

SITEBSi srl
**Rassegna
del bitume**

RIVISTA DEL SITEB-ASSOCIAZIONE ITALIANA BITUME ASFALTO STRADE

ESTRATTO DAL N° **31/98**

**Proprietà fisiche degli aggregati lapidei e loro influenza
sulle caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose**

**Physical properties of aggregates and their effect on the
mechanical characteristics of bituminous mixtures**

Ezio Santagata

Politecnico di Torino, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili

Proprietà fisiche degli aggregati lapidei e loro influenza sulle caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose

Physical properties of aggregates and their effect on the mechanical characteristics of bituminous mixtures

EZIO SANTAGATA

Politecnico di Torino, Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture Civili

Riassunto

Vengono presentati i risultati di una serie di indagini sperimentali finalizzate a mettere in evidenza l'influenza che le proprietà fisiche degli aggregati hanno sulle caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose. In particolare sono state effettuate prove di modulo elastico su miscele bituminose preparate con tecniche idonee per valutare in maniera distinta l'effetto delle caratteristiche di forma e quello della distribuzione granulometrica. Sono stati inoltre effettuati degli studi di mix design seguendo vari approcci e dimostrando l'effettiva importanza che una corretta scelta degli aggregati ha per l'ottenimento di miscele bituminose ad elevate prestazioni.

Summary

The results of a series of experimental investigations are presented by highlighting the effect that the physical properties of aggregates have on the mechanical characteristics of bituminous mixtures. Elastic modulus tests have been performed on various bituminous mixtures prepared by means of appropriate procedures specifically conceived in order to evaluate separately the effect of shape characteristics and of particle size distribution. Moreover, various mix design studies have been carried out by following different approaches: the obtained results prove that the correct choice of the aggregates strongly affects the production of high performance bituminous mixtures.

1. Introduzione

Gli aggregati lapidei rappresentano una preziosa risorsa territoriale il cui sfruttamento per la costruzione delle pavimentazioni stradali è regolamentato da vincoli legislativi e prescrizioni di capitolato estremamente rigidi. Lo studio per il loro impiego è soggetto a continui processi di ottimizzazione da un punto di vista tecnico ed economico per tenere conto dell'effetto che le loro proprietà hanno sulle prestazioni dell'intera sovrastruttura.

In tal senso si possono individuare due diversi aspetti delle prestazioni di una sovrastruttura che debbono essere presi in esame simultaneamente da chi è preposto alla sua progettazione, costruzione e manutenzione:

- le **prestazioni strutturali**, legate al comportamento tenso-deformativo e alla resistenza a fatica della sovrastruttura soggetta ai carichi di traffico e alle sollecitazioni di origine climatica;
- le **prestazioni funzionali**, connesse con l'interazione della pavimentazione con i veicoli così come viene percepita dagli utenti soprattutto con riferimento al comfort e alla sicurezza di guida.

Sulle prestazioni strutturali e funzionali delle sovrastrutture influiscono le caratteristiche degli aggregati che possono essere classificate come segue:

- **caratteristiche chimiche** (petrografiche e mineralogiche);
- **caratteristiche meccaniche**;
- **caratteristiche fisiche** (volumetriche, dimensionali, di forma e di rugosità superficiale).

Tali gruppi di caratteristiche sono naturalmente legati tra loro, ma vengono generalmente studiati in maniera disgiunta in modo da semplificare l'approccio al loro studio in laboratorio.

Nella presente memoria vengono trattate unicamente le proprietà fisiche degli aggregati, mettendo in luce il loro effetto sulle caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose che determinano in larga misura le prestazioni delle pavimentazioni flessibili. A tale scopo si fa riferimento a risultati sperimentali ottenuti nel corso di una serie di indagini di laboratorio effettuate dall'Autore presso il Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino. Vengono così forniti degli esempi relativi ai criteri di selezione dei materiali lapidei aventi le caratteristiche ottimali che si ritiene possano essere utili per Amministrazioni ed Imprese nell'assicurare agli utenti della strada pavimentazioni di qualità.

2. Caratteristiche fisiche degli aggregati

Un generico elemento lapideo, detto granulo, può essere caratterizzato dal punto di vista fisico facendo riferimento ad una serie di parametri e di grandezze che ne riassumono le caratteristiche volumetriche, dimensionali, di forma e di rugosità superficiale. Esse condizionano le proprietà della miscela di cui fanno parte in quanto hanno un effetto sulle interazioni tra i singoli granuli, sia all'atto del costipamento sia nelle condizioni di servizio, e sulle interazioni che questi ultimi hanno con la matrice legante costituita da bitume, normale o modificato, e da filler minerale. Come indicato schematicamente in Figura 1, ciascun granulo di aggregato possiede delle cavità che sono in parte interne alla massa dell'elemento ed in parte comunicanti con l'esterno. Con riferimento a queste ultime possono inoltre essere individuati dei volumi che possono essere occupati da una parte del bitume presente nella miscela, ed altri che risultano inaccessibili al legante in ragione della loro ridotta dimensione.

