

ANALISI PRESTAZIONALE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI CONTENENTI TRITURATO DI MEMBRANA IMPERMEABILIZZANTE RICICLATA

TRAMITE UN ACCURATO PROCESSO INDUSTRIALE, È POSSIBILE OTTENERE UN TRITURATO DI MEMBRANE BITUMINOSE IMPERMEABILIZZANTI ADATTO AD UN POTENZIALE UTILIZZO IN CONGLOMERATI BITUMINOSI STRADALI. L'ARTICOLO PRESENTA I PROMETTENTI RISULTATI DAL PUNTO DI VISTA PRESTAZIONALE

Le membrane bituminose bitume-polimero sono state concepite principalmente per scopi di impermeabilizzazione, aspetto fondamentale per poter allungare la vita utile di servizio di elementi strutturali [1 e 2]: sono in genere costituite da una successione di strati e precisamente una parte strutturale (tessuto-non-tessuto e/o rete di rinforzo in fibra di varia natura) che viene impregnata in un mastice composto da legante bituminoso altamente modificato e filler (Figura 1).

I polimeri contenuti nella mescola bitume-polimero variano in termini di tipologia e dosaggio sulla base del loro utilizzo: membrane prodotte con polimeri del tipo Stirene-Butadiene-Stirene (SBS) sono più adatte alle basse temperature di esercizio, mentre quelle prodotte con polimeri del tipo Polipropilene Attattico (APP) sono più adatte per condizioni di servizio ad alte temperature [3].

Con la prospettiva di incentivare scelte tecnologiche sostenibili, per il possibile riutilizzo di tali prodotti sono stati sviluppati nuovi processi industriali che permettono l'ottenimento di un triturato adatto al riutilizzo in diversi cicli produttivi. Proprio per la sua natura compositiva, il triturato di membrana impermeabilizzante riciclata rappresenta un valido elemento di sostenibilità dei conglomerati bituminosi stradali, in particolare per il significativo apporto di legante bituminoso di recupero [4].

La tecnologia del riciclaggio delle membrane impermeabilizzanti nei conglomerati bituminosi risulta già ampiamente diffusa negli stati del Nord America, i quali si attengono a specifiche AASHTO come linee guida per il loro utilizzo. In altri termini, il riciclaggio di membrana impermeabilizzante viene trattato alla stessa stregua del granulato di conglomerato bituminoso (fresato), il cui uso è ormai consolidato. Diversi campi prova hanno valutato l'immissione di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata fino al 5%, restituendo risultati analoghi a quelli di pavimentazioni tradizionali [5].

Ovviamente, il Produttore di conglomerato bituminoso dovrà provvedere ad eseguire tutti i controlli necessari sia sul materiale di riciclo utilizzato sia sul conglomerato bituminoso confezionato, assicurandosi che vengano rispettati tutti i requisiti richiesti. I risultati presentati in questo articolo rappresentano la seconda fase di un più complesso e ampio studio che ha riguardato una prima caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi contenenti triturato di membrana impermeabilizzante riciclata, presentata su "Strade & Autostrade" n° 162 di Novembre/Dicembre 2023 a pag. 112.

Di seguito, viene riportata una omologa analisi prestazionale di conglomerati bituminosi confezionati con differenti bitumi di partenza, additivati con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata. Anche in questo caso, lo studio è stato esteso a due tipi di membrane, caratterizzate da diversi tipi di polimeri nella mescola bitume/polimero (SBS e APP).



