



**PROGETTO DELLA MISCELA PER CONGLOMERATI
BITUMINOSI “A CALDO”, CON RICICLAGGIO DEL
FRESATO: ANALISI DEL PROBLEMA ED INDAGINE
SPERIMENTALE TRAMITE COMPATTATORE GIRATORIO
SUPERPAVE**

Filippo G. Praticò

Dipartimento di Informatica, Matematica, Elettronica e Trasporti
Università Mediterranea di Reggio Calabria– Via Graziella–Feo di Vito 89100–
Reggio Calabria– Italy
Tel: +39.0965.875230
Fax: +39.0965.875247
E-mail: fpratico@ing.unirc.it

PROGETTO DELLA MISCELA PER CONGLOMERATI BITUMINOSI “A CALDO”, CON RICICLAGGIO DEL FRESATO: ANALISI DEL PROBLEMA ED INDAGINE SPERIMENTALE TRAMITE COMPATTATORE GIRATORIO SUPERPAVE

Filippo Giammaria Praticò

Dipartimento D.I.M.E.T. – Facoltà di Ingegneria – Università di Reggio Calabria – Via Graziella – Feo di Vito – 89133 Reggio Calabria – 0965 875230/875247 - fpratico@ing.unirc.it

RIASSUNTO

Il tema del riciclaggio del conglomerato bituminoso fresato riveste un'importanza strategica nel contesto economico ed ambientale attuale. Esso ha implicazioni prettamente ambientali (recupero di materie prime pregiate, mitigazione degli effetti indesiderati sugli ecosistemi causati dalla coltivazione di cave e dal mantenimento di discariche, etc.), energetiche (modificazione del ciclo di vita di alcuni materiali e delle quantità energetiche in gioco), economiche (per effetto della modifica dei processi costruttivi) e tecniche (idoneità a fronte di carichi di traffico elevati). Sulla base di tali premesse, nella memoria, sono dapprima esaminati ora singolarmente ora sinergicamente gli aspetti congiunti al riutilizzo del fresato negli strati legati delle sovrastrutture flessibili. Successivamente, particolare attenzione è rivolta al problema della progettazione delle miscele bituminose così ottenute. In particolare, è effettuata una specifica analisi delle proprietà volumetrico-meccaniche dei conglomerati bituminosi “a caldo” prodotti per miscelazione del fresato con inerti e legante bituminoso “vergini”. Sono ricercate, anche attraverso estesa indagine sperimentale tramite compactatore giratorio Superpave, logiche e classi di algoritmi in grado di fornire adeguate e concrete risposte ai problemi derivanti dalla compresenza, da un lato, di ben note tecniche di deduzione della percentuale di legante vergine iniziale da aggiungere e, dall'altro, di avanzate metodiche di analisi e progetto “volumetrico” della miscela presso le quali il problema del reclaimed asphalt può apparire, talvolta, non adeguatamente sviluppato. Attraverso gli studi, le analisi e le sperimentazioni effettuati, si perviene alla proposizione di soluzioni di tentativo inerenti al problema della idoneità di tecniche e materiali stessi al fine di perseguire le indispensabili performance tecniche.

ABSTRACT

As well known, RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) may constitute a real answer to both environmental and traditional requirements. This opportunity is conditioned to design, production, executive problems. In particular, it is necessary to understand better how to obtain bituminous mixes with reliable performance (concerning permanent deformation, fatigue and low temperature cracking) by both old and new design techniques. So, in relation to these well known demands, this paper deals with reclaimed Asphalt design by SHRP standards. Some specific experiments have been planned and SHRP applicability to reclaimed asphalt has been studied in deep in order to consider both mechanic reliability and the compatibility with Italian standards. The obtained results have demonstrated that there are some scientific and technical domains that must be studied more in deep, that some very diffused algorithms for determining bitumen content may need a new calibration, that the application of SHRP standards to Italian culture needs to be improved by the emission of new national standards and that SHRP standards themselves may be perfected in order to fit better reclaimed asphalt characteristics and behavior.

1. PREMESSE

In un contesto finanziario ed ambientale caratterizzato da una rinnovata attenzione per gli ecosistemi, il problema dello smaltimento del conglomerato bituminoso fresato o demolito ha progressivamente motivato il perfezionamento delle tecniche di riciclaggio. Sono ben note le principali e congiunte peculiarità ambientali e tecniche dei processi di riciclo (o, meglio, riutilizzo) del fresato a caldo:

- risparmio di materie prime (l'impiego di aggregati e leganti bituminosi "nuovi" risulta senz'altro ridotto);
- limitazione degli effetti ambientali e dei relativi oneri finanziari legati alla apertura ed al mantenimento di discariche;
- limitazione dell'impatto ambientale e dei relativi oneri finanziari associati alla apertura ed alla "coltivazione" di cave;
- necessità di fronteggiare adeguatamente particolari aspetti tecnico-ambientali (inquinamento atmosferico durante la produzione in centrale; opportunità di adeguato controllo granulometrico nonché del grado di umidità del fresato, di accuratezza nei processi di riscaldamento/miscelazione del fresato in quanto a tempistica e regime termodinamico – temperature e pressioni in cilindro);
- possibilità di interventi a "profilo conservato".

A fronte di un bilancio ambientale che può spesso definirsi complessivamente positivo, permane, tuttavia, la necessità di garantire elevate prestazioni tecniche in senso lato, specie in relazione a regimi di traffico pesante sovente in crescita.

D'altra parte, in linea del tutto generale, le performance di una miscela bituminosa dipendono tanto dalle caratteristiche fisiche, meccaniche ed in particolare reologiche dei materiali costituenti (aggregati, leganti [1], conglomerato riciclando) che dai processi e dagli aspetti compositivo-dimensionali [2, 3]. In particolare, il legame tra prestazioni eminentemente meccanico-reologiche (in laboratorio ed in sito) e proprietà volumetriche, fondamento della scienza dei materiali "ab immemorabili", ha storicamente trovato conferma, pur se con differenziata importanza, nello specifico settore dell'Ingegneria delle sovrastrutture stradali, oltre che indirettamente presso i Capitolati Speciali d'Appalto delle principali Committenze (per es., ANAS ed Autostrade), anche nelle seguenti tecniche di progettazione: a) Metodologia Marshall; b) Metodologia Hveem; c) Modello CRR; d) Sistema SHRP-Superpave. Con riferimento, appunto, a quest'ultimo sistema di analisi e progettazione, l'importanza della distribuzione dei volumi tra legante bituminoso, grani lapidei, filler e vuoti ha acquisito rilievo così peculiare da poter costituire elemento chiave del progetto della miscela. Ciò risulta immediatamente qualora, in particolare, si consideri che, per sovrastrutture soggette a carichi "ridotti" (<10⁶ ESALs), i criteri di accettazione "volumetrici" costituiscono (unitamente ai tests sui materiali primi costituenti, legante ed aggregati) la totalità dei vincoli cui sottoporre la miscela bituminosa.

Alla luce di tali risultanze tecniche e delle citate istanze ambientali, si è avvertita, allora, l'esigenza di indagare intorno alla applicabilità delle procedure di progettazione volumetrica SHRP ai conglomerati a caldo con riciclo di fresati.

2. ANALISI E MODELLAZIONE

2.1 Materiali e prestazioni: struttura del problema

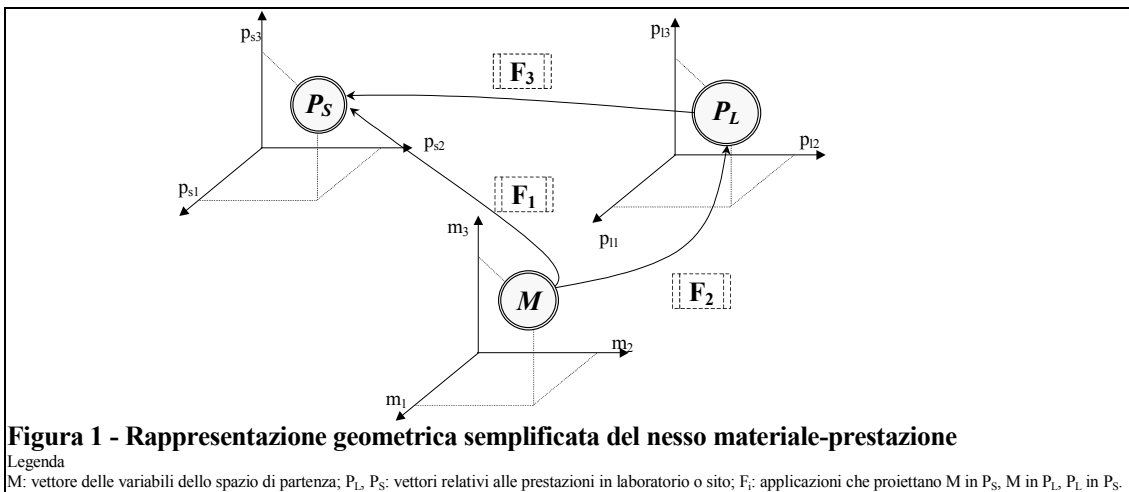
In termini del tutto generali, la progettazione di una miscela bituminosa può intendersi nei termini di un processo di ottimizzazione caratterizzabile attraverso le seguenti applicazioni (Cfr. Fig.1):

$$F_1: M \rightarrow P_S; \quad F_2: M \rightarrow P_L; \quad F_3: P_L \rightarrow P_S.$$

Le F_i , se esistenti, sono applicazioni che proiettano il punto M (come Materiale) nel punto P_S (come Prestazione meccanica della miscela in sito) o nel punto P_L (come prestazioni meccaniche della miscela in laboratorio), od ancora il punto P_L nel punto P_S . In tale modello, il problema della progettazione della miscela può così sintetizzarsi:

Individuazione del punto M^* tale che le prestazioni in sito (P_S) siano ottimizzate.

Presso la tecnica Marshall di progetto della miscela riveste particolare rilievo l'applicazione F_3 , per effetto della quale si valuta la ottimizzazione delle prestazioni in situ attraverso la massimizzazione della stabilità Marshall. Al contrario, presso la tecnica SHRP Superpave, particolare attenzione è rivolta soprattutto alla applicazione F_1 , nei termini della ottimizzazione del comportamento della miscela in situ attraverso le proprietà compositivo-volumetriche della miscela.



In prima approssimazione è possibile asserire che P_S è equivalente ad un vettore di componenti p_{si} concernenti indicatori di *prestazione in situ*: nel caso SHRP esse possono concretizzarsi come segue:

1. p_{s1} = PD, Permanent Deformation (deformazioni permanenti), causa del rutting (inormaiamento), specie in condizioni di temperature elevate (stagione estiva) e traffico pesante elevato; ci si riferisce specie all'aliquota (spesso preponderante) delle PD ascrivibile ad insufficienti caratteristiche meccaniche degli strati bituminosi (un'altra concausa può essere costituita dall'insufficiente portanza del sottofondo);
2. p_{s2} = FC, Fatigue Cracking (fessurazioni per fatica), componente relativa al fenomeno causato da eccesso di tensioni per effetto di carichi ripetuti; tali fenomeni sono a volte riscontrabili in usure di spessore ridotto o/e strati inferiori di insufficiente portanza, e/o risalite capillari in rilevato o innalzamento livello di falda, e/o suscettibilità eccessiva all'umidità, od ancora conglomerati di insufficiente resistenza a trazione e/o leganti dal modulo "troppo" elevato;
3. p_{s3} = LTC, Low Temperature Cracking (fessurazioni per effetto di basse temperature), con riferimento ai fenomeni connessi a sollecitazioni termiche per temperature

troppo basse, spesso congiunte alla presenza di leganti bituminosi “duri”, anche per effetto di invecchiamento o/e, in forma congiunta, in relazione ad una percentuale di vuoti troppo elevata;

4. p_{sj} , altre componenti relative ad altre prestazioni in sito della miscela bituminosa. P_L (prestazioni in laboratorio, cfr. Tabelle 1 e 2) ha componenti p_{li} .