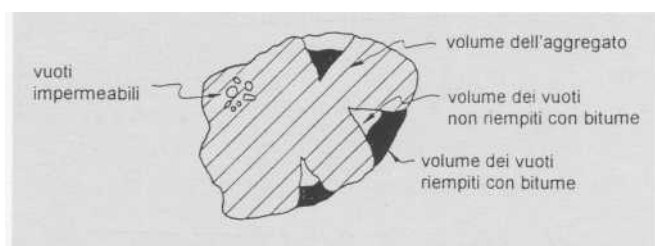


Fig. 1 - Rappresentazione schematica dell'interazione tra un aggregato ed il bitume

Alla luce di quanto rappresentato in figura, per un aggregato possono essere definite quattro diverse masse volumetriche:

- la **massa volumica reale dei granuli** γ_g , definita come la massa di un volume unitario del materiale solido, esclusi i pori esistenti all'interno dei granuli;
- la **massa volumica apparente dei granuli** γ_a , definita come la massa di un volume unitario del materiale solido, inclusi i pori interni ai granuli non saturabili con acqua;
- la **massa volumica dei granuli saturi a superficie asciutta** γ_{ssa} , definita come la massa di un volume unitario del materiale, inclusi i pori esterni saturabili con acqua;
- la **massa volumica effettiva dei granuli** γ_e , definita come la massa di un volume unitario del materiale, inclusi i pori esterni saturabili con acqua ma non con bitume.

Tali grandezze, determinate per via sperimentale mediante opportune procedure di prova, vengono utilizzate, una volta noto il contenuto percentuale di legante della miscela, per il calcolo di una serie di parametri, detti volumetrici, che riassumono sinteticamente lo stato di addensamento e di aggregazione interna della miscela bituminosa compattata. I parametri volumetrici più comunemente utilizzati sono:

- la **percentuale dei vuoti %V**, definita come il rapporto tra il volume dei vuoti residui e il volume totale della miscela;
- i **vuoti nella miscela degli aggregati VMA**, definiti come il rapporto percentuale tra il volume compreso tra gli elementi lapidei (vuoti e bitume) e il bitume totale della miscela;
- i **vuoti riempiti di legante VFA**, definiti come la percentuale del volume compreso tra gli aggregati occupata da bitume.

Per quanto riguarda le dimensioni di un granulo di aggregato, esse restano definite facendo riferimento al cosiddetto **diametro medio**, che corrisponde all'apertura più piccola del setaccio o del crivello attraverso cui esso passa. Questo tipo di informazione può essere esteso ad un insieme di granuli: in tal caso, ad un campione rappresentativo dell'aggregato si associa la sua **distribuzione granulometrica**, espressa con una serie di valori di passanti percentuali corrispondenti ad una serie di aperture di setacci e/o crivelli normalmente espresse in millimetri. Gli aggregati lapidei utilizzati per la preparazione delle miscele per uso stradale sono generalmente disponibili in cava in cumuli divisi secondo la loro frazione dimensionale, designata con una coppia di numeri che indica il minimo ed il massimo diametro medio. Il loro cor-

retto impiego richiede inoltre che sia nota anche la relativa distribuzione granulometrica.

Per la descrizione delle caratteristiche di forma di un aggregato, viene fatto comunemente riferimento ai seguenti coefficienti caratteristici definiti dalle norme CNR [1] e determinati sperimentalmente impiegando appositi calibri e vagli a fenditure parallele, eseguendo prove su campioni rappresentativi dell'aggregato in oggetto:

- il **coefficiente di forma** C_f , pari al rapporto tra la lunghezza L e lo spessore S ;
- il **coefficiente di appiattimento** C_a , pari al rapporto tra il diametro medio D e lo spessore S ;
- il **coefficiente di allungamento** C_l , pari al rapporto tra la lunghezza L ed il diametro medio D .

Infine, nella caratterizzazione degli aggregati lapidei è di fondamentale importanza tenere conto della loro **rugosità superficiale**. A seconda della loro origine e della loro composizione gli aggregati possono infatti avere una superficie più o meno rugosa che influisce sulle interazioni meccaniche che essi hanno tra loro, con la matrice legante e, quando esposti in superficie, con i pneumatici dei veicoli.

3. Prestazioni strutturali di una pavimentazione

Per effetto del transito dei veicoli sulla sua superficie, una pavimentazione stradale è soggetta nel tempo a ripetute sollecitazioni che vengono distribuite al suo interno e trasmesse al sottofondo di appoggio in una maniera che dipende dalle caratteristiche di rigidità dei materiali costituenti i vari strati. Le prestazioni strutturali della pavimentazione dipendono inoltre anche dalle caratteristiche di resistenza dei materiali che, a seconda dei casi, possono dar luogo a fenomeni di rottura per fatica (miscele bituminose) o di rottura con accumulo di deformazioni plastiche (stabilizzati non legati e terreni di sottofondo).

Esistono moltissime apparecchiature che possono essere impiegate in laboratorio per lo studio delle proprietà strutturali di un conglomerato bituminoso. Esse si differenziano in base alla modalità di confezionamento e alla geometria dei provini, al tipo di sollecitazioni ad essi applicate, e alle modalità con le quali vengono misurate le corrispondenti deformazioni. Privilegiando un approccio razionale allo studio di tali proprietà, presso il Politecnico di Torino si sono da tempo avviate numerose sperimentazioni legate all'uso di una apparecchiatura pneumatica a controllo elettronico denominata Nottingham Asphalt Tester (NAT). Messa a punto dal gruppo di

ricerca della Nottingham University [2-4], tale strumentazione consente di misurare una serie di grandezze fisiche tra le quali si segnala il cosiddetto modulo elastico, rappresentativo della rigidità del materiale in condizioni nelle quali possono essere trascurati i contributi deformativi di natura viscoplastica. Esso viene misurato nella configurazione di trazione indiretta a 20 °C mediante l'applicazione di impulsi di carico aventi una predefinita forma d'onda (Figura 2). Corrispondentemente, mediante dei trasduttori di spostamento LVDT vengono misurate le deformazioni trasversali del campione dalle quali si può risalire, mediante una modellazione di materiale elastico lineare, al modulo di rigidità elastico E definito come segue:

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot s} \cdot (0,273 + \nu) \quad (1)$$

ove P indica il carico verticale applicato, Δ la deformazione totale orizzontale, s l'altezza del campione e ν il coefficiente di Poisson del materiale.

