



**IL METODO DEI VUOTI:
UN APPROCCIO INNOVATIVO AL
PROPORZIONAMENTO VOLUMETRICO DEI
CONGLOMERATI BITUMINOSI**

Marco Bassani

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
Tel: +39 011.5645635 - Fax: +39.011.5645614
E-mail: bassani@polito.it

Ezio Santagata

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
Tel: +39 011.5645633 - Fax: +39.011.5645614
E-mail: santagata@polito.it

Carlo De Palma

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
Tel: +39 011.5645623 - Fax: +39.011.5645614
E-mail: depalma@polito.it

IL METODO DEI VUOTI: UN APPROCCIO INNOVATIVO AL PROPORZIONAMENTO VOLUMETRICO DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

MARCO BASSANI – D.I.T.I.C. – Politecnico di Torino
EZIO SANTAGATA – D.I.T.I.C. – Politecnico di Torino
CARLO DE PALMA – D.I.T.I.C. – Politecnico di Torino

SOMMARIO

Il Metodo dei Vuoti si colloca tra i metodi analitico-volumetrici di mix-design con i quali vengono definite miscele di conglomerato bituminoso aventi le desiderate caratteristiche volumetriche. Nella presente memoria vengono illustrati i più recenti risultati ottenuti nello sviluppo del Metodo dei Vuoti facendo riferimento alle sperimentazioni compiute nel corso degli ultimi cinque anni nel Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino.

In primo luogo viene proposto, grazie all'analisi dei risultati ottenuti su miscele derivanti dalla sistematica combinazione di aggregati e leganti di diverse origini, un aggiornamento della formula di progetto di origine sperimentale inclusa nel modello. Tale formula viene inoltre presentata in una duplice versione per potere distinguere il caso dell'impiego della tradizionale tecnica di costipamento Marshall da quello relativo all'uso della pressa a taglio giratorio. Con riferimento ai campioni di prova preparati con quest'ultima metodologia vengono inoltre correlate le caratteristiche di lavorabilità con i dati di ingresso del modello.

ABSTRACT

The Voids Method is an analytical-volumetric mix design method which is used to proportion bituminous mixtures with desired volumetric properties. In this paper the most recent results obtained in the development of the Voids Method are presented. They stem from the investigations carried out in the Road Materials Laboratory of the Politecnico di Torino in the last five years.

In first place, as a result of investigations performed on mixtures deriving from the systematic combination of aggregates and binders of different origin, an update of the experimentally derived formula included in the design model is presented. Moreover, the additional formula is given in a double version in order to separate the case of Marshall-compacted and gyratory-compacted specimens. By referring to the specimens of the latter type the workability properties of the mixtures are also correlated to the input data of the mix design model.

1. INTRODUZIONE

Una delle fasi fondamentali che precedono la costruzione di una pavimentazione stradale è costituita dal proporzionamento delle miscele di conglomerato bituminoso in essa impiegate, il cosiddetto *mix design*. A tale scopo possono essere utilizzate numerose metodologie che si differenziano tra loro in base sia alle procedure ed ai criteri di formulazione delle miscele, sia alle tecniche sperimentali impiegate per la verifica delle loro prestazioni attese.

L'approccio seguito in questo settore dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino ha portato negli ultimi anni alla formulazione di diverse proposte metodologiche caratterizzate da elementi innovativi [Celauro e Santagata, 1998]. Esse vanno dal cosiddetto *mix design* strutturale [Santagata, 1996], nel quale si è proposto di affiancare misure di modulo elastico alle tradizionali verifiche di composizione (fusi granulometrici e intervalli di percentuale di bitume) e di volumetria, al Metodo dei Vuoti, basato sulla modellazione analitica della composizione volumetrica ottimale di miscele caratterizzate da un livello di addensamento controllato.

Il Metodo dei Vuoti ha subito nel corso degli anni, a partire dalla sua iniziale formulazione, alcune importanti trasformazioni. Originariamente derivato [De Palma, 1992] dalla modellazione di miscele ideali totalmente chiuse proposta da Vestraeten [1978], il metodo è stato dapprima validato sperimentalmente [Santagata et al., 1996] con aggregati e legante di un'unica origine prendendo in considerazione anche gli effetti della variazione dell'energia di costipamento. Successivamente, applicato su una più vasta gamma di materiali componenti, esso è stato arricchito di alcune varianti derivanti dal diverso trattamento, all'interno dei modelli analitici, del mastice bitume-filler [Bassani et al., 1996] e dalla misura delle proprietà meccaniche delle miscele. Infine, più di recente, a seguito di ulteriori indagini sperimentali il metodo è stato modificato in maniera sostanziale con l'introduzione di una nuova formula analitica che consente di legare il sistema di equazioni teoriche che definiscono la ricetta di impasto alla banca dati dei risultati sperimentali ottenuti con l'applicazione del metodo [De Palma et al., 2000].

Nella presente memoria vengono illustrati i più recenti risultati ottenuti nello sviluppo del Metodo dei Vuoti. In primo luogo viene proposto, grazie all'analisi dei risultati ottenuti su miscele derivanti dalla sistematica combinazione di aggregati e leganti di diverse origini, un aggiornamento della formula di progetto di origine sperimentale inclusa nel modello. Tale formula viene inoltre presentata in una duplice versione per potere distinguere il caso dell'impiego della tradizionale tecnica di costipamento Marshall da quello relativo all'uso della pressa a taglio giratorio. Con riferimento ai campioni di prova preparati con quest'ultima metodologia vengono inoltre correlate le caratteristiche di lavorabilità con i dati di ingresso del modello.

2. EQUAZIONI DI PROGETTO E MODELLI MATEMATICI

Nella loro più recente versione le equazioni di progetto delle miscele bituminose proporzionate con il Metodo dei Vuoti definiscono le percentuali in massa di aggregato grosso (m_p), sabbia (m_s), filler (m_f) e bitume (m_b) necessari per ottenere miscele caratterizzate, nello stato addensato ottenuto in laboratorio con una data metodologia di

costipamento, da un certo valore del parametro di addensamento ω che è funzione della percentuale dei vuoti desiderata ($\%v$). Nelle equazioni di progetto e nel modello matematico di origine sperimentale che mette in relazione tra loro ω e $\%v$ compaiono grandezze che descrivono compiutamente da un punto di vista volumetrico i materiali componenti. Esse sono le masse volumiche apparenti ($\gamma_p, \gamma_s, \gamma_f$) e gli indici dei vuoti (e_p, e_s, e_f) degli aggregati, la massa volumica reale del bitume (γ_b) ed i fattori di ricoprimento degli aggregati μ e ρ . Questi ultimi indicano i rapporti tra il volume delle pellicole di bitume di ricoprimento ed il volume degli aggregati rivestiti, rispettivamente nel caso dell'aggregato grosso e della sabbia. Le sei costanti a, b, c, d, e, f e g che compaiono nel modello matematico sono di origine sperimentale e dipendono essenzialmente dalla ampiezza e generalità della banca dati presa in esame oltre che dalla metodologia di costipamento utilizzata.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_p = \frac{100}{1 + \frac{\gamma_s}{\gamma_p} \frac{e_c}{1+e_s} \frac{\mu}{\gamma_c} + \frac{\gamma_f}{\gamma_c} \frac{(e_s \rho)}{(1+e_s)} \frac{(e_p \mu)}{(1+e_f)} - \omega \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \frac{1+e_p}{1+e_f}} \\ m_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_f} \frac{e_p \mu}{1+e_s} m_p \\ m_f = \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \frac{e_s \rho}{1+e_f} m_s - \omega \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \frac{1+e_p}{1+e_f} m_p \end{array} \right. \quad (\text{eq.1, 2 e 3})$$

$$m_b = \gamma_b \cdot \left[\mu \cdot \frac{m_p}{\gamma_p} + \rho \cdot \frac{m_s}{\gamma_s} + e_f \cdot \frac{m_f}{\gamma_f} \right] \quad (\text{eq.4})$$

$$\%v = a + b e_p + c e_s + d e_f + e \mu + f \rho + g \omega \quad (\text{eq.5})$$

Occorre inoltre precisare che le prime tre equazioni dell'impianto analitico che definisce il Metodo dei Vuoti risultano valide solo nel caso di miscele chiuse. Nel caso di miscele aperte, caratterizzate da una percentuale dei vuoti superiore al 15%, esse vengono infatti sostituite da quelle di seguito indicate.