1. Applicazione di una membrana bituminosa

REQUISITO	METODO	U.M.	VALORE		
			SABBIA	GRANIGLIA BASALTICA	
Dimensioni dell'aggregato	UNI EN 933-1	mm	0/4	4/8	10/16
Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8	%	82	-	-
Massa volumica delle particelle	UNI EN 1097-6	Mg/m ³	2.668	2.790	2.750
Percentuale di superfici frantumate	UNI EN 933-5	%	-	100	100
Forma dell'aggregato grosso - Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	-	-	14	13
Resistenza alla frammentazione dell'aggregato grosso	UNI EN 1097-2	%	-	18	16
Resistenza alla levigazione dell'aggregato grosso	UNI EN 1097-8	-	-	50	52
Resistenza al gelo e disgelo	UNI EN 1367-1	%	-	< 1	< 1

REQUISITO	METODO	U.M.	VALORE
Dimensioni dell'aggregato	UNI EN 933-1	mm	0/8
Percentuale di bitume sugli aggregati	UNI EN 12697-1	%	5.2
Percentuale di bitume sulla miscela	UNI EN 12697-1	%	5.0

REQUISITO	METODO	U.M.	70/100	PMB 45/80-70	PMB 25/55-70
Penetrazione a 25 °C	UNI EN 1426	dmm	83	48	35
Punto di Rammollimento	UNI EN 1427	° C	46.4	73.2	72.6
Viscosità dinamica a 160 °C	UNI EN 13302	Pa · s	0.090	0.490	0.625
Ritorno elastico	UNI EN 13398	%	-	83.5	87.5
Performance Grade	ASTM D6373	-	58-22	76-22	82-16

2A, 2B e 3. Caratteristiche degli inerti naturali (2A), del fresato utilizzato (2B) e dei leganti bituminosi utilizzati (3)

MATERIALI E PROGRAMMA SPERIMENTALE

Le materie prime

Il programma sperimentale ha valutato l'utilizzo di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata per il confezionamento di conglomerati bituminosi per strati di usura tipo A in accordo alle Capitolato Speciale d'Appalto - Norme Tecniche ANAS SpA. Dunque sono stati utilizzati aggregati naturali, ovvero una sabbia calcarea, graniglie basaltiche e granulato di conglomerato bituminoso le cui caratteristiche sono riportate nelle Figure 2A e 2B. Sono stati selezionati tre bitumi di comune utilizzo: un bitume 70/100, un bitume modificato Hard PmB 45/80-70 e un bitume alto modulo PmB 25/55-70 (Figura 3).

Le miscele studiate sono state progettate prevedendo l'impiego di granulato di conglomerato bituminoso in accordo alle citate Norme tecniche, ovvero in misura pari al 15% per strati di usura. Altresì, è stato previsto l'utilizzo di un additivo chimico funzionale (ACF) in misura del 3% sulla massa del bitume di recupero (in questo caso sommando i contributi dei due granulati utilizzati, Figura 5).

Sono state utilizzate membrane di risulta derivanti da rimozioni di impermeabilizzazioni di vecchie opere civili in fase di manutenzione/demolizione, selezionate me-

dante preventive indagini FT-IR che ne hanno definito la tipologia di modifica (SBS, APP), adeguatamente granulate con specifici processi industriali al fine di ottimizzarne il riutilizzo (Figure 4A e 4B).

Le due tipologie di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata sono state inizialmente analizzate in termini di contenuto di bitume residuo, risultato mediamente paria 50,8% per triturato con polimeri SBS e 48,7% per triturato con

polimeri APP: la restante aliquota è da considerarsi relativa a filler ed elementi di rinforzo (tessuto-non-tessuto e/o fibra di varia natura).

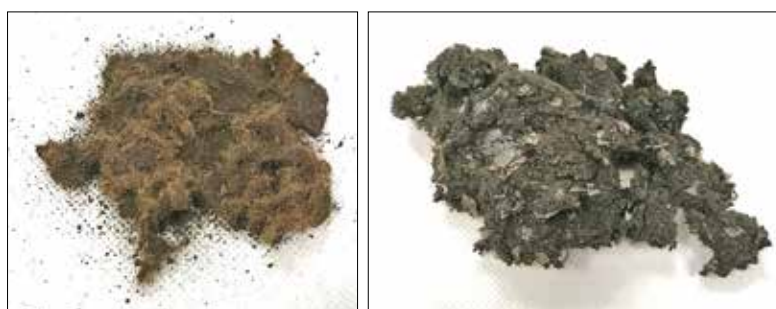
I conglomerati bituminosi

I conglomerati bituminosi analizzati sono strati di usura tipo A, conformi ai requisiti compositivi delle Norme tecniche citate. In particolare la distribuzione granulometrica di riferimento è stata composta dal 33% di sabbia, 29% di graniglia basaltica 4/8, 19% di graniglia

