

CONGLOMERATI AD ALTO MODULO (EME) MIGLIORATI CON ADDITIVI PLASTICI

C. Celauro^{*}, M. Ranieri^{*} e F. Bonventre^{*}

^{*} Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM)
Università di Palermo

Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

e-mails: clara.celauro@unipa.it; mauro.ranieri@unipa.it; francesco.bonventre@unipa.it

(Ricevuto 20 Settembre 2014, Accettato 28 Settembre 2014)

Keywords: EME, SuperPlast, Recycled Plastics, Complex Modulus, Fatigue.

Parole chiave: EME, SuperPlast, Plastiche da riciclo, Modulo Complesso, Fatica.

Abstract. *This paper shows the results of an experimental study concerning the development and optimization (mix design) of special asphalt mixtures for binder and base courses, even with additives specifically engineered.*

The special asphalt object of this study are known in the technical literature as EME (enrobés à module élevé), that is mixtures of high modulus, with good performance both in terms of stability and durability. The focus was on the optimization of the mixtures in order to make use of ordinary aggregate and bitumen (as locally available) instead of the very hard bitumen typically prescribed. In order to do that the traditional EME formulation are investigated for modification with suitable polymers.

For this purpose, the mixtures were subjected not only to conventional tests for mix design purposes, such as the like Marshall test and the gyratory compactor test, but advanced tests for performance evaluation such as the rutting resistance and fatigue resistance were investigated, via small scale testing at the wheel tracking and four point bending tests at the University of Palermo's Road Materials Laboratory.

Sommario. *Vengono presentati i risultati di uno studio sperimentale riguardo la messa a punto ed ottimizzazione (mix design) di conglomerati bituminosi speciali per strati di base e binder con additivi specificamente ingegnerizzati.*

I conglomerati bituminosi speciali oggetto della ricerca sono gli EME (enrobés à module élevé), ovvero miscele di conglomerati bituminosi ad alto modulo complesso ottimizzate per garantire buone prestazioni in termini sia di stabilità che di durata nel tempo. Ci si è concentrati sull'ottimizzazione di formule EME che impieghino non necessariamente materiali ad elevate prestazioni, ma che facciano uso di aggregati lapidei e bitumi localmente disponibili, anche puntando al miglioramento delle formule tradizionali come reso possibile da additivazione delle miscele stesse con appositi polimeri.

A tal scopo, le miscele sono state sottoposte alle prove convenzionali di stabilità Marshall, prove di compatibilità alla pressa giratoria e di prove di simulazione del comportamento in opera (prove di ormaimento), prove dinamiche di modulo complesso e di rottura per fatica presso il Laboratorio Sperimentale di Materiali Stradali del DICAM dell'Università degli Studi di Palermo.

1 INTRODUZIONE

Le miscele di conglomerati bituminosi ad alto modulo complesso, meglio conosciute come “EME”, furono introdotte in Francia negli anni ottanta per ridurre l’uso di prodotti derivati dal petrolio poiché, facendo affidamento sulle loro migliori prestazioni meccaniche, consentivano notevoli riduzioni degli spessori rispetto alle pavimentazioni realizzate con conglomerati tradizionali. La caratteristica principale di tali formulazioni è l’elevata rigidità, ottenuta utilizzando leganti duri o molto duri (a basso grado di penetrazione). Al contempo, però, l’uso di leganti più duri limita la lavorabilità delle miscele, ragion per cui il loro impiego è giustificato nel caso di traffici molto elevati o per applicazioni specifiche come nel campo aeroportuale¹.

Tali miscele necessitano di una selezione rigorosa dei componenti e, in particolare, di aggregati lapidei di buona qualità e, soprattutto, bitumi molto duri e di elevate prestazioni^{2,3}.

Secondo quanto riportato nel progetto di ricerca sviluppato nel 2007 dal CRR (Centre de Recherches Routières belga), il quale prende come riferimento principale la normativa francese NF P 98-140⁴, tali miscele sono considerate come una possibile soluzione all’ormaiamento in Belgio, fenomeno crescente dovuto al costante aumento del traffico pesante. L’obiettivo primario di tale studio era quello di verificare la fattibilità tecnologica, in termini di formulazione, produzione e applicazione, di tali miscele molto conosciute all’estero, soprattutto in Francia, paese d’origine, e ancora poco usate nel contesto belga. In altri termini lo scopo era fornire la necessaria adeguata conoscenza nello studio di formulazione di un EME e le informazioni sulla corretta scelta dei requisiti da includere nelle specifiche di tali miscele, verificando che la granularità proposta era realizzabile con i materiali più comunemente usati in Belgio⁵.

Analogo interesse si intuisce abbia l’applicazione delle formulazioni EME al contesto italiano, il quale risulta caratterizzato non solo da elevati traffici pesanti, come tutte le nazioni a patrimonio viario maturo e con evidente prevalenza della modalità di trasporto stradale per la mobilità delle merci, ma anche e soprattutto per il clima mediterraneo che lo caratterizza, ancora più penalizzante del clima continentale tipico della regione francese o belga.

Si tratta quindi di un’ottimizzazione che porti a delle scelte di compromesso tra necessità, tra loro contrastanti, da indagare mediante un apposito piano sperimentale che possa mettere in evidenza l’influenza delle diverse variabili in gioco (qualità dei componenti delle miscele – aggregati, bitume ed additivi, mutue proporzioni dei componenti, curva granulometrica adottata, etc.).

2 MATERIALI E PIANO SPERIMENTALE

Lo studio sperimentale è stato sviluppato seguendo questo iter:

- materiali (aggregati, leganti, additivi, miscele):
 - aggregati (granulometria tipo EME 0/14);
 - legante (bitume puro 50/70);
 - additivi (SuperPlast, plastiche da riciclo);
 - miscela:
 - a. EME BP (50/70);
 - b. EME BP/SP (50/70 + SuperPlast);
 - c. EME BP/P (50/70 + Plastiche da riciclo).
- prove di formulazione:
 1. studio di formulazione Marshall a 4 diverse percentuali di bitume con CE = 75;
 2. prova di compattabilità alla pressa giratoria con D = 150 mm.
- prova da eseguire sulle miscele ottimizzate:
 - ormaiamento (s = 50 mm, 60°C);
 - modulo complesso (20°C);
 - fatica (20°C, 10Hz).

2.1 Aggregato lapideo

L'aggregato lapideo utilizzato nel confezionamento delle miscele proviene tutto da frantumazione di rocce calcaree del Palermitano (cava Giardinello s.n.c. di Buttitta Francesco & C. sita in località Giardinello, Termini Imerese - PA, vedi tabelle seguenti).

Tabella 1 – Assortimento granulometrico degli aggregati vergini impiegati per la produzione delle miscele di studio.

Setacci [mm]	Passante [%]					
	a ₁ = 30/25	a ₂ = 20/25	a ₃ = 10/15	a ₄ = 6/10	a ₅ = 0/6	filler
32	100	100	100	100	100	100
24	89.16	100	100	100	100	100
20	3.44	94.73	100	100	100	100
12	0.26	18.33	99.96	100	100	100
8	0.20	0.77	85.67	99.91	99.70	100
4	0.19	0.51	38.3	72.62	97.78	100
2	0.18	0.49	15.66	41.54	70.60	100
0.4	0.16	0.44	6.62	16.84	26.09	99.31
0.18	0.15	0.41	5.28	11.21	17.19	93.78
0.075	0.10	0.33	4.01	6.42	10.57	74.25

Tabella 2 – Caratteristiche fisico-meccaniche degli aggregati vergini impiegati per la produzione delle miscele di studio.

