

SITEBSi srl
**Rassegna
del bitume**

RIVISTA DEL SITEB-ASSOCIAZIONE ITALIANA BITUME ASFALTO STRADE

ESTRATTO DAL N° **16/90**

**Caratteristiche reologiche e meccaniche dei conglomerati
bituminosi nella prova Marshall**

Tiziano Pizzocchero

Università di Padova , Facoltà di Ingegneria, Istituto di Strade e Trasporti

Marco Pasetto

Università di Padova , Facoltà di Ingegneria, Istituto di Strade e Trasporti

Caratteristiche reologiche e meccaniche dei conglomerati bituminosi nella prova Marshall

Tiziano Pizzocchero*
Marco Pasetto**

SOMMARIO

Le proprietà meccaniche delle miscele bituminose utilizzate negli interventi di costruzione e manutenzione delle sovrastrutture viarie sono convenzionalmente quantificate per mezzo della prova Marshall. Lo studio appreso descritto, svolto presso la Sezione Sperimentale dell'Istituto di Strade e Trasporti, Università di Padova, vuole rilevare criticamente la genericità di tale metodo di prova e la sua insufficienza nel caratterizzare compiutamente caratteristiche reologiche e di resistenza dei conglomerati neri stradali. A tal fine si è eseguita un'ampia serie di test su campioni di diversificate miscele bituminose e si è potuto dimostrare che l'esito della sperimentazione è, pur nei limiti della Normativa e nel rispetto delle specifiche di Capitolato, tutt'altro che univocamente definito, suscitando ciò oltre che seri problemi di *ripetibilità e riproducibilità del metodo* anche legittime perplessità in termini di *accettazione* dei materiali provati.

1. Introduzione

Le infrastrutture stradali italiane di più recente realizzazione hanno previsto nella quasi totalità l'utilizzo di conglomerati bituminosi a costituzione degli strati superficiali o portanti delle relative pavimentazioni.

Anche laddove si sono sperimentate soluzioni progettuali innovative (si pensi ad esempio alla PCP della bretella Fiano - San Cesareo o alle miscele catalizzate delle SS.SS. Romea, Col di Tenda, Casilina...) si è confermata l'usuale propensione ad abbinare miscele di aggregato e legante idrocarburico ed altre a base di leganti idraulici.

Neppure le più recenti campagne di sensibilizzazione all'esperienza estera orientata verso l'apprezzato impiego di sovrastrutture in calcestruzzo, sono riuscite a creare un'inversione di tendenza nel settore delle Costruzioni, forse perché il nuovo orientamento è in effetti auspicato e gradito più da parte dei Tecnici che degli Operatori.

Del resto, la congiuntura economica delineatasi negli ultimi anni, la spinta automazione dei cantieri e la flessibilità d'uso delle miscele bituminose di cui si può variare a piacimento il confezionamento per quanto concerne qualità e quantità del prodotto ottenuto, l'ormai consolidata pratica esecutiva, l'avvento di nuove tecnologie nella manutenzione (il riciclaggio e pienamente affermato per la celerità dell'intervento e la qualità del prodotto finito), son tutte ragioni che fanno decisamente pendere la bilancia dalla parte dei fautori delle tradizionali pavimentazioni flessibili.

Tutto ciò mentre, viceversa, in campo aeroportuale e ferroviario ci si avvale delle miscele cementizie con sempre maggior frequenza ed interesse, anche se ciò si giustifica ampiamente con le peculiari condizioni di "lavoro" dei materiali nell'infrastruttura stessa.

È dunque confermato che, a meno di oggi imprevedibili fattori contingenti, il futuro prossimo delle sovrastrutture viarie vada cercato nel continuato e persistente utilizzo di leganti organici, anche se probabilmente con metodologie più razionali e ponderate. Gli studi più attuali volgono infatti l'attenzione all'impiego di additivi multifunzionali, dunque alla ricerca di inediti prodotti costruttivi, oppure, restando sui materiali tradizionali, cercano di ottimizzarne le proprietà fisiche e compositive (granulometrie e dosaggi ad esempio) in modo da risolvere problematiche di carattere funzionale o strutturale (inquinamento acustico, sicurezza, comfort...).

Tutto ciò lascia trasparire un'impellente odierna necessità di qualificare nel modo più semplice ed intuitivo, ma soprattutto efficace, le proprietà del materiale impiegato. Senza nulla togliere alla validità di prove triassiali (statiche o dinamiche) o di deformabilità (creep) sicuramente irrinunciabili per stimare il comportamento a fatica e le caratteristiche reologiche dei conglomerati bituminosi, lo strumento più pratico ed accessibile (sostanzialmente l'unico normalizzato) nel controllo di tali materiali resta la prova Marshall. Tuttavia è importante che la si interpreti ed utilizzi con opportuna prudenza alla luce di alcune elementari ri-

* Professore associato di "Complementi di Costruzioni stradali" presso l'Istituto di Strade e Trasporti, Università di Padova.

** Ricercatore presso l'Istituto di Strade e Trasporti, Facoltà di Ingegneria, Università di Padova.

flessioni, sortite in margine agli studi sperimentali di cui ampiamente ci riferisce la letteratura.

Il presente lavoro, a completamento di una precedente analisi, intende contribuire alla caratterizzazione del *modus operandi* da tenersi nell'allestimento della prova e nell'interpretazione dei suoi risultati, ponendo particolarmente l'accento, come si vedrà, sulla controversa interrelazione Capitolati - standard normativi - pratica costruttiva.

2. Obiettivi della sperimentazione.

La vigente normativa CNR stabilisce la procedura da rispettare nella misura convenzionale delle proprietà meccaniche di miscele bituminose confezionate a caldo in laboratorio o in cantiere. Un'attenta lettura delle prescrizioni riportate sul Bollettino CNR 30/73 che disciplina le modalità operative del citato test non consente tuttavia di fugare alcuni dubbi in merito al suo espletamento ed ai quali si è perciò cercato di dare una risposta attraverso l'indagine sperimentale. In sostanza, i punti controversi sono i seguenti:

- a) quali miscele confezionate con legante organico possano essere caratterizzate efficacemente tramite la prova Marshall (calcestruzzi, conglomerati, malte, misti, pietrischetti bituminosi);
- b) in quale grado siano confrontabili gli esiti di test su impasti diversi se, in definitiva, pur coi tanti fattori che qualificano il materiale in gioco, si debbono rispettare esclusivamente degli standard relativi alla dimensione massima dell'inerte e alle temperature di confezionamento;
- c) che significato possa avere regolamentare solo attraverso le prescrizioni di Capitolato parametri influenti (anche vistosamente) sull'esito della prova, quali granulometria dell'aggregato, percentuale di bitume e qualità del legante stesso, certificando le miscele - al loro variare - sempre e solo attraverso stabilità e scorrimento univocamente definiti;
- d) quali conseguenze possa avere la modificazione accidentale (o caso limite, intenzionale) di uno dei soprascritti fattori sulle caratteristiche del materiale testato e dunque sulla sua *accettazione*;
- e) infine, in quale misura sia lecito ricorrere ad un unico approccio operativo, in cantiere ed in laboratorio, su miscele soggette a diverse vicissitudini in termini di manipolazione, sollecitazione ed invecchiamento.

La presente trattazione tenterà, coi limiti intrinseci di qualsivoglia lavoro sperimentale, di trovare una risposta plausibile ai precedenti quesiti.

Come anticipato, il controllo di qualità degli impasti bituminosi è previsto dal Legislatore che sia articolato in due momenti distinti: dapprima attraverso il confezionamento di provini aventi caratteristiche di forma e composizione predefinite; poi attraverso il raffronto con le prescrizioni di Capitolato dell'Ente competente. Ne risultano due momenti che esercitano un differente vincolo sullo sperimentatore, cui si richiede da un lato di uniformare comunque, nella loro generalità, le indicazioni operative e dall'altro di distinguere la qualità del prodotto finito sulla base del suo posizionamento in seno alla sovrastruttura. A questo proposito

si rammenta che i Capitolati (ANAS, Soc. Autostrade...) porgono un quadro dettagliato delle specifiche che i singoli materiali devono rispettare, in funzione del ruolo cui sono chiamati ad adempiere nella pavimentazione; a tal fine essi indicano i requisiti necessari per l'accettazione di inerti lapidei, legante organico e miscela bituminosa impiegati nei singoli strati, superficiali e portanti, con le relative tolleranze.

Tuttavia ciò non toglie che, come anticipato in altra occasione, la possibilità di variare la dosatura di bitume di 1-1.5 punti percentuali ovvero di selezionare la curva granulometrica dell'aggregato entro un fuso d'una certa ampiezza concorrano, col contributo di altri fattori, all'ottenimento di prodotti aventi caratteristiche anche sensibilmente diverse fra loro. Un altro parametro non sufficientemente regolamentato e dal quale non è ammissibile prescindere è la classe di penetrazione del legante, che incide sulle proprietà meccaniche del conglomerato bituminoso in modo visibilmente significativo.

In un'altra memoria si sono illustrate le possibili implicazioni tecnico-economico-legali della questione; senza volerci ripetere su tale argomento, rinviando ulteriori considerazioni al successivo commento sulle risultanze dell'indagine da noi effettuata.

3. Caratterizzazione del materiale costituente.

Per garantire la più ampia generalità al lavoro svolto si è stabilito di confezionare differenziate miscele bituminose, rappresentative di conglomerati idonei a strati di usura, binder e base. Per evitare di impostare mere speculazioni teoriche si sono assunte, in qualità di riferimento, le specifiche del Capitolato ANAS vigente, specifiche che - come è noto - definiscono in dettaglio i requisiti posti per l'accettazione delle miscele 'finite', ma anche dei loro costituenti primi.

L'inerte adoperato è risultato provenire da un'unica cava, sita in località Fontaniva (Padova) presso l'alveo del Brenta, con caratteristiche chimico-litologiche omogenee per le varie pezzature. La granulometria è stata fissata in modo da mediare le curve limite dei tre fusi (usura, collegamento e base legati a bitume; vedi Figura 1 a, b, c), ritenendo non valido motivo di complicità il supplemento d'un ulteriore variabile qual è quella individuata dalla mutevole geometria dell'aggregato. Del resto uno studio in tale senso aveva costituito momento preliminare della ricerca.