Tabella 1 - Procedure di analisi Superpave con Superpave Shear Tester SST e Indirect Tensile Tester IDT ($\rightarrow P_L$)				
Prove con Superpave Shear Tester SST				
	Livello di analisi	Tensioni	Parametri	DC
Volumetric Test	C	σ_r	T=4, 20, 40°C	PD, FC
Uniaxial strain test	C	σ_r, σ_n	D=costante, T=4, 20, 40°C	PD, FC
Repeated shear test at constant stress ratio		τ, σ_n	N=5000-120000 cicli di carico in relazione a traffico/clima o sino al 5% di deff. Permanenti; $f=0.7^{-1}$ Hz; $\sigma_n/\tau=1.2-1.5$; le relative magnitudi dipendono da contenuto di bitume e condizione dello strato inferiore; il test è usualmente effettuato per P_b alto, V_a prossimo al 3% (TF), ad una specifica temperatura.	TF
Repeated shear test at constant height (not required by Superpave)	NO SHRP, utile in I e C	τ, σ_n	Altezza costante; $f=0.7^{-1}$ Hz; N=5000 cicli di carico o sino al 5% di deff. Permanenti; temperatura specifica in funzione della temperatura settimanale massima alla profondità di 50mm;	PD (RD)
Simple shear test at constant height	I, C	τ, σ_n	Altezza costante; temperatura e tensioni di taglio dipendono dal livello di analisi (I, C), dalla tipologia di decadimento simulato (PD, FC) e dal particolare clima, profondità della miscela nella pavimentazione, affidabilità ambita nel calcolo;	PD, FC
Frequency sweep test at constant height	I, C	τ, σ_n	Deformazione a taglio controllata; N=100 cicli per ciascuna delle frequenze seguenti (10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01Hz); altezza del provino costante; temperatura di prova dipendente dal livello di analisi, dal clima, dalla tipologia di decadimento simulato (PDF, FC).	PD, FC
Prove con Indirect Tensile Tester IDT				
IDT Creep Compliance and Strenght	I, C	σ_r	Tre temperature di prova (0, -10, -20°C). carico statico per 100s; poi carico suppletivo per velocità di deformazione di 12.5mm/minuto sino a rottura; per I, la creep compliance è determinata a 0, -10, -20°C e la resistenza a trazione solo a -10°C. Per C (analisi completa), la creep compliance e la resistenza a trazione sono determinate ambedue per tutte e tre le temperature.	LTC
IDT Strenght	I, C	σ_r	Velocità di deformazione costante (50mm/minuto); carico sino a rottura. Per I, il test avviene ad una temperatura particolare, funzione dello specifico fenomeno di degrado esaminato (FC). Per C, invece, sono esaminate tre temperature: -10, 4, 20°C.	FC
Legenda DC: Decadimento Correlato; C: completa; I: intermedia; LTC: Low temperature Cracking; FC: Fatigue Cracking; PD: Permanent Deformation; TF: Tertiary Flow, Terziary Rutting; RD: Rut Depth; σ_r : tensioni radiali; σ_n : tensioni normali; τ : tensioni di taglio;				

Tabella 2 - Analisi dei dati ed interpretazione	
L'analisi può avvenire su tre miscele completamente diverse, in granulometria, P_b , presenza di modificanti, etc. In particolare, può integrarsi in un processo di progetto della miscela, nella determinazione del contenuto di bitume di ottimo, a fronte dei problemi di PD, LTC e FC.	
Diagramma ESALs (ascisse, in milioni)-Rut Depth (ordinate, mm)	PD
Diagramma ESALs (ascisse, in milioni)-Percent area (fatigue cracking)	FC
Diagramma anni di vita (ascisse)-crack spacing (m).	LTC
Diagramma P_b (ascisse), Rut Depth (mm)	PD
Diagramma P_b (ascisse), Fatigue cracking (%)	FC
Diagramma P_b (ascisse), Low temperature crack spacing (m)	LTC

Nel caso SHRP, le p_{li} sono riconducibili ad alcuni o tutti i seguenti (in relazione al riferimento al livello 2/3):

- a) indicatori di suscettibilità all'acqua della miscela bituminosa compattata (essenzialmente il $TSR\% = 100 \cdot \text{Average Wet Strenght} / \text{Average Dry Strenght}$, rapporto percentuale tra la resistenza a trazione indiretta media su provini bagnati ed asciutti);

- b) indicatori valutati attraverso il Superpave Shear Tester SST (\approx tensioni tangenziali); sono previste n.6 procedure di prova:
- volumetric test (only for complete analysis, \rightarrow PD, FC);
 - unaxial strain test (only for complete analysis, \rightarrow PD, FC);
 - repeated shear test at constant stress ratio (\rightarrow PD \rightarrow tertiary flow);
 - repeated shear test at constant height (non è parte integrante del sistema SHRP, \rightarrow PD \rightarrow ruth depth estimation);
 - simple shear test at constant height (\rightarrow PD, FC)
 - frequency sweep test at constant height (\rightarrow PD, FC)
- c) indicatori valutati attraverso l'Indirect Tensile Tester IDT (\approx resistenza a trazione indiretta); sono previste 2 procedure di prova: c1) Creep Compliance and Strenght (Low temperature cracking analysis); c2) Strenght (Fatigue Cracking Analysis).

E' utile sottolineare che, attraverso tali determinazioni (condotte con riferimento a campioni di diversa numerosità in relazione alla pertinenza al livello 2 o 3 del sistema SHRP), si rende possibile la determinazione di tre famiglie di curve:

RD(ESALs); FC(ESALs); LTC(years).

Ciascuna delle curve può corrispondere ad una data percentuale di bitume (per complessive n percentuali in tutto). In tal modo, fissato un valore di ESALs (e/o anni di vita), ad ogni famiglia di curve è possibile associare n punti nel piano P_b - RD, in quello P_b - FC e nell'altro P_b - LTC. Le relative tre curve realizzano le cosiddette Design Chart, attraverso le quali è possibile determinare/controllare la percentuale di bitume ottima, affinché:

RD sia ridotto (ridotti valori di profondità di inormaiamento);

FC sia ridotto (ridotta % di area fessurata per fatica);

LTC sia elevato (elevato spazio tra fessurazioni per ridotta temperatura).

M (*materiali, procedure, altri parametri*) è equivalente ad un vettore di componenti m_i .

Tra di esse possono individuarsi diversi insiemi di componenti, di differente importanza, rispettivamente concernenti:

- $m_1..m_i$: i materiali componenti (aggregati e legante bituminoso), attraverso le relative caratteristiche testate;
- $m_{i+1}..m_j$: la composizione volumetrico-ponderale della miscela;
- $m_{j+1}..m_k$: altre variabili congiunte (procedure di confezionamento e stesa; trattamenti, procedure di prova; azioni di carico nel periodo di riferimento (clima, traffico, etc.).

Una delle peculiarità del sistema SHRP-SUPERPAVE consiste nell'attribuire un'importanza assolutamente cospicua alla composizione volumetrico-ponderale della miscela, cioè alle componenti $m_{i+1}..m_j$ del vettore-punto M.

In particolare, sono considerate alcune *grandezze*, le quali si riferiscono alla definizione di una composizione volumetrico-ponderale ed anche alla individuazione di precise metodiche di compattazione attraverso il superpave giratory compactor (analogo concettuale della pressa Marshall, simulante la compattazione in situ); tali grandezze sono:

- $V_a(N_{des})$, percentuale dei vuoti della miscela bituminosa, per dato numero di girazioni N_{des} del Giratory;
- $VMA(N_{des})$, percentuale dei vuoti della miscela di aggregati, per dato numero di girazioni del Giratory;
- $VFA(N_{des})$, percentuale dei vuoti intergranulari riempiti con legante bituminoso, per dato numero di girazioni del Giratory;

- $\%G_{mm}(N_{ini})$, rapporto percentuale tra il peso di volume della miscela bituminosa per N_{ini} girazioni ed il massimo peso di volume della medesima miscela;
- $\%G_{mm}(N_{max})$, rapporto percentuale tra il peso di volume della miscela bituminosa per N_{max} girazioni ed il massimo peso di volume della medesima miscela;
- DP, Dust proportion, pari al rapporto (non percentuale) tra il passante allo 0.075mm e la percentuale di bitume effettivo (cioè non comprensivo di quello assorbito).

Si specifica che N_{des} è funzione del traffico e della Average Design High Temperature, mentre $\text{Log}N_{max}=1.10\text{Log}N_{des}$ e $\text{Log}N_{ini}=0.45\text{Log}N_{des}$. Sono stabiliti i seguenti *obiettivi*:

- $V_a(N_{des})=4\%$
- $VMA(N_{des})>VMA_{min}$, pari a 15~11%, per nominal maximum aggregate size pari a 9.5~37.5mm;
- $VFA_{min}<VFA(N_{des})<VFA_{max}$, con (VFA_{min}, VFA_{max}) variabile da (65, 75) a (70, 80) in funzione del maggiore (≥ 100 milioni di ESALs) o minore (< 0.3 milioni di ESALs) carico di traffico;
- $\%G_{mm}(N_{ini})<89\%$;
- $\%G_{mm}(N_{max})<98\%$;
- $0.6<DP<1.2$.

Per il raggiungimento di tali obiettivi, nel caso di miscele bituminose tradizionali (senza impiego di riciclato) la metodologia SHRP prevede di operare dapprima sulla individuazione della miscela di aggregati lapidei, pervenendo, dunque, per esempio, da tre vettori iniziali di tentativo M_{01} , M_{02} , M_{03} , soggiacenti anch'essi a specifici vincoli compositivi (Cfr. Tabella 4), ad uno M_{0j} (scelto tra i tre), ottenuto sottoponendo la miscela bituminosa ad una compattazione con giratory compactor ed operando delle deduzioni attraverso algoritmi correlativi. Da M_{0j} si perviene, poi, per sola modifica delle percentuali di legante bituminoso, ad un M^* , tramite altra compattazione con giratory e successivi algoritmi di deduzione.

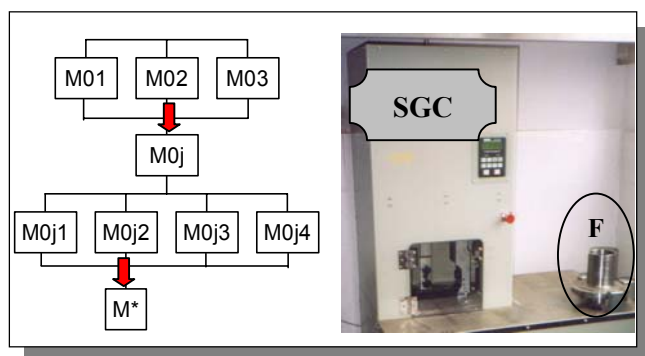


Figura 2 – Metodica SHRP

Legenda

M_{0j} : miscele sottoposte ad analisi e compattazione; M^* : miscela ottimale; SGC: Superpave Giratory Compactor, sistema di compattazione impiegato nella sperimentazione; F: fustelle;

2.2 Modellazione volumica e fondamenti differenziali degli algoritmi di calcolo

Al fine di specificare con sufficiente accuratezza il significato ed il grado di esaustività del sistema di simboli introdotti e pervenire ad algoritmi di calcolo impiegabili anche nel caso in studio (riutilizzo del fresato) risulta necessario modellizzare il sistema dei volumi in gioco. Con riferimento alla Fig.2, presso la quale sono illustrati i principali parametri volumetrico-compositivi, è possibile asserire che:

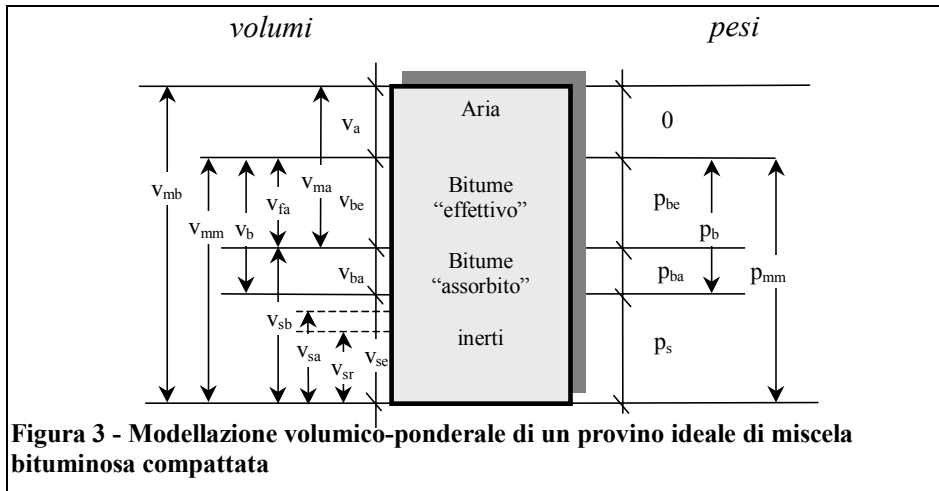


Figura 3 - Modellazione volumico-ponderale di un provino ideale di miscela bituminosa compattata

1. dal sistema dei volumi è deducibile un sistema di volumi percentuali; per esempio: $V_a=100 \cdot v_a/v_{mb}$; $VMA=100 \cdot v_{ma}/v_{mb}$; $VFA=100 \cdot v_{fa}/v_{mb}$; si precisa che tali indicatori, impiegati presso la procedura SHRP, risultano presenti anche presso la letteratura scientifica europea (in particolare quella tedesca); elemento di rilievo è, però, nel caso SHRP, il relativo coinvolgimento in una architettura logica di procedura, nonché la presenza di precise indicazioni sui ranges di accettazione;
2. dal sistema dei pesi ne è deducibile uno dei pesi percentuali; per esempio: $P_b=100 \cdot p_b/p_{mm}$; $P_s=100 \cdot p_s/p_{mm}$; $P_{mm}=100 \cdot p_{mm}/p_{mm}=100$;
3. dal sistema dei pesi e da quello dei volumi si ottiene quello dei pesi specifici (riferiti, a volte, per effetto delle tecniche di determinazione, al peso specifico dell'acqua); per esempio: $G_{sb}=p_s/(v_{se}+v_{ba})$; $G_{se}=p_s/(v_{se})$; $G_{sa}=p_s/(v_{sa})$; $G_{sr}=p_s/(v_{sr})$; $G_{mb}=p_{mm}/v_{mb}$; $G_{mm}=p_{mm}/v_{mm}$. E' essenziale sottolineare che, presso la metodica SHRP in esame, il peso di volume G_{sr} non è considerato; presso la Marshall, è il G_{se} a non essere adeguatamente considerato; presso le norme CNR-UNI, G_{sr} e G_{sa} sono valutati, mentre G_{se} non lo è.