Caratteristica	Frazione a ₁ (30/25)	Frazione a ₂ (20/25)	Frazione a ₃ (10/15)	Frazione a ₄ (6/10)	Frazione a ₅ (0/6)	filler	Unità di misura	Norma di riferimento
Massa specifica reale (γ_r)						2,85	g/cm ³	C.N.R. n.64/78
Massa specifica apparente (γ_a)	2,82	2,82	2,83	2,84	2,85		g/cm ³	C.N.R. n.63/78
Determinazione della perdita in peso per abrasione Prova Los Angeles (L.A.)	21,88	22,10	20,19	20,64	20,12		%	C.N.R. n.34/73
Equivalente in Sabbia (ES)				91,38	90,41		%	C.N.R. n.27/72
Indice dei vuoti	0,87	0,80	0,79	0,71	0,73			C.N.R. n.65/78
Coefficiente di imbibizione	0,65	0,64	0,51					C.N.R.n.137/92

Per l'assortimento granulometrico è apparso opportuno fare riferimento alla curva granulometrica francese dell'EME classe 2 0/14⁶, le cui caratteristiche sono qui di seguito riportate:

Tabella 3. Assortimento granulometrico EME classe 2 0/14.

EME classe 2 0/14	
Setacci [mm]	Passante [%]
14	100
10	78
6.3	58
2	34
0.08	8

Si è quindi cercato di riprodurre tale curva, setacciando il materiale a disposizione mediante una setacciatura automatica, i cui setacci sono: 12.7, 9.51, 4.76 e 2 mm.

Sono state scelte sei diverse frazioni granulometriche:

- A è la frazione degli aggregati che passano attraverso il setaccio di 16 mm e rimangono sul setaccio di 12.7 mm;
- B è la frazione degli aggregati che passano attraverso il setaccio di 12.57 mm e rimangono sul setaccio di 9.51 mm;
- C è la frazione degli aggregati che passano attraverso il setaccio di 9.51 mm e rimangono sul setaccio di 4.76 mm;
- D è la frazione degli aggregati che passano attraverso il setaccio di 4.76 mm e rimangono sul setaccio di 2 mm;
- a₅ è la frazione 0/6, comunemente chiamata sabbia;
- filler è la frazione 0/0.4, ovvero il filler d'apporto calcareo.

La curva granulometrica è stata quindi scelta combinando opportunamente le sei diverse frazioni sopra citate ed ottenendo una miscela di aggregati a scheletro sabbioso.

Tabella 4. Percentuali della miscela di aggregati.

A = 12.7/16	12
B = 9.51/12.7	12
C = 4.76/9.51	27
D = 2/4.76	3
a₅ = 0/6	42
filler = 0/0.4	4

Tabella 5. Curva granulometrica scelta.

Setacci [mm]	A = 12.7/16	B = 9.51/12.7	C = 4.76/9.51	D = 2/4.76	a ₅ = 0/6	filler = 0/0.4	totale
16	12.00	12.00	27.00	3.00	42.00	4.00	100.00
12.7	0.00	12.00	27.00	3.00	42.00	4.00	88.00
10	0.00	1.84	27.00	3.00	41.93	4.00	77.78
9.51	0.00	0.00	27.00	3.00	41.92	4.00	75.92
6.3	0.00	0.00	8.75	3.00	41.45	4.00	57.20
4.76	0.00	0.00	0.00	3.00	41.22	4.00	48.22
2	0.00	0.00	0.00	0.00	29.65	4.00	33.65
0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	10.96	3.97	14.93
0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	4.57	3.01	7.58

Tale miscela di aggregati è stata quindi sottoposta al metodo del picnometro per la determinazione della massa specifica apparente, il cui valore è risultato essere pari a 2.823 g/cm³.

2.2 Bitume

Al fine di valutare la possibilità di formulazione EME anche con bitumi meno duri di quelli previsti dalla letteratura tecnica, ma più facilmente reperibili in altri contesti come quello italiano, il bitume puro utilizzato nella ricerca è un bitume 50/70 proveniente dall'impianto dell'impresa Iacuzzo, sita a Termini Imerese, in provincia di Palermo, le cui caratteristiche sono qui riportate in tabella.

Tabella 6. Caratteristiche del bitume utilizzato.

Caratteristiche	Unità di misura	Valori	Norma di riferimento
Densità a 25°C, γ	g/cm ³	1.033	C.N.R. n.67/78
Penetrazione a 25°C, pen	dmm	68	EN 1426:2000
Temperatura palla-anello, T _{R&B}	°C	50.5	EN 1427:2000
Indice di penetrazione, PI		-0.21	EN 1427:2000
Temperatura di rottura fraas, T _F	°C	-12	EN 12593:2007
Duttilità	mm	> 100	ASTM D113-07
Viscosità a 60 °C	Pa·s	255.5	EN 13302:2010
Viscosità a 100 °C	Pa·s	3.917	EN 13302:2010
Viscosità a 135 °C	Pa·s	0.435	EN 13302:2010
Viscosità a 150 °C	Pa·s	0.2225	EN 13302:2010
Temperatura di miscelazione ($\eta = 0.17$ Pa·s)	°C	155	EN 13302:2010
Temperatura di costipamento ($\eta = 0.28$ Pa·s)	°C	145	EN 13302:2010
Dopo invecchiamento RTFOT:			
Perdita di massa	%	-0.19	EN 12607-1:2007
Penetrazione a 25°C, pen	%	44	EN 1426:2000
Temperatura palla-anello, T _{R&B}	°C	64.5	EN 1427:2000
Viscosità a 60 °C	Pa·s	668	EN 13302:2010

2.3 Additivi

Come additivi sono stati utilizzati il SuperPlast e plastiche da riciclo. Il SuperPlast è un particolare compound di polimeri selezionati, polietilene a bassa densità (LDPE) ed etilenvinilacrilato (EVA) ed altri polimeri a basso peso molecolare e medio punto di fusione, che si presenta in granuli semi-morbidi e flessibili, tutti passanti al setaccio da 4 mm e trattenuti al setaccio da 2 mm. Le plastiche costituenti il SuperPlast sono flessibili, ovvero non sono così resistenti come quelle rigide, ma sono molto più tenaci. Le proprietà fisiche sono qui di seguito riportate:

- aspetto granuli: neri/grigi;
- punto di rammollimento: 150°C;
- punto di fusione: 180°C;
- melt index: 1÷5;
- densità a 20°C: 0,90 – 0,98 gr/cm³.

Il SuperPlast utilizzato in questo studio è stato fornito dalla società Iterchimica S.r.l di Suisio (Bergamo) ed ha un peso dell'unità di volume pari a 0.934 g/cm³. Su tale materiale è stata effettuata la prova DSC, i cui risultati sono mostrati in Fig. 1, nella quale sono evidenti tre picchi: il primo a circa 106 gradi è attribuibile al polietilene a bassa densità o lineare a bassa densità, quello a 120 °C è attribuibile al polietilene ad alta densità, mentre il picco a 160°C ad un polipropilene. Considerando che l'area sottesa alla curva è proporzionale alla massa ed essendo le due aree a 120 °C e 160 °C abbastanza basse, il polipropilene (PE) e l'HDPE sono presenti in tracce.

I picchi presenti nelle curve in basso non vanno considerati perché corrispondono alla cristallizzazione che i polimeri hanno a temperature più basse.

Tale prova quindi permette di dire che il SuperPlast è essenzialmente un polietilene a bassa densità, ma con aggiunta di impurità quali polietilene ad alta densità e polipropilene.