Essendo fissate le dimensioni massime dell'aggregato lapideo per usura, binder e base rispettivamente in 15, 25 e 40 mm si è ritenuto di stimarne la resistenza all'abrasione mediante prova Los Angeles sulle classi B e C, da cui è scaturito un identico coefficiente di qualità pari a 24,5%. Tale valore, di per sé sufficiente per base e binder, ma non per strato di usura, è stato considerato comunque adeguato agli obiettivi della sperimentazione, constatando che l'inerte si presentava con elementi "sani, duri, durevoli, a superficie ruvida, puliti ed esenti da polvere", nonché di forma prevalentemente poliedrica, non appiattita né lenticolare.

Il legante organico utilizzato consisteva in un bitume semisolido per uso stradale delle classi B 60/70, 80/100, 180/200, cioè sostanzialmente si sono adoperati bitumi che rispondono alle correnti definizioni di "duro", "semi duro" e "molle".

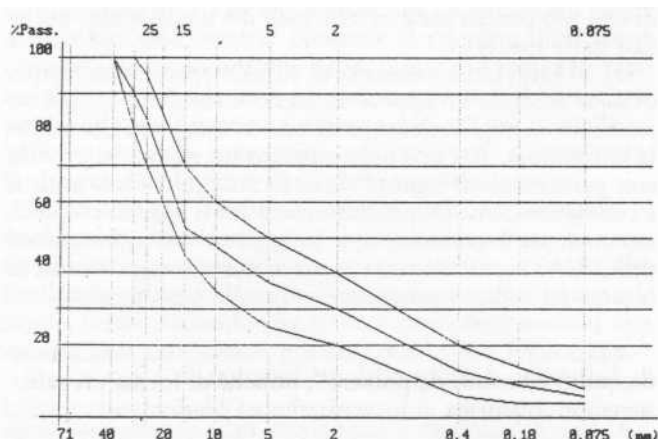
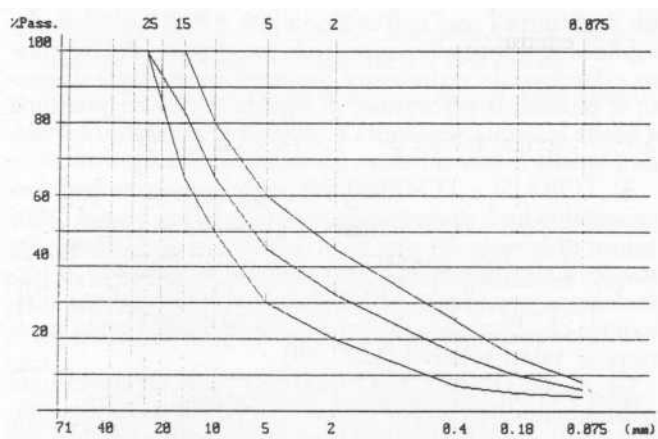
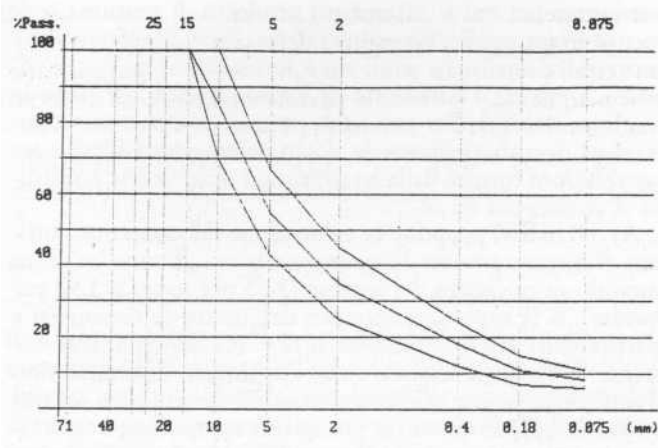


Fig. 1 a, b, c - Fusso ANAS per strato di usura, binder e base. Curve medie utilizzate nella sperimentazione.

Per una completa identificazione di tale prodotto si sono eseguite prove di penetrazione (a 25°C, 100 g per 5 sec.), densità, punto di rammollimento (metodo palla-anello) e solubilità, i cui esiti, perfettamente in linea con le prescrizioni, sono sintetizzati nella Tabella I.

BITUME (CLASSE)	60/70	80/100	180/200
pen (dmm)	63.5	93.0	191.3
dens. (g/cmc)	1.045	1.045	1.038
ramm. (°C)	51.5	48.2	41.2
sol. (%)	99.5	99.5	99.5
I.P.	-0.245	-0.036	+0.307

Coi medesimi parametri si è calcolato l'Indice di Penetrazione compreso, come richiesto dall'ANAS e compatibilmente con la necessità, fra -1 e +1 (si veda la citata Tabella).

4. Caratterizzazione della miscela.

Per ogni granulometria conforme alla curva media del fusso corrispondente si sono confezionate alcune serie di provini in conglomerato bituminoso, impiegando percentuali di legante (sul peso dell'inerte) comprese entro i limiti di Capitolato e precisamente pari a 4,5-5-5,5-6% per l'usura, 4-4,5-5-5,5% per il binder, 3,5-4-4,5% per la base. I provini sono stati confezionati secondo le prescrizioni CNR relative a "determinazione di Stabilità e scorrimento con la prova Marshall", adottando alcuni semplici, ma utili accorgimenti.

L'inerte è stato accuratamente lavato ed essiccato prima della prova. La preparazione dei provini (come la successiva operazione di costipamento) è stata attuata alla temperatura differenziata di 155, 150 e 140°C, rispettivamente per le tre classi di penetrazione (60/70, 80/100, 180/200).

I provini di ogni serie sono stati confezionati simultaneamente, a partire da un unico impasto, non singolarmente — secondo le indicazioni della Norma — al fine di evitare possibili errori occasionali.

La compattazione dei provini è avvenuta applicando 75 colpi di pestello per faccia, in accordo con le più recenti indicazioni ANAS. L'estrazione è avvenuta a 20 h dal costipamento, a seguito di raffreddamento a temperatura ambiente. Determinate le caratteristiche geometriche e fisiche dei campioni si è provveduto alla prova di schiacciamento, al termine di un condizionamento termico in bagno di acqua distillata a 60°C per 40' circa.

In ogni prova si sono determinate stabilità, scorrimento (quindi rigidità), nonché densità Marshall, verificando di volta in volta l'opportunità di correggere le caratteristiche di resistenza in funzione della geometria dei provini. In nessun caso si sono applicati fattori correttivi esterni all'intervallo 0.97 ÷ 1.09 suggerito dalle Norme per la messa in conto delle tolleranze di confezionamento.

La sequenza di prove ha consentito di accertare, a pari granulometria dell'inerte, l'influenza di qualità e quantità di bitume su caratteristiche reologiche e meccaniche dei conglomerati nerici stradali e, a pari contenuto e tipologia di legante, l'incidenza della composizione dell'aggregato lapideo.

Giova osservare che, con l'eccezione del solo coefficiente L.A. per l'usura, si sono rispettati tutti i requisiti d'accettazione di materiali costituenti e miscela. Anzi, è doveroso riscontrare come in talune circostanze i valori di stabilità e rigidità Marshall si siano rivelati decisamente superiori agli standard di Capitolato nonché alle correnti risultanze sperimentali di laboratorio, probabilmente a causa dell'accurata preparazione dei provini, delle modalità di costipamento, dei tempi di estrazione. Vero è che stabilità e rigidità dei conglomerati per usura son risultate superiori di almeno il 30% ai minimi corrispondenti prescritti; del 40% superiori si sono rivelati i valori relativi allo strato di collegamento; incrementi del 100% si sono avuti per la base.

Volendo limitare il confronto all'ambito dei singoli strati, si osservano significative variazioni percentuali nelle proprietà meccaniche (a prescindere dall'applicazione delle 'correzioni') e fisiche, con escursioni massime per lo strato superficiale (§):

$$\frac{S_M - S_m}{S_m} = \frac{44.9\% \text{ NC}}{41.1\% \text{ C}} \quad \frac{s_M - s_m}{s_m} = 78.9\% \quad \frac{R_M - R_m}{R_m} = \frac{119.1\% \text{ NC}}{111.0\% \text{ C}} \quad \frac{d_M - d_m}{d_m} = 2.9\%$$

Naturalmente il paragone fra i valori limiti è sotto certi aspetti azzardato perché non si è tenuto conto del contenuto e della classe del legante organico utilizzato, ma resta comunque indicativo della notevole variabilità di risultati delle misurazioni effettuate.

Per il binder si è avuta una maggior uniformazione dei valori, con minima influenza delle correzioni suggerite dalla geometria dei provini:

$$\frac{S_M - S_m}{S_m} = \frac{43.9\% \text{ NC}}{42.7\% \text{ C}} \quad \frac{s_M - s_m}{s_m} = 62.6\% \quad \frac{R_M - R_m}{R_m} = \frac{93.1\% \text{ NC}}{89.9\% \text{ C}} \quad \frac{d_M - d_m}{d_m} = 4.4\%$$

Un ulteriore 'appiattimento' si registra per lo strato di base:

$$\frac{S_M - S_m}{S_m} = \frac{35.3\% \text{ NC}}{33.5\% \text{ C}} \quad \frac{s_M - s_m}{s_m} = 41.5\% \quad \frac{R_M - R_m}{R_m} = \frac{62.1\% \text{ NC}}{58.1\% \text{ C}} \quad \frac{d_M - d_m}{d_m} = 4.4\%$$

Qualità e quantità di bitume incidono dunque con minor spicco sui misti bitumati rispetto a quanto rilevato su conglomerati semi-chiusi o chiusi per manto. La contenuta variabilità del tenore di legante per l'ultimo strato di fondazione nulla toglie alle precedenti indicazioni.

5. Considerazioni preliminari.

A puro titolo orientativo si sono determinati preliminarmente per via analitica i contenuti ottimi di bitume relativi alle miscele progettate, seguendo le indicazioni sperimentali di alcuni Autori. Il parallelo fra le conclusioni teoriche e quelle pratiche, come vedremo, è di un certo interesse perché solleva la sempre presente problematica della relatività e specificità dei metodi di prova, i quali costituiscono certamente, nella loro standardizzazione, un valido ausilio a Operatori e Tecnici stradali, purché li si applichi ed interpreti tenendo dovutamente conto del loro background sperimentale.

È nota ad esempio l'importanza che si attribuisce alla definizione della dosatura ottimale di legante nei conglomerati bituminosi, in quanto essa indica le proporzioni bitu-

me/inerte per cui si ottiene un prodotto di massima resistenza e, si suppone, superiore durata. Per tale motivo varie espressioni analitiche sono state formulate sì da poter stimare, a priori, il contenuto di legante tale da garantire la migliore stabilità. Per curiosità, potendo contare su un'immediata riprova sperimentale, si son volute testare le più note correlazioni fornite dalla letteratura; l'esito di tale controllo si commenta da sé.

