



LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI MISCELE BITUMINOSE CONTENENTI POLIMERI DI ADDIZIONE

DA BITEM, CONFRONTO TRA MISCELE BITUMINOSE PRODOTTE CON BITUMI MODIFICATI CON SBS (METODO "WET") E PLASTOMERI ADDIZIONATI AL MESCOLATORE IN IMPIANTO (METODO "DRY")

Per far fronte a specifiche esigenze progettuali e per compensare la minor qualità dei bitumi tal quali oggi presenti sul mercato, l'utilizzo di polimeri a natura elastomerica e plastomerica consente di migliorare le proprietà meccaniche e di resistenza ai principali fenomeni di degrado delle miscele bituminose con essi prodotti.

L'aggiunzione dei polimeri, oltre che di eventuali additivi, può avvenire secondo due differenti tecnologie comunemente denominate "wet" e "dry".

Nella consolidata tecnologia "wet", i polimeri vengono miscelati direttamente col bitume tal quale, in un ambiente controllato (temperatura, energia di miscelazione, durata, dosaggi), ottenendo bitumi modificati (PMB-Polymer modified bitumen) di elevata qualità in termini di costanza produttiva e prestazioni finali. Tali bitumi sono garantiti da marcatura CE secondo la Norma UNI EN 14023. In tempi più recenti, in alternativa all'utilizzo dei PMB, si è rafforzata la possibilità di impiego di polimeri direttamente addizionati nell'impianto di produzione dei conglomerati bituminosi. In questo caso, i polimeri (principalmente plastomeri di polietilene e polipropilene) non vengono omogeneizzati con il bitume ma aggiunti direttamente nel mescolatore insieme agli aggregati e al bitume tal quale, sviluppando quindi differenti interazioni con la matrice bituminosa rispetto a un PMB.

Tale metodo, noto come tecnologia "dry", presenta alcune criticità riguardo alle prestazioni dei conglomerati bituminosi così prodotti, che risultano di più difficile valutazione rispetto a quel-

le delle miscele contenenti PMB. I controlli di qualità vengono, infatti, eseguiti esclusivamente sulle miscele finali e prevedono prove che non sempre rispecchiano le reali caratteristiche prestazionali e di durabilità delle miscele investigate.

IL PROGRAMMA SPERIMENTALE

Nell'ambito dello studio condotto presso il laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, sono state indagate due differenti miscele bituminose per strato di usura del tipo "splittmastix", realizzate in impianto e aventi medesima distribuzione granulometrica dello scheletro litico, identico dosaggio di fibre stabilizzanti ma prodotte con le due differenti tecnologie: un conglomerato bituminoso realizzato con bitume modificato con polimero SBS (Polyplast Hard-Petroli Firenze), di seguito denominato "wet", e un conglomerato bituminoso confezionato con bitume tal quale e compound plastomerico (Bitempoly Road), addizionato direttamente in impianto, di seguito denominato "dry".

Le principali caratteristiche compositive delle due miscele indagate sono sintetizzate nelle Figure 3 e 4.

LA CARATTERIZZAZIONE VOLUMETRICA

La valutazione delle caratteristiche di addensamento e volumetriche è stata condotta mediante prove di compattazione con tecnica giratoria (240 rotazioni), i cui principali risultati sono sintetizzati in Figura 5.

CARATTERISTICA ESSENZIALE	UNITÀ DI MISURA	NORMA DI RIFERIMENTO	VALORI DI RIFERIMENTO
Consistenza alle temperature intermedie di esercizio: penetrazione a 25 °C	0,1 mm	UNI EN 1426	45 - 80
Consistenza alle temperature elevate di esercizio: punto di rammollimento	°C	UNI EN 1427	≥ 70
Punto di rottura Fraass	°C	UNI EN 12593	≤ -18
Intervallo elastoplastico	°C	-	≥ 85
Coesione (Force ductility a 10 °C)	J/cm ²	UNI EN 13589	≥ 3
		UNI EN 13703	
Recupero di deformazione (ritorno elastico a 25°C)	%	UNI EN 13398	≥ 80
Durabilità: resistenza all'invecchiamento RTFOT	Penetrazione residua	%	≥ 60
	Incremento del punto di rammollimento	°C	≤ 5
	Variazione di massa	%	≤ 0,8
Infiammabilità	°C	EN ISO 2592	≥ 250