Definiti i principali indicatori, è possibile asserire che per essi sussista la seguente equazione differenziale: $dv_{mb}=dv_{se}+dv_{ba}+dv_{be}+dv_a$.

Essa costituisce la base per le successive elaborazioni. Qualora l'approccio si incentri sul riempimento, da parte delle frazioni di pezzatura minore dei vuoti non occupati dalle frazioni di pezzatura maggiore, l'equazione differenziale risulta ulteriormente scomporre ed integrare con altre, al fine di pervenire alle percentuali in massa delle singole classi granulometriche [4]. In particolare, come specificato di seguito, tramite la citata relazione differenziale sono deducibili i 12 algoritmi posti a fondamento della procedura SHRP.

Nella tabella successiva sono state ricavate e caratterizzate, inoltre, le operazioni differenziali suppletive che possono essere considerate il supporto teorico delle formule previsionali impiegate presso la procedura SHRP.

Tabella 3 - Modellazione fisica della miscela ed algoritmi fondamentali	
R.1	$G_{sb}=(\sum_i P_i) \cdot (P_1 \cdot G_{sb1}^{-1} + \dots + P_1 \cdot G_{sb1}^{-1})^{-1}$
R.2	$G_{sa}=(\sum_i P_i) \cdot (P_1 \cdot G_{sa1}^{-1} + \dots + P_1 \cdot G_{sa1}^{-1})^{-1}$
R.3	<p>R.3.1 $G_{se}=G_{sb}+K \cdot (G_{sa}-G_{sb})$</p> <p>R.3.2 $V_{ba}=P_s \cdot (1-V_a) \cdot (P_b \cdot G_b^{-1} + P_s \cdot G_{se}^{-1}) \cdot (G_{sb}^{-1}-G_{se}^{-1}) \approx 0.95 \cdot (1-0.04) \cdot (0.05 \cdot 1.02^{-1} + 0.95 \cdot G_{se}^{-1}) \cdot (G_{sb}^{-1}-G_{se}^{-1})$</p> <p>R.3.3 $V_{be} \approx 0.176 - 0.0675 \cdot \log_{10} S_n$ (nominal maximum sieve size of the aggregate blend in millimeters)</p> <p>R.3.4 $W_s = P_s \cdot (1-V_a) \cdot (P_b \cdot G_b^{-1} + P_s \cdot G_{se}^{-1}) \approx 0.95 \cdot (1-0.04) \cdot (0.05 \cdot 1.02^{-1} + 0.95 \cdot G_{se}^{-1})$</p> <p>R.3.5 $P_{br} = 100 \cdot G_b \cdot (V_{be} + V_{ba}) \cdot [G_b \cdot (V_{be} + V_{ba}) + W_s]^{-1} \approx 100 \cdot 1.02 \cdot (V_{be} + V_{ba}) \cdot [1.02 \cdot (V_{be} + V_{ba}) + W_s]^{-1}$</p>

	<p>Nota. Rielaborando il modello di grano lapideo nei termini della considerazione dei vuoti impermeabili e di quelli permeabili, si ottiene che l'espressione R.3.1, con $K=0.5\sim 0.8$ è congruente con un rapporto tra il volume dei vuoti permeabili e quelli impermeabili (dei grani) pari a $1\sim 4$ c.a.</p> <p>Nota. La relazione R.3.2 si ottiene esprimendo il volume di bitume assorbito come differenza tra quello totale inerti+bitume assorbito e quello dei soli inerti. E' essenziale precisare che in tal caso sarebbe corretto scrivere $V_a/100$, poiché ci si riferisce al valore assoluto e non a quello percentuale.</p> <p>Nota. La relazione R.3.3 può essere intesa solo quale strumento previsionale di massima; essa, infatti, se fosse rigorosamente vera, esprimerebbe l'indipendenza di V_{be} dal contenuto totale di legante bituminoso, per data miscela granulometrica.</p> <p>Nota. La relazione R.3.4 si riferisce essenzialmente, a meno di costante dimensionata, al peso complessivo dei grani riferito al volume complessivo dei grani e del legante bituminoso. Non dunque, al peso dei grani tout-court.</p>
R.4	$G_{mbestimated}(N) = W_m \cdot (\pi \cdot d^2 \cdot 0.25 \cdot H(N))^{-1} \cdot \gamma_w \approx$ $\approx W_m \cdot (\pi \cdot 150^2 \cdot 0.25 \cdot H(N) \cdot 10^{-3})^{-1} \quad (g/cm^3); W_m: \text{peso provino in grammi}; H(N): \text{altezza provino in mm alla N-esima}$ girazione; $C = [G_{mbmeasured}(N_{max})] \cdot [G_{mbestimated}(N_{max})]^{-1}$ $\%G_{mm}(N) = 100 \cdot G_{mbestimated}(N) \cdot C \cdot G_{mm}^{-1}$
R.5	$V_a = 100 - \%G_{mm}(N_{des})$ Nota. Tale relazione si ottiene esprimendo il volume dei vuoti in termini di differenza tra il volume totale e la somma di due componenti: quella relativa al volume dei grani incluso il volume del bitume assorbito e quella relativa al bitume non assorbito.
R.6	$VMA = 100 - [\%G_{mm}(N_{des}) \cdot G_{mm} \cdot P_s \cdot G_{sb}^{-1}]$, ove P_s è noto essendo noto o/e determinabile P_{bi} . Nota. La relazione si ottiene immediatamente esprimendo il volume dei vuoti della miscela di aggregati come differenza tra il volume totale della miscela bituminosa e la somma del volume degli inerti e quello del bitume non assorbito.
R.7	$P_{b,estimated} = P_{bi} \cdot 0.4 \cdot (4 - V_a)$, ove V_a è calcolata tramite la relazione 5. Nota. Tale relazione discende, con alcune approssimazioni, dall'assunto della costanza, al variare della percentuale di bitume, della somma del volume dei vuoti e di quello del bitume (assorbito e non assorbito)
R.8	$VMA_{estimated} = VMA_{initial} + C_{ostant} \cdot (4 - V_a)$, ove: $VMA_{initial}$ è quella calcolata attraverso la relazione 6, V_a è quella calcolata attraverso la relazione 5, C_{ostant} è pari a 0.1 se V_a è minore del 4% oppure a 0.2 se V_a è maggiore del 4%; Nota. Anche tale relazione discende, tramite altre più consistenti approssimazioni, dall'assunto della costanza, al variare della percentuale di bitume, della somma del volume dei vuoti e di quello del bitume (assorbito e non assorbito). Sulla base delle elaborazioni qui effettuate, alla base di essa possono, in prima approssimazione, essere considerate due equazioni differenziali ($\partial V_{ba} / \partial V_a = -C$ e $\partial V_{fa} / \partial V_a = C - 1$), ovvero un diagramma lineare di $V_{ba}(V_a)$, da cui l'equazione differenziale $\partial V_{ba} / \partial V_a + \partial V_{fa} / \partial V_a = -1$ ovvero $\partial V_{ba} + \partial V_{fa} = -\partial V_a$, ovvero $\partial V_{ba} + \partial V_{fa} + \partial V_a = 0$, ovvero un principio di conservazione della massa posto $\partial V_{inerti} = 0$. E' essenziale precisare la bipartizione 80-90% per il bitume effettivo e 20-10% per quello assorbito. Si precisa, poi, che ciò è congruente con l'equazione differenziale $\partial VMA = C \cdot \partial V_a$
R.9	$VFA_{estimated} = 100 \cdot (VMA_{estimated} - 4.0) \cdot (VMA_{estimated})^{-1}$ Nota. Tale espressione si ottiene considerando i vuoti riempiti di bitume in termini di differenza tra la totalità dei vuoti intergranulari e l'aliquota semplicemente relativa alla porosità.
R.10	$\%G_{mm\ estimated}(N_{ini}) = \%G_{mm\ trial}(N_{ini}) - (4.0 - V_a)$ ove $\%G_{mm\ trial}(N_{ini})$ è calcolato tramite la relazione 4
R.11	$\%G_{mm\ estimated}(N_{max}) = \%G_{mm\ trial}(N_{max}) - (4.0 - V_a)$ ove $\%G_{mm\ trial}(N_{max})$ è calcolato tramite la relazione 4
R.12	R.12.1 $P_{be} = -(P_s \cdot G_b) \cdot (G_{se} \cdot G_{sb}) \cdot (G_{se} \cdot G_{sb})^{-1} + P_{b, estimated}$ R.12.2 $DP_{estimated} = P_{0.075} \cdot P_{be}^{-1}$, ove $P_{0.075}$ è la percentuale di filler. Nota. Il pedice be si riferisce al contenuto di bitume effettivo, cioè decurtato della quantità ponderale assorbita. Nell'espressione sopra riportata, appunto, il primo addendo del secondo membro concerne l'aliquota assorbita, stimata in funzione del relativo volume V_{ba} .

Alla luce di quanto sopra, con riferimento al particolare caso di studio (riutilizzo del fresato), è essenziale precisare che:

1. è presumibile che v_{se} (e dunque G_{se}) riferito agli aggregati da fresato risulti affetto dal precedente stato dei grani, cioè che i processi di riscaldamento essiccazione e miscelazione non "puliscano" la memoria del materiale riguardo allo "stato volumico". In pratica, ciò può comportare la necessità di una ricalibrazione dell'espressione previsionale sopra riportata per G_{se} , ovvero ad una dipendenza del k non solo dal tipo di grani del fresato, ma dalla stessa peculiarità di "grani da fresato";
2. congiuntamente a quanto sopra, il fresato può intendersi grossolanamente relativo all'aliquota volumica $\alpha_2 \cdot (v_{se} + v_{ba} + \alpha_1 \cdot v_{be})$, ed il nuovo a quella $(1 - \alpha_2) \cdot (v_{se} + v_{ba}) + (1 - \alpha_1 \cdot \alpha_2) \cdot v_{be}$; ciò posto, è possibile che si verifichi che, per effetto di tempi-temperature non sufficientemente a tal fine adeguate, l'addendo $\alpha_1 \cdot v_{be}$ non ridiventi completamente "fluidico" e si misceli alla porzione $(1 - \alpha_1 \cdot \alpha_2) \cdot v_{be}$;