basaltica 10/16, 15% di granulato di conglomerato bituminoso 0/8 e dal 4% di filler d'integrazione.

In totale sono stati confezionati cinque conglomerati bituminosi contenenti rispettivamente bitumi 70/100, PmB 45/80-70, PmB 25/55-70, PmB 45/80-70 con aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP e 70/100 con aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS.

Il confronto delle miscele prodotte con bitumi 70/100, 70/100 con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS e PmB 45/80-70 ha evidenziato il potenziale contributo conferito dal triturato contenente polimeri SBS ad un bitume non



4A e 4B. Triturato di membrane bituminose APP (4A) ed SBS (4B)

LEGANTE	% BITUME RIFERITO AL CONGLOMERATO BITUMINOSO			
	VERGINE	FRESATO	GUAINA	TOTALE
70/100	4,54	0,72	0,49 ⁽¹⁾	5,26
PmB 45/80-70				
PmB 25/55-70				
PmB 45/80-70 + APP	4,05	0,72	0,49 ⁽¹⁾	5,26
70/100 + SBS	3,73		0,81 ⁽²⁾	

⁽¹⁾ Il valore mostrato è relativo ad un dosaggio di triturato di guaina APP pari al 1.0% sulla massa del conglomerato bituminoso

⁽²⁾ Il valore mostrato è relativo ad un dosaggio di triturato di guaina SBS pari al 1.6% sulla massa del conglomerato bituminoso

5. Composizione del dosaggio di bitume totale nei conglomerati bituminosi prodotti

modificato, accostando i risultati a quelli di un tradizionale bitume PmB 45/80-70.

Allo stesso tempo, ponendo a confronto le miscele prodotte con bitumi PmB 45/80-70, PmB 45/80-70 con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP e PmB 25/55-70, si è voluto approfondire il potenziale effetto dei polimeri APP apportati dal triturato ad un bitume PmB 45/80-70, accostando i risultati a quelli di un bitume "alto modulo" PmB 25/55-70.

Il dosaggio di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata è stato determinato attraverso un protocollo sperimentale rivolto alla reologia dei leganti bituminosi (si veda "Strade & Autostrade" n° 162 di Novembre/Dicembre 2023 a pag. 112), riportato, assieme al contributo del bitume di apporto del fresato e del bitume vergine, in Figura 5. È possibile osservare che l'utilizzo di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata nei dosaggi indicati consente una riduzione del legante vergine compreso tra lo 0,5% e lo 0,8% sulla massa del conglomerato bituminoso. Le miscele oggetto di studio sono state prodotte in laboratorio tramite miscelatore ad asse orizzontale con capienza massima di 20-25 kg. Gli aggregati e il filler, asciugati in forno a 180 °C fino al raggiungimento di massa costante, sono stati introdotti nel miscelatore riscaldato anch'esso alla stessa temperatura.

Gli aggregati sono stati quindi mescolati fino ad ottenere un assortimento granulometrico omogeneo. A questo punto, ove previsto, è stata inserita in prima fase il triturato di membrana bituminosa riciclata e granulato di asfalto fino a miscelazione completa (Figura 6).



6. Vista del conglomerato dopo aggiunta di guaina

Successivamente, è stato inserito il quantitativo di bitume e di filler ipotizzati, procedendo alla miscelazione con controllo di temperatura (170 °C) fino a completa e uniforme distribuzione del legante. Una volta raggiunta una temperatura omogenea di 150 °C, i conglomerati bituminosi sono stati compattati tramite pressa a taglio giratoria.