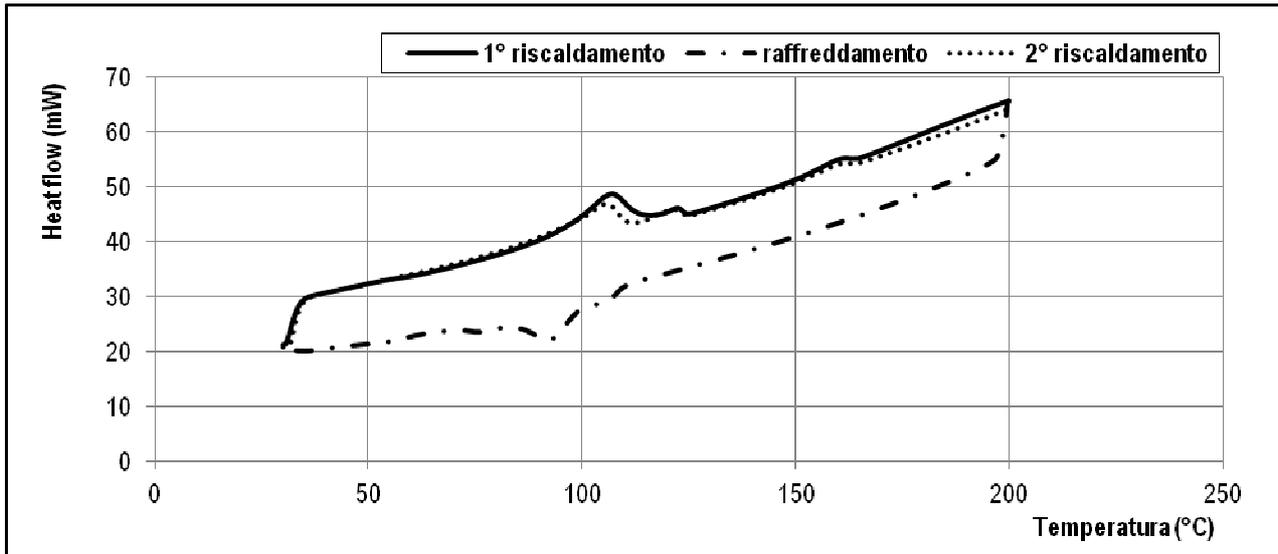


Figura 1. Risultati della prova DSC sul SuperPlast.

Le plastiche da riciclo provengono dal post riciclaggio dei teli da serra comunemente impiegati per uso agricolo: una volta dismessi, tali teli vengono inviati ad un processo di recupero del quale le plastiche impiegate nello studio costituiscono lo scarto non utilizzabile. Anche su tale materiale è stata effettuata la prova DSC (vedi fig. 2), che ha permesso di confermare, come in precedenti studi, che tali plastiche sono per lo più costituite da polietilene ad alta densità (HDPE) e da polipropilene (PP). Il peso dell'unità di volume è stato assunto pari a 0.94 g/cm^3 .

Entrambi gli additivi hanno scarsa affinità con il bitume, pertanto, per le esigenze della pratica, risulta più vantaggiosa l'additivazione via secca, direttamente in conglomerato.

Per quanto riguarda il momento di aggiunta, ossia il "quando additivare", dei tre possibili momenti (subito dopo l'inerte e prima del bitume, ovvero dopo l'aggiunta del bitume e prima del filler, cioè ancora in coda al bitume ed al filler), l'inserimento della plastica subito dopo l'inerte produce sempre i migliori effetti⁷. In considerazione di ciò, il processo ottimale di fabbricazione delle miscele è quello che prevede la seguente successione dei componenti: aggregati, additivi, bitume, filler.

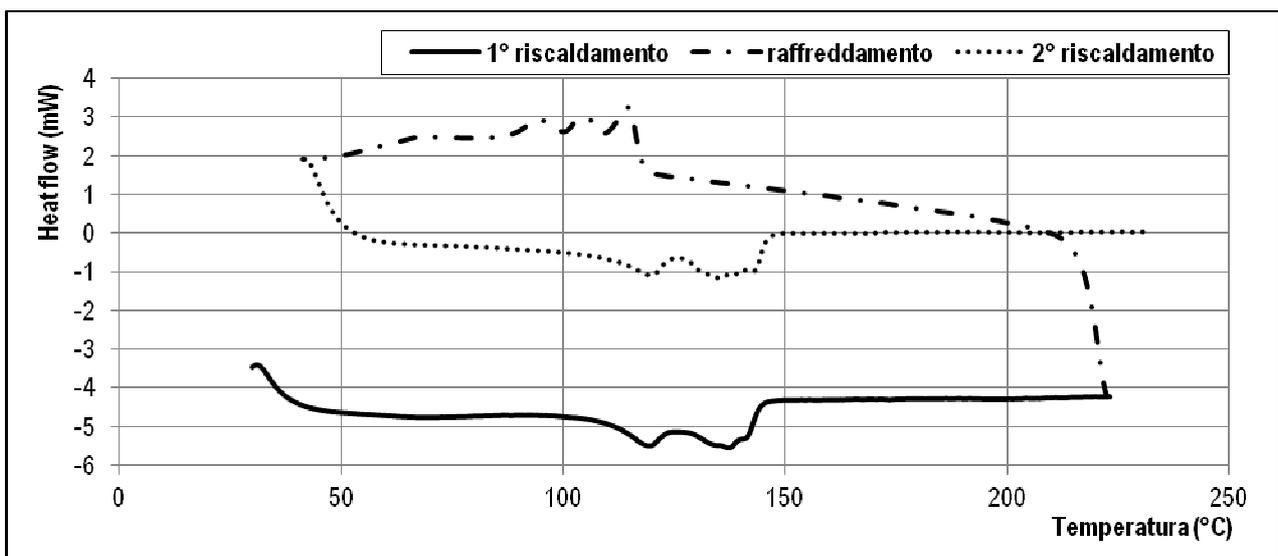


Figura 2. Risultati della prova DSC sulle plastiche da riciclo.

3 PROVE DI FORMULAZIONE

3.1 Stabilità Marshall

Al solo fine di valutare le caratteristiche fisiche e meccaniche tipicamente considerate nei Capitolati Italiani si è proceduto allo studio di formulazione Marshall. Tale prova è stata eseguita secondo la normativa europea EN 12697-34. Sono stati scelti quattro diversi dosaggi in bitume (4.8, 5.2, 5.5, 5.9 %) e per ogni percentuale si sono ottenuti quattro campioni, di cui tre sono stati sottoposti alla prova, mentre uno è stato paraffinato.

Le proprietà volumetriche (v e VFB) sono state determinate secondo quanto prescritto dalla normativa europea EN 12697-8.

Il calcolo della densità massima γ_t della miscela è stato eseguito secondo il procedimento C (matematico) specificato dalla norma EN 12697-5, mentre il calcolo della densità di volume γ_{app} è stato eseguito secondo la EN 12697-6 con la procedura "B" (superficie satura asciutta) per i tre campioni non paraffinati e con la procedura "C" (provino sigillato) per il quarto campione che è stato paraffinato. I risultati della prova Marshall sono qui di seguito riportati.

Tabella 7. Risultati della prova Marshall (2x75).

b [%]	v [%]	S [KN]	F [mm]	R=S/F[KN/mm]	VFB [%]	γ_{app} [g/cm ³]	filler/bitume
4.8	6.03	12.24	4.27	2.87	69.22	2.46	1.54
5.2	2.88	13.39	4.07	3.29	82.90	2.52	1.42
5.5	2.52	14.67	4.40	3.33	86.05	2.52	1.35
5.9	1.82	13.30	5.33	2.49	89.75	2.53	1.26