3. in particolare, risulta molto probabile il verificarsi, nella miscela definitiva, di uno stato di apprezzabile differenziazione reologica tra le quantità $\alpha_2 \cdot v_{ba}$ (da fresato) e $(1-\alpha_2) \cdot (v_{ba}) + (1-\alpha_1 \cdot \alpha_2) \cdot v_{be}$ (aliquota “nuova”);
4. quanto sopra, in particolare, è connesso al problema della determinazione del “corretto” valore di $(1-\alpha_2) \cdot (v_{ba}) + (1-\alpha_1 \cdot \alpha_2) \cdot v_{be}$. E’ possibile, infatti, non solo che la reomogeneizzazione della aliquota $\alpha_2 \cdot (v_{ba} + \alpha_1 \cdot v_{be})$ risulti insoddisfacente, ma che parte della massa di legante vecchio in oggetto non sia neppure potenzialmente suscettibile di assumere un nuovo stato di legante, poiché eccessivamente “invecchiato”;
5. la determinazione del contenuto ottimo di legante attraverso tecniche alla *Duriez*, legate, cioè ad un concetto di opportuno ricoprimento dei grani, dunque alla relativa superficie specifica ($v_{be} \propto \Sigma_s^{\beta}$), condurrebbe, per il caso in oggetto, alla immediata deduzione della percentuale di bitume totale e da aggiungere. Risulta, allora, necessario che tale approccio, diffuso presso alcuni Capitolati Speciali d’Appalto italiani, sia integrato e validato nell’ottica della considerazione dell’apporto specifico di aggregati vergine e da fresato, secondo tecniche di deduzione essenzialmente governate, come nelle metodiche SHRP, dalla necessità di conseguire un dato *obiettivo volumetrico*;
6. il temuto residuo di umidità presente nel fresato e non sufficientemente eliminato attraverso i successivi processi, oltre a poter avere conseguenze sulla adesione legante-grani e sulla instabilità termodinamica dei processi produttivi in centrale, può sortire effetti negativi sul piano dei bilanci volumici, alterando la reale distribuzione percentuale delle singole aliquote; risulta, in tal caso, non conseguito l’obiettivo prioritario citato ($V_a \cong 4\%$).
7. Tanto i “difetti” volumici da presenza di umidità che da bitume non reomogeneizzato possono provocare, in sintesi, errori di valutazione sia per V_a che per gli altri indicatori volumici soggetti a vincoli (Dust proportion incluso);
8. Come ben noto, è probabile, per effetto congiunto delle operazioni di fresatura e di quelle di vagliatura del fresato (ricorrenti presso i più moderni impianti), che la curva granulometrica risultante appaia traslata verso l’alto. Di qui la possibilità che la relativa percentuale di bitume, valutata, appunto, sul “fresato vagliato”, attinga valori piuttosto elevati, apprezzabilmente maggiori della percentuale di legante bituminoso della pavimentazione di provenienza; ciò può comportare: a) vincoli ulteriori sulla massima percentuale di fresato riutilizzabile; b) “possibilità limite” di una percentuale di bitume nuovo estremamente ridotta, in pratica con introduzione di solo rigenerante; c) etc.. Per siffatte miscele (aggregati vergini + fresato + rigenerante + “poco” legante vergine), può, comunque, risultare suscettibile di qualche perplessità l’attitudine meccanico-reologica dello strato realizzato a soddisfare gli uffici prestazionali durante la vita utile;

3. INDAGINE SPERIMENTALE

3.1 Formalizzazione del protocollo sperimentale

Definiti gli obiettivi ed effettuata la modellazione del problema, prima di intraprendere la sperimentazione si è resa necessaria la formalizzazione di un protocollo di prova.

La miscela definitiva da progettare (con funzione di collegamento tra la base e lo strato superficiale) è costituita da fresato, aggregati vergine, Rigenerante RIG e bitume di apporto.

In relazione alla specificità degli obiettivi, in primis inerenti alla composizione volumetrica ed alla relativa attitudine di processi ed algoritmi a renderne possibile l'ottimizzazione, particolare attenzione è stata indirizzata ai problemi compositivi.

All'interno del protocollo formalizzato possono individuarsi le macroattività di seguito richiamate e descritte.

a. Individuazione preliminare delle tre miscele granulometriche da sottoporre ad analisi volumetrica.

Tali miscele saranno costituire in parte dagli inerti presenti nel fresato ed in parte da aggregati vergini. La definizione delle tre spezzate $P_{a1}(d_i)$, $P_{a2}(d_i)$, $P_{a3}(d_i)$ può effettuarsi in armonia con i fusi di prescrizione ANAS ed Autostrade per gli strati di pertinenza (binder) e con i gradation criteria SHRP [5]: 8 punti di controllo min/max (d_j , $P_a(d_j)$) ed un insieme di valori (d_j , $P_a(d_j)$) non consentiti (restricted area, dominio delle sabbie, Cfr. Tab.4). In relazione all'essere i fusi ANAS-Autostrade definiti attraverso la serie di setacci UNI (0.075-0.18-0.4-2-5-10-15-25) ed al contrario i gradation criteria tramite la serie ASTM (0.075-0.15-0.3-0.6-1.18-2.36-4.75-9.5-12.5-19-25.4), si rendono necessari processi di utilizzo congiunto e/o interpolazione.

b. Analisi del fresato

Il conglomerato bituminoso fresato, di percentuale in massa, sul totale, pari a P_r , deve essere preliminarmente analizzato al fine di dedurne informazioni sulla qualità e quantità dei costituenti.

Si procede, quindi, ad una estrazione del legante. A seguito di essa si perviene alla determinazione del contenuto percentuale di legante, riferito al peso totale del fresato, denominato P_v . E' necessario procedere anche ad estrazione non distruttiva del legante ed alla successiva determinazione della viscosità dinamica (Brookfield). Sugli aggregati ottenuti, filler compreso, si procede all'analisi granulometrica mediante crivelli e setacci UNI, pervenendo, in tal modo, alla spezzata $P_{afr}(d_i)$ delle percentuali di passante in funzione delle aperture dei vagli. Da essa si ricavano, per ogni coppia utile di vagli UNI d_j/d_{j+1} (ove le j ordinano la serie di vagli al crescere dell'apertura), le relative percentuali $P_{afr}(d_j/d_{j+1}) = P_{afr}(d_{j+1}) - P_{afr}(d_j)$.

Gli aggregati del fresato devono essere sottoposti alla determinazione sperimentale di G_{sb} e G_{sa} .

c. Determinazione delle quantità di aggregati di apporto e relativi pesi di volume

Gli aggregati di apporto devono essere preliminarmente sottoposti ai controlli di qualità inerenti alle cosiddette consensus properties (angolarità del fino e del grosso, forma, equivalente in sabbia), soggette a specifici criteri di accettazione [5], alle altre proprietà concernenti le caratteristiche di provenienza (source properties: toughness, tramite Los Angeles, Soundness, resistenza all'azione di solfati, deleterious materials, percentuali di contaminanti, Cfr. Tab.4).

Risulta, poi, necessaria l'effettuazione della analisi granulometrica e la separazione in classi granulometriche secondo la serie di vagli UNI.

Per la formazione delle miscele risulta necessaria la conoscenza delle frazioni granulometriche da aggiungere al fresato. Ciò posto, se m è il numero dei setacci (per un binder, usualmente, otto: 0.075, 0.18, 0.4, 2, 5, 10, 15, 25), si risolve il sistema vincolato di m equazioni, $m+1$ vincoli, in m incognite, la cui generica equazione è: $P_a(d_j/d_{j+1}) = P_{fr} \cdot P_{afr}(d_j/d_{j+1}) + P_{ave}(d_j/d_{j+1})$. Le incognite sono le percentuali di singola

pezzatura vergine $P_{ave}(dj/dj_{+1})$ da aggiungere al fresato per la miscela in oggetto. I vincoli operativi possono essere i seguenti: $P_{ave}(dj/dj_{+1}) \geq 0$; $0.2 \leq P_{fr} \leq 0.50$.

Complessivamente, allora, per le tre miscele, devono risolversi 24 equazioni in 24 incognite. Risultando $P_{fr} \leq 1$, il sistema è, in generale, celermente risolvibile. Qualora non lo sia è possibile:

c.1 prevedere una percentuale di fresato P_{fr} minore, al di fuori del range sopra indicato, con violazione delle prescrizioni di Capitolato;

c.2 effettuare una setacciatura del fresato, riducendo la pezzatura indesiderata, ancora con violazione delle prescrizioni da capitolato e riconduzione ad un sistema di equazioni diverso dal precedente, non sussistendo l'unicità della percentuale di fresato P_{fr} al variare della pezzatura dello stesso;

c.3 modificare i termini noti $P(dj/dj_{+1})$, i.e. le miscele già sottoposte ai gradation criteria SHRP. Ciò comporterà la necessità di ulteriori verifiche secondo l'approccio SHRP, e potrebbe tradursi nella scelta di miscele tali da non consentire la definitiva individuazione di miscele di aggregati idonee a valle della prima compattazione con compattatore giratorio Superpave.

c.4 modificare tipologia di fresato (soluzione, in generale, non opzionabile, fatto salvo il caso di possibilità di impiego del fresato per altri strati).

Le miscele granulometriche devono essere sottoposte ad indagini sperimentali per la determinazione di G_{sb} e G_{sa} sulle singole classi di pezzature. Da tali valori e da quelli relativi agli aggregati da fresato si perviene, nota la composizione in esso, ai combined G_{sb} e G_{sa} .

c.5 In centrale di produzione lo schema analitico sopra proposto può risultare piuttosto disagiata, poiché prevede la separazione degli aggregati in classi per pezzatura. Può essere applicabile, allora, il seguente, qui formalizzato. Se sono presenti n pezzature (per es. 4+ il fresato), allora, se la miscela-obiettivo 1 ha passanti ($p_1^0, p_2^0, p_3^0, \dots, p_k^0$) ai setacci (d_1, d_2, \dots, d_k) deve essere, per essa:

$$p_1^0 = a_{11} \cdot p_{11} + a_{12} \cdot p_{12} + a_{13} \cdot p_{13} + \dots + a_{1n} \cdot p_{1n}$$

....

$$p_k^0 = a_{11} \cdot p_{k1} + a_{12} \cdot p_{k2} + a_{13} \cdot p_{k3} + \dots + a_{1n} \cdot p_{kn};$$

Detto sistema può non avere soluzioni. Si può procedere attraverso la seguente tecnica, facilmente implementabile su PC. Si definisce un indicatore di errore (per esempio, $I_1 = \sum_{i=1 \dots k} (p_i^0 - p_i^r)^2$); si pone: $\Phi = \min I_1$, con i vincoli: I) $\sum_{i=1 \dots n} a_{1i} = 1$; II) $a_{1i} =$ percentuale di aggregati da fresato (quasi coincidente con la percentuale di fresato); III) $\min a_{1i} \geq 0$. Tale tecnica può fornire risultati insoddisfacenti o non condurre ad esiti significativi. In tal caso può essere conveniente, per esempio, eliminare il vincolo II) sulla percentuale obbligatoria di fresato, oppure sostituirlo con il seguente: II.1) $a_{11inf} \leq a_{11} \leq a_{11sup}$. Qualora non risulti possibile l'ottimizzazione con il vincolo di eguale (nel senso di ben assimilabile) percentuale di fresato per le 3 miscele di tentativo, tale circostanza può tradursi nella presenza di 3 miscele caratterizzate da diversa percentuale di bitume nuovo. Nonostante la condizione di eguale viscosità, imposta attraverso la differenziazione del contenuto di rigenerante. Non è possibile escludere che, in tali condizioni, le tecniche SHRP di inferenza della miscela granulometrica di ottimo siano non del tutto adeguate. Dette tecniche, infatti, sono fondate su un'assunzione implicita di "egual qualità dei costituenti", in tal caso, probabilmente, non sussistente. Di qui, allora, l'opportunità di vincoli del tipo $a_{11inf} \leq a_{11} \leq a_{11sup}$, con riferimento a domini ristretti indicati presso i Capitolati Speciali d'Appalto.

d. Scelta del legante bituminoso di apporto (quantità e qualità)

d.1 Determinazione della qualità del legante di apporto

Secondo la procedura SHRP, carichi termici e veicolari governano la scelta della qualità del legante (Cfr. tabella). Presso la metodica in oggetto [5], però, non è previsto un protocollo “dedicato” al caso del riutilizzo del fresato. Risulta, allora, necessario applicare il protocollo SHRP alla composizione finale del legante (B_n+B_v+RIG), apportando eventuali correzioni agli algoritmi di calcolo. Ai fini della successiva determinazione della quantità di rigenerante è, comunque, preliminarmente necessaria la determinazione della viscosità dinamica a $60^\circ C$. Tale determinazione si aggiunge alle usuali tecniche di caratterizzazione dei leganti definite in ambito SHRP o, in via preliminare, CNR;

d.2 Determinazione della qualità del rigenerante

Risulta necessaria almeno la determinazione della viscosità dinamica a $60^\circ C$.

d.3 Determinazione della quantità di bitume di apporto.