$$\begin{aligned} m_p &= \frac{100}{1 + \frac{\gamma_s}{\gamma_p} \frac{(e_p \mu) \omega (1+e_p)}{(1+e_s)} + \frac{\gamma_f}{\gamma_p} \frac{(e_s \rho) [(e_p \mu) \omega (1+e_p)]}{(1+e_f) (1+e_s)}} \\ m_s &= \frac{\gamma_s}{\gamma_p} \frac{(e_p \mu) \omega (1+e_p)}{(1+e_s)} m_p \\ m_f &= \frac{\gamma_f (e_s \rho)}{\gamma_s (1+e_f)} m_s \end{aligned} \quad (\text{eq.6, 7 e 8})$$

3. SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione effettuata nel Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino per lo sviluppo e l'aggiornamento progressivo del Metodo dei Vuoti ha visto fino ad oggi l'utilizzazione di materiali componenti (aggregati e leganti) estremamente diversificati. Essi sono stati combinati in modo da realizzare miscele per strati di usura, collegamento e base di tipo tradizionale a masse chiuse e/o semichiose; inoltre sono state realizzate anche miscele per strati di usura speciali del tipo drenante e fonoassorbente, caratterizzate da percentuali dei vuoti comprese tra il 20 ed il 30%.

Le caratteristiche dei bitumi e degli aggregati lapidei considerati nella sperimentazione sono illustrate nel paragrafo 3.1, nel quale sono messe in evidenza le proprietà di questi materiali che intervengono in maniera diretta nell'applicazione del metodo. Nel successivo paragrafo 3.2 viene inoltre presentato il quadro complessivo delle miscele di conglomerato bituminoso proporzionate secondo il Metodo dei Vuoti, con l'elencazione dei valori dei parametri di input utilizzati per la loro formulazione e l'illustrazione delle curve granulometriche sia delle classi di origine sia delle miscele finali. Rispetto alle memorie precedentemente pubblicate dagli Autori su questo argomento [Santagata et al., 1996, Bassani et al., 1996, De Palma et al., 2000], la banca dati utilizzata per l'analisi critica e lo sviluppo del Metodo si è arricchita di 43 nuove miscele (sulle 74 totali).

3.1 Bitumi ed aggregati

I bitumi utilizzati nel corso della sperimentazione sono rappresentativi di quelli normalmente impiegati in Italia. Oltre ai due bitumi già considerati in precedenti lavori sperimentali [De Palma et al., 2000], indicati nella Tabella 1 con i codici A e B, sono stati infatti presi in esame altri quattro bitumi, due dei quali modificati con polimeri elastomerici. Quelli individuati dai codici C, D ed E sono stati utilizzati per il confezionamento di miscele chiuse e semichiose per strati di usura e di collegamento, mentre il bitume modificato individuato con il codice F è stato impiegato per la costituzione di miscele drenanti.

Sono stati complessivamente utilizzati otto diversi gruppi di aggregati lapidei provenienti da impianti e cave di prestito situati in Piemonte, con la sola eccezione del basalto utilizzato nella serie DRE, proveniente da una cava situata nei pressi di La Spezia. Le caratteristiche fisiche e volumetriche delle varie classi di aggregati sono indicate nella Tabella 2. Per la determinazione della loro massa volumica apparente (γ), della massa volumica in mucchio e dell'indice dei vuoti (e) si è fatto ricorso alle attrezzature e procedure indicate nelle norme CNR. Nel caso dell'indice di forma (I_F) e del coefficiente di appiattimento (C_A) si è invece fatto riferimento alla norma UNI-8520.

Le curve granulometriche delle varie classi di aggregato considerate nella sperimentazione sono riportate nella Figura 1, ove sono raggruppate nei vari grafici a seconda del loro impiego nelle differenti miscele bituminose come aggregato grosso (p), sabbia (s) o filler (f). A tale proposito si segnala che con gli aggregati individuati dalle sigle CHT, CGFB, RSC ed IMP sono state confezionate miscele per strati di collegamento e/o di base mediante l'impiego delle classi 15-30 (pietrisco), 5-15 (pietrischetto), 0-5 (sabbione) e filler, e miscele per strati di usura mediante l'utilizzo delle classi 3-8 (graniglia), 0-2 (sabbia) e filler.

Codice	A	B	C	D	E	F
Tipo di bitume	80/100	70/100	60/70	70/100	Modificato	Modificato
Penetrazione, P [dmm]	96	72	66	71	60	40-66
Punto di rammollimento, T _{R&B} [°C]	45	47	48	45	57	56-63
Densità at 25°C [g/cm ³]	1,022	1,024	1,021	1,020	1,025	1,020

Tabella 1. Caratteristiche dei bitumi utilizzati

Codice aggregati	Classe	Origine litica	Massa volumica apparente [g/cm ³]	Massa volumica in mucchio [g/cm ³]	Indice dei vuoti e		Indice di forma I _F	Coefficiente Di appiattimento C _A (%)	
SP	5-15	Roccia calcarea	2,86	1,63	0,75	0,66	0,21	11	
	3-8		2,86	1,67	0,71		-	-	
	0-3	Calcarea	2,70	1,68	0,61		-	-	
	filler	Cemento	3,11	1,59	0,97		-	-	
TV	6-12	Ghiaie calcaree	2,85	1,62	0,76	0,15	0,15	38	
	0-6	calcareae	2,84	1,92	0,48		-	-	
	filler	Cemento	3,11	1,59	0,97		-	-	
CGFA	5-15	Ghiaie calcareae	2,85	1,62	0,76	0,75	0,17	-	
	3-8		2,82	1,50	0,88		0,37	52	
	0-5		2,79	1,80	0,55		-	-	
	Filler	Recupero	3,37	2,02	0,67		-	-	
CHT	15-30	Ghiaie Silicee	2,85	1,62	0,75	0,60	0,193	35	
	5-15		2,87	1,66	0,73		0,123	42	
	3-8		2,83	1,65	0,72		-	61	
	0-5		2,86	1,90	0,50		-	-	
	0-2		2,87	1,86	0,54		-	-	
	Filler	2,82	1,61	0,75		-	-		
CGFB	15-30	Ghiaie calcareae	2,83	1,62	0,74	0,71	0,185	30	
	5-15		2,83	1,55	0,83		0,124	32	
	3-8		2,80	1,52	0,84		-	43	
	0-5		2,80	1,83	0,53		-	-	
	0-2		2,75	1,74	0,58		-	-	
	Filler	Cemento	2,97	1,87	0,58		-	-	
RSC	15-30	Ghiaie calcareae	2,67	1,55	0,73	0,61	0,181	32	
	5-15		2,74	1,48	0,82		0,116	25	
	3-8		2,73	1,45	0,76		-	36	
	0-5		2,73	1,71	0,48		-	-	
	0-2		2,72	1,62	0,49		-	-	
	Filler	Cemento	2,97	1,87	0,58		-	-	
IMP	15-30	Ghiaie calcareae	2,72	1,60	0,78	0,73	0,130	43	
	5-15		2,74	1,58	0,82		0,114	46	
	3-8		2,73	1,55	0,76		-	66	
	0-5		2,73	1,72	0,48		-	-	
	0-2		2,72	1,84	0,49		-	-	
	Filler	Cemento	2,97	1,87	0,58		-	-	
DRE	10-20	Basalto	2,91	1,63	0,78		-	-	
	0-5	S. Silicee	2,78	1,82	0,51		-	-	
	Filler	Cemento	2,71	1,75	0,55		-	-	