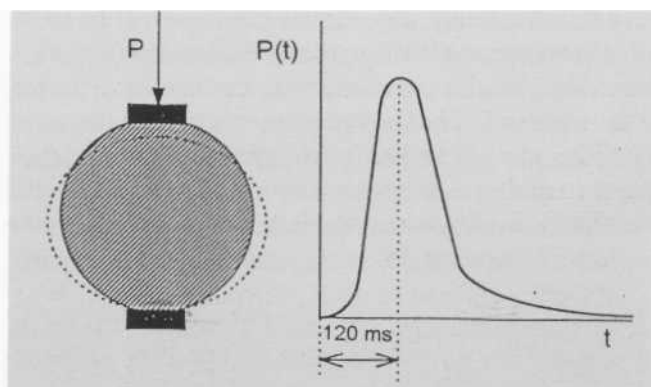


Fig. 2 - Prova per la determinazione del modulo elastico con il Nottingham Asphalt Tester (NAT)

L'esecuzione di tale prova su miscele aventi composizioni note consente di mettere in luce l'effetto che le proprietà fisiche degli aggregati hanno sulle prestazioni strutturali del conglomerato bituminoso. I granuli dell'aggregato occupano infatti circa l'80% del volume totale della miscela, formando uno scheletro litico che attraverso l'addensamento e il contatto tra i grani influisce sulle proprietà tenso-deformative e determina lo sviluppo della resistenza al taglio. In tale contesto tanto le loro caratteristiche granulometriche e di forma quanto quelle meccaniche e chimiche rivestono un ruolo particolarmente importante [5]; tuttavia nel seguito si darà spazio esclusivamente all'esame delle caratteristiche

fisiche evidenziando il loro effetto sulle prestazioni strutturali e sottolineando come debbano essere tenute in conto in una corretta procedura di proporzionamento (mix design).

Per quanto riguarda la granulometria [5], salvo esigenze particolari, all'atto del mix design le varie classi di aggregati disponibili vengono combinate in modo tale da ottenere una distribuzione granulometrica piuttosto vicina a quella di massimo addensamento definita dalla legge:

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (2)$$

ove d e D indicano rispettivamente il diametro medio dei più grandi elementi passanti da ciascun setaccio e la massima dimensione degli aggregati, mentre l'esponente n risulta pari a 0,45 secondo quanto dimostrato dalle esperienze di Goode e Lufsey [6]. La legge di distribuzione (2) è stata recepita dalle raccomandazioni tecniche statunitensi della Federal Highway Administration (FHWA) [7] che propongono per il controllo della curva granulometrica di un aggregato la rappresentazione di Figura 3. In ascissa viene riportata la dimensione delle aperture dei setacci elevata alla potenza 0,45, mentre in ordinata sono riportati i passanti percentuali in scala lineare. Definito che sia il diametro massimo dell'aggregato, cui corrisponde un passante pari a 100, la retta di massimo addensamento si ottiene congiungendo il punto relativo al diametro massimo con l'origine.

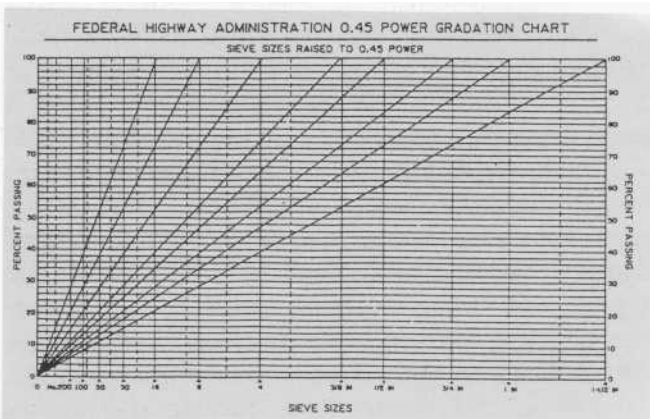


Fig. 3 - Il grafico per il controllo della granulometria della FHWA [5]

nel conglomerato allo stato compattato. In tali condizioni le miscele sottoposte ai carichi di traffico tendono infatti a chiudersi troppo e a far rifluire in superficie il legante in eccesso con un conseguente pericoloso aumento della scivolosità del piano stradale. Tali accorgimenti sono stati inoltre integrati nelle prescrizioni per il mix design derivanti dal recente programma di ricerca statunitense denominato Strategic Highway Research Program (SHRP), con l'inclusione di una serie di vincoli supplementari e la definizione di una zona del grafico-di Figura 3 che non deve essere attraversata dalla curva granulometrica presa in esame [8].