A tale riguardo si ritiene opportuno procedere attraverso una strategia combinata, in parziale difformità tanto rispetto alle procedure usuali per i conglomerati a caldo con fresato [6], che rispetto a quelle tradizionali SHRP. Tale metodica muove dalla stima della percentuale di bitume necessario nella miscela finita, attraverso formule assimilabili alle seguenti:

$P_t=(0.04 \cdot R+0.07 \cdot S+0.12 \cdot F) \cdot C$, [7] con $C=1 \sim 1.1$ in relazione alla durezza del bitume vecchio, R pari al trattenuto al setaccio 8ASTM (2.7mm), S pari al passante al setaccio 8 ASTM e trattenuto al 200 ASTM (0.075mm), F pari al passante al 200 ASTM.

$P_t=0.035 \cdot a+0.045 \cdot b+c \cdot d+f$ [6], ove a è il trattenuto al setaccio 2mm UNI, b il passante al 2mm UNI e trattenuto a allo 0.075mm UNI, c il passante allo 0.075mm UNI, $d=0.15-0.2$ (in funzione di c), $f=0.3-0.8$ (in funzione dell'assorbimento degli inerti).

$P_{bi}=100 \cdot [G_b(V_{be}+V_{ba})] / [G_b(V_{be}+V_{ba})+W_s]$ [5] (Cfr. Tab.3).

Qualora, per la singola miscela di aggregati, dal confronto tra le P_t e P_{bi} risulti una adeguata corrispondenza, è allora possibile ricavare l'apporto di bitume nuovo:

$P_n=P_{bi} \cdot P_v \cdot P_{fr}$. Da cui: $R_a=100 \cdot P_n / P_{bi}$

d.4 Determinazione/controllo della quantità di rigenerante (Cfr. Fig.3)

Sono necessari due passi successivi, ipotizzando andamenti log-lineari delle viscosità in funzione delle percentuali.

d.4.1 Attraverso la $\text{Log} \eta(B_n+ B_n \cdot x)=a+b \cdot x$, note le coppie $(0, \eta(B_n))$, $(100, \eta(RIG))$, con $x=100 \cdot RIG/B_n$, si ottiene $\Rightarrow \eta(B_n+ B_n \cdot x)$, per es. con $x=10$;

d.4.2 Attraverso la $\text{Log} \eta[(B_n+ B_n \cdot x)/R_a]=a+b \cdot z$, note le coppie $(0, \eta(B_v))$, $(100, \eta(B_n+ B_n \cdot x))$, con $z=R_a=100 \cdot P_n/P_t$, si ottiene $\Rightarrow \eta[(B_n+ B_n \cdot x)/R_a]=\eta(B_{tot})$;

Tale valore di viscosità (dinamica, a $60^\circ C$) deve risultare prossimo a $800\text{Pas} \sim 1300\text{Pas}$ [5, 8]. Qualora ciò non avvenga è necessario:

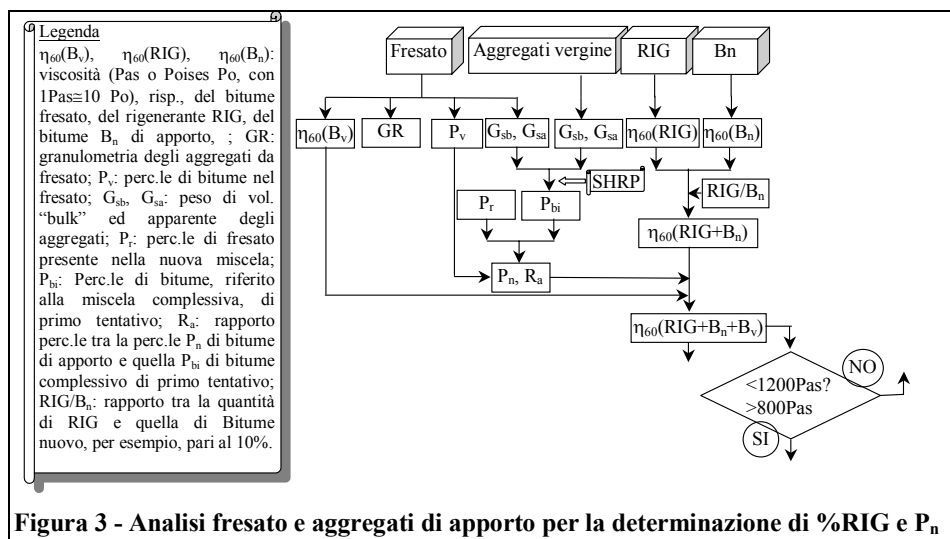
se è $\gg 1300\text{Pas}$, diminuire P_r , congruentemente con i limiti da Capitolato;

se è $\ll 800\text{Pas}$, aumentare P_r e/o ridurre la percentuale di RIG.

d.5 Problema temperature di confezionamento

Nota la viscosità dinamica a $60^\circ C$ di B_v , B_n , RIG, risultano necessarie almeno altre $2 \cdot 3$ determinazioni a diverse temperature (una delle quali prossima alla abituale temperatura di miscelazione), al fine di poter individuare, su base previsionale, per ciascuna possibile futura composizione $B_{ni}+B_{vi}+RIG_i$, la relativa legge $\text{log} \eta(B_{ni}+ B_{vi}+RIG_i)=a_i-b_i \cdot T$ e, di qui, le temperature corrispondenti a $\eta(B_{ni}+ B_{vi}+RIG_i)=0.17 \pm 0.02\text{Pas}$ (miscelazione) e $0.28 \pm 0.03\text{Pas}$ (compattazione). Allo scopo di effettuare una

validazione preliminare e di larga massima, è possibile miscelare un presumibile quantitativo di $B_{ni} + B_{vi} + RIG_i$ e ricavare, sul fluido risultante, l'effettiva legge di decadimento di η con la temperatura.



d.6 Digressione sulla percentuale di RAP

Nel caso del RAP, il legante che sarà sottoposto, nel corso del proprio life cycle, al cemento meccanico e termico è una miscela $B_{ni} + B_{vi} + RIG_i$; il protocollo SHRP deve, quindi, applicarsi ad essa. La determinazione della %RAP deve quindi soggiacere, oltre che ai vincoli sopra citati, anche ai seguenti (i quali incidono su B_v , dunque, appunto su %RAP):

Strumento	Vincolo reologico	Temperatura di prova	% RAP
DSR	$G^*/\sin\delta \geq 1 \text{KPa}$	HT	(P_{inf1}, P_{sup1})
DSR	$G^*/\sin\delta \geq 2.2 \text{Kpa}$ (post RTFOT)	HT	(P_{inf2}, P_{sup2})
BBR	$S \leq 300 \text{Mpa}$ (post RTFOT+PAV)	LT	(P_{inf3}, P_{sup3})
BBR	$m \geq 0.3$ (post RTFOT+PAV)	LT	(P_{inf4}, P_{sup4})
DSR	$G^* \cdot \sin\delta \leq 5.0 \text{Mpa}$ (post RTFOT+PAV)	MT	(P_{inf5}, P_{sup5})
Intervallo di accettabilità:		$(P_{inf1}, P_{sup1}) \cap (P_{inf2}, P_{sup2}) \cap (P_{inf3}, P_{sup3}) \cap (P_{inf4}, P_{sup4}) \cap (P_{inf5}, P_{sup5})$	

e. I compattazione con Superpave Giratory Compactor

Definite le tre miscele granulometriche e le tre rispettive % di bitume, si confezionano i provini per la successiva compattazione. Si precisa che, calcolata la percentuale totale di legante bituminoso, riferita alla miscela, la determinazione della percentuale di B_n (cioè del solo bitume vergine di apporto, al netto di B_v , univocamente legato alla quantità di fresato, e di RIG) può effettuarsi con relazione più precisa di quella precedentemente segnalata ($P_n = P_{bi} - P_v \cdot P_{fr}$): $[-b_{fr} \cdot (\%ADF) \cdot (1-b)] \cdot (1 + \%RIG/100)^{-1}$;
 Si rende così possibile, per data miscela, il calcolo delle caratteristiche volumetriche ottenute (Cfr. Tab.3), nonché la previsione di quelle ottenibili variando la percentuale di bitume da P_{bi} a $P_{b,estimated}$

f. Scelta della miscela fresato + aggregati di progetto

Si effettua sulla base del confronto tra i criteri di accettazione (inerenti ancora ai requisiti volumetrici) ed i valori stimati delle caratteristiche volumetriche per la percentuale di bitume stimata (Cfr Fig.4).

g. II compattazione

Avviene in conformità alla prima. La miscela granulometrica è ora identica, mentre la percentuale di bitume è fatta variare in un intorno della $P_{b, estimated}$ (Cfr. Tab.3, Fig.5).

h. Analisi dei risultati e scelta della percentuale di ottimo di bitume

In relazione alla evoluzione delle proprietà volumetriche in funzione della percentuale di bitume, si perviene, attraverso il confronto con i criteri di accettazione, alla scelta della percentuale di legante bituminoso di ottimo.

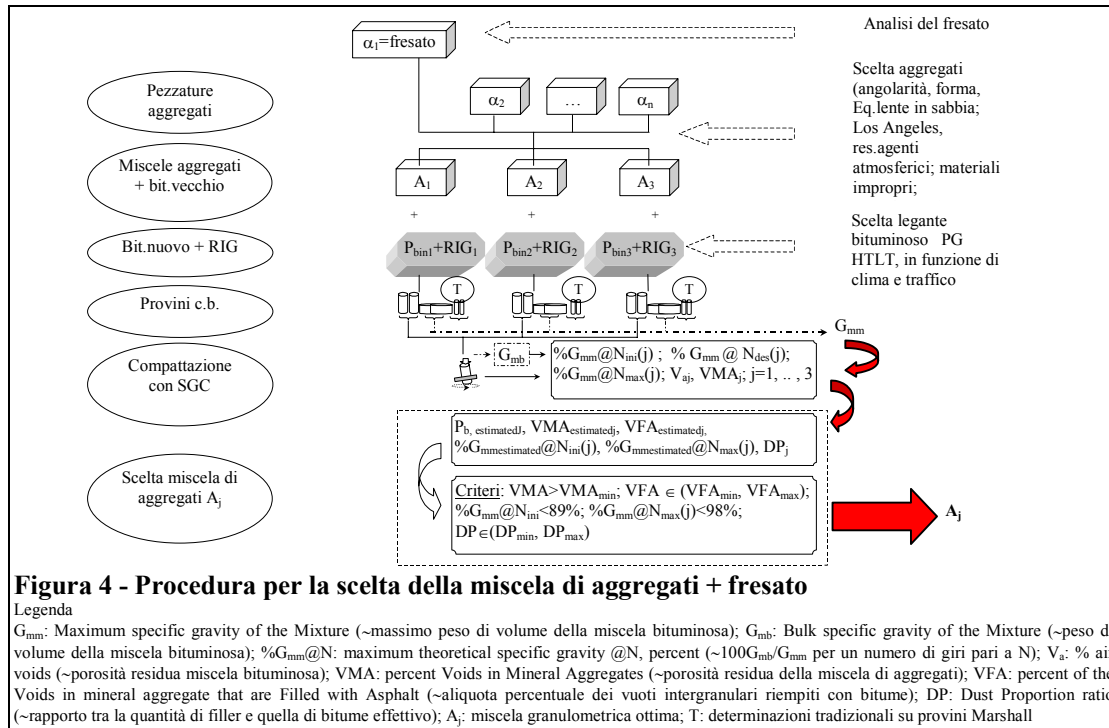
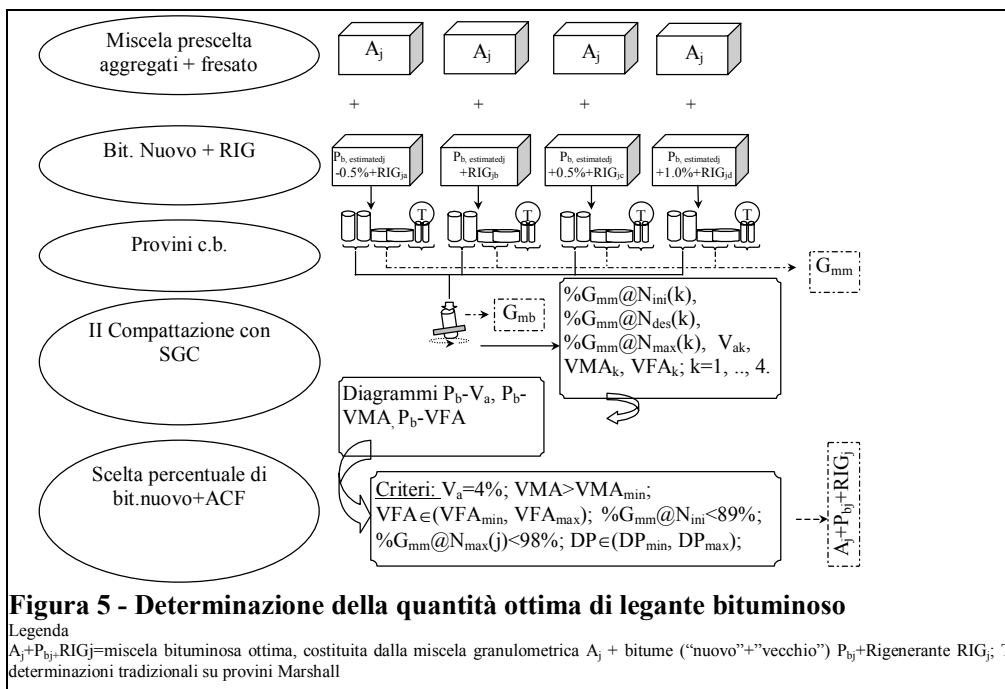