A) DURIEZ propone la valutazione del contenuto ottimo di bitume tramite l'espressione $b = m S^n$ ove 'm' è un modulo di ricchezza del legante (3.75 per usura e 3.50 per binder), S la superficie specifica dell'inerte da desumersi a partire dalla sua granulometria, n = 0.2 un esponente costante. È stato già segnalato che l'**optimum** di bitume non è confrontabile con quello sperimentale determinato col metodo Marshall, in quanto la precedente espressione è stata tarata con apposita prova (diversa dalla Marshall). Del resto non sfugge a un'attenta analisi che con S solo mediamente si tien conto di forma, tessitura, porosità dell'aggregato e si prescinde del tutto dalle caratteristiche del legante. Infine, volendo applicare la formula di Duriez alle curve limiti superiore e inferiore del fuso ANAS per usura e binder si hanno degli ottimi pari nell'ordine a 6.6, 5.9, 5.9 e 5.1 il che significa che dovendo rispettare le prescrizioni di Capitolato e desiderando ottimizzare contemporaneamente il tenore di bitume, la percentuale di legante dev'essere prossima a quella massima consentita o la curva granulometrica vicina a quella limite inferiore (si veda Tabella II).

B) TORRISI e TEMPESTINI suggeriscono, su basi sperimentali e limitatamente allo strato di usura, un più cauto valore di $b = m S^n$ ove m = 1.90 e n = 0.42 fermo restando il significato degli altri simboli. Applicando la formulazione precedente nella versione corretta italiana si riscontra che l'ottimo relativo alle curve limiti è poco superiore ai valori tollerati (6.27, 4.9).

C) AGOSTINACCHIO indirizza verso un'espressione polinomiale ottenuta per interpolazione di dati sperimentali; i contenuti di bitume conseguenti sono piuttosto alti per l'usura, ragionevoli per il binder, comunque inferiori a quelli tradizionali di Duriez. A detrimento delle formulazioni nostrane resta l'univoca dipendenza dell'**optimum** di legante dalla superficie specifica dell'inerte, essendo ormai chiaro che tale parametro andrebbe in qualche modo tarato sulla base di una più precisa caratterizzazione dei componenti utilizzati nella miscela.

D) MARSHALL consente di stimare sperimentalmente, dunque secondo un approccio meno immediato ma più attendibile, la migliore composizione da assegnare alla miscela bituminosa. Avendo noi confezionato numerosi provini con percentuali di legante variabili nei limiti consentiti, si è constatato come le massime resistenze si inquadrino decisamente, per le granulometrie in oggetto, entro gli standard dell'ANAS e precisamente verso le miscele meno ricche di bitume (si veda in proposito la Tabella riepilogativa).

6. Influenza della qualità del bitume.

Al fine di accertare il contributo delle diverse qualità di legante alle proprietà meccaniche dei conglomerati bitumi-

(§) LEGENDA: S, s, R e d indicano nell'ordine Stabilità, Scorrimento, Rigidità e Densità Marshall. - NC e C sono rispettivamente i valori 'non correnti' secondo Normativa. - I pedici M e m indicano rispettivamente il valore massimo e minimo di ogni grandezza.

METODO/STRATO	USURA	BINDER	BASE
DURIEZ	6.30	5.53	-
TORRISI-TEMPESTINI	5.65	-	-
AGOSTINACCHIO	5.97	5.13	-
MARSHALL	5.00	4.5-5	4
LIMITI CAP. ANAS	4.5-6	4.5-5	3.5-4.5

nosi si sono sottoposti a prova Marshall provini relativi ad impasti di tre diverse granulometrie, rappresentanti nell'ordine un'usura, un binder, una base. Per ogni curva media di inerti si sono preparati campioni con differenti percentuali di legante e per ogni singolo contenuto si sono utilizzati bitumi di varia qualità (espressa in termini di 'penetrazione').

Si passa ora a descrivere i risultati della sperimentazione, con particolare riguardo alle emergenze fondamentali delle seguenti situazioni operative;

- variazione del tipo di bitume, assegnate che siano percentuale di bitume e granulometria dell'inerte;
- variazione del contenuto di legante, definiti tipo di bitume e 'curva' dell'aggregato;
- variazione di granulometria e pari qualità e quantità di bitume.

Un primo commento lo merita di certo l'aspetto meno 'sondato' fra quelli in esame e su cui primariamente è stata posta la nostra attenzione: l'influenza della qualità del legante sulle proprietà meccaniche delle miscele bituminose.

Segue una breve analisi dei risultati, differenziata per i strati.

A) **USURA.** La stabilità del conglomerato decresce all'aumentare della 'penetrazione' con escursioni sicuramente più marcate per i bitumi duri e semi-duri. Le miscele più povere di legante hanno una risposta allo schiacciamento che è reciprocamente confrontabile qualitativamente oltre che quantitativamente, mentre i provini confezionati col 6% di bitume hanno resistenze di ben 200 kg inferiori a quelle dei campioni col solo 4% (vedi Figura 2a). La lettura dei valori di stabilità 'non corretti' consente di rilevare, oltre a una certa congenita dispersione nelle misure, un marcato effetto lubrificante del legante per tenori superiori al 5% (si presume che in tali provini il bitume non sia più presente in 'velo sottile' e che la sua adesione con l'inerte sia prevaricata dal più debole contributo della coesione interna).

Le miscele più 'ricche' - e come visto, meno stabili - sono anche quelle che subiscono maggiore scorrimento a rottura. Sotto questo aspetto si può comunque avvertire che l'influenza della durezza del legante è scarsamente apprezzabile, fermo restando che bitumi molli determinano una rottura con scorrimenti più contenuti (vedi Figura 2b).

Il parametro che sintetizza le caratteristiche di deformabilità e resistenza del conglomerato è la rigidità, preferita nella standardizzazione dei Capitoli allo scorrimento. Poiché la nostra indagine ha fornito provini con stabilità elevate, sopra la norma, ciò ha avuto evidenti ripercussioni sul calcolo della rigidità, risultata anch'essa superiore alle necessità (Figura 2c).

Fig. 2a. Usura.

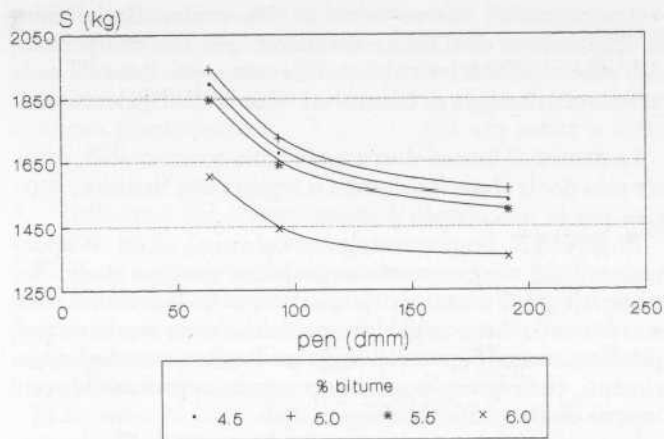


Fig. 2b.

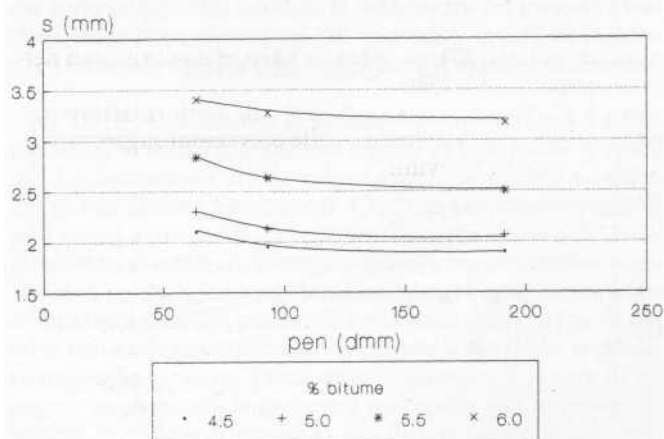


Fig. 2c.

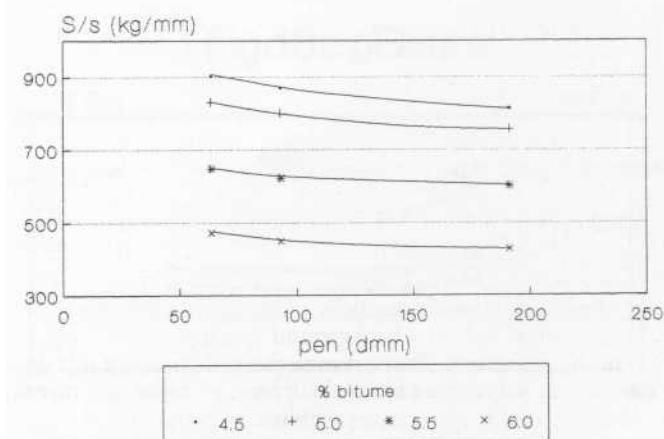


Fig. 2 a, b, c - Influenza della qualità del bitume. Strato di usura: Stabilità, scorrimento e rigidità.

Conglomerati più rigidi sono quelli con meno bitume; il cambiamento del tipo di legante ha determinato variazioni del rapporto S/s non superiori al 10%, evidenziando come le diminuzioni di stabilità siano state più che compensate dall'effetto della deformabilità. Rilevante resta invece il contributo del dosaggio di bitume sul valore della rigidità (corretta o meno che sia).

Le densità di bitumi duri e molli sono confrontabili, mentre solo per la classe intermedia si registra una flessione, marcata per le miscele più povere.

B) BINDER. Fondamentalmente si assiste ad un comportamento del conglomerato semi-chiuso simile a quello del materiale per l'usura per quanto concerne la stabilità, crescente con la durezza del bitume, anche se in modo un po' più tormentato (Figura 3a). Regolare l'andamento degli scorrimenti, che registra un minimo appena apprezzabile per i leganti di classe 80/100 (Figura 3b).

La rigidità è ancora lievemente decrescente all'aumentare del grado di penetrazione, ma si rilevano forti variazioni in funzione del contenuto di bitume (passando dal 4 al 5.5% il rapporto stabilità/scorrimento si riduce del 70% - Vedi Figura 3c).