Tabella 2. Caratteristiche degli aggregati utilizzati

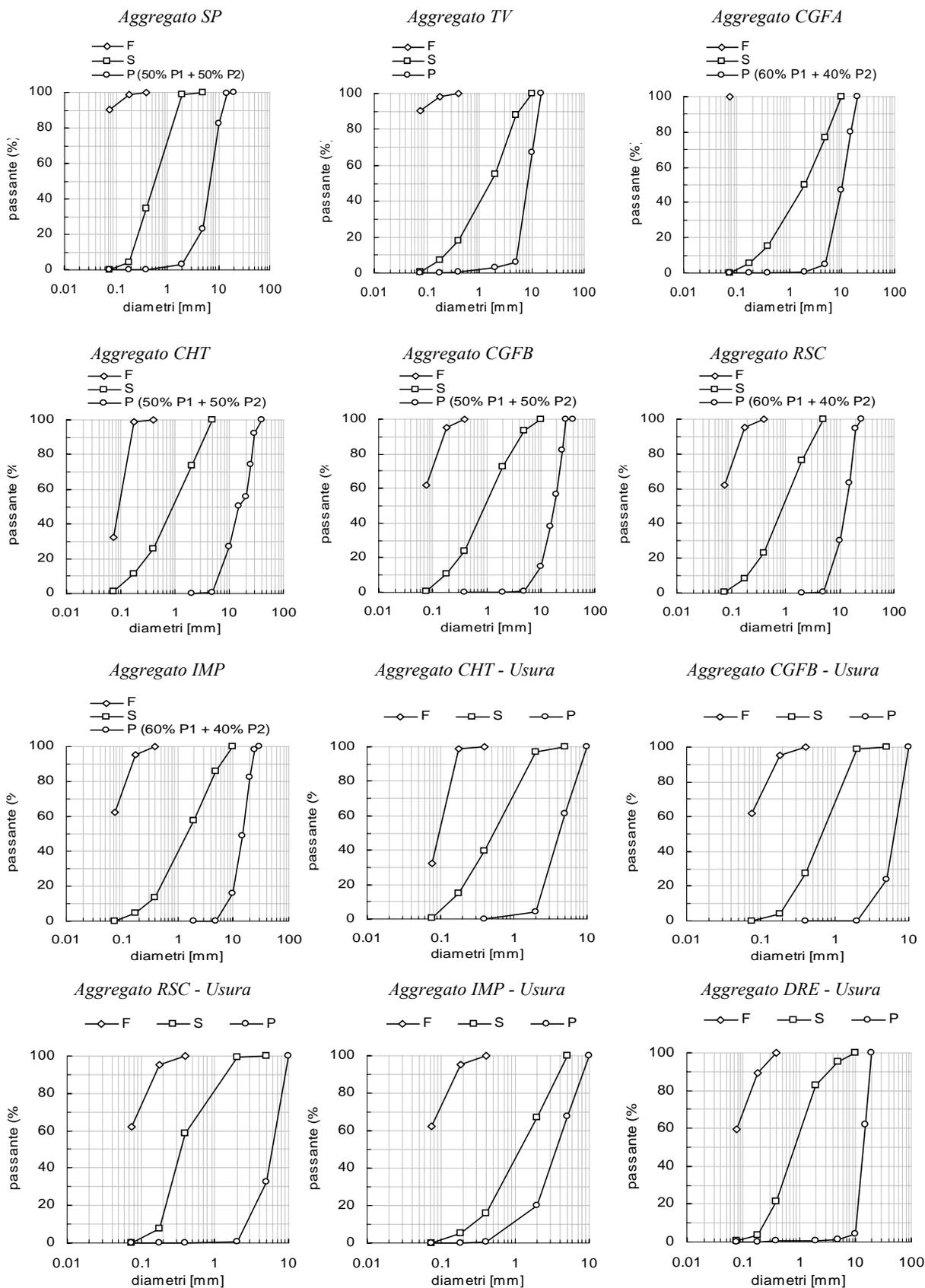


Figura 1. Curve granulometriche degli aggregati componenti le varie miscele bituminose

Si segnala inoltre che nel caso di disponibilità e possibilità di impiego di quattro classi di aggregati per la costituzione di una miscela proporzionata con il Metodo dei Vuoti, queste sono state preventivamente ricondotte al caso di sole tre classi previsto dalle equazioni di progetto. Ciò è stato fatto, come descritto in precedenti memorie [Santagata et al., 1996, Bassani et al., 1996], mediante l'unione delle due frazioni a granulometria più grossa, costituite a seconda dei casi da pietrisco e pietrischetto o da pietrischetto e graniglia, combinate in modo tale da individuare la miscela binaria a minor indice dei vuoti e . Per le miscele considerate in questa sperimentazione tale operazione si è resa necessaria per le tipologie di aggregato SP, CGFA, CHT, CGFB, RSC ed IMP. Come indicato nella Tabella 2, per le miscele costituite dall'unione di classi è riportato il valore dell'indice dei vuoti con cui sono state poi calcolate le ricette delle miscele bituminose.

3.2 Miscele bituminose

L'intero piano sperimentale ha visto la realizzazione di 74 diverse miscele aventi caratteristiche tali da potere essere impiegate, a seconda dei casi, per la costituzione di strati di usura, collegamento e base di sovrastrutture flessibili. Ciò si può evincere anche dai fusi derivanti dalla sovrapposizione delle curve granulometriche complessive degli aggregati in esse impiegati, riportate nei grafici di Figura 2 ove sono state raggruppate a seconda della loro destinazione d'uso. In tali grafici a titolo di confronto vengono inoltre rappresentati anche i fusi granulometrici di accettazione che compaiono nelle Norme Tecniche elaborate per conto del Ministero dei Lavori Pubblici da parte del Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale [CIRS, 2001].

Le caratteristiche salienti delle miscele di conglomerato bituminoso prese in esame sono indicate nella Tabella 3, ove sono state indicate con un codice che deriva da quello di identificazione degli aggregati in esse impiegati. Oltre all'indicazione dei materiali componenti (tipo di aggregati e tipo di bitume) e dei parametri volumetrici considerati per la loro definizione (ω , μ e ρ), nella Tabella 3 sono riportate le quantità percentuali di aggregato grosso (m_p), di sabbia (m_s), di filler (m_f) e di bitume (m_b) con le quali si è proceduto alla preparazione delle miscele.

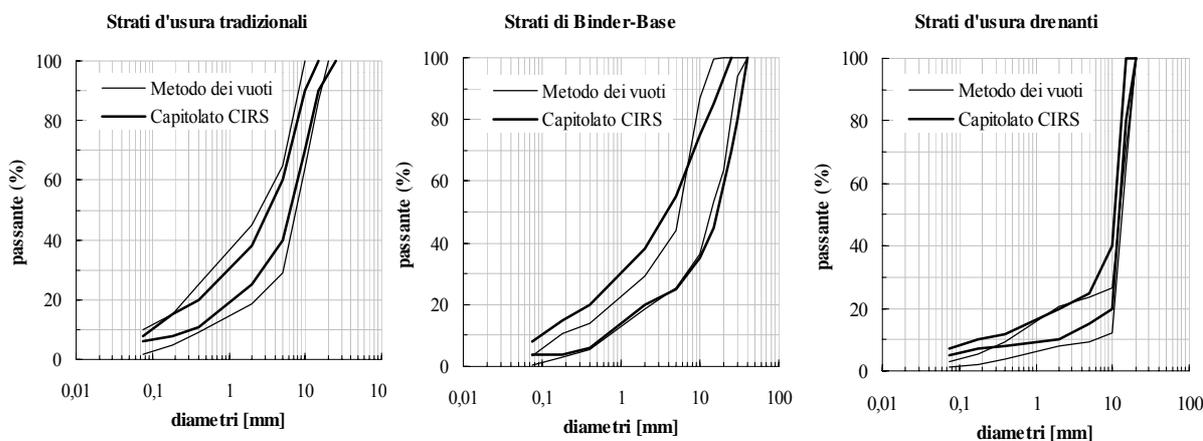


Figura 2. Fusi granulometrici complessivi delle miscele progettate con il Metodo dei Vuoti