Le prescrizioni correntemente contenute nelle Norme Tecniche dei Capitolati Speciali di Appalto per pavimentazioni stradali derivano in parte da questo approccio, con la definizione di fusi granulometrici che discendono anche dalle esperienze passate. A titolo di esempio in Figura 4 vengono riportate le prescrizioni del capitolato ANAS [9] per strati di usura. Esse individuano miscele a grana più grossa rispetto a quelle corrispondenti alle condizioni di massimo addensamento FHWA. Rispettando i vincoli del fuso ANAS viene praticamente scongiurato il rischio di attraversare la cosiddetta zona vietata SHRP, mentre risulta possibile violare le condizioni poste dai punti di controllo superiori.

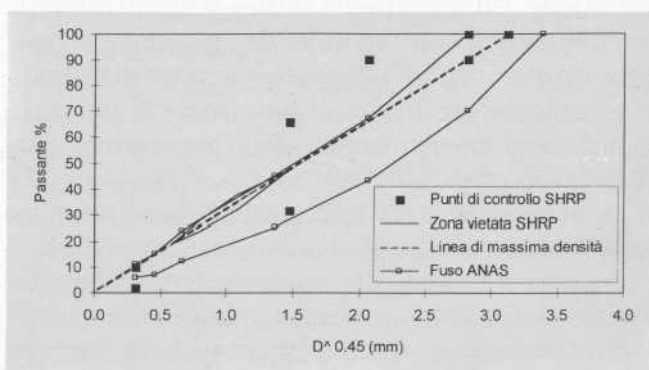


Fig. 4 - I fusi granulometrici ANAS riportati nel grafico di controllo della FHWA con l'inserimento dei punti di controllo SHRP

Le prescrizioni di capitolato fissano inoltre degli intervalli della percentuale di filler (passante al setaccio da 0,075 mm) più ridotti rispetto a quello derivante dalla semplice applicazione del modello (2) e praticamente coincidenti con quelli suggeriti dalle prescrizioni SHRP. Ciò risulta di notevole importanza in quanto il filler svolge un ruolo fondamentale all'interno della struttura del conglomerato bituminoso, costituendo insieme con il bitume un mastice legante le cui proprietà influenzano direttamente le caratteristiche di rigidezza e di resistenza della mi-

sceola. La sua percentuale nella miscela deve pertanto poter essere scelta dal progettista in modo da soddisfare le esigenze del caso: un eccesso di filler può infatti condurre ad un eccessivo addensamento della struttura litica del conglomerato (VMA eccessivamente basso) con il rischio di non poter introdurre nella miscela una quantità di bitume sufficiente in grado di preservare la sua durabilità. Un sovradosaggio di filler può inoltre aumentare la superficie specifica dell'aggregato riducendo di conseguenza l'effettivo spessore delle pellicole di bitume che avvolgono i granuli. Si noti inoltre che anche un quantitativo di filler troppo esiguo può influire negativamente sulle proprietà della miscela: in tal caso si ottengono infatti miscele troppo poco addensate con elevati valori della percentuale dei vuoti e della VMA. Il mastice legante costituito dal bitume e dal filler risulta inoltre troppo poco rigido e ciò inficia le proprietà tenso-deformative della miscela.

Riconoscendo nel filler un parametro chiave del comportamento meccanico delle miscele bituminose, nelle prescrizioni SHRP viene introdotto un ulteriore vincolo al mix design: viene infatti fissato un intervallo di accettazione del rapporto tra la massa del filler e del bitume m_f/m_b (compreso tra 0,6 e 1,2) in modo da ottenere mastici di opportune caratteristiche reologiche e strutture litiche aventi idonee proprietà volumetriche [8].

Altri Autori [10] hanno invece seguito un diverso approccio al controllo del quantitativo di filler presente nelle miscele, proponendo un modello alternativo a quello indicato in (2) nel quale viene introdotto un ulteriore coefficiente F che corrisponde alla percentuale di filler desiderata. Il modello da essi messo a punto è dato dall'espressione:

$$P = \frac{(100 - F) \cdot (d^n - 0,075^n)}{(D^n - 0,075^n)} + F \quad (3)$$

4. Risultati sperimentali

Per evidenziare l'effetto della forma e rugosità degli aggregati sulle prestazioni meccaniche delle miscele bituminose si riportano in Tabella 1 i risultati sperimentali di prove effettuate su campioni di miscele bituminose per strati di collegamento preparati in modo da riprodurre in maniera esatta la distribuzione granulometrica corrispondente ad una curva centrata nel fuso definito dalle prescrizioni dell'ANAS [9]. Essi sono stati preparati con bitumi di classe 80/100 utilizzando aggregati di differente origine preventiva-

mente setacciati in modo da isolare frazioni granulometriche comprese tra coppie di setacci successivi della serie UNI. Gli aggregati A derivano dalla frantumazione di ghiaie del Ticino della provincia di Novara; gli aggregati B provengono invece dalla frantumazione della roccia di Villanova Mondovì (Cuneo).