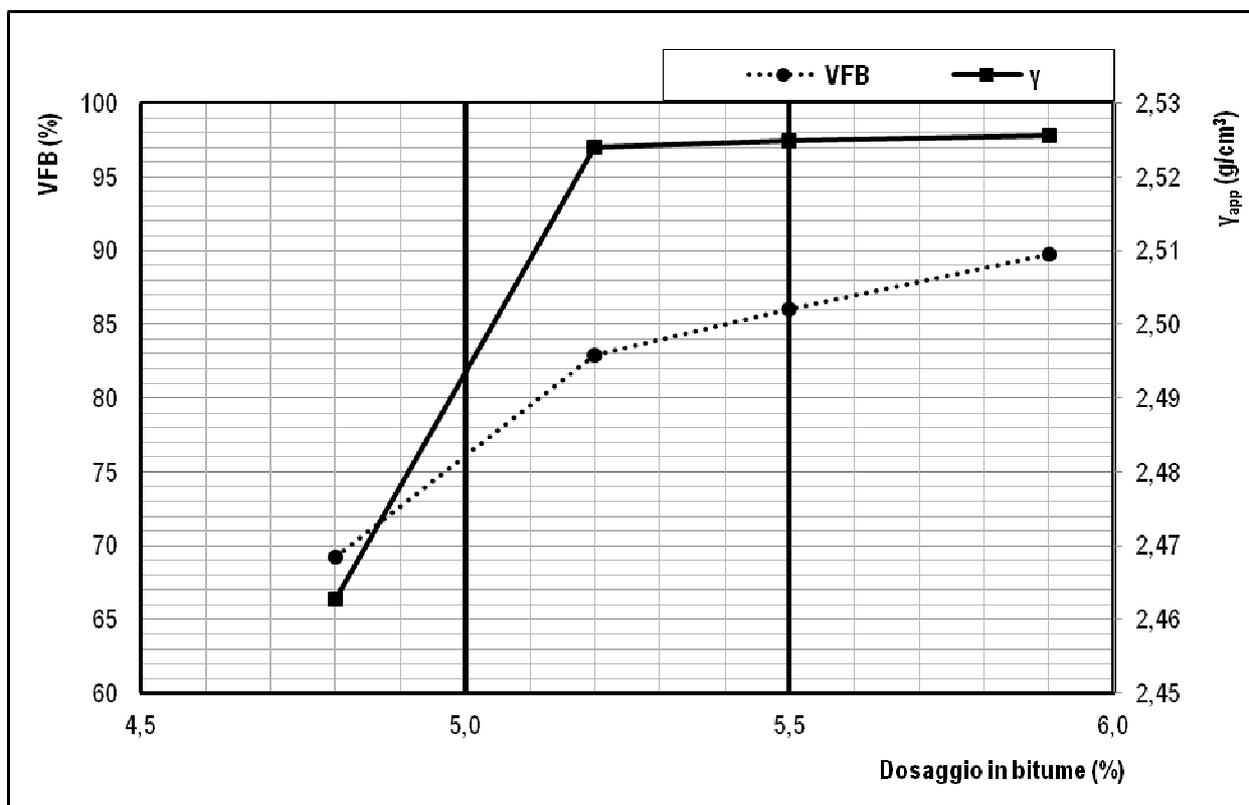


Figura 3. Andamento di VFB e γ al variare del dosaggio in bitume.

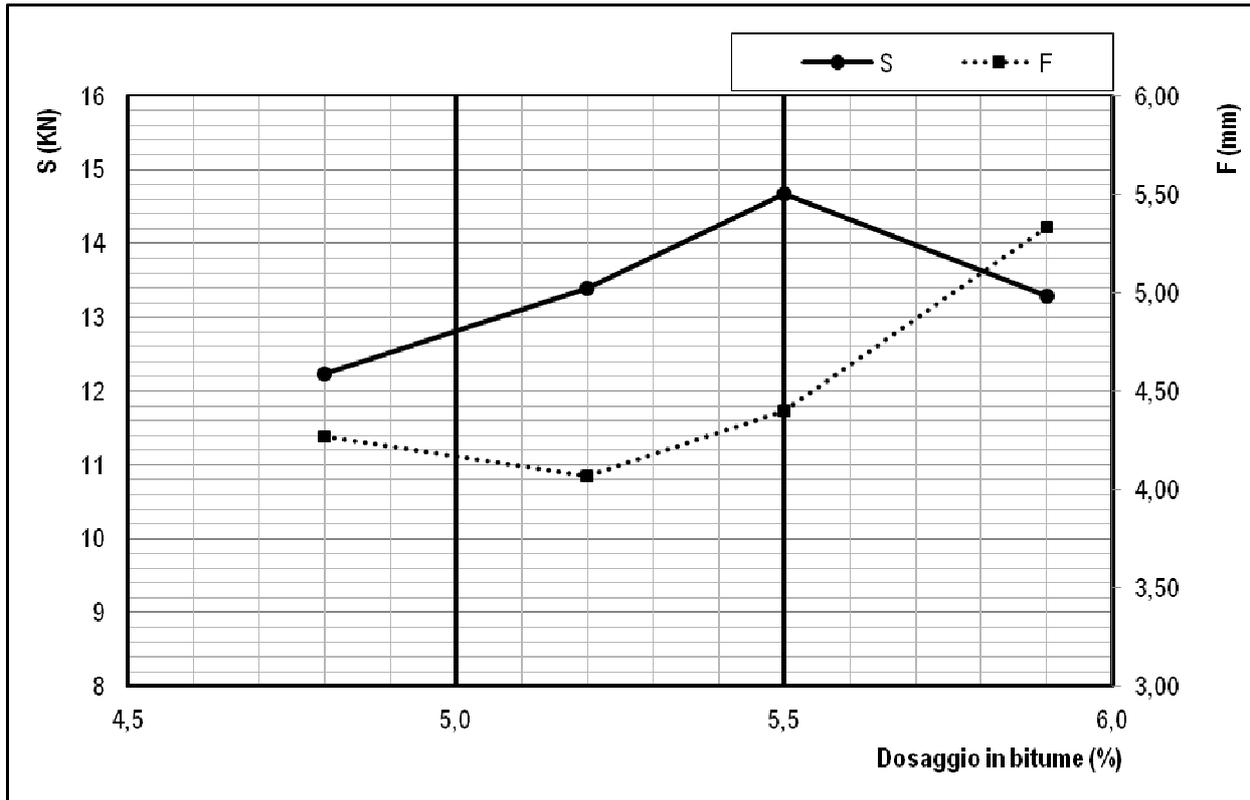


Figura 4. Andamento di S e F al variare del dosaggio in bitume.