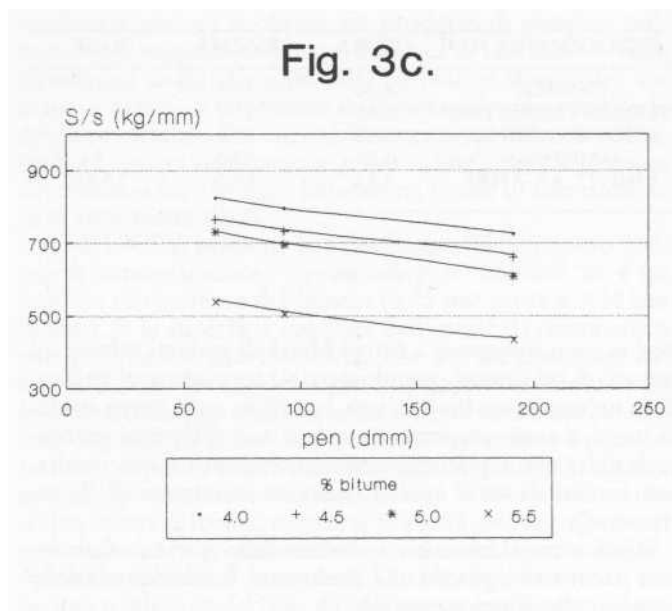
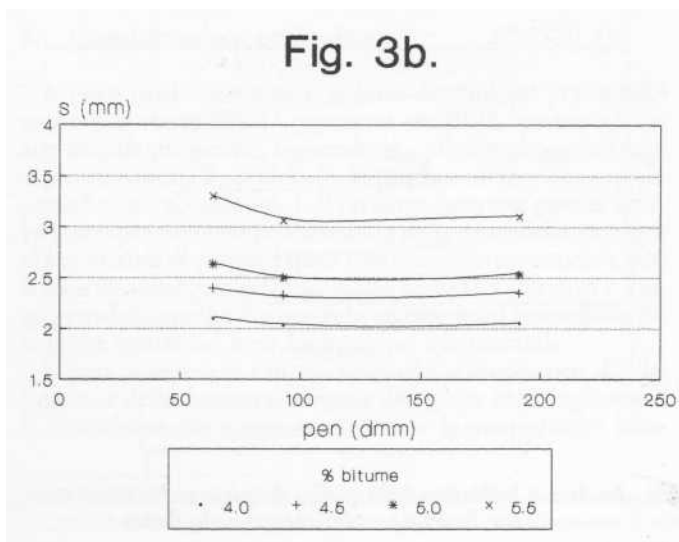
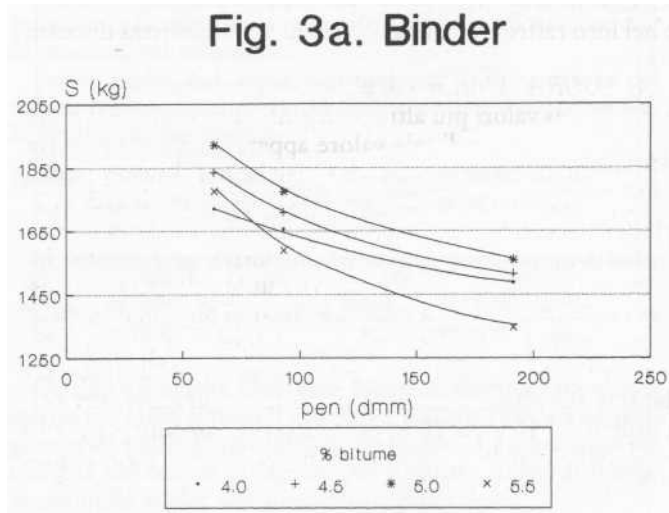


Fig. 3 a, b, c - Influenza della qualità del bitume. Strato di collegamento: Stabilità, scorrimento e rigidità.

Anche in questo caso la massa volumica apparente del conglomerato è stranamente sensibile al solo bitume semi-duro, con riduzioni nelle miscele 'povere' e lievi incrementi per le 'ricche'.

C) BASE. Nel confezionare i provini Marshall relativi al misto bitumato di base ci si è posti un quesito di non agevole soluzione: seguire pedissequamente i dettami della Normativa selezionando l'inerte passante al setaccio 1" ASTM e così utilizzando un aggregato granulometricamente modificato, affine per dimensione massima dei grani (25 mm) a un binder, oppure impiegare l'inerte 'tal quale', ignorando le specifiche. Si è optato per quest'ultima soluzione, ritenendo più veritiera l'esecuzione di un test su campioni di materiale indisturbato, seppure non conforme agli standard, e riformulando l'obiezione di genericità alla prova Marshall che, così come la si effettua, impone un'assoluta uniformità operativa anche laddove ciò non sia pienamente giustificabile. Ad ogni buon conto, per non correre il rischio di inficiare l'esito della prova nel caso di singolari accostamenti o sovrapposizioni dei grani di dimensioni maggiori e tali da armare trasversalmente il cilindretto di conglomerato, si sono eseguiti dei controlli supplementari, aumentando il numero dei campioni visionati.

La nostra scelta è stata rimessa in discussione dagli elevati valori di stabilità misurati che, anche per le miscele più o meno ricche di legante e per i bitumi più molli, hanno indicato resistenze più che doppie di quelle minime imposte dal Capitolato (Figura 4a). Addirittura, con l'*optimum* di bitume (pari al 4% per la classe B 60/70) si è trovata la più elevata stabilità in assoluto della nostra sperimentazione, superiore ai 2.000 kg. Ponendola a confronto coi corrispondenti valori dello strato di collegamento (inerte 0/25) e analizzando le relative granulometrie si può ritenere che il superamento della citata soglia non sia del tutto ingiustificato.

La stabilità decresce ancora all'aumentare della 'penetrazione' del legante, sempre più sensibilmente per gli impasti

Fig. 4a. Base.

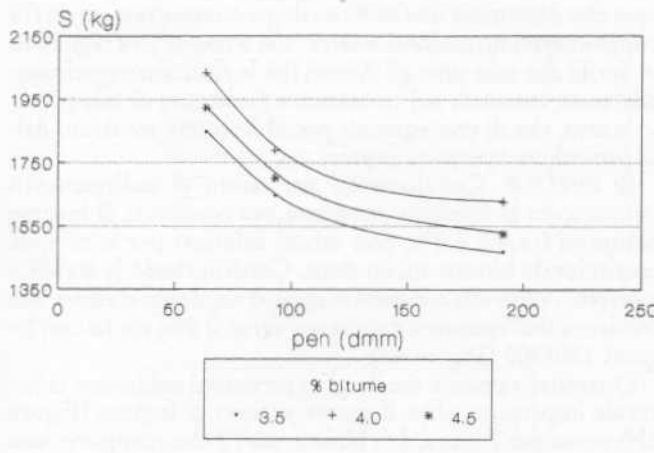


Fig. 4b.

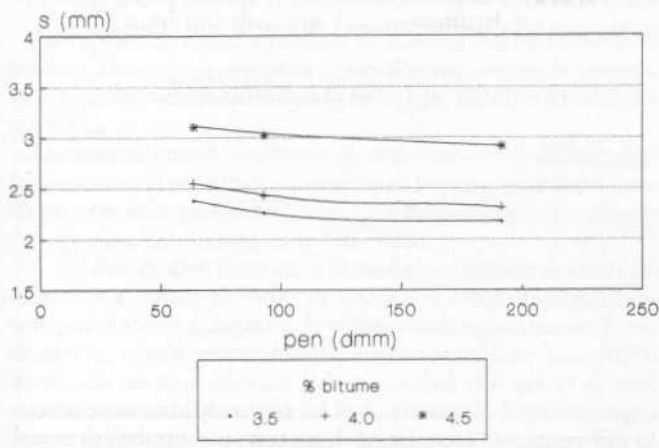


Fig. 4c.

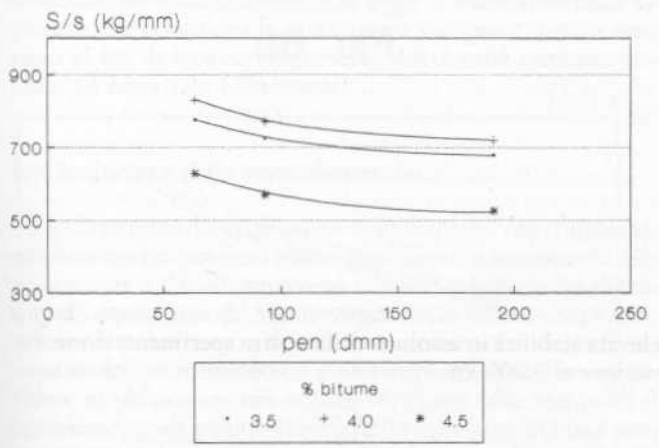


Fig. 4 a, b, c - Influenza della qualità del bitume. Strato di base: Stabilità, scorrimento e rigidità.

con bitumi più duri. Scorrimento e rigidità variano qualitativamente come i corrispondenti parametri del manto (Figure 4b e c); nuovamente si riscontrano dei 'minimi' al rapporto resistenza/deformabilità per le miscele 'ricche'. I campioni di misto bitumato sembrano più sensibili nelle caratteristiche fisiche (densità), forse anche a causa di una meno continua granulometria.

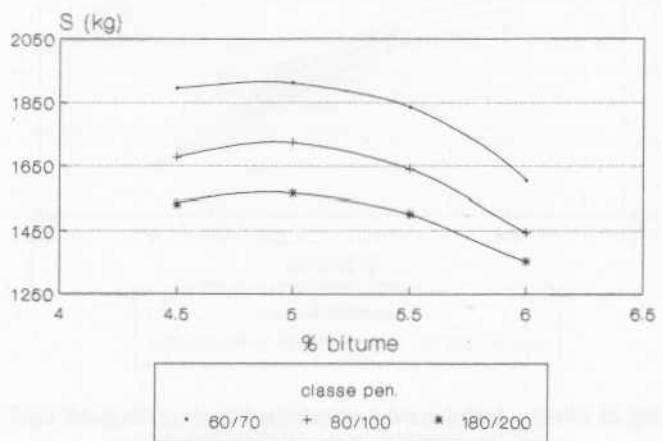
7. Influenza del contenuto di legante.

Come anticipato, la ricerca avviata intendeva verificare - tra le altre cose - l'importanza del dosaggio di legante sulle proprietà meccaniche delle miscele bituminose, facendo simultaneamente variare la qualità dello stesso legante nell'ambito delle tre classi di penetrazione disponibili.