Tabella 1 - Influenza dell'impiego di aggregati di diversa forma e rugosità sulle proprietà meccaniche e volumetriche di miscele bituminose per strati di collegamento

Aggregati	% Bitume	m_f/m_b	%V	VMA	VFA	E_{NAT} [MPa]
A	4,75	1,26	3,9	15,1	73,9	4170
B	4,60	1,30	2,8	13,6	79,4	5950
B	4,90	1,22	2,1	13,5	84,3	5580

I dati di Tabella 1 indicano inequivocabilmente che, a parità di contenuto di bitume, gli aggregati di origine fluviale (tipo A) determinano, in ragione delle loro specifiche caratteristiche fisiche, una struttura litica che risulta meno addensata rispetto a quella delle miscele preparate con gli aggregati di tipo B (valore più elevato della VMA). Conseguentemente per queste ultime si riscontrano valori del modulo elastico dell'ordine dei 5700 MPa, ben superiori ai 4170 MPa delle miscele ideali contenenti gli aggregati A. Viene così confermato quanto già osservato da altri Autori: le caratteristiche di forma, pur non influenzando direttamente la proprietà meccaniche espresse dal modulo elastico (o da altre grandezze quali il modulo complesso), esercitano una influenza indiretta attraverso il loro effetto sulle caratteristiche di addensamento [11].

Come già indicato in precedenza, all'atto pratico una miscela bituminosa viene preparata combinando tra loro classi di aggregati con procedure di ottimizzazione che mirano ad ottenere una granulometria risultante vicina a quelle ideali definite da fusi granulometrici o da modelli analitici. Per gli aggregati A e B presi in esame si è pertanto effettuata una ottimizzazione in modo da avvicinare la distribuzione ideale di centro fuso ANAS. Si sono così ottenute miscele aventi le caratteristiche meccaniche e volumetriche indicate in Tabella 2.

È interessante osservare che le proprietà strutturali delle miscele così ottenute sono ben lontane da quelle delle miscele ideali di Tabella 1. Facendo riferimento sia alle caratteristiche meccaniche sia a quelle volumetriche si osserva inoltre che le differenze tra le miscele preparate con i due tipi di aggregati risul-

tano ben più ridotte rispetto a quelle rilevate per le miscele a granulometria ideale perfettamente controllata. Ciò deriva dal fatto che la struttura litica delle miscele è in questo caso influenzata, oltre che dalle diverse caratteristiche di forma e di rugosità, anche dalle distribuzioni granulometriche delle singole classi di aggregati impiegati.

Tabella 2 - Proprietà meccaniche e volumetriche di miscele bituminose per strati di collegamento ottimizzate facendo riferimento al fuso granulometrico ANAS

Rife- rimento	% Bitume	%V	VMA	VFA	E_{NAT} [MPa]
A-ANAS	4,75	9,0	19,6	54,2	3340
B-ANAS	4,70	8,0	18,4	56,8	3660

Queste considerazioni sono confermate dall'andamento delle curve granulometriche riportate in Figura 5 secondo una rappresentazione analoga a quella illustrata nella Figura 3. Mentre la curva caratteristica delle miscele ideali di centro fuso ANAS risulta piuttosto vicino alla retta di massimo addensamento, le distribuzioni granulometriche effettive delle miscele ottimizzate si discostano da essa in maniera evidente. In particolare, ciò accade in corrispondenza dei diametri superiori ai 5 mm (corrispondenti ad un valore di $D_{0,45}$ pari a 2,06), ed in maniera più marcata per gli aggregati di tipo A cui corrisponde in effetti una struttura litica meno addensata. Nel caso degli aggregati di tipo A si è pertanto valu-

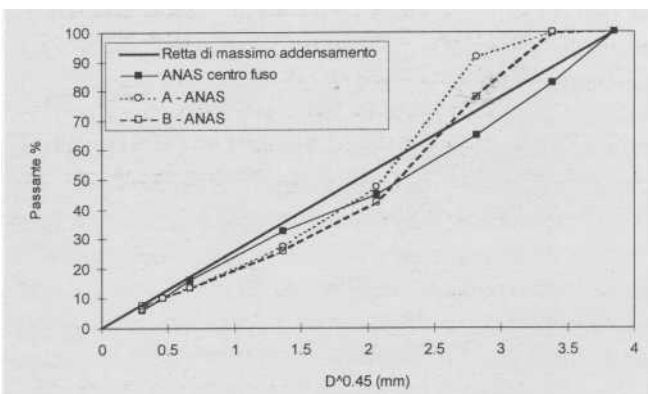


Fig. 5 - Curve granulometriche di miscele ideali ed ottimizzate

tata la possibilità di utilizzare procedure di ottimizzazione alternative a quella associata al fuso ANAS prendendo in esame le curve ideali di riferimento descritte in precedenza e sintetizzate dalle equazioni (2) e (3). I risultati sperimentali ottenuti da prove volumetriche e meccaniche effettuate su tali miscele sono riportati in Tabella 3 [12].

Tabella 3 - Influenza della distribuzione granulometrica di riferimento sulle proprietà meccaniche di miscele bituminose per strati di collegamento

Rife- rimento	% Bitume	%V	VMA	VFA	E_{NAT} [MPa]
ANAS	4,75	9,0	19,6	54,2	3340
SHRP (2)	5,00	6,5	17,9	63,5	3540
Modello (3)	4,75	9,5	20,0	52,7	3200
Modello (3)	5,55	8,0	20,3	60,6	2790

Dall'esame dei risultati di Tabella 3 si evince che le caratteristiche strutturali ottimali della miscela vengono determinate da un'ottimizzazione che prende a riferimento il modello (2) derivante dalle prescrizioni del programma SHRP: per tale miscela si riscontra infatti la più elevata rigidezza associata a valori sufficientemente contenuti della VMA e della percentuale dei vuoti residui %V. Le altre ottimizzazioni, pur fornendo valori accettabili del modulo, hanno condotto a miscele caratterizzate da contenuti dei vuoti dell'8-9%. Si noti inoltre che facendo riferimento al modello (3) ed aumentando la percentuale di bitume della miscela dal 4,75 al 5,55% si è riscontrata una sensibile diminuzione del modulo elastico derivante da un eccessivo riempimento della struttura litica e da una riduzione della rigidezza del mastice filler-bitume [12].