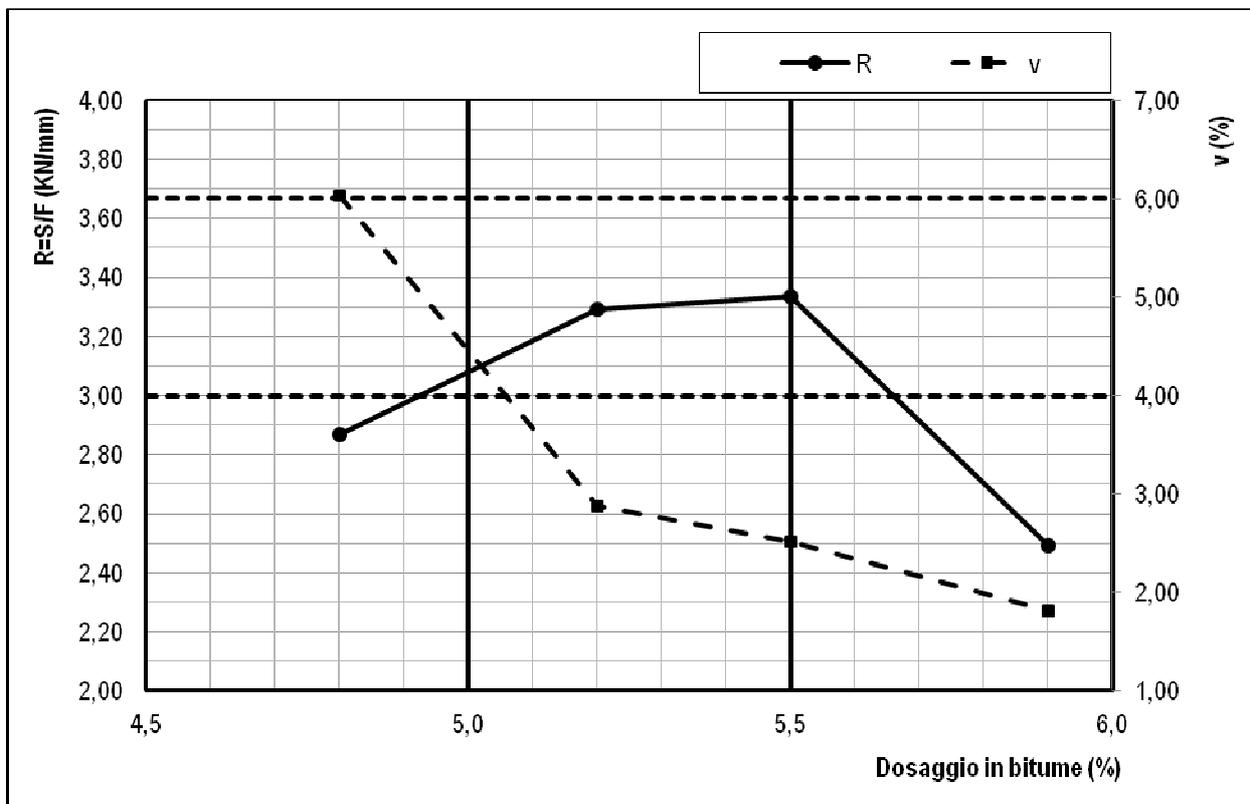


Figura 5. Andamento di R e v al variare del dosaggio in bitume.

Come si può evincere dai grafici sopra riportati, i requisiti previsti dai principali Capitolati Italiani (in tabella 8 sono riportati a titolo di esempio quelli del MIT) sono rispettati per dosaggi in bitume compresi tra il 4.8 e il 5.1 %.

Tabella 8. Risultati richiesti per la prova Marshall secondo il Capitolato MIT

Metodo Marshall	Strato pavimentazione		
Risultati richiesti	Unità di misura	Base	Binder
Stabilità Marshall	KN	8	10
Rigidezza Marshall	KN/mm	> 2.5	3÷4.5
Vuoti residui	%	4÷7	4÷6

3.2 Compattabilità alla pressa giratoria

Per la formulazione delle miscele, oltre alle informazioni desunte dalla prova Marshall, è stato anche adottato il metodo Superpave dello SHRP⁸.

Oltre a quanto previsto dalla procedura SHRP, durante la prova di compattabilità alla pressa giratoria è stato acquisito anche il rapporto di taglio per ottenere una misura della stabilità interna del conglomerato nel corso del costipamento. L'acquisizione di questa caratteristica è stata fatta su campioni appositamente compattati fino a $N = 200$ giri, allo scopo di valutare il comportamento delle miscele nelle diverse condizioni di addensamento che lo interessano dal momento della posa in opera e fino al periodo di vita utile di progetto. In generale, un andamento crescente del rapporto di taglio σ nella fase iniziale della compattazione (all'incirca, nei primi 50 giri) ed una sua stabilizzazione fin oltre N_{max} , congiuntamente al rispetto dei requisiti volumetrici (VMA, VFA), assicura una corretta formulazione delle miscele e buona stabilità durante l'esercizio⁹.

La prova alla pressa giratoria è stata eseguita su due campioni per tre diversi dosaggi in bitume (4.9, 5.1, 5.4 %) e tre diversi dosaggi di SuperPlast (0, 0.3, 0.6 %, rispetto al peso dell'aggregato lapideo). Successivamente, sulla base dei risultati dei campioni testati, si è deciso di eseguire la prova, per la percentuale di SuperPlast dello 0.3, anche su due campioni a due percentuali di bitume inferiori (4.3, 4.6). In un secondo momento sono state eseguite delle prove utilizzando come additivi le plastiche da riciclo con tre percentuali di bitume (4.6, 4.9, 5.1) e quattro diversi dosaggi di plastiche (0.3, 0.5, 0.7, 1 %).

Le curve di addensamento registrate durante il costipamento alla pressa giratoria hanno permesso di ottenere i parametri K e C_1 delle rette di regressione che definiscono rispettivamente la lavorabilità e le caratteristiche di autoaddensamento delle miscele¹⁰.

Tabella 9. Valori di lavorabilità e di auto addensamento.

miscela	b [%]	sp [%]	p [%]	% $G_{mm} = C_1 + k * \log(N)$		
				C_1	K	R^2
EME 4.3/SP.3	4.3	0.3		0.8009	0.0757	0.998
EME 4.6/SP.3	4.6	0.3		0.8072	0.0739	0.9984
EME 4.9/SP.0	4.9	0.0		0.7972	0.0753	0.9989
EME 4.9/SP.3	4.9	0.3		0.8141	0.0788	0.9952
EME 4.9/SP.6	4.9	0.6		0.8278	0.0748	0.9900
EME 5.1/SP.0	5.1	0.0		0.8190	0.0710	0.9988
EME 5.1/SP.3	5.1	0.3		0.8168	0.0786	0.9940
EME 5.1/SP.6	5.1	0.6		0.8274	0.0755	0.9880
EME 5.4/SP.0	5.4	0.0		0.8141	0.0788	0.9952
EME 5.4/SP.3	5.4	0.3		0.8345	0.0741	0.9837
EME 5.4/SP.6	5.4	0.6		0.8366	0.0742	0.9702
EME 4.6/P.3	4.6		0.3	0.8232	0.0743	0.9896
EME 4.6/P.5	4.6		0.5	0.8154	0.0751	0.9913
EME 4.6/P.7	4.6		0.7	0.8108	0.0769	0.9929
EME 4.6/P.1	4.6		1.0	0.8463	0.0660	0.9627
EME 4.9/P.5	4.9		0.5	0.8253	0.0744	0.9897
EME 4.9/P.7	4.9		0.7	0.8257	0.0731	0.9865

EME 4.9/P1.	4.9	1.0	0.8540	0.0638	0.9518
EME 5.1/P1.	5.1	1.0	0.8589	0.0617	0.9439

Dai valori riportati nella Tabella 9 si può osservare che per lo stesso assortimento granulometrico la lavorabilità non dipende dal dosaggio del bitume o dell'additivo. All'aumentare di bitume o di additivo, invece, crescono quasi nella totalità delle miscele i valori dell'addensamento iniziale C_1 e, conseguentemente, della compattezza a qualsivoglia numero di giri.

I profili di taglio giratorio σ in Fig. 6, determinati durante lo studio di compattezza alla pressa giratoria, fino a 200 giri, mostrano che i campioni con una percentuale di SuperPlast dello 0.3 ed una di bitume del 4.3 o 4.6, e i campioni senza alcun percentuale di SuperPlast ma con percentuale di bitume del 4.9 o del 5.1, mobilitano valori di taglio giratorio che si mantengono all'incirca costanti durante la vita di progetto della pavimentazione. Un leggero eccesso di bitume ed un leggero eccesso di additivo provocano, invece, una caduta dello sforzo di taglio giratorio, significativi di un dosaggio non ottimale.