In accordo col Capitolo si sono scelti gli intervalli di percentuali significative e al loro interno ci si è mossi con scarti di mezzo punto, ritenendo che una maggior articolazione delle composizioni potesse fornire risultati non confrontabili a causa delle tolleranze di confezionamento. Le curve correlanti stabilità e scorrimento con la percentuale di bitume sono utilizzabili, secondo le indicazioni del metodo Marshall, nella determinazione dei contenuti ottimi di legante e nel loro raffronto coi valori teorici in precedenza discussi.

A) *USURA*. L'ottimo di bitume è compreso fra 4.5 e 5%; tendendo ai valori più alti con leganti di tipo molle (Figura 5a). La limitatezza di tale valore appare senz'altro positiva dal punto di vista economico. Qualche perplessità semmai può aversi a proposito del comportamento a fatica del conglomerato al quale un'elevata stabilità e un contenuto scorrimento conferiscono rigidità che potrebbero rivelarsi incompatibili con una prolungata vita utile dello strato. Si osservi che a tale presunto inconveniente si potrebbe sopperire impiegando, senza variar sostanzialmente il tenore di legante e migliorando le proprietà reologiche dell'impasto, un bitume semiduro o molle: la stabilità si riduce infatti nell'ordine del 10 e del 20%, pur restando ampiamente nei limiti dell'accettabile, mentre poco significative sono le modifiche alla deformabilità.

Fig. 5a. Usura.



Le stabilità *tal quali*, cioè 'non corrette', appaiono in ogni caso più sensibili al contenuto di bitume, il che porta a ritenere che l'applicazione di un coefficiente ad aggiustare i valori di resistenza in funzione della geometria del provino abbia l'effetto di uniformare il comportamento meccanico delle miscele.

Oltre il contenuto ottimo di bitume lo scorrimento cresce notevolmente determinando una tangibile diminuzione di rigidità, sebbene anche per le miscele più ricche si abbiano valori largamente tollerabili (Figura 5b). Si può inoltre osservare come, a dispetto delle escursioni di stabilità, le variazioni di rigidità col tipo di bitume tendano ad appiattirsi, con scarti sempre inferiori al 10% (Figura 5c).

Fig. 5b.

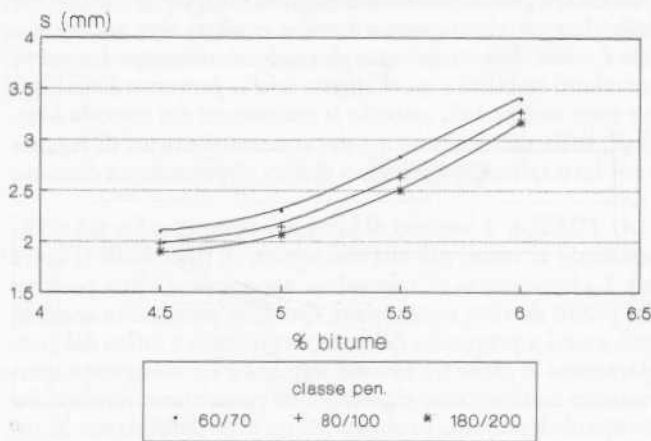


Fig. 5c.

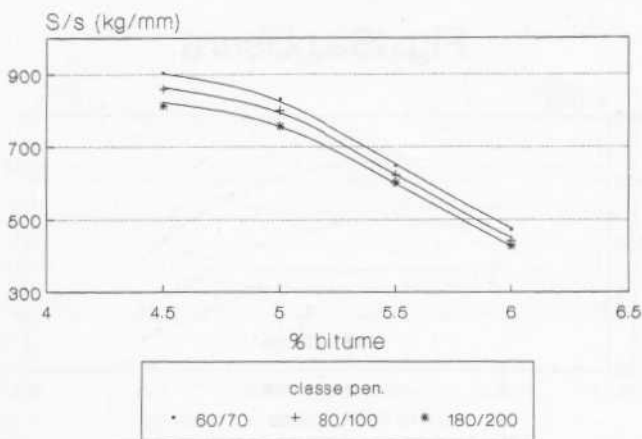


Fig. 5 a, b, c - Influenza del contenuto di legante. Strato di usura: Stabilità, scorrimento e rigidità.

Si rilevi infine il conseguimento della massima densità per tenori di bitume di circa mezzo punto superiori agli ottimi, cosa che determina una certa analogia comportamentale tra conglomerati bituminosi e terre 'alla Proctor'; va segnalato in verità che non tutti gli Autori (né le risultanze sperimentali) sono concordi nel riconoscere l'esistenza di tale piccolo scarto, che di conseguenza potrebbe essere motivato dalla procedura operativa seguita.

B) BINDER. Conglomerati per strato di collegamento conseguono la massima resistenza per contenuti di bitume compresi fra 4.5 e 5%, con ottimi inferiori per le miscele costituite da bitume meno duro. Confrontando le stabilità 'corrette', oltre alla consueta ma ;fiore regolarità si rileva una tendenza *dell'optimum* a spostarsi verso il 5%, anche con leganti 180/200 (Figura 6a).

Quantitativamente simili, gli scorrimenti subiscono la naturale impennata oltre il tenore ottimo di legante (Figura 6b); come per l'usura, è il bitume 60/70 che comporta una maggior deformabilità del provino a rottura, il che lascia supporre come a determinare lo stato limite del campione sia la classe di penetrazione del bitume, non nel senso di conferire una superiore duttilità agli impasti 'moll', ma viceversa nel ritardare la plasticizzazione (e quindi prolungare l'esposizione alla sollecitazione) di quelli più 'duri'.

Fig. 6a. Binder.

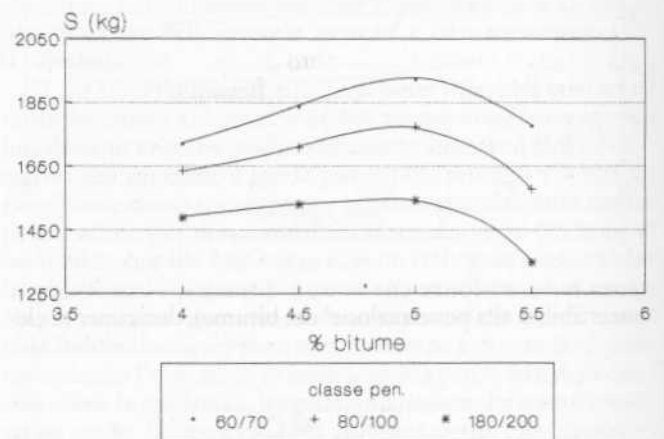
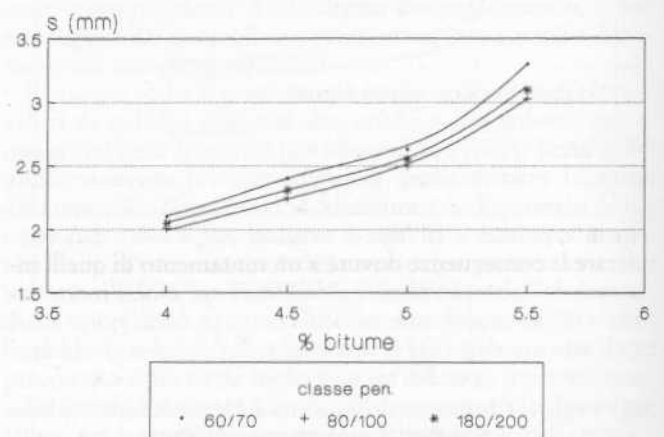


Fig. 6b.



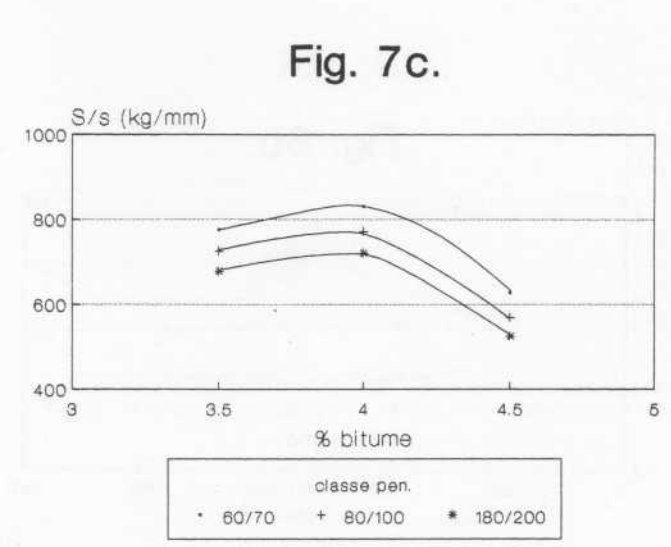
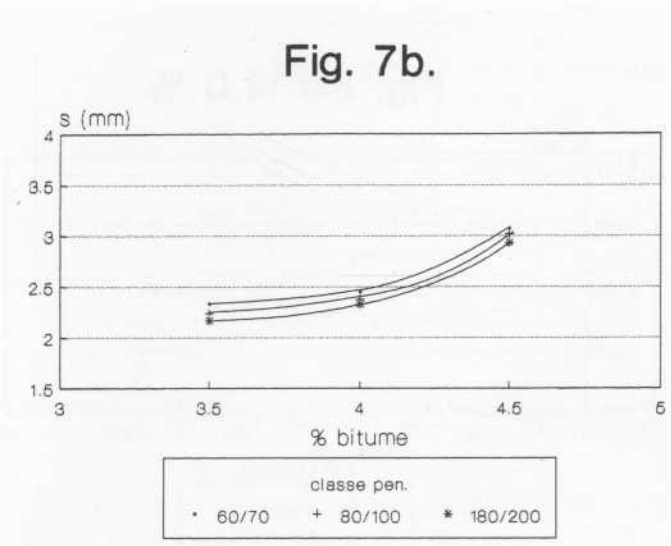
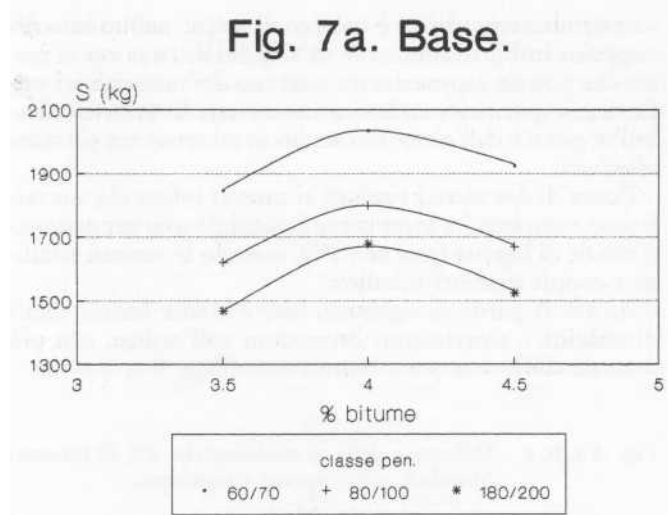
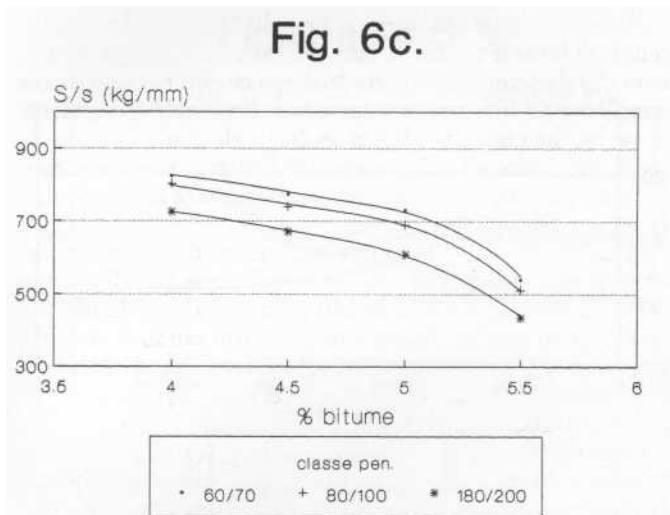