Codice miscela	Tipo di aggregato	Tipo di bitume	ω	μ	ρ	m_c (%)	m_s (%)	m_f (%)	m_B (%)	Metodo di compattazione	Campioni per ricetta			
SP 0B	Pietrischi da roccia calcarea + Sabbie naturali	A	0	0,114	0,095	70,4	22,7	6,9	5,9	Marshall (75)	12			
SP 1B			0,01			70,8	22,9	6,3	5,7					
SP 2B			0,02			71,3	23,1	5,6	5,5					
SP 3B			0,03			71,8	23,2	5,0	5,4					
SP 4B			0,04			72,2	23,4	4,4	5,2					
SP 5B			0,05			72,7	23,6	3,7	5,0					
SP 6B			0,06	73,2		23,7	3,1	4,8						
SP 0A			0	69,8		23,2	7,0	5,6						
SP 4A			0,04	71,7		23,8	4,5	4,9						
SP 0C			0	70,9		22,4	6,7	6,2						
SP 4C			0,04	72,8		23,0	4,2	5,5						
TV 0			Ghiaie di fiume calcaree frantumate + Sabbie naturali			0	0,100	0,095	65,0		28,8	6,2	5,3	
TV 1	0,01	65,4			29,0	5,6			5,1					
TV 2	0,02	65,8			29,2	5,0			5,0					
TV 3	0,03	66,3			29,4	4,4			4,8					
TV 4	0,04	66,7			29,6	3,7			4,6					
CGF A-0A	Ghiaie calcaree di deposito frantumate + Sabbie naturali	B	0	0,100	0,125	65,1	26,7	8,2	5,3	Marshall (75) + Giratoria (100)	4 + 4			
CGF A-1A			0,01			65,6	27,0	7,5	5,1					
CGF A-2A			0,02			66,2	27,2	6,7	5,0					
CGF A-3A			0,03			66,7	27,4	5,9	4,9					
CGF A-4A			0,04			67,3	27,6	5,1	4,7					
CGF A-0B			0			65,6	26,4	8,1	5,6					
CGF A-1B			0,01	66,1		26,6	7,3	5,4						
CGF A-2B			0,02	66,7		26,8	6,6	5,3						
CGF A-3B			0,03	67,2		27,0	5,8	5,2						
CGF A-4B			0,04	67,8		27,3	5,0	5,1						
CGF A-0C			0	66,0		26,0	8,0	5,9						
CGF A-1C			0,01	66,6		26,2	7,2	5,7						
CGF A-2C			0,02	67,1		26,4	6,4	5,6						
CGF A-3C			0,03	67,7		26,7	5,6	5,5						
CGF A-4C			0,04	68,3		26,9	4,8	5,4						
CHT-A			Ghiaie silicee di fiume frantumate + Sabbie frantumate	C		0	0,077	0,146	70,7			24,4	4,9	4,5
CHT-B	C	0		0,100	0,095	71,2	23,5	5,4	4,9					
CHT-C	C	0,04		0,100	0,095	73,0	24,1	2,9	4,2					
CHT-D	C	0,08		0,100	0,095	75,0	24,7	0,3	3,6					
CHT-E	D	0		0,100	0,095	71,2	23,5	5,4	4,9					
CHT-F	D	0,08		0,100	0,095	75,0	24,7	0,3	3,6					
CHT-G	E	0		0,100	0,095	71,2	23,5	5,4	4,9					
CHT-H	E	0,08		0,100	0,095	75,0	24,7	0,3	3,6					
CHT-UA	C	0		0,100	0,095	67,6	26,0	6,5	5,1					
CHT-UB	C	0,04		0,100	0,095	69,4	26,7	3,9	3,9					
CGFB-A	Ghiaie calcaree di deposito frantumate + Sabbie naturali	C		0	0,077	0,144	66,2	26,8	7,0	4,6				
CGFB-B		C		0	0,100	0,095	66,4	26,0	7,6	4,8				
CGFB-C		C	0,04	0,100	0,095	68,5	26,7	4,7	4,3					
CGFB-D		C	0,08	0,100	0,095	70,7	27,6	1,7	3,8					
CGFB-E		D	0	0,100	0,095	66,4	26,0	7,6	4,8					
CGFB-F		D	0,08	0,100	0,095	70,7	27,6	1,7	3,8					
CGFB-G		E	0	0,100	0,095	66,4	26,0	7,6	4,8					
CGFB-H		E	0,08	0,100	0,095	70,7	27,6	1,7	3,8					
CGFB-UA		C	0	0,100	0,095	62,1	28,4	9,5	5,2					
CGFB-UB		C	0,04	0,100	0,095	64,0	29,3	6,6	4,7					
RSC-A		Ghiaie calcaree frantumate + Sabbie naturali	C	0	0,073	0,138	69,6	23,6	6,9	4,6				
RSC-B			C	0	0,100	0,095	70,2	22,5	7,3	5,0				
RSC-C	C		0,04	0,100	0,095	72,5	23,3	4,2	4,5					
RSC-D	C		0,08	0,100	0,095	74,9	24,1	1,0	3,9					
RSC-E	D		0	0,100	0,095	70,2	22,5	7,3	5,0					
RSC-F	D		0,08	0,100	0,095	74,9	24,1	1,0	3,9					
RSC-G	E		0	0,100	0,095	70,2	22,5	7,3	5,0					
RSC-H	E		0,08	0,100	0,095	74,9	24,1	1,0	3,9					
RSC-UA	C		0	0,100	0,095	61,7	27,6	0,7	5,5					
RSC-UB	C		0,04	0,100	0,095	63,7	28,6	7,7	5,0					
IMP-A	Ghiaie silicee di fiume frantumate + Sabbie frantumate		C	0	0,075	0,132	64,4	28,7	6,9	4,6				
IMP-B			C	0	0,100	0,095	64,9	27,7	7,4	4,9				
IMP-C		C	0,04	0,100	0,095	66,9	28,6	4,4	4,4					
IMP-D		C	0,08	0,100	0,095	69,1	29,6	1,3	3,9					
IMP-E		D	0	0,100	0,095	64,9	27,7	7,4	4,9					
IMP-F		D	0,08	0,100	0,095	69,1	29,6	1,3	3,9					
IMP-G		E	0	0,100	0,095	64,9	27,7	7,4	4,9					
IMP-H		E	0,08	0,100	0,095	69,1	29,6	1,3	3,9					
IMP-UA		C	0	0,100	0,095	64,0	28,5	7,5	5,0					
IMP-UB		C	0,04	0,100	0,095	66,0	29,4	4,6	4,5					
DRE-A		Basalto + Sabbie frantumate	F	0,15	0,127	0,095	76,4	18,7	4,9	5,1			Marshall (75) + Giratoria (100)	4 + 4
DRE-B			F	0,25	0,127	0,095	85,7	11,4	3,0	4,8				
DRE-C	F		0,30	0,127	0,095	91,2	6,9	1,8	4,7					

Tabella 3. Composizione delle miscele progettate con il Metodo dei Vuoti

Nel complesso sono stati confezionati 458 campioni impiegando sia la tradizionale metodologia di costipamento Marshall, sia quella derivante dall'uso della pressa giratoria. In entrambi i casi il costipamento è stato effettuato in corrispondenza delle temperature di equiviscosità così come definite dalle norme CNR.

4. ANALISI DATI

4.1 Caratteristiche volumetriche – Versione originaria del modello

A partire dalle prime sperimentazioni effettuate per valutare l'applicabilità del Metodo dei Vuoti [Santagata et al., 1996] si è individuata l'esistenza di un legame di tipo lineare tra la percentuale dei vuoti misurata nei campioni addensati ($\%v_{misurata}$) ed il valore assunto dal parametro ω , che nelle prime versioni del modello indicava proprio la percentuale dei vuoti desiderata. L'insieme dei dati sperimentali raccolti nel Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino non fanno che confermare tutto ciò, sia nel caso delle miscele addensate mediante il costipatore Marshall (Figura 3), sia per quelle addensate con la pressa giratoria (Figura 4). In entrambi i casi si deve però osservare che l'applicazione del sistema di equazioni 1, 2 e 3 conduce a miscele nelle quali si ha un contenuto di vuoti residui superiore a quello desiderato, mentre con il sistema di equazioni 6, 7 ed 8, valido per miscele drenanti, i campioni addensati in laboratorio assumono un contenuto di vuoti inferiore a quello atteso.