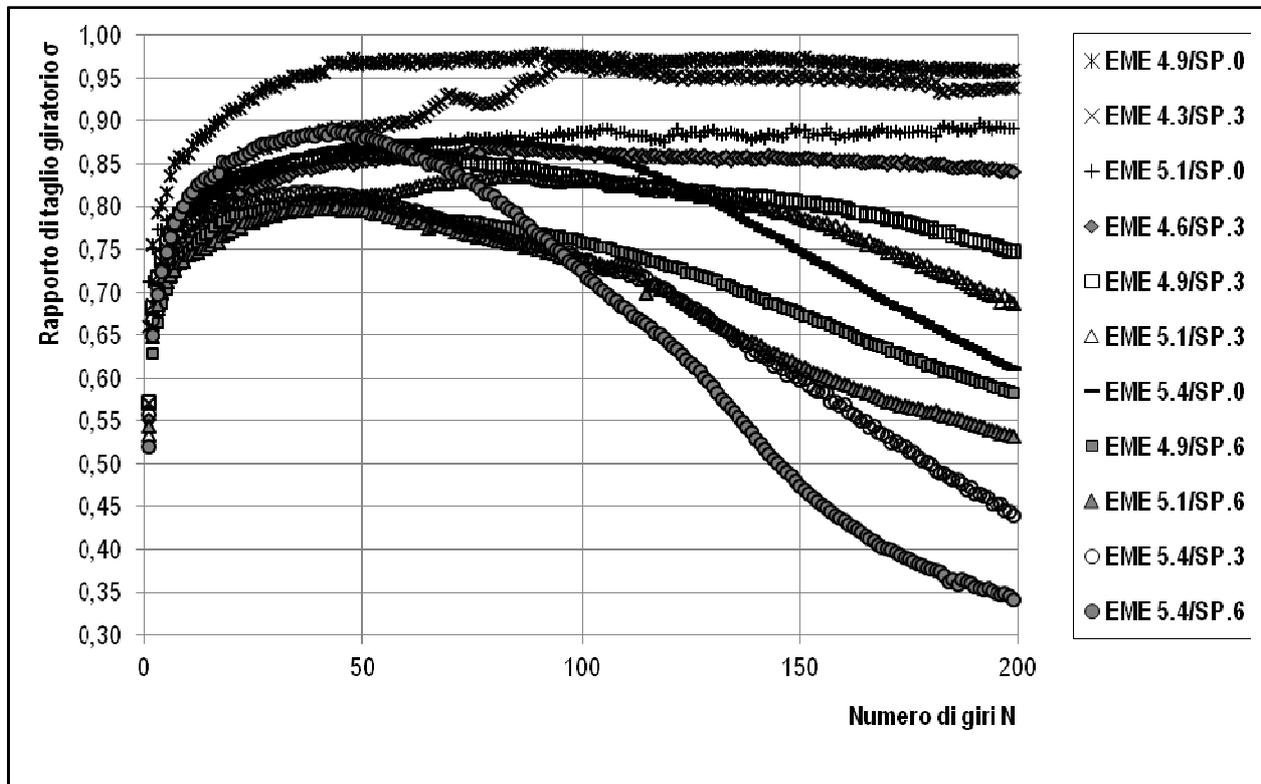


Figura 6. Profili di taglio giratorio delle miscele tradizionali e con SuperPlast.

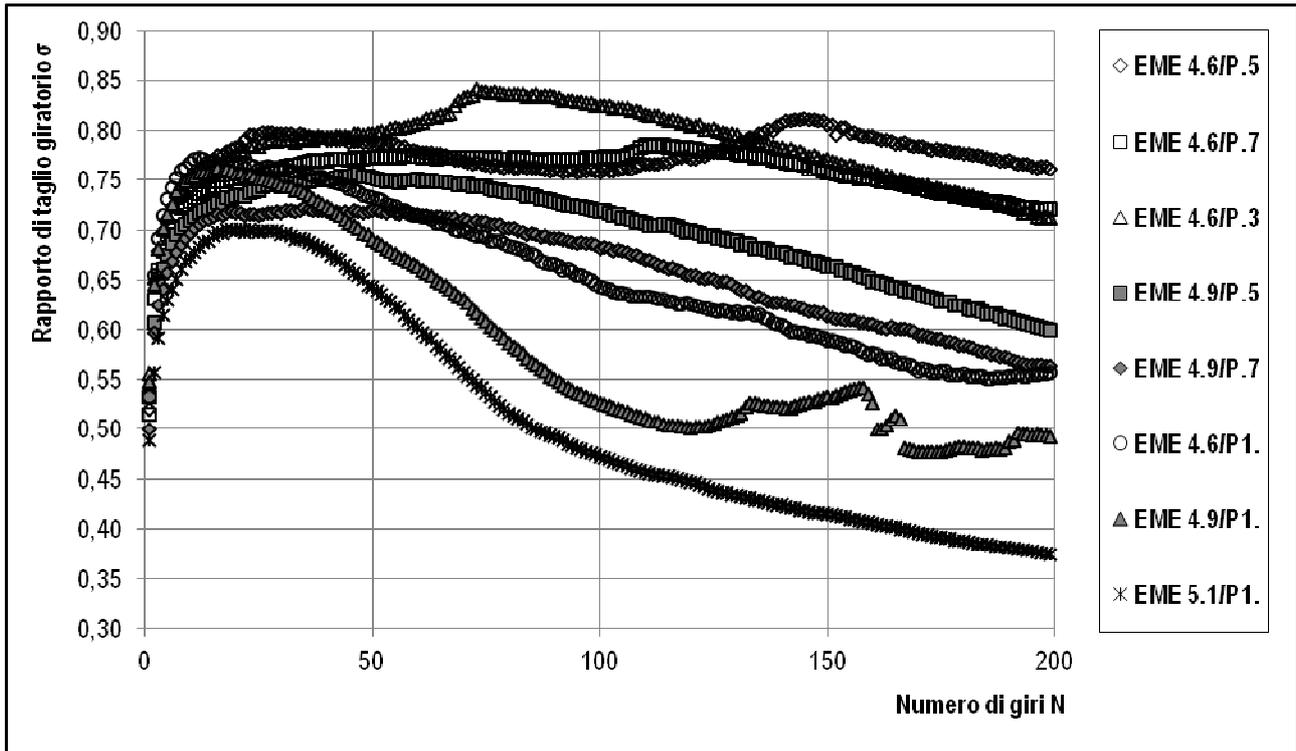


Figura 7. Profili di taglio giratorio delle miscele con plastiche da riciclo.

Stesso discorso può farsi per le miscele additivate con plastiche da riciclo (vedi Fig. 7), dove i campioni significativi di un dosaggio ottimale sono quelli contenenti una percentuale di 0.5 di plastiche e 4.6 di bitume.

Per quanto riguarda i vuoti, sono riportati in tabella 10 i valori medi dei campioni sottoposti alla pressa giratoria che, considerando ad esempio i requisiti sui vuoti previsti dall'Anas S.p.A¹¹ a 10, 100 e 190 giri, riportati in tabella 11, confermano quanto visto precedentemente nelle Figg. 6 e 7.

Tabella 10. Valori medi dei vuoti dei campioni sottoposti alla pressa giratoria a 10, 100 e 190 giri.

N° giri	b		4.6					4.9					5.1			5.4							
	[%]																						
	sp		0.3		0.5			0.7			1.0		0.5		0.7	1.0	1.0		0.3	0.6	0.3	0.6	
	[%]	[%]																					
N ₁₀	12.6	12.1	10.7	11.3	11.6	9.3	13.0	11.1	10.2	10.4	10.5	8.8	11.2	10.8	10.2	8.5	9.9	9.6	9.5				
N ₁₀₀	4.7	4.4	2.6	3.3	3.3	1.9	5.1	2.7	2.0	2.4	2.6	1.6	3.8	2.4	1.9	1.6	1.7	1.4	1.0				
N ₁₉₀	2.8	2.6	1.2	1.8	1.8	1.1	3.2	1.0	0.7	1.0	1.3	0.8	2.0	0.8	0.6	0.8	0.4	0.3	0.3				

Tabella 11. Valori dei vuoti a seconda del numero di giri come da requisiti Anas S.p.A.