Tabella 4 - Scelta dei materiali – Quadro riassuntivo

Determinazione delle temperature di miscelazione e compattazione tramite apposito diagramma temperatura-viscosità, in funzione delle relative viscosità (per bitumi <i>non modificati</i> : miscelazione: 0.17±0.02 Pa·s; compattazione: 0.28±0.03 Pa·s).
Scelta degli aggregati lapidei in base a proprietà di accettazione, proprietà di provenienza e curva granulometrica
<i>Proprietà di accettazione</i>
Angolarità della frazione grossa (>4.75mm); Angolarità della frazione fina (<2.36mm); Grani piatti od allungati; Contenuto di argilla;
<i>Proprietà di provenienza</i>
Toughness (resistenza a degradazione per azioni meccaniche, test Los Angeles); Soundness (resistenza a degradazione in esercizio, per effetto degli agenti atmosferici, test al solfato di magnesio o sodio); Materiali “deleterii” (mica, legno, carbone, masse di argille, argillite, etc.);
Granulometria
Nel piano $d^{0.45}-P$, si traccia la retta per (0, 0) e (max size, 100); si individuano 8 punti di controllo: due a 0.075mm, due a 2.36mm, uno a nom max size-1, due a nom max size, uno a max size. Si individua, poi, la restricted zone, posta a cavallo della retta sopra descritta, tra 0.3mm e 2.36mm, oppure fra miscele con max nom size pari a 25mm o 37.5 mm. E’ così individuato un dominio all’interno del quale deve porsi la curva granulometrica. Si consiglia, inoltre, il passaggio al di sotto della restricted zone
Scelta del legante e selezione dei modificanti
Il generico legante bituminoso ha denominazione PG HT LT (Performance Grade High Temperature Low Temperature della pavimentazione). Il primo problema risiede nella terminazione di HL e LT. Una possibile tecnica consiste nel determinare: a) il più caldo periodo settimanale e la relativa media delle temperature massime; quindi, per il numero di anni di osservazione, la media T_{airmax} e la deviazione standard di tali valori e densità di probabilità della distribuzione; b) il giorno più freddo dell’anno e la relativa temperatura; quindi la media T_{airmin} e la deviazione standard e densità di probabilità della distribuzione per il periodo di anni considerato (almeno 20); c) la relativa temperatura massima a 20mm di profondità (dalla superficie stradale), attraverso una relazione in funzione della latitudine e della T_{airmax} determinata e la relativa densità di probabilità della distribuzione; d) la minima temperatura della pavimentazione, posta pari a T_{airmin} oppure ad essa relazionata tramite apposita formula e la relativa densità di probabilità della distribuzione; e) le relative $HT_{teorica}$ e $LT_{teorica}$ estratte dalla relativa distribuzione per un rischio di errore del 2%; f) la correzione della $HT_{teorica}$, per carichi a bassa velocità (+6°C) o statici (+12°C); g) la correzione addizionale di $HT_{teorica}$ per numero di carichi eccezionale (+6°C opzionali, per $10^6-3 \cdot 10^6$ ESALS, +6°C obbligatori, per $>3 \cdot 10^6$ ESALS); h) le approssimazioni “conservative” dei valori così ottenuti in funzione dello standard SHRP per multipli di 6°C. Ottenute HT e LT, devono essere effettuate delle prove, a temperature dipendenti spesso da HT e/o LT, il cui esito è indipendente dal particolare regime termico impiegato: 1. Flash Point Temp >230°C; 2. $\eta(135^\circ C) < 3$ Pa·s; 3. $G^*/\sin\delta > 1.00$ KPa (tramite DSR); post RTFOT o post TFOT: 4. Mass loss ≤ 1%; 5. $G^*/\sin\delta(HT) \geq 2.2$ KPa; post PAV (90-100°C): 6. $G_{sen\delta}(MT=(LT+HT)/2+4) \leq 5.00$ KPa; post physical hardening: 7. Creep Stiffness (LT+10°C) ≤ 300 Mpa; 8. $M(LT+10^\circ C) > 0.3$; 9. $FS(LT+10^\circ C) > 1\%$; le determinazioni 7 e 8 sono effettuate tramite BBR, la 9 tramite DTT.



Le principali corrispondenze tra le prove SHRP/CNR sono riassunte in Tab.5, mentre le curve granulometriche delle miscele componenti e delle 3 risultanti (quelle, cioè, M1, M2, M3, sottoposte alla prima compattazione) sono rappresentate alle Figg.6 e 7.

Tabella 5 - Tabella corrispondenze prove SHRP-prove CNR
Norma AASHTO-ASTM suggerita in protocollo SHRP ed in protocolli per il riutilizzo del freato - Fase di pertinenza - Sintesi prova ASTM - Norma CNR correlata - Altre norme correlabili/Note
Bulk Specific gravity G_{sb} - AASHTO T85 o ASTM C127 Specific Gravity and Absorption of Coarse aggregate - Dopo la scelta dei materiali (bitume+aggregati). - Per pesatura in acqua. Essiccatura; immersione in acqua; rimozione da acqua e asciugatura delle superfici; pesatura (B); pesatura in acqua (C); essiccatura e pesatura (A); Bulk Sp Gr.=A/(B-C) - BU CNR n.63/78 mod; oppure BU CNR n.63/78 +137/92 con successiva deduzione tramite la $S_a = S_d / (1 - A_b S_d / 100)$, ove S_a è l'apparent sp. Gr. E S_d è la Bulk Sp. Gr. E A_b è l'Absorption
Bulk specific gravity G_{sb} - AASHTO T84 o ASTM C128 Specific Gravity and Absorption of fine aggregate - Idem c.s. - Con picnometro. Essiccatura; addizione di acqua; rimozione da acqua e decantazione eventualmente per esposizione delle superfici a debole flusso di aria calda; pesatura di circa 500g (P) ed introduzione in picnometro parzialmente riempito di acqua, poi totalmente riempito sino a tacca; pesatura picnometro + acqua + P=C; sia B il peso picnometro+peso sola acqua sino a tacca. Bulk Sp. Gravity = A / (B + P - C); P=500g Idem come sopra
Apparent Specific Gravity G_{sa} (ASTM C127, ASTM C128) - Per l'aggregato "grosso", tramite la C127: App.Sp.Gr.=A/(A-C); per l'aggregato fino, tramite la C128: App.Sp.Gr.=A/(B+A-C) - BU CNR 63/78. E' utile sottolineare che la differenza percentuale tra G_{sb} e G_{sa} risulta sovente contenuta nel range 1-3%, e tende ad essere tanto più ridotta quanto minore è la pezzatura media in esame.
Specific gravity of the mineral filler AASHTO T228 o ASTM D854 - Si impiega l'apparent specific gravity, con errore trascurabile, come specificato dalla stessa [5]. → BU CNR n.63/78
Specific gravity of the asphalt cement G_b AASHTO T228 o ASTM D70 Specific gravity and density of semi-solid bituminous materials - Con picnometro. Siano A il peso picnometro e B il peso picnometro +acqua; pesatura picnometro parzialmente riempito di bitume (C); pesatura picnometro +bitume+acqua (D); Sp.Gr.=(C-A)/(B-A-D+C);
Maximum specific gravity of the loose paving mixture G_{mm} AASHTO T209 o ASTM D 2041 Theoretical maximum specific gravity of bituminous paving mixtures - Miscela eguale a quella da compattare - La prova è concettualmente analoga a quella in BU CNR 63/78 per la determinazione del peso dei grani e si esegue su circa 2.5kg di c.b. non compattato. Si pesa il contenitore con acqua sino alla tacca (D). Si separano i grani della miscela. Si lascia raffreddare a temperatura ambiente, si pesa il conglomerato senza acqua (peso netto =A); si aggiunge acqua sino a ricoprire il c.b., si realizza una depressione, si riempie il contenitore con acqua sino alla tacca e si pesa (E). $G_{mm}=A \cdot (A+D-E)^{-1}$.
Bulk specific gravity of the compacted paving mixture G_{mb} AASHTO T166 o ASTM D1188/D2726 Bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using paraffin-coated specimens/ Bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using saturated surface-dry specimens - Post- I e II compattazione con giratorio - La prova è concettualmente analoga a quella in BU CNR 40/73 per la determinazione del peso di volume per paraffinatura. Si determina il peso di volume del provino (A); si determina il peso del provino paraffinato in aria (D) e poi in acqua (E). Determinazione/stima peso specifico paraffina; eventuale correzione per provini umidi. $G_{mm}=A \cdot [D-E-(D-A)/F]^1$.
ASDM D 4402 viscosità dei leganti bituminosi con viscosimetro Brookfield - Analisi dei leganti bituminosi "nuovi" o contenuti nel freato da riciclare.

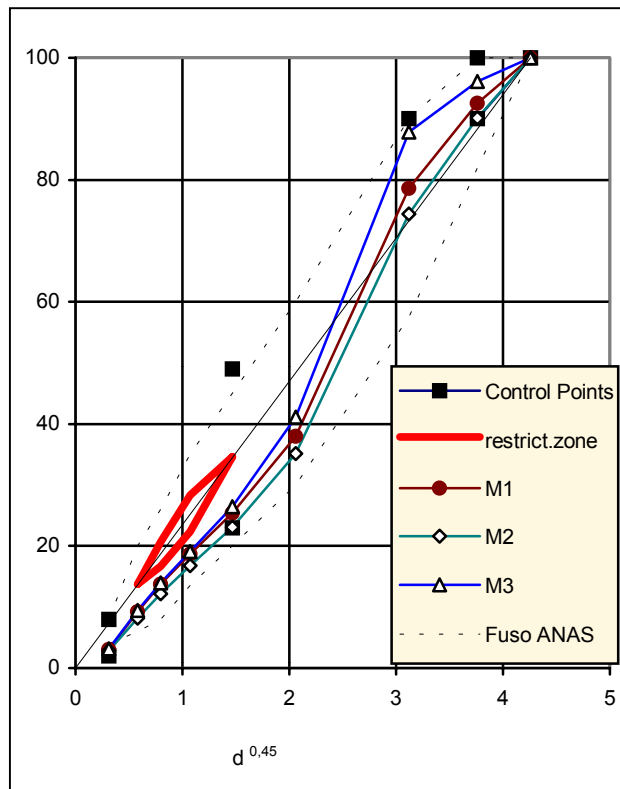
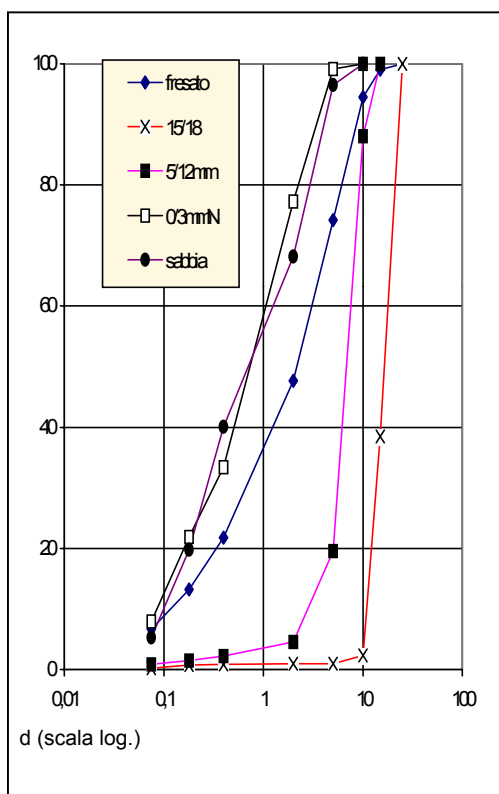


Figure 6 e 7 - Curve granulometriche componenti (a sx) e delle tre prescelte miscele (a dx) – I compattazione

3.2. Risultati ottenuti

Di seguito sono riassunti, in forma tabulare (Tab.6) e grafica (Figg.8~12), i principali risultati ottenuti.