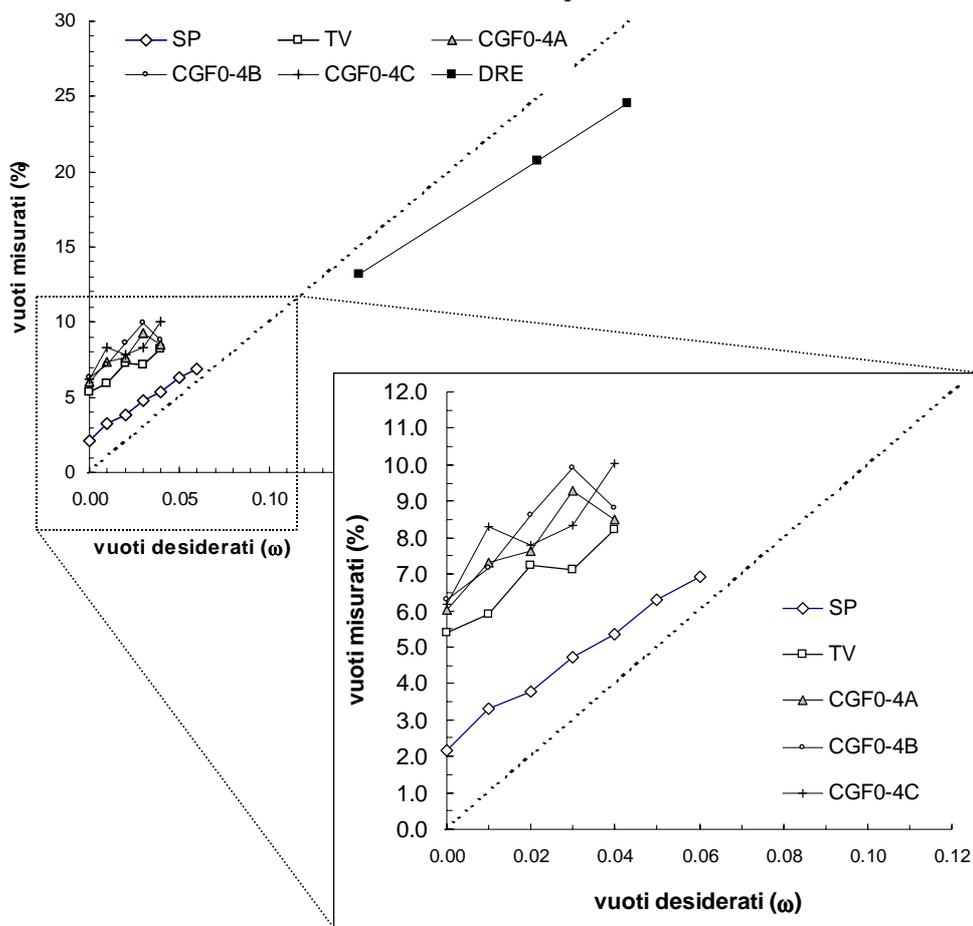


Figura 3. Relazioni tra vuoti desiderati (ω) e vuoti misurati per le miscele addensate mediante il costipatore Marshall (versione originaria delle equazioni di progetto)

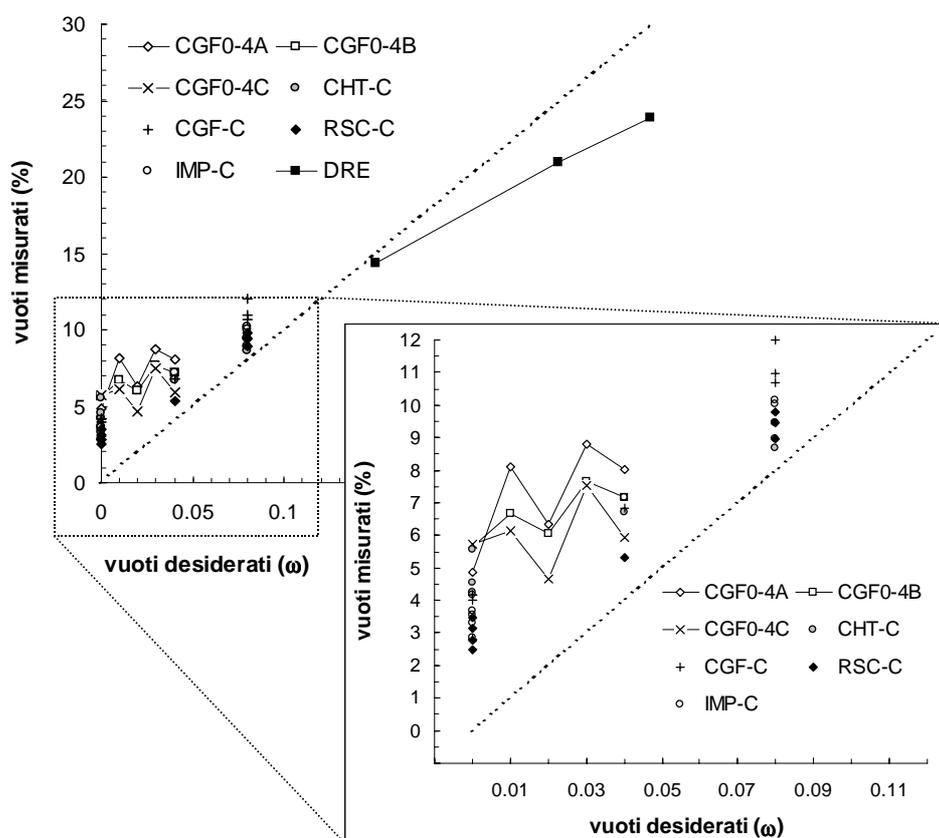


Figura 4. Relazioni tra vuoti desiderati (ω) e vuoti misurati per le miscele addensate mediante la Pressa Giratoria (versione originaria delle equazioni di progetto)

Come emerge dall'analisi del piano sperimentale riportato in Tabella 3, solo 18 delle 74 miscele sono state addensate con entrambi i sistemi di costipamento. Tuttavia, analizzando i risultati ottenuti nella caratterizzazione volumetrica di queste 18 miscele, derivanti dall'impiego di quattro diversi gruppi di aggregati, si osserva che il livello di addensamento raggiunto con 100 giri della pressa giratoria supera quello ottenuto con gli usuali 75+75 colpi per faccia inferti con il pestello Marshall. Ciò viene sintetizzato nella Tabella 4 nella quale, per le quattro famiglie di miscele prese in esame, sono indicati anche i valori medi degli scarti Δv riscontrati tra i vuoti attesi, espressi come previsto dalla versione originaria del modello (parametro ω), ed i vuoti misurati.

Miscela		CGF(0-4)A	CGF(0-4)B	CGF(0-4)C	DRE
Fattore di ricoprimento μ		0,100	0,114	0,127	0,127
Δv (%)	Marshall (75+75 colpi)	5,76	6,12	6,16	-3,83
	Pressa Giratoria (100 giri)	5,22	4,00	4,63	-3,57
Differenza $\%v_{\text{Marshall}} - \%v_{\text{Giratoria}}$		0,54	1,53	2,12	-0,26

Tabella 4. Valore medio dello scarto tra vuoti reali e vuoti attesi (versione originaria delle equazioni di progetto)

Per qualunque metodologia di costipamento impiegata e per qualunque miscela bituminosa presa in esame è lecito attendersi una differenza tra gli stati di addensamento che è effettivamente possibile ottenere in laboratorio ed i massimi stati di addensamento

della matrice lapidea che vengono invece ipotizzati nella formulazione del modello matematico alla base del Metodo dei Vuoti. Tale differenza è legata ad una serie di fattori tra i quali si citano, oltre che l'energia di costipamento impiegata e le modalità del suo trasferimento al materiale in esame (tipo di compattazione), anche quelli legati alla costituzione della miscela, quali la granulometria, la forma e la tessitura degli aggregati, la viscosità del legante alla temperatura di costipamento e l'assorbimento di bitume da parte della superficie dell'aggregato.

Per quel che riguarda la forma dei granuli di aggregato, essa risulta determinante nel processo di addensamento in quanto influisce direttamente sulla resistenza al taglio della miscela di conglomerato bituminoso allo stato sciolto e regola inoltre la forma dei vuoti intergranulari nei quali i grani di minori dimensioni possono trovare collocazione. Tra gli indicatori di forma che usualmente vengono presi in considerazione vi sono l'indice di forma (I_F), che esprime il rapporto tra il volume del granulo ed il volume della più piccola sfera che lo contiene e dà pertanto un'indicazione sul grado di sfericità, ed il coefficiente di appiattimento (C_A), che esprime la percentuale di elementi appiattiti rispetto alla massa totale degli aggregati considerati.