Requisiti Anas S.p.A		
N	N° giri	% vuoti
N ₁	10	11÷15
N ₂	100	3÷6
N ₃	190	≥2

4 PROVE SULLE MISCELE OTTIMIZZATE

4.1 Tenuta all'ormaiamento

La prova di wheel tracking è stata eseguita secondo la normativa europea EN 12697-22. Sono state scelte due diverse percentuali di bitume 50/70 a parità di percentuale di SuperPlast (0, 0.3), ed una sola percentuale di bitume per la miscela con plastiche da riciclo, realizzando per ogni miscela due piastre (data l'alta ripetibilità di tale prova), i cui valori sono così stati mediati e riportati in figura 8. Da questa si evince come, a parità di percentuale di bitume, si hanno valori di profondità d'ormaia dimezzati tra la miscela senza additivi plastici e la miscela contenente SuperPlast e circa il 75 % in meno tra la miscela additivi plastici e la miscela con plastiche da riciclo. Inoltre, l'introduzione del Superplast porta a risultati praticamente costanti al variare del dosaggio di bitume in miscela, per le percentuali di legante studiate, diversamente da quello che accade per le miscele tradizionali, che sempre manifestano un aumento di ormaia all'aumentare del dosaggio in bitume. Ciò porta a concludere che il polimero introdotto, rendendo pressoché insensibile al variare del dosaggio in legante la resistenza all'accumulo delle deformazioni permanenti offerta dalle miscele, risulta vantaggiosa nel caso di miscele che necessitano di dosaggi in bitume particolarmente elevati.

Gli additivi impiegati risultano quindi essere, in entrambi i casi, particolarmente vantaggiosi.

Una conferma di quanto appena detto può essere ottenuta calcolando un ulteriore parametro quale il WTS_{air} (wheel-tracking slope in air), che è il tasso medio al quale la profondità di ormaia aumenta con il numero di passaggi ripetuti della ruota di carico ed i cui valori sono riportati in tabella 13.

Tale parametro infatti aumenta all'aumentare della percentuale di bitume, mentre diminuisce all'aumentare della percentuale di additivo introdotta in miscela.

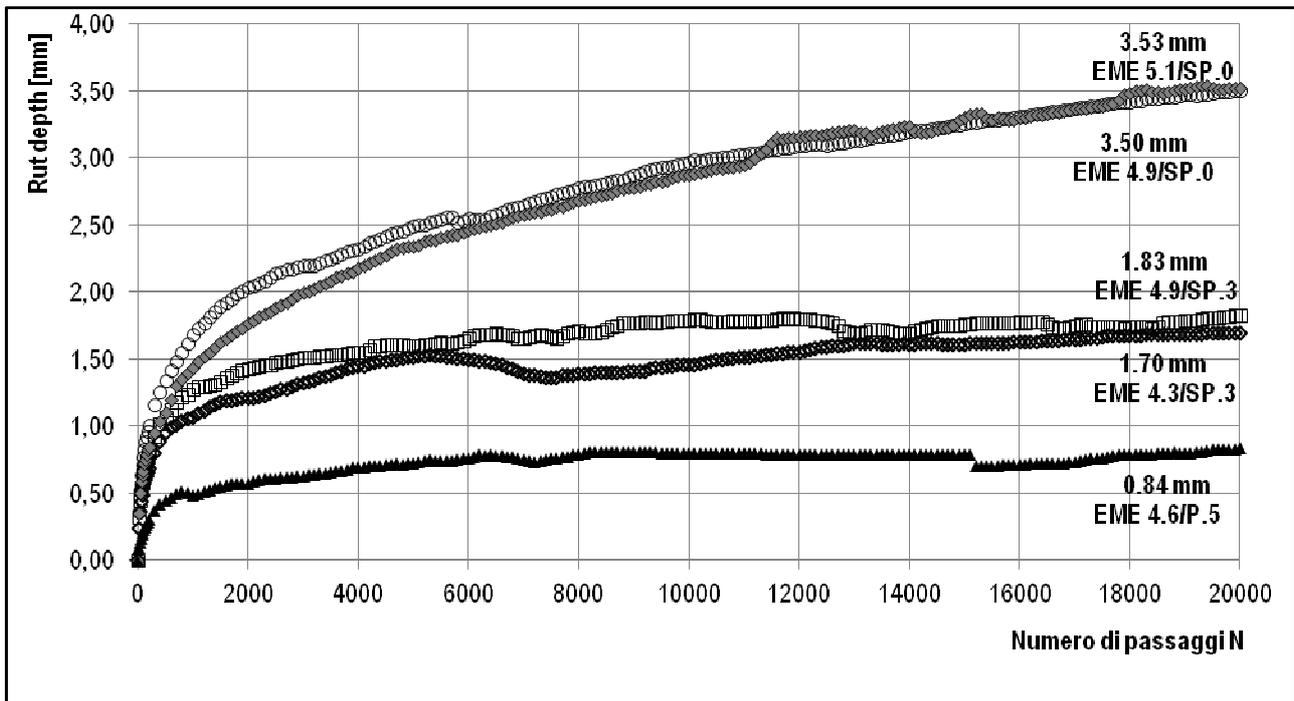


Figura 8. Evoluzione della profondità d'ormaia durante la prova di ormaiamento

Tabella 12. Valori della profondità d'ormaia per le miscele studiate.

RD_{air} (mm)	Mixture	Value (mm)
	EME 4.9/SP.0	3.50
	EME 5.1/SP.0	3.53
	EME 4.3/SP.3	1.70
	EME 4.9/SP.3	1.83
	EME 4.6/P.5	0.84

Differenza (%)	EME 4.9/SP.3-EME 4.9/SP.0	52.29
-----------------------	---------------------------	-------

Tabella 13. Valori della WTS_{air} (wheel-tracking slope in air) per le miscele studiate

WTS_{air} (mm/10 ³ cicli di carico)	EME 4.9/SP.0	0.11
	EME 5.1/SP.0	0.13
	EME 4.3/SP.3	0.01
	EME 4.9/SP.3	0.05
	EME 4.6/P.5	0.008

4.2 Modulo complesso e resistenza a fatica

Il tipo di sollecitazione adottato nelle prove di fatica (così come nelle prove di modulo) è stato quello della flessione sinusoidale su provini prismatici appoggiati agli estremi e doppiamente caricati (flessione su 4 punti). Le modalità di sollecitazione sono state quelle dell'ampiezza della deformazione relativa mantenuta costante nel corso della prova (deformazione controllata), che è stata eseguita secondo la normativa europea EN 12697-24 annesso D.

Le prove sono state condotte ad una temperatura di 20 °C e ad una frequenza di 10 Hz su travetti di dimensioni 400*45*50 mm, ricavati da una piastra di dimensioni 400*305*50 mm. La deformazione imposta è stata pari a 350 (breve durata) e 150 microstrain (lunga durata).

Il criterio di rottura adottato è quello che prevede la "rottura" del campione corrispondente ad una dimezzamento del modulo di resistenza rispetto al valore iniziale. La resistenza iniziale viene, per norma, definita come quella calcolata al centesimo ciclo di carico.

Le prove di modulo complesso, preliminari alle prove di fatica, sono state eseguite nella stessa configurazione di queste, secondo la normativa europea EN 12697-26 annesso B, sottoponendo i campioni ad un livello di deformazione tale da non dare origine a deformazioni non reversibili e per un numero di cicli pari a 150. La deformazione imposta è stata pari a 25 microstrain e le frequenze adoperate sono state 1, 10, 30,1 Hz. Sia le prove di modulo che quelle di fatica sono state eseguite sulle miscele ottimizzate nelle prove precedenti, ovvero una miscela tradizionale con un dosaggio in bitume pari a 4.9 %, una miscela con un dosaggio in bitume del 4.3 % e 0.3 % di SuperPlast ed una miscela con un dosaggio in bitume del 4.6 % e 0.5 % di plastiche da riciclo.

I risultati delle prove di modulo sono riportati in tabella 14 e mostrano che tali prove, precedenti le prove di fatica, hanno risposto come da attese: i moduli del materiale sono maggiori alle basse temperature ed alte frequenze, minori altrimenti; inoltre le miscele con SuperPlast e plastiche da riciclo offrono moduli sempre superiori di quelli della miscela tradizionale, senza additivo, a pari condizioni di temperatura e frequenza.

Tabella 14. Valori del modulo complesso e dell'angolo di fase per le miscele studiate.