Tabella 6- Quadro riassuntivo dei risultati ottenuti e delle procedure impiegate		
Legenda		
F: Fresato; PADF: Pezzature aggregati da Fresato; 15/18, 5/12, 0/3N, sabbia (Cfr. Figura); miscele granulometriche componenti da cui sono state ricavate quelle sottoposte a sperimentazione M1, M2, M3; B _v : Bitume vecchio da fresato; B _n : Bitume nuovo; RIG: Rigenerante; PAVE: Pezzature aggregati vergine; M ₁ =0.33·PADF+0.27·(15/18)+0.33·(5/12)+0.04·(0/3N)+0.03·sabbia; M ₂ =0.33·PADF+0.29·(15/18)+0.34·(5/12)+0.04·(0/3N); M ₃ =0.33·PADF+0.11·(15/18)+0.49·(5/12)+0.04·(0/3N)+0.03·sabbia; MBNC: miscele bituminose non compattate; MBC: Miscele bituminose compattate		
Materiale - Test sperimentale od algoritmo di deduzione	Indicatore	Valore ottenuto
6.1 Analisi fresato, bitume nuovo e rigenerante		
F – Estrazione di bitume tramite processo ASTM Draft n.8/97 (Proposed test for Asphalt Content of H.M.A. by the ignition Method)	P _{bv}	6.06 (riferita alla miscela)
PADF – Analisi granulometrica mediante crivelli e setacci BUCNR n. 23	GR (curve granulometriche)	Cfr. figura
PADF – ASTM C127 e C128	G _{sb}	2.77g/cm ³
PADF – ASTM C127 e C128	G _{sa}	2.80 g/cm ³
B _v – Estrazione non distruttiva ASTM D1856, BU CNR n,133		
B _v - ASTM D 4402 (Brookfield)	η ₆₀ (B _v)	10500Pas
B _v - Temperatura P. e A. (BUCNR35/73)	T _{PA} (B _v)	74.0°C
B _v – Penetrazione a 25°C (BUCNR 24/71)	Pen(B _v)	10dmm
B _n - ASTM D 4402 (Brookfield)	η ₆₀ (B _n)	141Pas
B _n - Temperatura P. e A. (BUCNR35/73)	T _{PA} (B _n)	48.0°C
B _n – Penetrazione a 25°C (BUCNR 24/71)	Pen(B _n)	77dmm
RIG – ASTM D 4402 (Brookfield)	η ₆₀ (RIG)	0.035Pas

6.2 Analisi aggregati vergini		
PAVE - ASTM C127 e C128	G_{sb}	15/18: 2.62; 5/12:2.67;
PAVE - ASTM C127 e C128	G_{sa}	15/18: 2.69; 5/12:2.70; 0/3N:2.88; sabbia: 2.69
Analisi granulo-metrica mediante crivelli e setacci BUCNR n. 23	GR (curve granulometriche)	Cfr. figura
6.3 Miscele ideali di aggregati vergini + aggregati da fresato		
M ₁ - Relazioni 1, 2, 3	$G_{sb}=2.69; G_{sa}=2.74; P_{bi}=4.25$	
M ₂ - Relazioni 1, 2, 3	$G_{sb}=2.69; G_{sa}=2.74; P_{bi}=4.27$	
M ₃ - Relazioni 1, 2, 3	$G_{sb}=2.70; G_{sa}=2.74; P_{bi}=4.17$	
6.4 I compattazione con giratory		
Average Design High Air Temperature=43-44°C; Design ESALs=10·10 ⁶ -30·10 ⁶ ; N _{des} =135; N _{ini} =9; N _{max} =220		
MBNC - ASTM D 2041	$G_{mm}(1)=2.51; G_{mm}(2)=2.50; G_{mm}(3)=2.50$	
MBC - ASTM D 1188	$G_{mb}(1.1)=2.36; G_{mb}(1.2)=2.38; G_{mb}(2.1)=2.31; G_{mb}(2.2)=2.34; G_{mb}(3.1)=2.35; G_{mb}(3.2)=2.32$	
Relazione 4	%G _{mm} @N _{ini} (1) = 82.5; %G _{mm} @N _{max} (1) = 94.5; %G _{mm} @N _{ini} (2) = 81.0; %G _{mm} @N _{max} (2) = 93.0; %G _{mm} @N _{ini} (3) = 81.8; %G _{mm} @N _{max} (3) = 93.7	
6.5 II compattazione con giratory e scelta percentuale ottima di legante bituminoso		
Average Design High Air Temperature=43-44°C; Design ESALs=10·10 ⁶ -30·10 ⁶ ; N _{des} =135; N _{ini} =9; N _{max} =220		
Leggi correlative (stima approssimata)	$V_a(P_b) \approx 2.7 \cdot P_b + 18.8$; $VMA(P_b) \approx 2.5 \cdot P_b^2 - 28.8 \cdot P_b + 99.5$; $VFA(P_b) \approx 14.2 \cdot P_b - 3.4$;	
Proprietà della miscela di progetto	$P_b=5.52$; $V_a=4$; $VMA=15.9$; $VFA=74.8$; $DP=0.6$; %G _{mm} @N _{ini} (D) ≈ 86.3 ; %G _{mm} @N _{max} (D) ≈ 98.2	

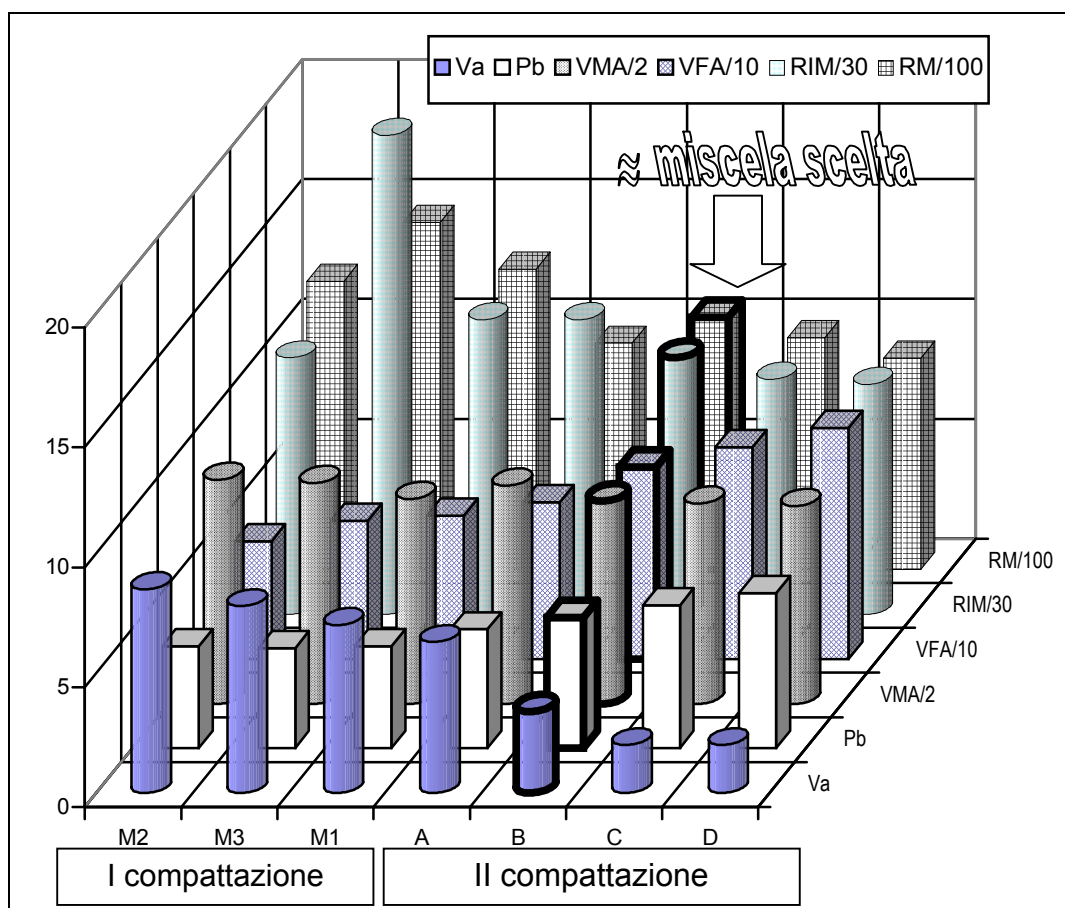


Figura 8 – Evoluzione delle prestazioni volumiche (V_a , P_b , VMA, VFA) e meccaniche (valori Marshall R_M e RI_M) nella transizione dalle tre miscele della prima fase (M1, M2, M3) alle 4 della seconda (A, B, C, D)

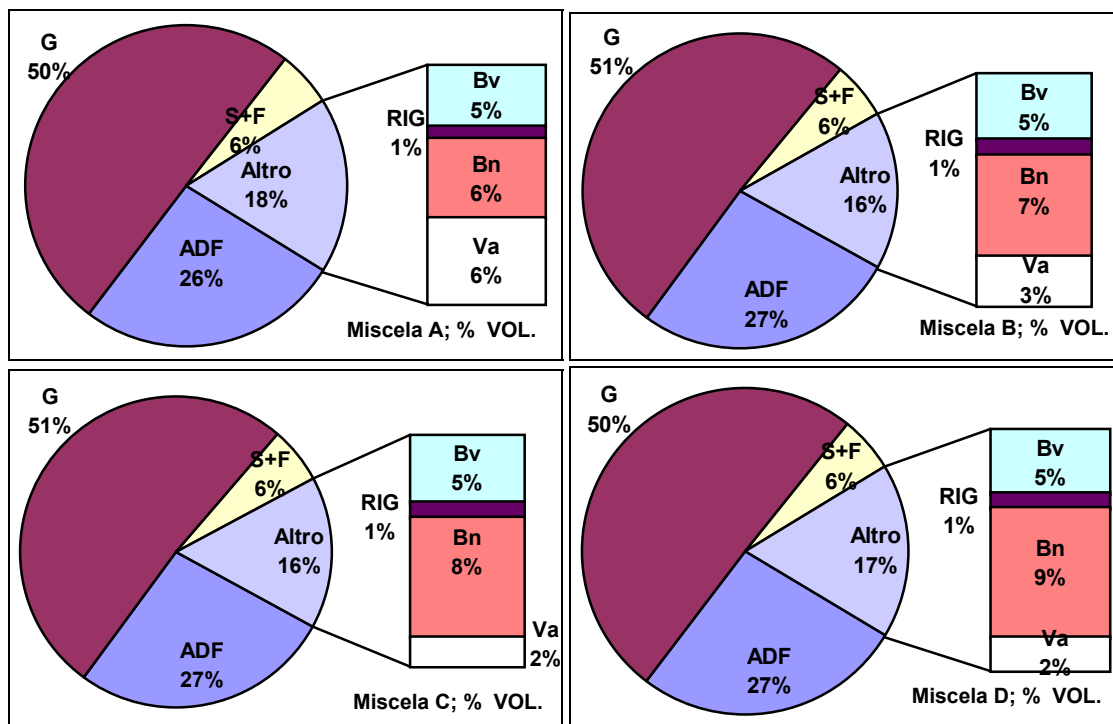


Figure 9-12 - Composizione volumica delle 4 miscele bituminose A, B, C, D (II compattazione)

Legenda

ADF: aggregati da freato; Bv: bitume contenuto nel freato; Bn: bitume di apporto; RIG: rigenerante; Va: percentuale dei vuoti; G: % volume del "grosso" (5/12+15/18); S+F: % volume del "fino" (sabbia+0/3);

Risulta evidente la laboriosità ed il carattere articolato del processo progettuale SHRP messo in pratica. A fronte dell'effettuazione di un elevato numero di prove e di cospicui tempi di sperimentazione, gli studi condotti, le analisi degli algoritmi di calcolo e le elaborazioni sperimentali non consentono di pervenire ad indicazioni di carattere generale.