Fig. 7 a, b, c - Influenza del contenuto di legante. Strato di base: Stabilità, scorrimento e rigidità.

Fig. 6 a, b, c - Influenza del contenuto di legante. Strato di collegamento: Stabilità, scorrimento e rigidità.

La rigidità, come previsto, si attenua col contenuto di bitume, con minor evidenza che nell'usura, restando comunque superiore e confrontabile per leganti 60/70 e 80/100 (Figura 6c).

La densità cresce, anche in questo caso, oltre l'ottimo di bitume sino al massimo contenuto di legante (di mezzo punto percentuale superiore), con una flessione per le miscele più 'povere' realizzate con l'80/100.

C) BASE. Più limitata è la casistica relativa ai misti bitumati per strato di base, in quanto si sono impiegate tre sole percentuali di legante. L'ottimo cade esattamente a metà, al 4%, senz'aprezzabili differenze tra valori 'corretti' o meno. Si torna a rilevare l'eccezionalità dei valori di resistenza misurati (oltre che la loro disparità, funzione della 'suscettibilità alla penetrazione' del bitume), decisamente elevati per lo strato di appartenenza e per gli standard di Capitolato (Figura 7a).

Confermata l'aumentata deformabilità delle miscele con eccedenza di legante (Figura 7b). I citati valori di stabilità determinano sostanzialmente la legge di variazione delle rigidità, che si esplicita in una curva a 'campana' con un massimo al 4% di bitume (Figura 7c). Le densità crescono comunque oltre tale contenuto.

8. Influenza della granulometria.

Le caratteristiche reologiche e meccaniche dei conglomerati bituminosi possono essere modificate intervenendo singolarmente o simultaneamente su svariati fattori. Analizzati quelli dipendenti dal legante organico, si passano ora a considerare le conseguenze dovute a un mutamento di quelli intrinseci dell'altro costituente dell'impasto, cioè l'inerte lapideo; in particolare si è voluto verificare cosa comporti il cambiamento di granulometria dello scheletro litico (a pari natura mineralogica dell'aggregato) sui parametri ricavati con prova Marshall.

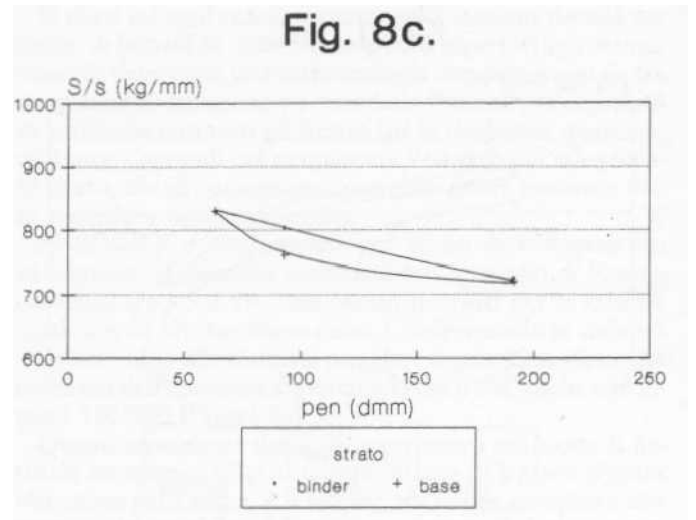
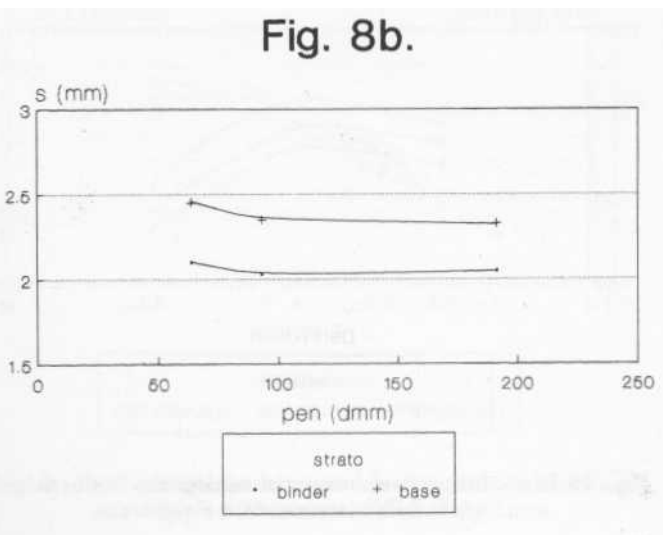
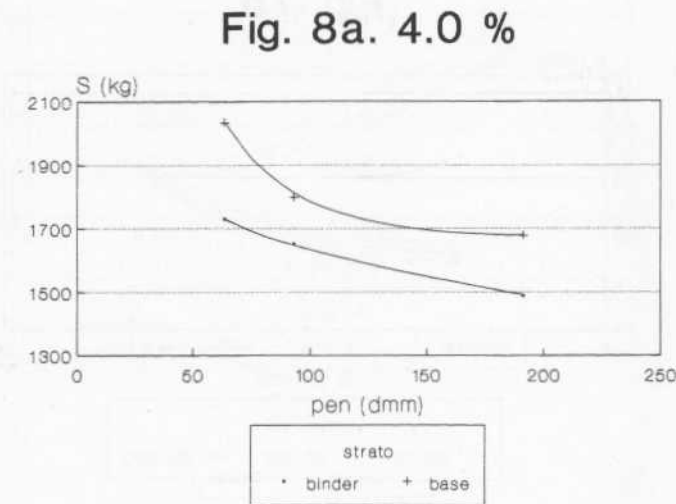
Operando con materiali destinati a tre diversi strati della

sovrastuttura stradale si è stabilito di fissare, nell'ambito dei rispettivi fusi granulometrici da Capitolato, una curva media che potesse rappresentare ciascuno dei materiali ivi utilizzati, in quanto da un lato era necessario limitare le variabili in gioco e dall'altro uno studio in tal senso era già stato effettuato.

Prima di discutere i risultati si osservi infine che un raffronto completo fra le tre curve è possibile solo per una percentuale di legante (pari al 4.5%), essendo le restanti comuni a coppie di strati soltanto.

A) 4% A parità di rigidità, base e binder hanno valori di stabilità e scorrimento decrescenti nell'ordine, con più marcate differenze per i bitumi duri (Figg. 8 a, b e c).

Fig. 8 a, b, c - Influenza della granulometria. 4% di bitume: Stabilità, scorrimento e rigidità.



B) 4,5% In corrispondenza del contenuto di legante attorno al quale oscillano approssimativamente tutti gli ottimi si registra una totale identità di valori e comportamento meccanico per le tre granulometrie, fermo restando il contributo della variabile suscettibilità alla penetrazione del legante (Figura 9a).

Viceversa, la granulometria agisce significativamente sugli scorrimenti, più di quanto non faccia la qualità del bitume: curve più aperte (base, poi binder e infine usura che è a `masse chiuse') conferiscono all'impasto, a prescindere dalla durezza del legante (quasi irrilevante), una più sensibile deformabilità: lo scorrimento del misto supera dunque del 50% quello del conglomerato per strato superficiale (Figura 9b). Le rigidità si succedono ovviamente in ordine inverso, come del resto richiede la posizione dei materiali in seno alla pavimentazione (Figura 9c).

C) 5 % Con questo contenuto di bitume ci si aggira ancora attorno all'optimum e come riprova si rileva una discreta similitudine comportamentale con la precedente serie di provini. Stabilità confrontabile per usura e binder e decrescente all'aumentare della penetrazione dei bitumi (Figura 10a); scorrimento maggiore per la curva granulometrica più aperta (strato di collegamento) e rigidità in sequenza inversa (Figura 10b e c).

D) 5.5% L'ottimo di bitume si profila come elemento demarcatore di una diversa attitudine delle miscele a resistere alle sollecitazioni. Se con il 4% di legante la curva granulometrica più `bassa' comportava stabilità e rigidità maggiori, ora è quella `superiore' che consente più elevate proprietà meccaniche. Se ne deduce che se per un certo tenore di bitume le caratteristiche di resistenza si uniformano, sopra e sotto tale quantitativo le granulometrie giocano un ruolo di un certo interesse. Una precedente sperimentazione aveva già indicato questa tendenza, che ora trova piena giustificazione (Figura 11a e b).

Si può infine osservare come una miscela `chiusa' possa essere preferibile con bitumi più teneri (perché meno sensibile alla classe di penetrazione), mentre laddove si impieghino i tradizionali leganti 60/70 prescritti dal Capitolato si registra una discreta omogeneità comportamentale fra materiali per usura e binder (Figura 11c).