Miscela	E* (Mpa)			f (Deg.)		
	Frequenza [Hz]			Frequenza [Hz]		
	1	10	30	1	10	30
EME 4.9/SP.0	3691.77	7281.67	8755.89	35.95	24.21	22.56
EME 4.3/SP.3	4168.25	7528.47	9187.98	29.62	20.33	17.98
EME 4.6/P.5	6792.87	10682.04	12277.45	23.02	15.35	14.60

Le rette di fatica mostrate in figura 9 hanno alti valori di coefficienti di regressione R^2 (vedi tabella 15) e quindi i risultati sono poco dispersi e molto ben ripetibili.

Tali rette sono molto sovrapponibili tra di loro, per cui si può concludere che i materiali offrono pressochè la stessa prestazione a fatica; inoltre il valore della deformazione ϵ a 10⁶ cicli di carico maggiore di 130 microstrain, requisito previsto per i conglomerati bituminosi ad alto modulo⁶, è pienamente soddisfatto dalle tre miscele.

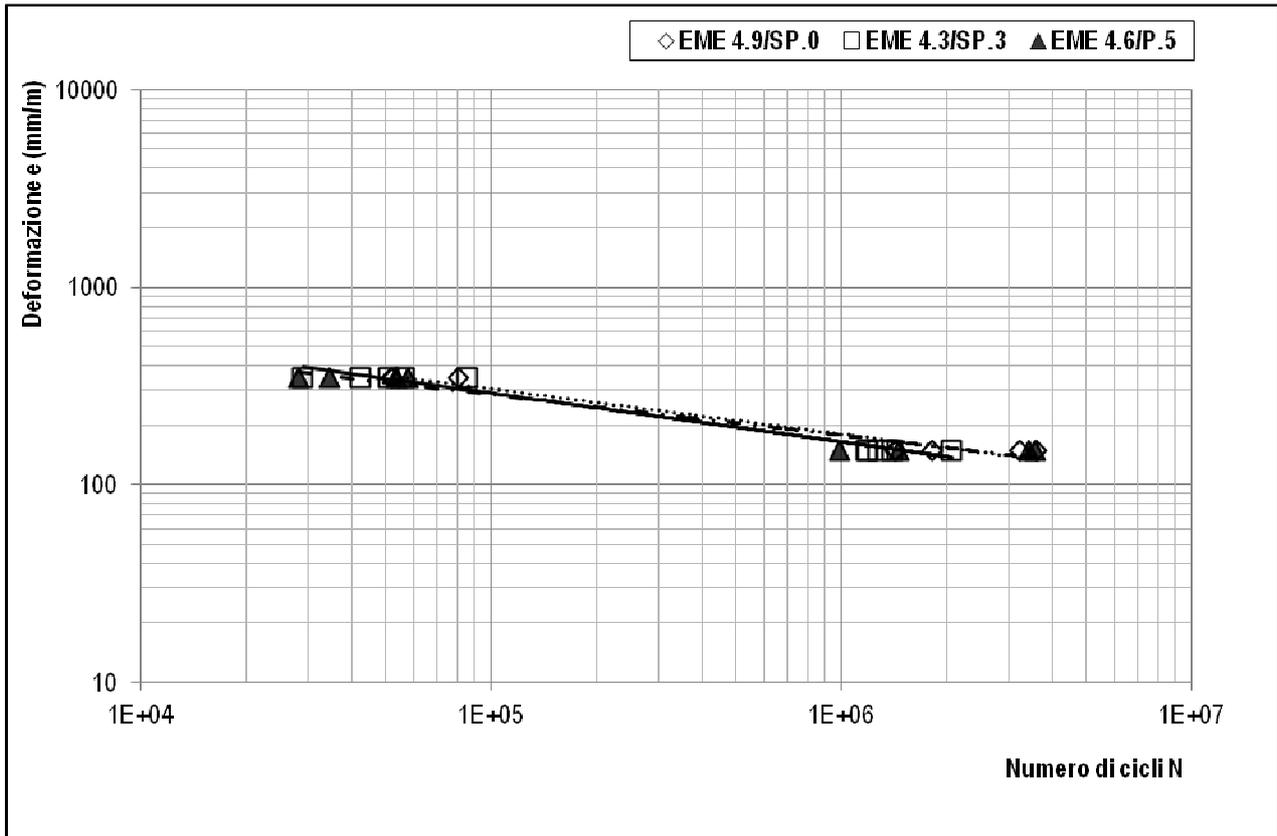


Figura 9. Rette di fatica

Tabella 15. Valori delle rette di fatica per le miscele studiate.

Miscela	A	B	R ²	e ₁₀ ⁶
EME 4.9/SP.0	4273.9	-0.229	0.9623	180.6
EME 4.3/SP.3	4987.8	-0.247	0.9704	164.4
EME 4.6/P.5	3093.4	-0.207	0.9505	177.2

5 CONCLUSIONI

Gli aspetti esaminati evidenziano buoni valori di stabilità e compattabilità per quanto riguarda le miscele ottimizzate e l'influenza positiva che ha l'additivazione su tali miscele nei confronti della resistenza all'accumulo di deformazione permanente, come dimostrato dalla prova di tenuta all'ormaiamento, anche agli alti dosaggi in legante.

Inoltre la presenza di additivi come il SuperPlast o le plastiche da riciclo consente l'impiego di bitumi meno duri (e di più facile reperibilità) di quelli tradizionalmente impiegati per queste formulazioni speciali e, come da prove di formulazione condotte, permette l'ottimizzazione della miscela a minori tenori in legante.

Con riferimento alle prestazioni meccaniche in termini di modulo complesso, l'additivazione con plastiche consente di ottenere valori maggiori del modulo complesso rispetto alla miscela tradizionale, senza additivo (nello specifico 35 % in più per quanto riguarda le miscele con SuperPlast e 45 % con plastiche da riciclo) ed offre prestazioni a fatica, paragonabili a quelle della miscela tradizionale, come nel caso della miscela con SuperPlast, o migliori, come nel caso della miscela con plastiche da riciclo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pasetto M., “Contributo dei bitumi ad alto modulo complesso nel miglioramento delle caratteristiche di portanza delle pavimentazioni stradali”, *Rassegna del bitume* n°30/98, 1998.
- [2] Maschietto M., Merlo F., “Alto modulo: un po’ di chiarezza”, *Rassegna del bitume* n°57/07, 2007.
- [3] Parracini G, Berni V., Panceri C., Imparato P., Bacchi M., “Riabilitazione della pista 17L/35R dell’aeroporto di Milano Malpensa”, *Strade e Autostrade* n°6/13, 2013.
- [4] NF P98-140. - *Enrobés hydrocarbonés – Couches d’assises: enrobés à module élevé (EME)* - Norme française, AFNOR, Saint Denis – Cedex (1999).
- [5] De Backer C., Denolf K., De Visscher J. et al. - *Enrobés à module élevé (EME): de la conception à la mise en oeuvre* - Compte rendu de recherche CR43/07, CCR, Bruxelles (2007).
- [6] Observatoire des Techniques de Chaussées. - *Les enrobés à module élevé. Note d’information* - S.E.T.R.A. Bagneux, Cedex (1997).
- [7] Brosseaud Y., “Les enrobés à module élevé: bilan de l’expérience de française et transfert de technologie”, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l’Aménagement et des Réseaux, IFSTTAR, 2012.
- [8] Celauro B., Giuffrè O., Di Francisca A. - *Indagine sperimentale su conglomerati bituminosi per strati di usura additi vati con plastiche da scarti* - *Strade & Autostrade* (6-2001).
- [9] Cominsky R. J., Huber G. A., T. W. Kennedy, Anderson M. - *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays* – Report SHRP-A-407, Strategic Highway Research Program – National Research Council - Washington, DC (1994).
- [10] Roberts, F.L., Kandhal, P.S. et al. - *Hot Mix Asphalt Materials, Mix Design, and Construction* - 2nd Ed. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland (1996).
- [11] Anas S.p.A - Capitolato speciale d’appalto: Norme tecniche - (2009).