L'impiego di fusi granulometrici e/o di modelli di distribuzione dimensionale per il proporzionamento impongono che venga fatta la scelta del contenuto ottimo di legante sulla base di prove sperimentali volte alle determinazioni delle proprietà volumetriche complessive della miscela o delle sue proprietà meccaniche. Si pensi al metodo empirico di progettazione Marshall, per anni impiegato nel settore stradale per supportare questo tipo di decisione ma che risulta attualmente obsoleto e viene generalmente sostituito da procedure basate sull'impiego di apparecchiature più sofisticate capaci di misurare grandezze meccaniche fondamentali.

In Tabella 4 vengono riportati a titolo di esempio i valori delle grandezze volumetriche e meccaniche relative a miscele a contenuto via via crescente di bitu-

Tabella 4 - Proprietà volumetriche e meccaniche di miscele a crescente contenuto di bitume

% Bitume	%V	VMA	VFA	E_{NAT} [MPa]
4,3	4,4	14,3	69,4	4900
4,9	3,1	14,5	78,9	5360
5,5	2,2	14,6	84,8	3580

me. In questo specifico caso si può osservare che con l'aumento della VFA si determina un progressivo incremento del modulo elastico fino ad un punto oltre il quale si verifica un eccessivo riempimento della struttura litica con conseguente crollo delle caratteristiche strutturali.

Lo stesso tipo di considerazione può essere fatta analizzando i dati di Figura 6, nei quali sono riportati i risultati di una sperimentazione effettuata su miscele preparate con contenuti variabili di filler e di bitume (miscele I, II e III), messe a confronto con una miscela di analoga composizione prodotta in centrale [12].

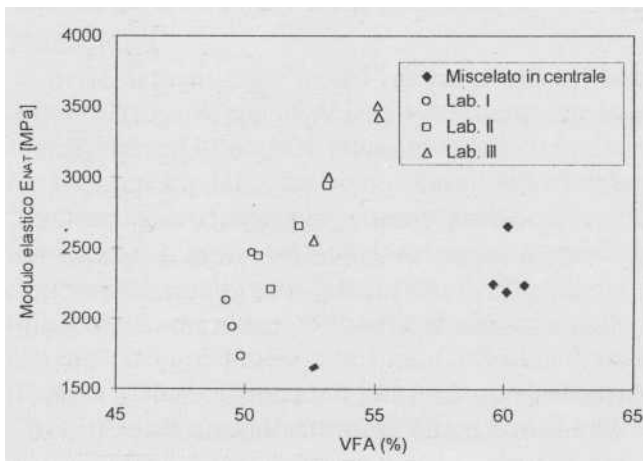


Fig. 6 - Tipica relazione tra la VFA e il modulo elastico

In alternativa agli approcci descritti, il problema del mix design può essere affrontato in una maniera che tiene conto della struttura interna del conglomerato bituminoso e delle interazioni tra le varie classi di aggregato ed i vari componenti (aggregato, filler, bitume). Proposto a livello prettamente teorico da Verstraeten [13] per miscele a minimo contenuto di vuoti, tale approccio è stato ripreso dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino di cui l'Autore fa parte per mettere in relazione tra loro la struttura interna del conglomerato bituminoso e la ricetta di miscela avente una percentuale dei vuoti predefinita [14-15]. Il modello proposto prevede che:

- l'inerte grosso forma lo scheletro litico principale per mutuo contatto dei grani;
- i grani della sabbia vengono a contatto tra loro;
- i grani del filler vengono a contatto tra loro;
- la miscela di sabbia, filler e bitume riempie i vuoti dell'inerte grosso;
- una parte del legante avvolge l'inerte grosso e la sabbia;
- il mastice bitume-filler riempie i vuoti della sabbia;
- la restante parte del legante riempie i vuoti del filler.

Per tradurre in termini pratici tali condizioni vengono effettuate prove di caratterizzazione degli aggregati che consistono nella determinazione della massa volumica dei granuli γ e del loro indice dei vuoti e . Quest'ultimo, valutato con la procedura dell'addensamento su tavola a scosse, è influenzato, oltre che dalla granulometria, anche dalla forma e dalla rugosità superficiale dei granuli che sono quindi tenuti indirettamente in conto nella procedura di mix design proposta.

Sulla base di queste determinazioni sperimentali il modello conduce ad una serie di equazioni di congruenza volumetrica che opportunamente sviluppate possono essere scritte come segue:

$$\begin{cases} m_p = \frac{100}{1 + \frac{\gamma_s}{\gamma_p} \frac{e_p - \mu}{1 + e_s} + \frac{\gamma_f}{\gamma_p} \frac{(e_s - \rho) \cdot (e_p - \mu)}{(1 + e_s) \cdot (1 + e_f)} - \omega \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \frac{1 + e_p}{1 + e_f}} \\ m_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_f} \frac{e_p - \mu}{1 + e_s} \cdot m_p \\ m_f = \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \frac{e_s - \rho}{1 + e_f} \cdot m_s - \omega \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \frac{1 + e_p}{1 + e_f} \cdot m_p \end{cases} \quad (4)$$

ove con m sono indicate le percentuali in massa, con γ le masse volumiche e con e gli indici dei vuoti di aggregato grosso, sabbia e filler, rispettivamente associati ai pedici p , s ed f . Nelle espressioni (4) compaiono inoltre due parametri μ e ρ , che indicano i rapporti tra il volume delle pellicole che rivestono gli elementi dell'aggregato grosso (μ) e della sabbia (ρ) e i volumi occupati dagli aggregati stessi. Infine, il parametro ω indica il contenuto dei vuoti della miscela espresso in termini decimali.