Dall'analisi dei risultati riportati nella Figura 5 emerge che è proprio il valore assunto da quest'ultimo parametro (C_A) a poter essere messo in relazione con lo scarto rilevato tra il parametro ω (contenuto dei vuoti desiderato secondo la versione originaria del modello) ed il contenuto di vuoti misurato sui campioni addensati: quanto più gli aggregati sono appiattiti (C_A crescente), tanto più risulta rilevante lo scarto tra le previsioni del modello e l'effettivo grado di addensamento. Inoltre, sebbene sia noto che con il costipatore Marshall e con la pressa giratoria si ottengano non solo differenti livelli di addensamento ma anche diverse strutture interne [Cominsky et al., 1994], nella relazione evidenziata in Figura 5 non vengono distinti tra loro i dati derivanti dall'una o dall'altra metodologia di costipamento. I dati di Figura 5 indicano inoltre che non risulta del tutto chiaro il tipo di legame esistente tra l'indice di forma I_F e lo scarto Δv .

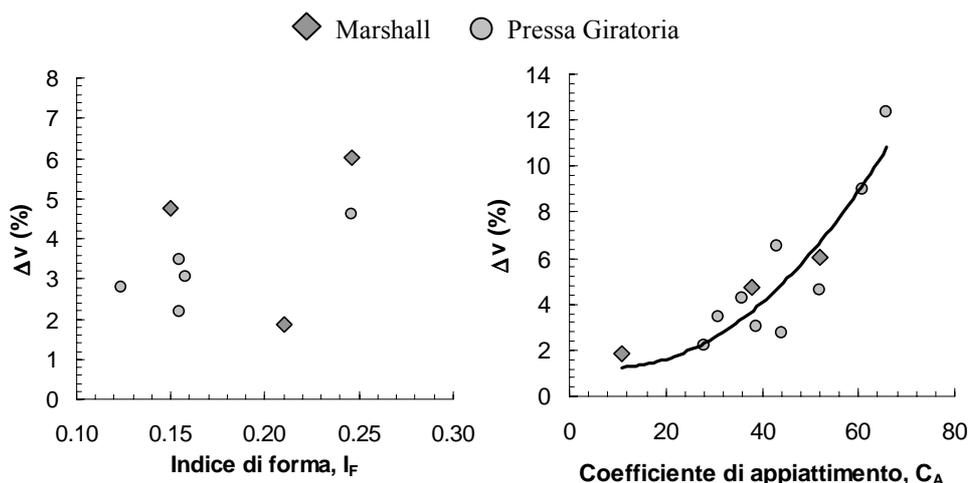


Figura 5. Relazione tra scarto medio della percentuale dei vuoti Δv , indice di forma I_F e coefficiente di appiattimento C_A degli aggregati

Un secondo aspetto legato alla forma degli aggregato, che contribuisce ad allontanare la configurazione volumetrica realmente osservata da quella ideale considerata dalle equazioni di modello, è costituito dalle interazioni che sul piano squisitamente volumetrico si instaurano tra le tre classi di aggregato considerate e distinte dai pedici p , s ed f . Le tre classi, infatti, sono caratterizzate da distribuzioni granulometriche più o meno ampie (Figura 1) all'interno delle quali alcuni diametri possono essere contemporaneamente presenti in due delle tre classi. Ciò può determinare una parziale dislocazione della struttura granulare ed un maggior indice dei vuoti (e) della classe rispetto a quello misurato nelle condizioni di mucchio assestato determinato mediante la tavola a scosse. La probabilità che ciò accada è tuttavia molto piccola in quanto dipende dalla consistenza delle frazioni potenzialmente interferenti, generalmente piuttosto modeste, e dalla probabilità che, nel corso del costipamento, gli elementi interferenti vadano ad interagire proprio con i granuli nei cui spazi intergranulari vi siano volumi disponibili più piccoli di quelli da essi occupati (Figura 6).

Infine, l'ultimo elemento che contribuisce a creare uno scarto tra il contenuto di vuoti attesi e quelli realmente misurati nei campioni, è costituito dall'assorbimento di bitume che si verifica alla superficie dell'aggregato nella fasi di confezionamento e di posa in opera. Questo fenomeno, specie se di tipo selettivo, può modificare le proprietà fisiche, reologiche e chimiche del legante. Dal punto di vista meramente volumetrico può determinare inoltre una parziale sottrazione di uno dei componenti della miscela che si riflette nella creazione di una percentuale dei vuoti maggiore rispetto a quella attesa.

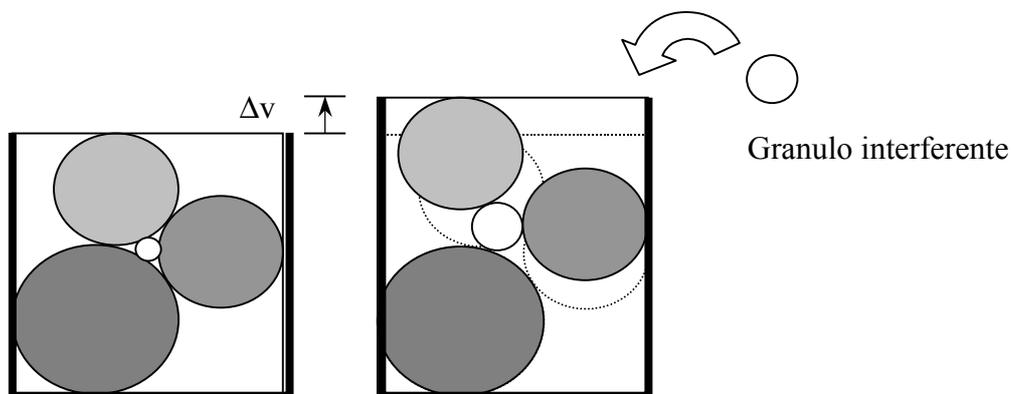


Figura 6. Effetto di dislocazione interna alla miscela causato da un granulo interferente

4.2 Caratteristiche volumetriche – Versione aggiornata del modello

A seguito di precedenti sperimentazioni [De Palma et al., 2000], è stata dimostrata l'esistenza di una relazione funzionale di tipo lineare tra le caratteristiche volumetriche delle miscele (percentuale dei vuoti, $\%v$, e vuoti nella miscela degli aggregati, VMA), ed i parametri di input fondamentali del modello: quelli che controllano le caratteristiche volumetriche di addensamento delle tre classi lapidee (indici dei vuoti e_p , e_s , e_f), quelli che definiscono i rapporti volumetrici di ricoprimento degli aggregati (μ e ρ), e quello che esprime, nella versione originaria del modello, il contenuto di vuoti atteso (ω).

Ciò è stato confermato prendendo in esame l'intera banca dati dei risultati sperimentali derivanti dall'analisi delle miscele riportate in Tabella 3. Mediante analisi di regressione si sono quindi determinate, mantenendo distinti i dati relativi alle miscele

addensate con il costipatore Marshall da quelli delle miscele costipate con la pressa giratoria, le costanti che compaiono nei modelli lineari di seguito indicati:

$$VMA = a_{VMA} + b_{VMA} \cdot e_p + c_{VMA} \cdot e_s + d_{VMA} \cdot e_f + e_{VMA} \cdot \mu + f_{VMA} \cdot \rho + g_{VMA} \cdot \omega \quad (\text{eq.9})$$

$$\%v = a_{\%v} + b_{\%v} \cdot e_p + c_{\%v} \cdot e_s + d_{\%v} \cdot e_f + e_{\%v} \cdot \mu + f_{\%v} \cdot \rho + g_{\%v} \cdot \omega \quad (\text{eq.10})$$

L'applicazione diretta di tale elaborazione dei dati sperimentali è illustrata in Figura 7, ove i valori dei parametri volumetrici VMA e $\%v$ calcolati con le equazioni 6 e 7 sono rappresentati in funzione dei corrispondenti parametri misurati sperimentalmente. Nella stessa figura sono inoltre indicati i valori dei coefficienti di regressione delle due famiglie di dati relativi a campioni addensati con le due metodologie prese in esame (Marshall e Giratoria).