Fig. 9a. 4.5 %

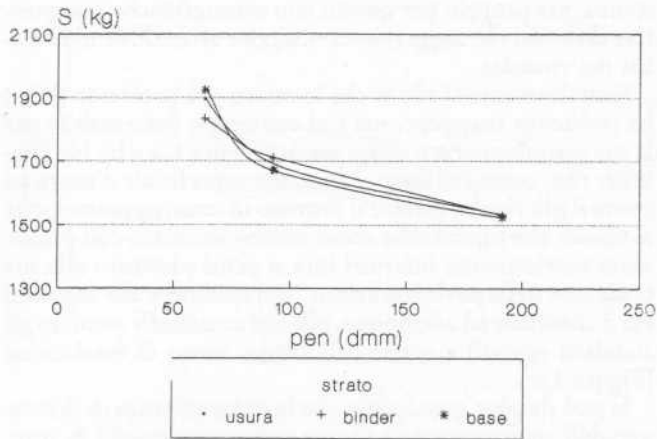


Fig. 10a. 5.0 %

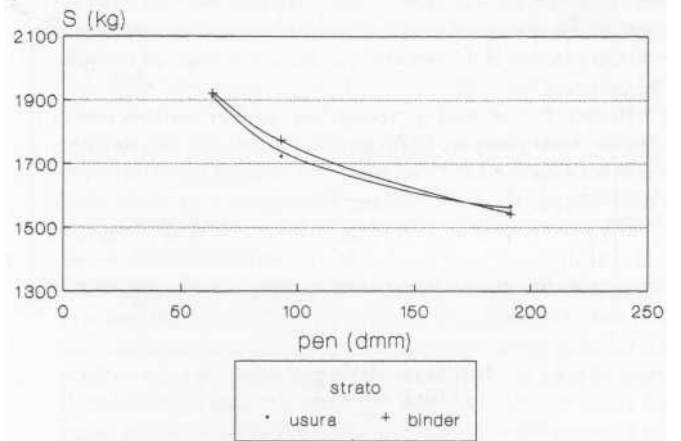


Fig. 9b.

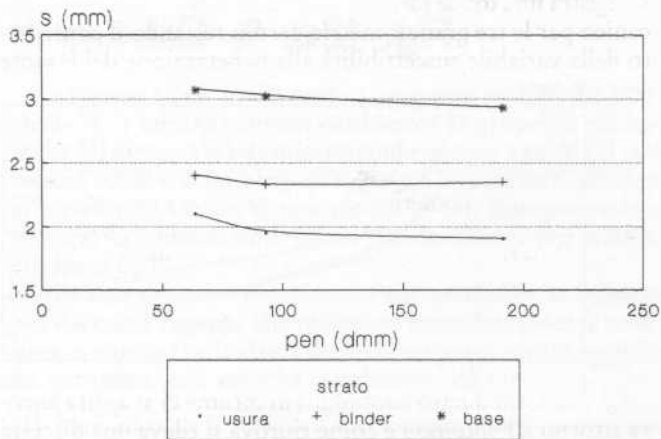


Fig. 10b.

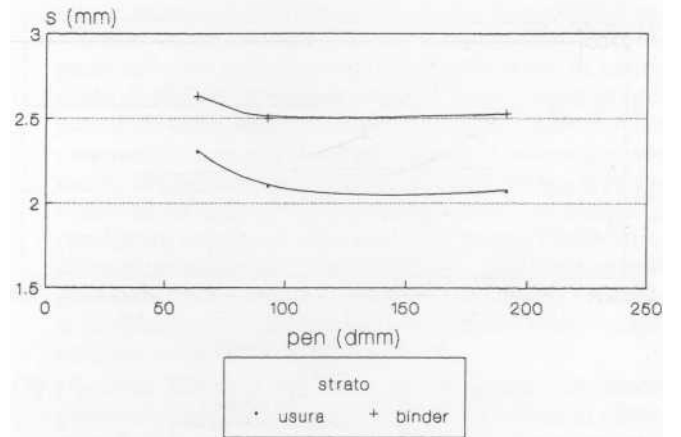


Fig. 9c.

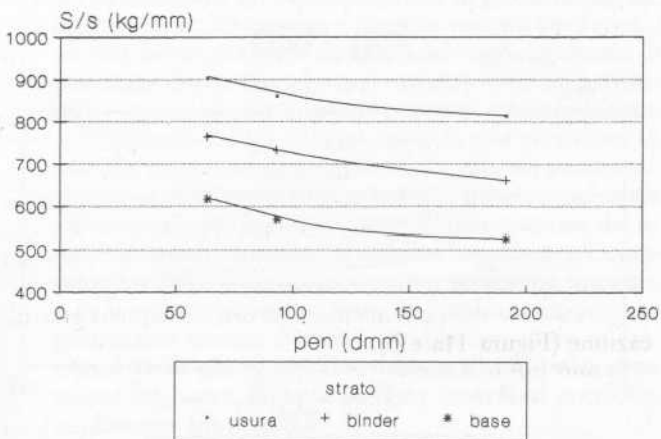


Fig. 10c.

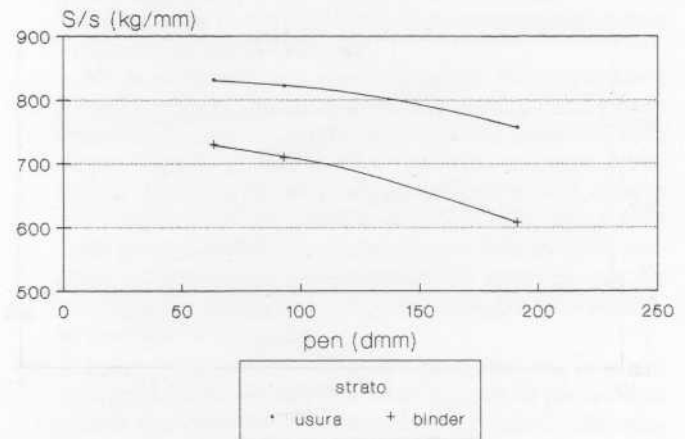


Fig. 9 a, b, c - Influenza della granulometria. 4.5% di bitume: Stabilità, scorrimento e rigidezza.

Fig. 10 a, b, c - Influenza della granulometria. 5% di bitume: Stabilità, scorrimento e rigidezza.

Fig. 11a. 5.5 %

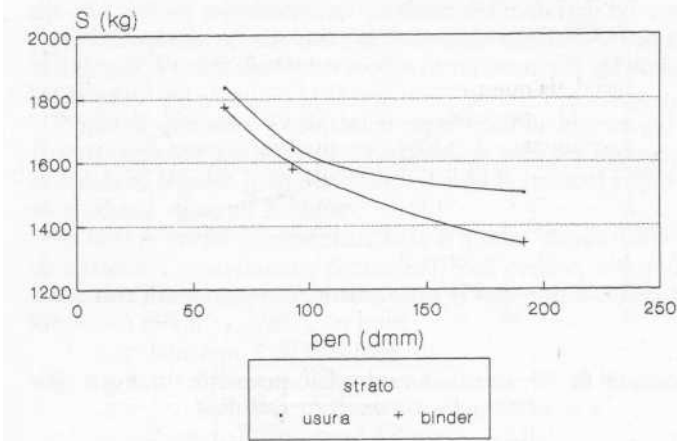


Fig. 11b.

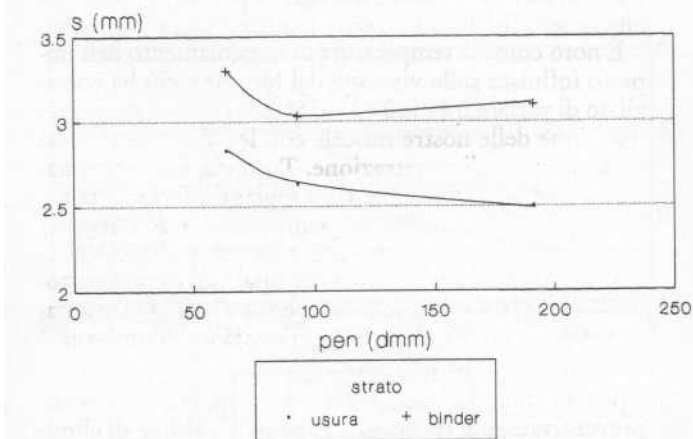


Fig. 11c.

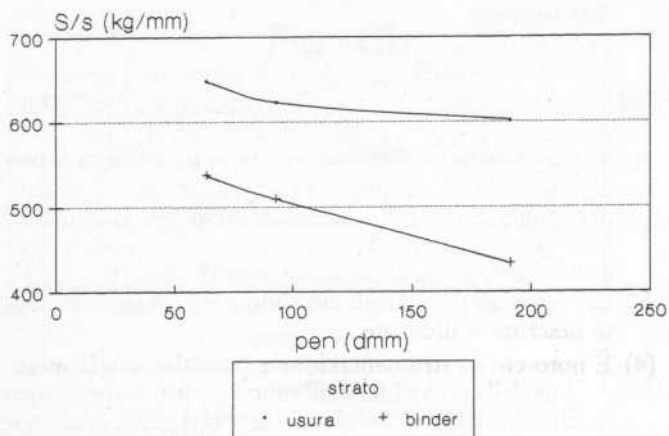


Fig. 11 a, b, c - Influenza della granulometria. 5.5% di bitume: Stabilità, scorrimento e rigidità.

E) % OTTIMA. Per completezza si riporta un ulteriore confronto eseguito questa volta su miscele di massima resistenza, ma proprio per questo con caratteristiche compositive difformi che suggeriscono maggior attenzione nell'analisi dei risultati.

Sinteticamente si rileva che lo strato più profondo (base) ha resistenza maggiore, ma è al contempo deformabile per la sua granulometria a masse aperte (Figura 12a e b). Ne consegue che, come richiesto, è lo strato superficiale d'usura ad essere il più rigido, mentre il primato in senso opposto spetta al binder che figurerebbe come strato-cuscinetto con prestazioni teoricamente inferiori (ma si pensi piuttosto alla sua posizione nella pavimentazione, agli spessori e alle funzioni cui è chiamato ad adempiere, più che accettabili secondo gli standard vigenti) a quelle dell'ultimo strato di fondazione (Figura 12c).

Si può dunque concludere che la concomitanza di diverse variabili sia responsabile di una certa eterogeneità di comportamento che ben difficilmente è riconducibile ad un'interpretazione univocamente ascrivibile alla prova Marshall.

Fig. 12a. % Ott.