La percentuale di legante %L, espressa sul peso degli aggregati, viene definita in funzione dei parametri su descritti e della massa volumica del legante γ_b mediante l'equazione:

$$\%L = \gamma_b \cdot \left[\mu \cdot \frac{m_p}{\gamma_p} + \rho \cdot \frac{m_s}{\gamma_s} + e_f \cdot \frac{m_f}{\gamma_f} \right] \quad (5)$$

In Tabella 5 vengono forniti in maniera sintetica alcuni risultati di prove volumetriche e meccaniche effettuate su miscele per strati di usura contenenti gli aggregati A e B già descritti in precedenza e proporzionate in accordo con il metodo proposto [15]. Si osservi che, indipendentemente dal contenuto dei vuoti, per ciascun tipo di aggregato si sono ottenuti valori del modulo di rigidità piuttosto costanti per tutte le miscele: le prove eseguite con il NAT hanno infatti fornito valori medi del modulo elastico a 20 °C compresi tra 4800 e 5040 MPa per le miscele con-

Tabella 5 - Proprietà meccaniche e volumetriche di miscele proporzionate con le espressioni (4) e (5)

Aggregati	% Bitume	m_f/m_b	%V	VMA	VFA	E_{NAT} [MPa]
A	5,30	1,17	5,4	17,6	69,3	5040
A	5,13	1,09	6,2	18,0	65,9	4810
A	4,78	0,91	7,4	18,3	59,7	4800
B	5,20	0,84	5,6	17,4	67,8	3770
B	5,00	0,74	6,6	17,9	63,3	3450
B	4,80	0,65	7,2	18,0	60,1	3440

tenenti aggregati A e tra 3440 e 3770 MPa per quelle preparate con aggregati B. Ciò indica che la tecnica di proporzionamento definita mediante le espressioni (4) e (5) combina armonicamente le varie fasi in modo da pervenire a miscele con caratteristiche dipendenti quasi unicamente dalle proprietà fisiche degli aggregati impiegati.

Occorre inoltre osservare che, contrariamente a quanto riscontrato per le miscele per strati di collegamento, per quelle descritte in Tabella 5 i valori più elevati del modulo elastico corrispondono agli aggregati di tipo A. Ciò indica che al fine del loro utilizzo nel mix design il confronto tra aggregati di diversa origine e natura deve essere sempre supportato da una sperimentazione diretta che prenda in esame grandezze volumetriche e meccaniche significative delle prestazioni in opera.

Alla luce di quanto detto in precedenza a proposito della complessa struttura interna dei conglomerati bituminosi, è evidente che la dipendenza della rigidità di una miscela dalle proprietà degli aggregati lapidei può essere colta soltanto con un approccio unitario che tenga conto del contributo strutturale delle altre fasi costituenti e delle interazioni tra di essi. A tal proposito va citato il lavoro fondamentale pubblicato a più riprese in letteratura da Francken e collaboratori [16-17], che hanno dimostrato come il modulo di un conglomerato bituminoso in condizioni di risposta pressoché elastica possa essere espresso come una funzione esponenzialmente decrescente della percentuale dei vuoti % V e crescente del rapporto tra il volume occupato dagli aggregati ed il volume occupato dal legante (V_a/V_b).

Applicando questi principi ai risultati sperimentali raccolti con il NAT, effettuando prove su miscele di composizione nota l'Autore ha proposto la costruzione grafica riportata in Figura 7 ove sono riportati in scala doppiamente logaritmica i valori del modulo di rigidità elastica E_{NAT} in funzione del rapporto V_a/V_b [12]. Si nota che, come previsto dal

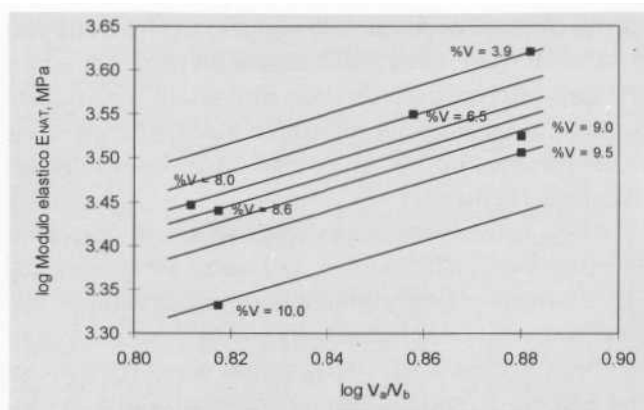


Fig. 7 - Correlazioni tra proprietà volumetriche e meccaniche di una serie di miscele bituminose aventi diversa composizione

modello di Francken, i punti sperimentali sono situati su rette parallele ed inclinate che corrispondono a valori del contenuto dei vuoti che decrescono andando dal basso verso l'alto del grafico.