È possibile rilevare che il valore del coefficiente di regressione relativo ai risultati ottenuti con campioni confezionati con la pressa giratoria, pari a 0,93, è sensibilmente più basso di quello dei campioni confezionati con il metodo Marshall (R^2 pari a 0,99). Ciò è verosimilmente imputabile alla maggior sensibilità che la metodologia di costipamento giratoria presenta nei riguardi delle caratteristiche di forma dei singoli aggregati che, come precedentemente sottolineato, influiscono sulla lavorabilità della miscela e quindi sul suo livello di addensamento finale.

Nelle miscele confezionate mediante l'uso del costipatore Marshall tale fenomeno non viene invece evidenziato poiché le uniche fasi in cui la miscela viene sottoposta a forte sollecitazioni tangenziali sono quelle che precedono il costipamento vero e proprio e nelle quali l'operatore, inserito il materiale sciolto nella fustella, esegue un primo addensamento manuale con una spatola metallica. Nel successivo costipamento inferto dal martello, i singoli granuli abbandonano la loro posizione originale per muoversi quasi esclusivamente nella direzione verticale avvicinandosi a quelli adiacenti: in questa fase, pertanto, non avviene alcuna riorganizzazione che possa fare entrare in gioco in maniera determinante l'effetto della forma dei singoli granuli.

Si deve infine sottolineare che, come evidenziato graficamente in Figura 7, i punti sperimentali che si presentano più lontani dalle rette di eguaglianza tracciate sui due grafici sono quelle relativi alla miscela IMP-U, caratterizzata dalla presenza al suo interno di una graniglia avente un contenuto di elementi appiattiti pari al 66%, che risulta il massimo tra quello degli aggregati grossi utilizzati (vedi Tabella 3). Solo nel caso di impiego di aggregati di questo tipo si può considerare che il modello previsionale rappresentato nella Figura 7 cada in difetto.

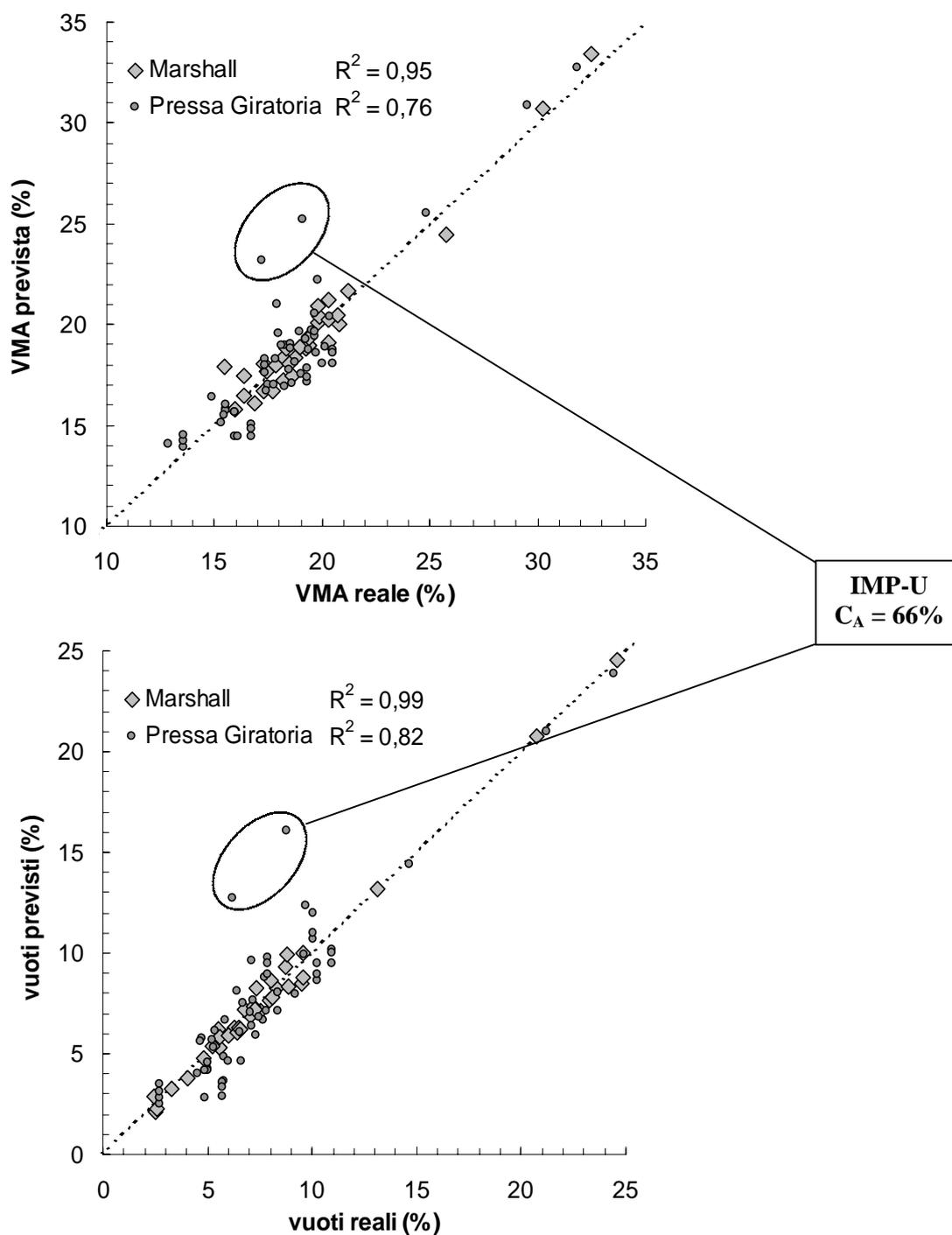


Figura 7. Risultati dell'analisi di regressione eseguita per VMA e %v in funzione dei sei parametri volumetrici (e_p , e_s , e_f , μ , ρ , ω)

L'eccellente rappresentatività delle regressioni costruite sulla base delle equazioni 9 e 10 suggerisce di utilizzare quella relativa alla percentuale dei vuoti, opportunamente invertita per ricavare il valore del parametro ω in funzione delle altre grandezze, come equazione di origine statistica e sperimentale complementare a quelle teoriche del

modello originale. Tale equazione, nella quale il simbolo %v assume a questo punto il significato di percentuale dei vuoti desiderata, è dunque la seguente:

$$\omega = \frac{\%v - a - b \cdot e_p - c \cdot e_s - d \cdot e_f - e \cdot \mu - f \cdot \rho}{g} \quad (\text{eq.11})$$

nella quale il parametro ω , come chiarito nel paragrafo 2, non assume più il significato di percentuale dei vuoti ma viene ad essere un parametro di addensamento caratteristico della miscela. Quando inserito nelle equazioni di progetto tale parametro rende minima la differenza tra la percentuale dei vuoti desiderata %v e quella effettivamente misurata.

	a	b	c	d	e	f	g	R ²
M	-36,49	24,34	-2,82	9,71	4,80	154,74	76,09	0,99
PG	-14,87	13,75	10,12	15,01	-39,05	-11,33	71,40	0,93

Tabella 5. Costanti di regressione indicate nell'eq.11

4.3 Lavorabilità

La lavorabilità di una miscela bituminosa, di fondamentale importanza nelle operazioni di posa in opera, risulta un elemento da tenere in considerazione all'interno di un sistema di mix-design, soprattutto se di tipo volumetrico come quello derivante dall'impiego del Metodo dei Vuoti. Ciò può essere fatto facendo riferimento alle curve di compattazione derivate dall'impiego della pressa giratoria, nelle quali si riconoscono i due parametri che esprimono in maniera quantitativa la lavorabilità: la pendenza (K) della curva di compattazione, detta lavorabilità, e la sua ordinata all'origine (C_1), definita come autoaddensamento [De Palma et al., 1998].