1. Le caratteristiche del bitume modificato

ASPETTO A 25 °C	DENSITÀ	PUNTO DI FUSIONE	MELT FLOW INDEX
Granuli di colore scuro	910-965 kg/cm ³	110-130 °C	0,52 g a 150 °C

2. Le caratteristiche dei plastomeri

	MISCELA "WET"	MISCELA "DRY"
Percentuale di legante (rispetto alla miscela) (EN 12697-39)	5,6	5,5
Percentuale di legante (rispetto agli aggregati) (EN 12697-39)	5,9	5,8
ρ_{mv} (Mg/m ³) (EN 12697-5)	2,537	2,541

3. La percentuale di legante e massa volumica massima (ρ_{mv}) delle miscele bituminose indagate

Si può osservare come a dieci rotazioni le due miscele presentino un contenuto medio dei vuoti piuttosto differente, sintomatico di una iniziale maggiore resistenza all'addensamento esibita dalla miscela realizzata con tecnologia "dry", probabilmente dovuta alla presenza del compound plastomerico e alla differente granulometria dello scheletro litico nell'intervallo 1-4 mm. Tuttavia, con il progredire del processo di compattazione entrambi i conglomerati bituminosi convergono a valori molto simili (sia a 120 che a 240 rotazioni).

LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

La resistenza alla rottura per trazione indiretta

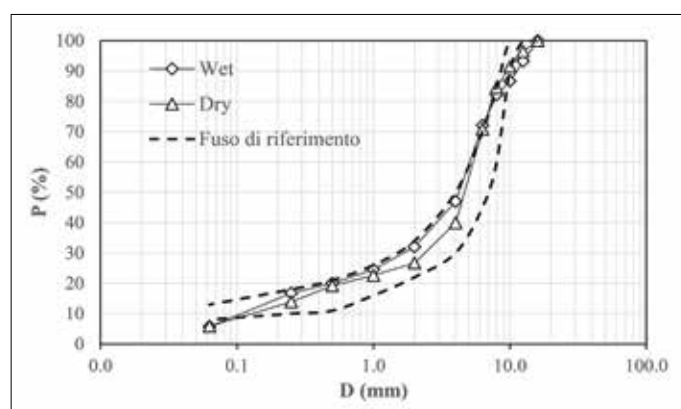
I campioni compattati con pressa giratoria sono stati sottoposti a prove atte a valutare la resistenza alla rottura per trazione indiretta (EN 12697-23).

Al fine di evidenziare ed esaltare le possibili differenze tra le due tecnologie, le prove sono state condotte in differenti condizioni di temperatura, addensamento, velocità di applicazione del carico e scenario di invecchiamento, breve e lungo termine (Figura 6).

I risultati ottenuti in termini di resistenza a trazione indiretta (RTI) e spostamento verticale a rottura (S_v) sono sintetizzati nelle Figure 7A e 7B.

Sulle miscele condizionate a breve termine, nella condizione di prova A si sono evidenziati valori di RTI e di S_v maggiori per le miscele realizzate con tecnologia "wet" rispetto a quelle "dry", che risultano, pertanto, caratterizzate da

una minore resistenza meccanica e da un comportamento apparentemente meno duttile. Il condizionamento a lungo termine (condizioni C e E) non ha, invece, prodotto sensibili variazioni di RTI tra le due miscele indagate e rispetto al condizionamento a breve termine (condizioni B e D).