Questo tipo di rappresentazione può essere pertanto utilizzata a supporto delle operazioni di mix design e di controllo di qualità dei conglomerati bituminosi. Essa richiede inoltre di essere basata su indagini sperimentali finalizzate alla valutazione di altre importantissime proprietà prestazionali quali la resistenza alla fatica e alle deformazioni permanenti [15].

5. Conclusioni

Nelle procedure di mix design e nelle fasi di controllo di qualità è di fondamentale importanza tenere conto dell'effetto che le proprietà fisiche degli aggregati hanno sulle caratteristiche meccaniche delle miscele bituminose.

I risultati sperimentali riportati nella presente memoria dimostrano che tali effetti possono essere messi in evidenza sottoponendo campioni di conglomerato bituminoso a prove di modulo elastico nella configurazione di trazione indiretta ripetuta e a prove finalizzate alla valutazione di una serie di parametri volumetrici. In particolare, è possibile valutare in maniera disgiunta l'effetto delle caratteristiche di forma e quello della distribuzione granulometrica degli aggregati prendendo in esame miscele preparate con particolari procedure di preselezione dei materiali. I risultati ottenuti utilizzando diverse procedure di mix design confermano queste considerazioni ed evidenziano la necessità di dedicare uno spazio anche considerevole alla scelta delle classi di aggregati costituenti più idonee per ciascuna situazione di impie-

go. La facile reperibilità dei materiali, pur se importante nel quadro di una economica gestione delle operazioni di costruzione e manutenzione delle pavimentazioni flessibili, non può dunque essere il fattore determinante nella definizione delle ricette di impasto. È infatti auspicabile che la sperimentazione diretta, preferibilmente effettuata con l'impiego di attrezzature in grado di fornire grandezze connesse con le effettive prestazioni delle miscele bituminose in opera, sia una parte integrante del mix design dei conglomerati bituminosi anche con riferimento alla selezione degli aggregati.

Bibliografia

- [1] C.N.R., "Forma di Aggregati Lapidei", *C.N.R. - Bollettino Ufficiale - (Norme tecniche)*, Anno XVIII, n. 95. 1984.
- [2] Cooper, K.E., Brown, S.F., "Development of Simple Apparatus for the Measurement of the Mechanical Properties of Asphalt Mixes", *Proceedings of the 4th Eurobitume Congress*, Madrid, 1989, pp. 494-498.
- [3] Brown, S.F., Cooper, K.E., Preston, J.N., Bell, C.A., "Development of a New Procedure for Bituminous Mix Design", *Proceedings of the 4th Eurobitume Congress*, Madrid, 1989.
- [4] Cooper, K.E., Brown, S.F. "Assessment of the Mechanical Properties of Asphaltic Mixes on a Routine Basis Using Simple Equipment", *Proceedings of the 5th Eurobitume Congress*, Vol. 1B, Stoccolma, 1993.
- [5] Santagata, E., "Bitumi e Conglomerati Bituminosi", *Manuale dei Materiali per l'Ingegneria*, McGraw-Hill, 1996, pp. 879-916.
- [6] Goode, J.F., Lufsey, L.A., "A New Grafical Chart for Evaluating Aggregate Gradations", *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 31, 1962, pp. 176-197.
- [7] FHWA, "Asphalt Concrete Mix Design and Field Control", *Technical Advisory T5040.27*, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1988.
- [8] Cominsky, R., R.B. Leahy, R.B., Harrigan, E.T., "Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction and Conditioning", *SHRP-A-408*, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., 1994.
- [9] Azienda Nazionale Autonoma delle Strade, *Capitolato Speciale di Appalto, Parte Seconda, Norme Tecniche*, ANAS, Roma, 1993.
- [10] Brown, S.F., Preston, J.N., Cooper, K.R., "Application of New Concepts in Asphalt Mix Design", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 60, 1991, pp. 264-286.
- [11] Di Benedetto, H., de la Roche, C., "State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures", *Bituminous Binders and Mixes, RILEM Report 17*, Ed. L. Francken, E & FN Spon, London, 1998, pp. 135-180.
- [12] Santagata, E., "A Performance-Related Approach to the Mix Design and Quality Control of Bituminous Mixes", *Proceedings, 5th International Rilem Symposium "Mechanical tests for Bituminous Materials - Recent Improvements and Future Prospects"*, Lione, Francia, 14-16 maggio 1997.
- [13] Verstraeten, J., "Contribution a la Formulation de Mélanges Hydrocarbonés Durables et Stables", *La Technique Routiere*, Vol. XXIII, n. 3/1978, pp. 1-16.
- [14] Santagata, E., Bassani, M., De Palma, C., "A rational framework for the mix design of bituminous mixtures", *Proceedings of the 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Strasbourg, France, 7-10 May 1996.
- [15] Bassani M., Santagata, E., De Palma C., "Proprietà Meccaniche di Miscele Bituminose Progettate con il Metodo dei Vuoti", *Atti del Convegno SIV, I Materiali nella Sovrastruttura Stradale*, Ancona, 1996.
- [16] Francken, L., "Propriétés Mécaniques des Mélanges Hydrocarbonés. Méthodes Expérimentales et Prévisionnelles Utilisées dans le Cadre du Dimensionnement des Chaussées", *La Technique Routiere*, Vol. XXI, n. 4/1976.
- [17] Francken, L., Vanelstraete, A., "Complex Moduli of Bituminous Binders and Mixtures. Interpretation and Evaluation", *First European Workshop on the Rheology of Bituminous Binders*, Eurobitume, Bruxelles, 1995.