Dalle osservazioni sperimentali emerge che la lavorabilità (K) e l'autoaddensamento (C_1) dipendono, oltre che dai parametri di progetto delle miscele, ossia dagli indici dei vuoti degli aggregati (e), dai parametri di ricoprimento μ e ρ e dal parametro di addensamento ω , anche dalle caratteristiche di forma degli aggregati (I_F e C_A). Ciò è stato confermato dall'analisi di regressione lineare multipla eseguita su tali grandezze relative all'insieme delle miscele riportate in Tabella 3, che ha portato alla valutazione delle costanti che compaiono nei modelli di seguito indicati e che sono riportate, insieme con i valori dei coefficienti di correlazione R^2 , nella Tabella 6:

$$k = a' + b' \cdot e_p + c' \cdot e_s + d' \cdot e_f + e' \cdot \omega + f' \cdot \mu + g' \cdot \rho + h' \cdot I_F + i' \cdot C_A$$

$$C_1 = a'' + b'' \cdot e_p + c'' \cdot e_s + d'' \cdot e_f + e'' \cdot \omega + f'' \cdot \mu + g'' \cdot \rho + h'' \cdot I_F + i'' \cdot C_A \quad (\text{eq.12 e 13})$$

	-	e _p	e _s	e _f	ω	μ	ρ	I _F	C _A	R ²
Autoaddensamento	59,89	11,13	15,25	30,20	-52,13	-14,46	-6,97	-0,28	-24,88	0,89
Lavorabilità	25,55	2,58	-26,18	-10,84	-14,76	7,21	-4,54	22,76	-0,025	0,86

Tabella 6. Risultati della regressione lineare multipla

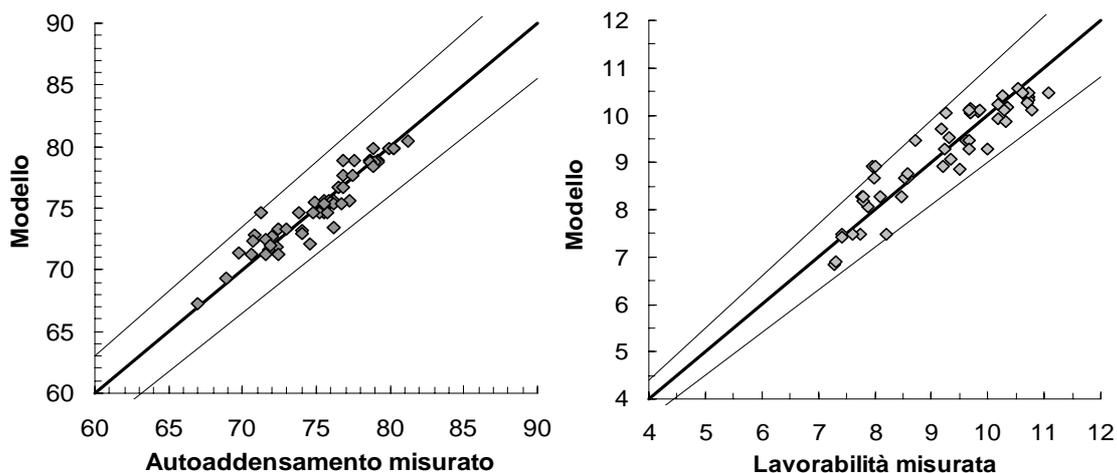


Figura 8. Analisi di modello sui dati di autoaddensamento e lavorabilità delle miscele

I risultati ottenuti sono del tutto soddisfacenti e consentono di avere a disposizione ulteriori equazioni da potere utilizzare in fase progettuale per una valutazione delle caratteristiche attese delle miscele in progetto.

4.3 Caratteristiche meccaniche

Le prime miscele proporzionate con il Metodo dei Vuoti sono state sottoposte a prove meccaniche per la valutazione del modulo di rigidità, della resistenza a fatica e della resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti [Bassani et al., 1996]. Tuttavia, a seguito dell'ampliamento della sperimentazione ad un gran numero di miscele si sono limitate le indagini meccaniche alla sola valutazione del modulo di rigidità mediante l'esecuzione di prove di trazione indiretta ripetuta a carico impulsivo [Santagata e Bassani, 1999].

Tali prove hanno fornito risultati che non è stato possibile mettere in diretta relazione con i parametri di input del modello analitico alla base del Metodo dei Vuoti. Resta però valido, anche per le miscele proporzionate con questo metodo, l'uso del modello previsionale del modulo elastico che è stato recentemente proposto dagli Autori in altra sede [Santagata e Bassani, 2001]. In funzione della temperatura di prova T , del tempo di picco degli impulsi di carico r_t , del diametro massimo degli aggregati (D_{max}), dell'indice di penetrazione del bitume (IP), del rapporto volumetrico tra aggregati e bitume (V_A/V_L) e del rapporto tra la massa di filler e quella di bitume (m_F/m_B), il modulo elastico E del conglomerato bituminoso può essere pertanto espresso dalla relazione seguente:

$$\log_{10} E = a + b \cdot r_t + c \cdot T^2 + d \cdot T + e \cdot D_{max} + f \cdot PI + g \cdot \%v^{s'} + h \cdot \left(\frac{V_A}{V_B} \right)^{h'} + k \cdot \left(\frac{m_F}{m_B} \right)^{k'} \quad (\text{eq.14})$$

che è scaturita dall'analisi statistica effettuata su dati sperimentali derivanti da prove effettuate su 146 miscele aventi diversa composizione.

5. CONCLUSIONI

Secondo quanto rilevato dall'analisi dei dati sperimentali accumulati nel corso degli anni presso il Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino operando su miscele proporzionate con il Metodo dei Vuoti è possibile allo stato attuale considerare il metodo come caratterizzato da una elevatissima affidabilità. Ciò risulta particolarmente rilevante in quanto il mix-design volumetrico si è di recente affermato come propedeutico ed in alcuni casi sostitutivo di quelli prestazionali previsti per applicazioni di particolare importanza.

È comunque auspicabile che miscele proporzionate con tale metodo vengano nel prossimo futuro messe in opera per una valutazione diretta sul campo delle loro caratteristiche funzionali e di durabilità. Al tempo stesso sono previsti ulteriori sviluppi del Metodo, finalizzati ad un maggior controllo dei fenomeni di interferenza tra grani di aggregati che sono stati brevemente descritti in questa memoria.

6. BIBLIOGRAFIA

American Society for Testing and Materials, *1989 Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, USA, nn. D 2041-78, D 2726-88, D4123-82.

Azienda Nazionale Autonoma delle Strade, *Capitolato Speciale di Appalto, Parte Seconda, Norme Tecniche*, ANAS, Roma, 1993.

Bassani, M., Santagata, E., De Palma, C., "Proprietà Meccaniche di Miscele Bituminose Progettate con il Metodo dei Vuoti", *Atti del Convegno S.I.I.V. "I Materiali nella Sovrastruttura Stradale"*, Ancona, 1996.

Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale, *Norme Tecniche di Tipo Prestazionale per Capitolato Speciale di Appalto*, CIRS, Ancona, 2001.

Consiglio Nazionale delle Ricerche, *Bollettino Ufficiale CNR*, CNR, Roma, nn.30, 63, 65, 67, 75, 76, 95.

Cominsky, R., Leahy, R.B., Harrigan, E.T., "Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning", *SHRP-A-408 Report, Strategic Highway Research Program*, National Research Council, Washington, D.C., 1994.

Celauro, B., Santagata, E., "Miscele Bituminose", in *Quaderno AIPCR "Manutenzione e rafforzamento delle pavimentazioni: innovazioni, sperimentazioni e tendenze"*, a cura del Comitato AIPCR Italiano C8 "Pavimentazioni Flessibili", 1998.

De Palma C., "La Composizione dei Conglomerati Bituminosi Chiusi e Aperti", *Le Strade*, anno XCIV, n° 1283 marzo/aprile 1992.

De Palma C., Santagata, E., Bassani, M., "Developments in the Rational Mix Design of Bituminous Mixtures: the Effects of Aggregates as Modelled by the Voids Method", *Proceedings of the 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona, Spain, 2000.

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, 1996.

Santagata, E., “Il Mix Design Strutturale dei Conglomerati Bituminosi”, *Atti del Convegno S.I.V. “I Materiali nella Sovrastruttura Stradale”*, Ancona, 1996.

Santagata, E., Bassani, M., “Improved Use of the Repeated Load Indirect Tensile Test”, *Proceedings of the 3rd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilised Composites*, Leeds, U.K., 1999.

Santagata, E., Bassani, M., “A Model for the Prediction of the Elastic Stiffness of Bituminous Mixtures Under Pulse Loading”, Submitted for publication to *The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology*, November 2001.

Verstraeten, J., “Contribution a la Formulation de Mélanges Hydrocarbonés Durables et Stables”, *La Technique Routière*, vol XXIII, n.3/1978.