4. La distribuzione granulometrica delle miscele bituminose indagate

	MISCELA "WET"	MISCELA "DRY"
v@10 rotazioni (%)	9,9	11,8
v@120 rotazioni (%)	3	3,2
v@240 rotazioni (%)	2	1,8
VMA@240 rotazioni (%)	15,5	15,3
VFB@240 rotazioni (%)	87,4	88

5. Le caratteristiche volumetriche e di addensamento dei campioni compattati con tecnica giratoria (valori medi su tre ripetizioni)

CONDIZIONE DI PROVA	TEMPERATURA (°C)	ADDENSAMENTO (%C) ⁽¹⁾	VELOCITÀ (MM/MIN)	SCENARIO DI INVECCHIAMENTO
A	25	100	50	Breve termine
B	10	98	50	Breve termine
C	10	98	50	Lungo termine (2)
D	10	98	12,5	Breve termine
E	10	98	12,5	Lungo termine (2)

6. Le condizioni di prova per la valutazione della resistenza alla rottura per trazione indiretta

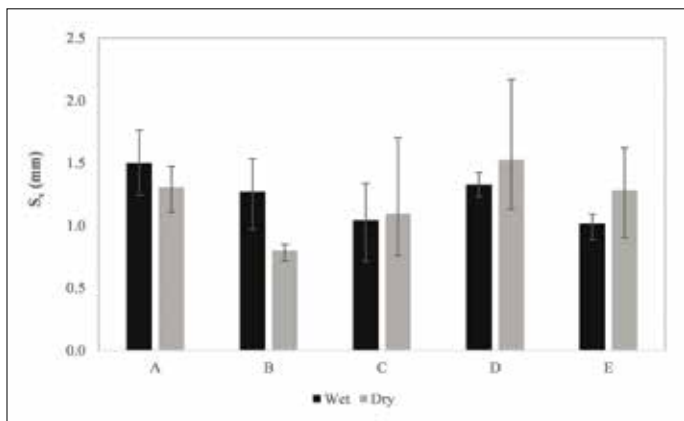
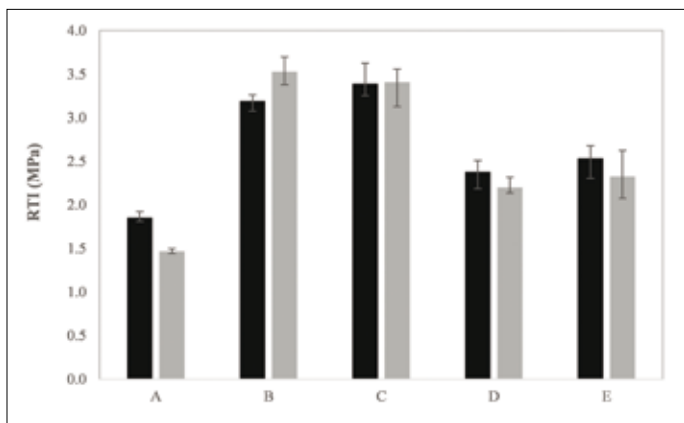
⁽¹⁾ riferito al valore ottenuto a 240 rotazioni;

⁽²⁾ la sua simulazione in laboratorio è stata condotta seguendo le indicazioni della Norma AASHTO R30, che prevede un invecchiamento accelerato condizionando i campioni compattati in stufa ventilata a 85 °C per 120 ore

Probabilmente, gli effetti dell'invecchiamento a lungo termine tendono a smussare le possibili differenze tra le diverse matrici leganti. I valori di S_v sembrano, invece, essersi leggermente ridotti in virtù della maggiore fragilità conseguente al processo di invecchiamento.

IL COMPORTAMENTO VISCOELASTICO LINEARE

Le proprietà viscoelastiche lineari sono state valutate mediante prove di modulo dinamico, eseguite a tre temperature (4 °C, 20 °C e 40 °C) e differenti frequenze di applicazione del carico (da 25 Hz a 0,1 Hz), effettuate su campioni realizzati mediante tecnica giratoria, successivamente carotati e tagliati per ottenere le dimensioni richieste dalla Norma AASHTO T378-17 (Figura 8).



7A e 7B. RTI e S_v delle miscele indagate nelle varie condizioni di prova (valori medi su tre ripetizioni)

Dall'analisi dei dati sperimentali (Figura 9) si può osservare come le miscele presentino rigidità simili, con valori di modulo dinamico leggermente più elevati per la tecnologia "dry" alle basse temperature ed elevate frequenze di carico. In Figura 9 sono altresì rappresentate le curve maestre del modulo dinamico modellate alla temperatura di riferimento di 20 °C.