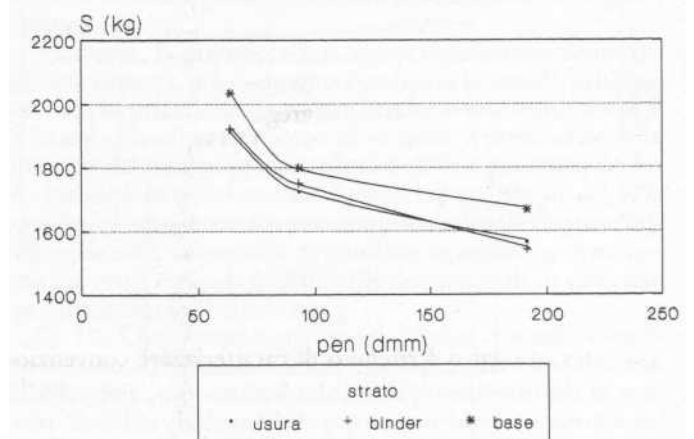
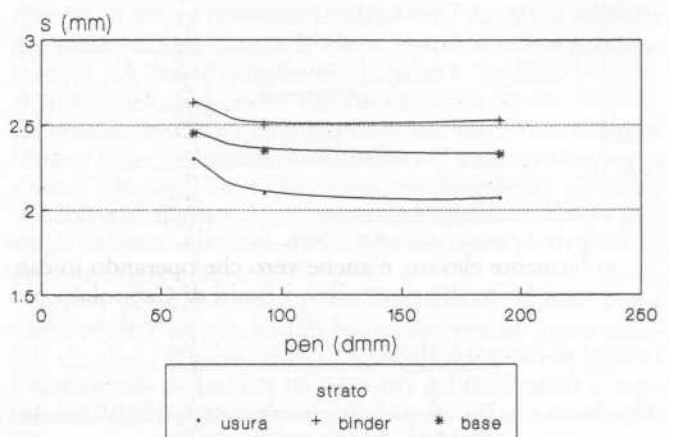
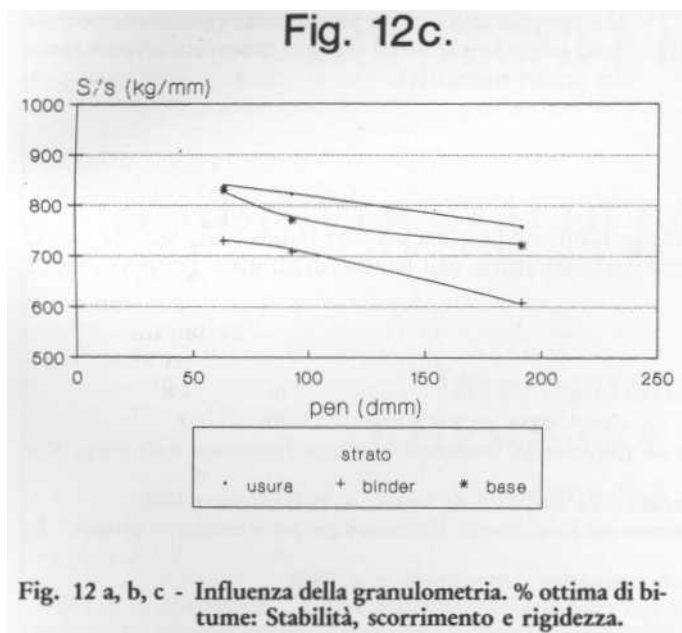


Fig. 12b.





9. Conclusioni

La Norma CNR 30/73 recita a proposito della prova Marshall: "(...) misura convenzionalmente le proprietà meccaniche (1) di miscele bituminose confezionate a caldo (2) con bitumi solidi o semisolidi ed aggregati lapidei tutti passanti al crivello 30 UNI o al setaccio da 1" (3), sottoponendo a rottura, in condizioni di prova standardizzata (4), provini cilindrici (...)".

Alla base della sperimentazione sin qui descritta, volendo poi dare una risposta alle obiezioni precedentemente sollevate, si ritiene che la citata definizione possa stimolare alcune considerazioni critiche conclusive.

(1) Sino ad oggi si è ritenuto di caratterizzare convenzionalmente *in toto* le proprietà meccaniche di una miscela mediante stabilità e scorrimento misurate con apparecchio Marshall. Gli incrementi quantitativi e la composizione qualitativa del traffico degli ultimi anni hanno determinato un rapido degrado di pavimentazioni, causato da un'impresvisa e precoce rottura per fatica o elevata deformabilità, vale a dire dal raggiungimento di uno stato limite che solo approssimativamente è stimabile a mezzo di una comune prova di schiacciamento.

D'altronde si è già rilevato come la sola variazione di uno dei parametri di progetto della miscela possa incidere sostanzialmente sulle grandezze misurate nel corso del test; solo cambiando la classe di penetrazione del legante si hanno variazioni di stabilità considerevoli, comprese fra 200 e 400 kg, anche per un medesimo impasto.

Se la nostra sperimentazione ha fornito resistenze singolarmente elevate, è anche vero che operando in cantiere è facile che si superino i limiti di Capitolato con minor larghezza, si che le predette escursioni potrebbero divenire intollerabili.

Si vuole inoltre osservare come la prassi esecutiva preveda di norma di apportare alla stabilità Marshall una correzione che tenga conto delle caratteristiche geome-

triche dei provini stessi, cosa segnalata da taluni Autori come 'elemento spurio nei riguardi della distribuzione stocastica delle misure'. Siccome la ricerca eseguita non ha impegnato popolazioni di provini di sufficientemente elevata numerosità, si da consentirci di entrare nel merito della questione, possiamo solamente rilevare che l'elaborazione dei dati corretti (si badi però che sono state convalidate solo prove eseguite su campioni dalle dimensioni compatibili con le tolleranze ammesse) fornisce grandezze più omogenee, come a dire che le eventuali irregolarità fossero dovute proprio al volume del provino di conglomerato.

(2) La Normativa vigente consente di verificare con apparecchio Marshall qualsiasi miscela bituminosa (salvo poi controllarne la componente granulometrica), purché sia stata confezionata a caldo. Ciò permette di uniformare il *modus operandi* su conglomerati da usura e misti da base, qualitativamente e funzionalmente differenti (i risultati discussi al punto 8 lo provano). Inoltre, nulla vieta di testare allo stesso modo i provini confezionati *ex novo* in laboratorio (come quelli utilizzati nella nostra ricerca) e quelli 'vecchi', rimaneggiati o ricostruiti su campioni prelevati in cantiere, aventi a proprio carico una vita in termini di sollecitazioni, quanto meno termiche.

È noto come la temperatura di mescolamento dell'impasto influisca sulla viscosità del bitume e ciò ha consigliato di variare fra i 140 ed i 155°C le condizioni di preparazione delle nostre miscele con leganti dalle diverse caratteristiche di penetrazione. Tuttavia, il condizionamento dei provini prima dello schiacciamento si fa avvenire ad un'unica prefissata temperatura e ad assegnate condizioni temporali, che non solo ostano l'individuazione di un'univocità comportamentale (in campo elastoplastico o plasto-viscoso), ma che vanificano (e i risultati lo dimostrano nuovamente) l'adozione d'un 'range' termico nella fase preliminare.

(3) I provini Marshall devono essere preparati con inerte preventivamente essiccato a 105-110°C, al fine di eliminare da essi ogni residuo d'umidità che comprometterebbe la qualità del prodotto finito. Tale intervento può essere criticabile per due diversi motivi: c'è il rischio di alterare a livello litologico-mineralogico alcuni costituenti dell'aggregato; non si rispecchiano le effettive modalità d'utilizzo in cantiere dove l'essiccazione può essere realizzata in modo naturale.

Ma la prescrizione a nostro giudizio più importante è quella relativa alle dimensioni dei grani, sul cui valore massimo è posto un limite che si traduce nella necessità di pre-vagliare gli inerti, eliminando in sostanza il pietrisco. Tuttavia, se quest'ultima componente è assente nei conglomerati per strati superficiali, essa non manca nelle granulometrie più aperte che, per tale motivo, vengono comunemente corrette prima di essere testate. Le conseguenze pratiche di ciò sono state precedentemente descritte e illustrate.

(4) È noto che la strumentazione e parzialmente la metodologia della prova Marshall sono oggetto di precise specifiche che definiscono gli standard operativi. Allo stesso tempo però rimangono delle lacune che la Norma non riesce a colmare, in quanto numerosi sono i parametri di progetto su cui intervenire e che, a posteriori, solo

i Capitolati in qualche modo provvedono a regolamentare. Sorge di fatto un dualismo che lascia eccessivi spazi agli Operatori e che non può che nuocere a ripetibilità

e riproducibilità della prova stessa che invece potrebbero essere tutelate con una più completa articolazione dei criteri normativi.

Ringraziamenti.

È nostro dovere ricordare la faticosa e competente collaborazione gentilmente prestata per una buona riuscita della ricerca dagli Ingg. Filippo Barzon e Angelo Bregolin, nonché dal personale del Laboratorio dell'Istituto di Strade e Trasporti, Facoltà di Ingegneria, Università di Padova.

BIBLIOGRAFIA

- B. JAFORTE, S. DI MINO "Contributo allo studio delle caratteristiche dei conglomerati bituminosi mediante l'estensione della prova Marshall". Asfalti Bitumi Catrami, n. 272, Marzo 1964.
- F.A. SANTAGATA "La percentuale di legante nei conglomerati bituminosi". La Rivista della Strada, n. 318, Gennaio 1968.
- S. TORRISI, M. TEMPESTINI "Sulla determinazione del dosaggio di bitume nei conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali". La Strada, Marzo-Aprile 1978.
- C. BENEDETTO "La prova Marshall. Contributo per un aggiornamento normativo". Autostrade, n. 4, 1983.
- M. AGOSTINACCHIO "Dosaggio ottimale di bitume in conglomerati neri stradali: una valutazione teorica". Autostrade, n. 3, 1984.
- A. LO BIANCO, G. TESORIERE "Osservazioni e considerazioni sulla prova Marshall. Indagine sperimentale e ricerca statistica sui conglomerati bituminosi per binder". Rassegna del bitume, anno XV, I trimestre 1988.
- T. PIZZOCCHERO, M. PASETTO "Influenza della qualità del legante sulle proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi nella prova Marshall". Costruzioni Strade Cantieri, anno VI, Giugno 1989.
- SHELL ITALIANA S.p.A. "Il calcestruzzo bituminoso". Servizio Bitumi/Emulsioni.
- C.N.R. Bollettini Ufficiali nn. 23/71, 24/71, 27/72, 30/73, 34/73, 35/73, 38/73, 40/73, 48/75, 66/78, 67/78, 68/78, 69/78, 121/87.