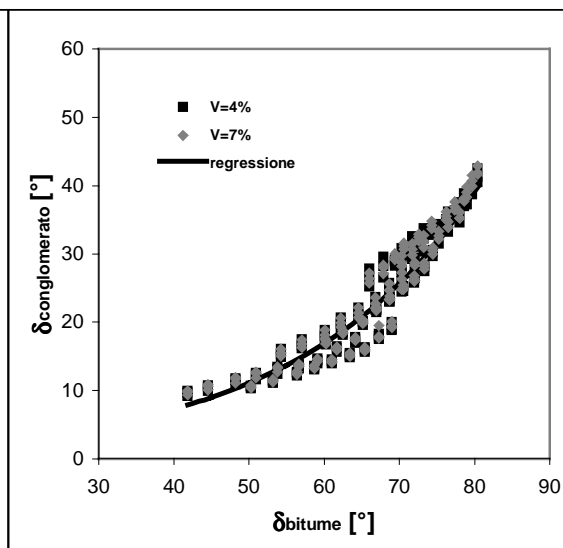
La regressione con una funzione esponenziale estesa a tutti i dati ha fornito la seguente espressione:

$$\delta_{\text{conglomerato}} = 1.3652 e^{0.0419 \delta_{\text{bitume}}} \quad (3)$$

con un coefficiente di correlazione pari a 0.955.



**Figura 9 – Confronto fra la fase del bitume e quella del conglomerato confezionato con il 4 % di bitume e 4% di vuoti**



**Figura 10 – Relazione fra la fase del bitume e quella del conglomerato**

## 6. CONCLUSIONI

Con il presente lavoro si è messo in evidenza il legame esistente fra le proprietà reologiche del legante e quelle del conglomerato bituminoso. Lo studio è stato condotto per mezzo di apparecchi (Dynamic Shear Rheometer e pressa elettro-idraulica) che hanno permesso di ricavare le proprietà dinamiche a taglio dei leganti e a trazione dei conglomerati bituminosi.

L'analisi statistica dei dati ha fornito espressioni che permettono di stimare, in modo soddisfacente, i parametri reologici del conglomerato (modulo complesso e angolo di fase) noti che siano quelli del legante, a prescindere dalla natura di quest'ultimo e in

modo indipendente dalle condizioni di prova (temperatura e frequenza). In particolare, le relazioni che stimano i moduli complessi del conglomerato sembrano dipendere leggermente dalla composizione della miscela mentre la stima dell'angolo di fase sembra dipendere unicamente dalla fase del legante.

Ovviamente occorrono ulteriori indagini per verificare la generalizzazione delle relazioni trovate, investigando su altri materiali e soprattutto su ulteriori composizioni della miscela (ad esempio facendo variare anche la granulometria degli aggregati).

Le relazioni comunque esprimono con chiarezza che il comportamento meccanico del conglomerato, la cui conoscenza è di fondamentale importanza nel dimensionamento delle pavimentazioni, è dominato strettamente dalla reologia del legante impiegato nella miscela.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Boussad N., Dony A., "Polymer modified bitumen: relationships between binder and mix rheology", Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasburgo, Francia, maggio 1996
- [2] Des Croix P., Di Benedetto H., "Binder-mix rheology: limits of linear domain, non linear behaviour", Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasburgo, Francia, maggio 1996
- [3] Francken L., Vanelstraete A., "Complex moduli of bituminous binders and mixes interpretation and evaluation", Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasburgo, Francia, maggio 1996
- [4] Goodrich J., "Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 60, 1991
- [5] Khalid Hussain A., Walsh Christopher M., "Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials", Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcellona, Spagna, settembre 2000
- [6] Judycki J., Jaskula P., "Interrelation between properties of bitumen and asphalt concrete containing that bitumen", Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcellona, Spagna, settembre 2000
- [7] Strategic Highway Research Program, "Stage 1: Validation of the Relationship Between Asphalt Properties and Asphalt-Aggregate Mix Performance", Washington, DC 1994