Purtuttavia, è possibile osservare, in via espressamente preliminare, che:

- le determinazioni di G_{sb} e G_{mm} sono risultate non prive di difficoltà procedurali, anche in relazione alla necessità di operare su protocolli di prova formalizzati in un differente contesto tecnico, scientifico e tecnologico;
- il processo progettuale non appare esente dalla possibilità di fenomeni di "deriva"; lievi imprecisioni nella percentuale di legante, per esempio, od ancora fenomeni di disomogeneità di impasto (per ognuno di essi risulta necessario duplicare il processo di miscelazione, per effetto delle dimensioni relativamente contenute dei miscelatori da laboratorio) possono condurre ad esiti sperimentali contraddittori;
- nella transizione dalla I alla II compattazione, le variazioni volumetriche maggiori concernono V_a e VFA, mentre quelle relative alla VMA risultano segnatamente minori, in relazione alla ridotta/nulla varianza associata alle modificazioni prettamente granulometriche ed alla non accentuata influenza, nel caso in esame, del grado di costipamento dalla percentuale di bitume (II compattazione);
- sulla base degli esperimenti effettuati, le formule previsionali della classe $P_t=0.035\cdot a+0.045\cdot b+c\cdot d+f$, pur costituendo un supporto decisionale valido, possono condurre a stime non perfettamente congruenti con quelle effettuabili su base SHRP; in particolare, qualora le evidenze maturate attraverso la presente sperimentazione

fossero supportate da un campione di indagini sufficientemente numeroso, il valore di f , ed il relativo range di variazione potrebbero risultare suscettibili di qualche modificazione;

- per ciò che concerne il confronto con l'ottimizzazione delle caratteristiche di resistenza Marshall (Rigidezza RIM e Resistenza RM), la miscela granulometrica prescelta (I compattazione) è risultata quella depositaria di valori di R_M (Resistenza Marshall) e RI_M (Rigidezza Marshall) medi ($M1$); tra le quattro miscele della II fase ($A=M1+P_{bA}$, $B=M1+P_{bB}$, $C=M1+P_{bC}$, $D=M1+P_{bD}$), la R_M della prescelta è la massima, mentre la RI_M risulta in posizione intermedia;
- la VFA della miscela prescelta si pone in prossimità del limite superiore del range di accettabilità; potrebbe, quindi, risultare opportuna, tra la I e la II compattazione, un'ulteriore modifica della curva granulometrica;
- prescelta la "qualità" di legante bituminoso ed aggregati, la individuazione della miscela bituminosa secondo la logica SHRP appare dominata da un ristretto, ma sinergico, novero di istanze; in tale ottica, tanto la selezione della miscela granulometrica (I compattazione) che della relativa percentuale di bitume (II compattazione) discendono, in particolare, dall'esigenza di assicurare un'adeguata resistenza a fatica ($VFA \uparrow$, $V_a \downarrow$), ma, in uno, una sufficiente resistenza all'inormaiamento ($VFA \downarrow$, $V_a \uparrow$); tali nessi relazionali sono confermati dalle seguenti, ben note, strutture di calcolo: $\log N = a + b \cdot [\log(c \cdot VFA) - d]$ [9, 10, 11, 12] e $\epsilon_p(t) = e \cdot (f + g \cdot V_a)^{-1} \cdot (|E^*(T, fr)|)^{-1} \cdot t^{0.25}$ [13], ove a, b, c, d, e, f, g sono positivi, N esprime la resistenza a fatica (numero di cicli a rottura per fatica), $\epsilon_p(t)$ è inversamente proporzionale alla resistenza all'inormaiamento (deformazione permanente al tempo t), $|E^*(T, fr)|$ è il modulo complesso corrispondente alla data temperatura e frequenza di carico, t è il tempo di applicazione del carico, correlato al numero di cicli di sollecitazione; nel caso in studio, tali relazioni, le quali hanno valore meramente previsionale e di massima, forniscono, purtuttavia, con immediatezza, una rappresentazione utile per apprezzare l'incremento della resistenza a fatica R_f , ed il decremento di quella all'inormaiamento R_i , valutati in termini di rapporto tra numero di cicli per la crisi;

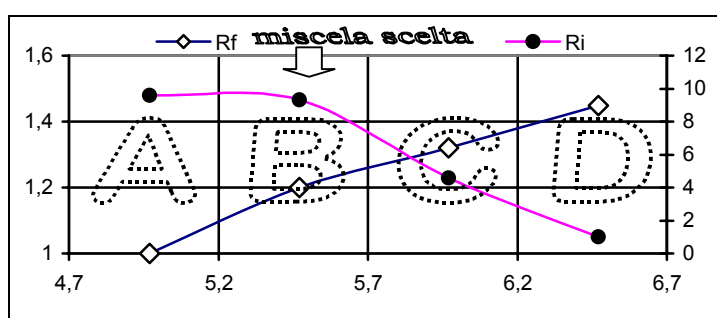


Figura13 – Resistenze a fatica ed all'inormaiamento delle 4 miscele A, B, C, D

Oss.: stima attraverso modelli previsionali [9-13]; valori adimensionali espressivi del rapporto tra numero di cicli a rottura e valore di riferimento

- risulta utile rimarcare, alla luce di quanto sopra, che resistenza all'inormaiamento, a fatica ed allo scorrimento viscoso Marshall forniscono, per il particolare caso di studio, e con attendibilità ben differenziata (le resistenze Marshall sono state determinate sperimentalmente mentre le rimanenti costituiscono delle previsioni), indicazioni piuttosto concordi ed inoltre in armonia con le scelte effettuate su base

- SHRP, cioè attraverso soli confronti tra indicatori volumetrici e range di accettabilità;
- in pratica, a valle della scelta della qualità dei materiali e della curva granulometrica, in termini prettamente volumetrici (cioè non considerando i requisiti meccanici), si profila uno scenario in cui le strategie tradizionali dell'Ingegnere stradale sono essenzialmente modificate ma concettualmente non "stravolte". Ai vincoli tradizionali (per es. I-VII, non sempre simultaneamente presenti, presso i Capitolati, per i diversi strati), se ne sostituiscono altri SHRP (1-6): I) $V_{aM} \in$; II) $V_{asitu} \in$; III) $V_{asitupost1} \in$; IV) $VFA <$; V) $P_b \in$; VI) $\min P_b$; VII) $\gamma_{situ} \geq (0.95 \sim 0.97) * \gamma_{Mmax}$; 1) $V_a(N_{des}) \equiv V_a \approx$; 2) $VMA >$; 3) $VFA\% \in$; 4) $\%G_{mm}(N_{ini}) <$; 5) $\%G_{mm}(N_{max}) <$; 6) $DP \in$, ove il pedice M indica il riferimento a provini Marshall, V_{asitu} indica V_a su carote da situ (diametro=15cm), γ_{situ} e γ_{Mmax} sono pesi di volume del conglomerato bituminoso su carote o su provini Marshall (valore max), i simboli \approx , $<$, $>$, \in si riferiscono ai noti vincoli (circa uguale, minore, maggiore, appartenente al dominio di estremi pari a ..). In sintesi, metodiche, strumenti e prove "cambiano", gli obiettivi prioritari appaiono, invece, tendenzialmente "affinati".

4. CONCLUSIONI

L'attuale comparto delle costruzioni stradali si caratterizza per la coesistenza di molteplici istanze, di diversa natura e grado di priorità. Esse costituiscono vincoli cui ogni intervento sul territorio deve soggiacere. Tra tali condizioni, due assurgono a ruolo tecnico e scientifico prioritario: le prestazioni (tradizionalmente intese) rese all'Utente e la compatibilità ambientale. Entrambi muovono dalla percezione globale di un rinnovato concetto di sicurezza, in parte concernente il modo stesso del trasporto su gomma, in parte afferente alla adeguata considerazione delle cosiddette esternalità. Il riutilizzo del conglomerato bituminoso a caldo può, talvolta, costituire una accettabile soluzione di compromesso. Perché ciò accada, però, oltre alle proprietà sistemiche prettamente ambientali, afferenti specie alla sfera delle caratteristiche termodinamiche del processo produttivo a caldo, lo strato finito (sia ad esso demandata una funzione eminentemente portante - base, binder - o, più di rado, in uno portante e di interfaccia - usura-), deve possedere adeguati requisiti meccanici. Affinché, poi, l'impiego risulti proponibile non solo in ambito prototipico ma anche su scala vasta, deve essere possibile la definizione di protocolli progettuali, produttivi e di controllo affidabili ed adeguatamente conformi allo stato dell'arte del settore specifico dei materiali stradali. Di qui l'esigenza di analizzare e testare l'applicabilità del sistema progettuale SHRP al riutilizzo a caldo del fresato. A tale obiettivo si è ispirato il ciclo di sperimentazioni effettuato. La complessità dei processi sperimentali indagati e delle metodiche analizzate non consente di inferire proposizioni di carattere generale. Purtuttavia, sulla base delle sperimentazioni e degli studi effettuati, risulta possibile asserire che sussistono le basi per un utilizzo proficuo della metodica SHRP per la progettazione ed il controllo di siffatte miscele. Risultanze di rilievo risultano la sperimentalmente validata congruenza con i requisiti meccanici tradizionali (Marshall), la comprovata sinergia con le più avanzate tecniche previsionali di valutazione della resistenza a fatica ed all'inormaiamento, nonché, da ultimo, la compatibilità con gli attuali standards tecnici che, definiti e illustrati presso i più noti Capitolati Speciali d'Appalto, trovano oggi applicazione presso le opere d'Ingegneria in corso

d'opera e costituiscono il bagaglio tecnico maturato e consapevole degli operatori di settore.

Permangono, comunque, alcuni domini tecnici, scientifici e concettuali in cui risulta necessaria un'ulteriore opera di ricerca ed un grado maggiore di approfondimento. Ci si riferisce alla difficoltà di realizzare sperimentazioni intrinsecamente fondate su standards e concetti in parte non diffusi né presenti presso la normativa italiana (in primis concernenti i pesi di volume "bulk" dei grani e massimo della miscela bituminosa), al legame, poi, tra le tecniche tradizionali (previsionali) di deduzione della percentuale di bitume di apporto e quelle, invece, qui formalizzate e parzialmente calibrate, in parte previsionali (ma su basi sperimentali "allargate" alla considerazione dei pesi volumici G_{sa} e G_{sb}), ed in parte organiche all'accurato progetto volumetrico della miscela.

BIBLIOGRAFIA

- [01] Boscaino G., Di Mino G., Bevilacqua A., Rischio da indurimento da stress termico nei bitumi, Convegno SIIV, Ancona, 1996.
- [02] Di Mino S., Tesoriere G., Studio del multistrato elastico. Proposta di un metodo di calcolo semplificato per la valutazione delle tensioni e delle deformazioni negli strati di pavimentazioni flessibili, Palermo, 1974.
- [03] Domenichini L., Gestione programmata della manutenzione delle pavimentazioni aeroportuali, XXI Convegno Nazionale stradale, Trieste, 11/15 Giugno, 1990.
- [04] Bassani M., Santagata E., Di Palma C., *Proprietà meccaniche di miscele bituminose progettate con metodo dei vuoti*, Convegno SIIV, Ancona, 1996.
- [05] Asphalt Institute, Superpave mix design, Superpave Series No.2 (SP-2), U.S.A., 1996.
- [06] Autostrade S.p.A., Manutenzione pavimentazioni – interventi sulle sovrastrutture – Norme tecniche, Roma, 1995.
- [07] American Society for Testing and Materials, Recycling of bituminous pavements, ASTM Special Technical Publication, U.S.A., 1977.
- [08] Le recyclage d'enrobés asphaltiques en centrale discontinue, CRR, Bruxelles, 1991.
- [09] Verstraeten J., Loi de fatigue en flexion répétée des mélanges bitumineux, Bull. Liaison des lab. Des Ponts et Chaussées, n.70, mars-avril 1979.
- [10] Giannattasio P., Pignataro P., La caratterizzazione dei conglomerati bituminosi-dati di ingresso per il calcolo razionale delle pavimentazioni, Napoli, 1983.
- [11] Caroti L., Lancieri F., Tempestini M., Sulla valutazione delle deformazioni degli strati bituminosi, ai fini del dimensionamento delle sovrastrutture stradali: quali le esigenze di precisione ai fini del prevedibile danno da fatica, Le Strade, n.1293, 1993.
- [12] Celauro B., Santagata E., Miscele bituminose, Quaderno AIPCR, Verona, 18/21 maggio, 1998.
- [13] AA.VV., Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux denses, Centre de Recherches routières, 1987.