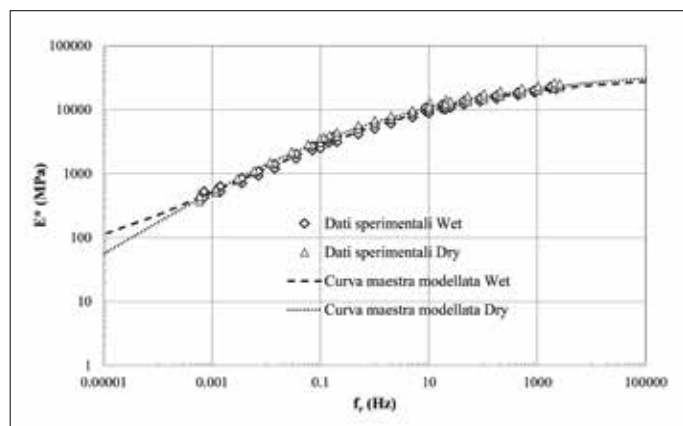
LA RESISTENZA ALLA ROTTURA PER FATICA

Il comportamento a rottura per fatica è stato valutato sottoponendo campioni delle due miscele, realizzati con tecnica giratoria a parità di energia di compattazione (50 rotazioni con conseguente percentuale dei vuoti dell'ordine del 6%), a un carico ripetuto assiale, in configurazione di trazione indiretta, sino al sopraggiungere della rottura (in accordo con la Norma EN 12697-24, Metodo E). Le prove sono state eseguite ad una temperatura di 10 °C, imponendo i medesimi livelli di sollecitazione di trazione al centro del campione (σ_0 , pari a 600, 750, 1.000 e 1.500 kPa) per entrambe le miscele bituminose indagate. In Figura 10 sono riportati i risultati desunti dalle prove effettuate in termini di deformazione iniziale di trazione al centro del campione (ϵ_0) e numero di cicli di sollecitazione del carico che hanno portato alla rottura del campione (N_f).

I dati così ottenuti, in accordo con la Norma EN 12697-24 e con quanto riportato in letteratura, consentono di derivare la



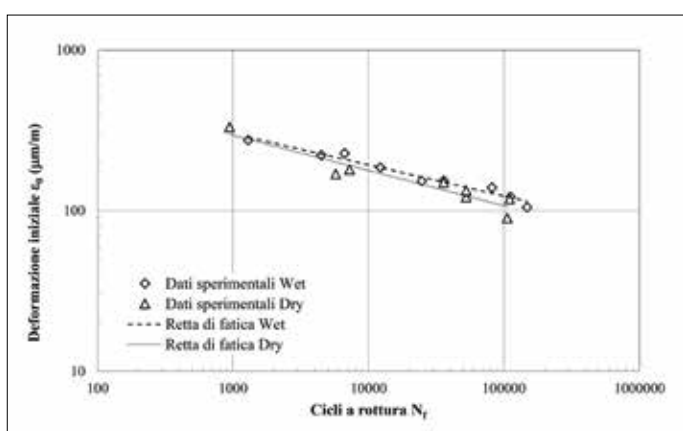
8. I campioni dopo carotaggio e taglio



9. Le curve maestre del modulo dinamico a 20 °C

SOLLECITAZIONE DI TRAZIONE	MISCELA "WET"		MISCELA "DRY"	
	σ_0 (kPa)	ε_0 (mm/m)	N_f	N_f
600	105	148.288	90	105.788
600	122	111.914	118	110.209
600	139	81.594	-	-
750	153	24.830	149	35.891
750	154	36.029	121	52.681
750	185	12.254	133	52.681
1.000	221	4.488	169	5.738
1.000	227	6.673	180	7.261
1.500	275	1.297	331	945

10. I risultati desunti dalle prove di fatica



11. Le rette di fatica delle miscele bituminose indagate

cosiddetta retta di fatica (Figura 11), che può essere matematicamente descritta dalla equazione seguente:

$$N_f = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^n \quad (1)$$

dove:

N_f = numero di cicli di sollecitazione che porta alla rottura per fatica la miscela bituminosa;

ε_0 = deformazione iniziale di trazione;

k e n = costanti di regressione dipendenti dalle caratteristiche del materiale (Figura 12).

Si può notare come per alte deformazioni iniziali il comportamento delle due miscele bituminose analizzate risulta essere simile ma, al decrescere del livello deformativo, i due comportamenti a rottura per fatica tendono a divergere. Confrontando il valore della deformazione iniziale che porta ad un numero di cicli a rottura pari a 10^6 , parametro tipico utilizzato in letteratura per confrontare i materiali a matrice bituminosa nei confronti del fenomeno della fatica, si osserva che per la miscela realizzata con tecnologia "wet" esso è pari a $77 \mu\text{m/m}$ mentre si riduce a $59 \mu\text{m/m}$ nel caso della tecnologia "dry". Tale riduzione delle prestazioni a fatica può essere associata alla differente resistenza alla rottura per fatica offerta dalla fase legante.

Le differenze risultano più evidenti se, adottando le costanti di regressione definite in Figura 12 e la relazione riportata nell'equazione 1, si effettua la previsione dei cicli di rottura per fatica a differenti livelli di deformazione iniziale (Figura 13).

MISCELA	k	n
Wet	2,45E+15	4,98
Dry	2,00E+13	4,12

12. Le costanti di regressione della retta di fatica

ε_0 ($\mu\text{m/m}$)	N_f	
	MISCELA "WET"	MISCELA "DRY"
50	8.468.992	1.996.732
100	268.376	114.781
150	35.631	21.590

13. I cicli a rottura per fatica N_f per differenti livelli di deformazione iniziale ε_0

Si può notare come la tecnologia "wet" rispetto alla "dry" sembri influenzare positivamente il comportamento a rottura per fatica, con un aumento generale del numero di cicli a rottura. Tale differenza risulta molto spiccata per bassi livelli deformativi iniziali.

CONCLUSIONI

I soli risultati delle prove di resistenza alla rottura per trazione indiretta sembrano non essere pienamente in grado di discriminare in maniera esauriente le differenze di comportamento imputabili alla diversa matrice legante adottata per le due miscele indagate. I risultati ottenuti dalle prove di modulo dinamico hanno evidenziato ridotte differenze di comportamento, con la miscela realizzata con tecnologia "dry" che ha mostrato, rispetto alla miscela "wet", rigidità maggiori alle basse temperature ed alte frequenze di carico.

Il comportamento a rottura per fatica, desunto dalle prove a carico ripetuto effettuate in configurazione di trazione indiretta, ha messo in evidenza una differente attitudine per le due miscele indagate. Il conglomerato bituminoso realizzato con tecnologia "wet" sembra poter offrire prestazioni migliori, con una durata a fatica, nelle medesime condizioni di carico e temperatura, che pare essere più estesa rispetto alla miscela realizzata con tecnologia "dry".

Da quanto sopra riportato si può concludere che non sempre le prove di caratterizzazione tradizionale (quali le prove di resistenza a trazione indiretta), riportate nelle principali Norme tecniche di Capolavoro italiane, sembrano essere adatte a valorizzare le differenze di comportamento tra le due tecnologie indagate.

Nel presente studio, in particolare, non consentono di discriminare in maniera efficace le reali potenzialità del processo "wet" rispetto a quello "dry", come invece si è potuto fare adottando approcci sperimentali di tipo prestazionale (come le prove atte a valutare la resistenza alla rottura per fatica). ■

⁽¹⁾ Professore Associato del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture presso il Politecnico di Torino

⁽²⁾ Ingegnere, Responsabile laboratorio, Qualità e Ricerca & Sviluppo di Bitem Srl

⁽³⁾ Ingegnere, Responsabile Produzione PmB di Petroli Firenze SpA