Il programma sperimentale

I cinque conglomerati bituminosi prodotti in laboratorio sono stati sottoposti a prove di rigidità e resistenza in accordo al programma sperimentale riassunto in Figura 7.

Le miscele oggetto di studio sono state sottoposte a prove di trazione indiretta in accordo alla UNI EN 12697-23, utilizzando una pressa statica a velocità di deformazione imposta con misurazione in continuo di carico e deformazione verticale (Figura 8A).

Tale prova ha inoltre avuto lo scopo di investigare la predisposizione del conglomerato bituminoso analizzato alla propagazione di fessure (ASTM D8225-19). La Norma definisce come "Cracking Tolerance Index" (CTIndex) la capacità del materiale di sopportare le deformazioni imposte (duttilità) e opporsi alla propagazione delle fessure una volta raggiunta la rottura: più è alto tale indice maggiore sarà la duttilità del conglomerato post-rottura. Esso è definito come (Figura 9):

$$CT_{Index} = \frac{h}{62} \cdot \frac{G_f}{|m_{75}|} \cdot \frac{s_{75}}{D} \quad (1)$$

dove:

h = altezza del provino;

G_f = energia di frattura, ovvero il rapporto tra l'area sottesa alla curva forza-spostamento e la sezione del provino (D · h);

m₇₅ = pendenza della curva nel punto in cui il carico è al 75% del valore di picco;

PROVA	TEMPERATURA	NORMA DI RIFERIMENTO
Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi + Cracking Tolerance Index ⁽¹⁾	25 °C	UNI EN 12697-23 ASTM D8225-19
Modulo di rigidità per trazione indiretta ⁽²⁾	(20; 40) °C	UNI EN 12697-26 Appendice C
Modulo complesso (trazione/compressione) ⁽³⁾	(0; 10; 20; 30; 40; 50) °C	UNI EN 12697-26 Appendice D

⁽¹⁾ Prova eseguita su provini di diametro Φ150 compattati in accordo alla UNI EN 12697-31 a N = 230 giri

⁽²⁾ Prova eseguita su provini di diametro Φ150 compattati in accordo alla UNI EN 12697-31 a N = 140 giri

⁽³⁾ Prova eseguita su provini di diametro Φ100 carotati e rettificati da provini di diametro Φ150 compattati in accordo alla UNI EN 12697-31 a N = 140 giri

7. Programma sperimentale svolto



8A e 8B. Attrezzatura utilizzata per le prove di resistenza e di modulo a trazione indiretta

s_{75} = spostamento relativo al 75% del valore di picco della forza post-rottura;

D = diametro del provino.

Le prove di modulo per trazione indiretta sono state eseguite secondo la UNI EN 12697-26 Appendice C su provini cilindrici con diametro 150 mm alle temperature di 20 °C e 40 °C (Figura 8B). Un conglomerato bituminoso soggetto a carico sinusoidale (o oscillatorio) a diverse frequenze e temperature può essere considerato come un materiale visco-elastico lineare. Questo è generalmente valido fintanto che le sollecitazioni imposte siano contenute nel dominio lineare e non causino deformazioni permanenti o danneggiamento del materiale. La principale caratteristica dei materiali visco-elastici è la dipendenza delle caratteristiche meccaniche dalla temperatura e frequenza di esercizio: il modulo di rigidità tende ad aumentare all'aumentare della frequenza e al diminuire della temperatura, mentre l'angolo di fase ϕ , ovvero lo sfasamento temporale tra sollecitazione e deformazione, subisce un andamento opposto. Oltre al ruolo meccanico-reologico relativo allo sfasamento, l'angolo di fase rappresenta anche la scomposizione del valore di modulo complesso nelle sue componenti reale E_1 (o modulo statico) ed immaginaria E_2 (o modulo viscoso), secondo l'equazione seguente:

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (2)$$

Di conseguenza, durante una misurazione di modulo complesso, per ogni coppia di valori $|E^*|$ e ϕ , è possibile ricavare i relativi valori di E_1 ed E_2 i quali possono essere rappresentati nel piano Cole-Cole e nel piano di Black. Nel caso in cui nei due piani appena descritti i punti sperimentali seguano una curva continua si può ritenere valido il Principio di Sovrapposizione Tempo-Temperatura (TTSP), il quale determina la possibilità di ottenere una curva maestra ad una temperatura di riferimento tramite la definizione di fattori di traslazione aT (o shift factor) delle singole isoterme.

La curva maestra è valida solo per la temperatura di riferimento a cui si riferisce e gli stessi shift factors vengono applicati ai valori di modulo e ai valori di angolo di fase. Per poter invece mettere a confronto diversi materiali e trascurare la variabilità dei singoli punti sperimentali misurati durante la prova, si rende necessario applicare dei modelli reologici che sappiano descrivere le caratteristiche intrinseche del materiale tramite la definizione di

precisi parametri. Ad oggi, il modello reologico più avanzato e affidabile, utilizzato per miscele di conglomerato bituminoso, è definito come 2S2P1D (due Springs, due Parabolic elements, un Dashpot) ed è composto da due molle, due elementi parabolici ed un dissipatore viscoso (Figura 10) [6].

Il modello 2S2P1D permette di descrivere la rigidità intrinseca del materiale nell'intero campo di frequenze ad una temperatura di riferimento tramite la definizione di 7 parametri costituenti la legge che lo determina:

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_{\infty} - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (3)$$

I parametri E_{∞} , E_{00} , δ , k , h , β e τ_E descrivono completamente il materiale investigato tenendo in considerazione la composizione della miscela, l'invecchiamento del materiale, la temperatura, la frequenza, ecc.. È importante sottolineare che le costanti E_{00} ed E_{∞} sono strettamente correlate allo scheletro solido della miscela, cioè caratteristiche degli aggregati, granulometria e contenuto di vuoti. Al contrario i parametri δ , k , h e β sono legati al bitume utilizzato nella miscela.

Le prove sono state eseguite in configurazione di trazione/compressione, a sei temperature (0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C e 50 °C) e a cinque frequenze (0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz) (Figura 11).

A valle delle prove sperimentali ed eseguito il processo di modellazione, si è proceduto con il confronto delle curve maestre in tutto l'intervallo di frequenze analizzato. Più in dettaglio, si è innanzitutto scelto il modello della curva maestra del conglomerato bituminoso di riferimento e successivamente si è calcolato lo scostamento in percentuale $\text{dev}|E^*|$ e in valore assoluto dell'angolo di fase $\text{dev}(\phi)$ della curva maestra del materiale da confrontare per ogni frequenza ridotta:

$$\text{dev}|E^*| = \frac{|E^*|_{\text{analisi}} - |E^*|_{\text{RIF}}}{|E^*|_{\text{RIF}}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\text{dev}(\phi) = \phi_{\text{analisi}} - \phi_{\text{RIF}} \quad (5)$$

dove:

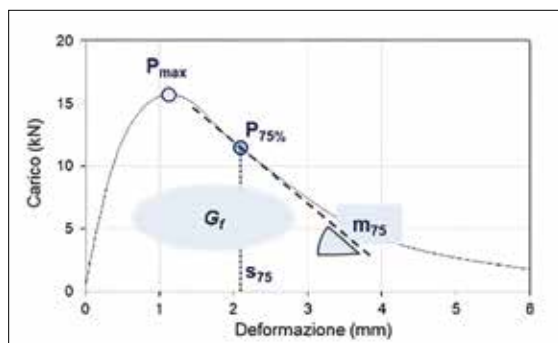
$|E^*|_{\text{analisi}}$ e ϕ_{analisi} = modulo complesso e l'angolo di fase del materiale da analizzare alla frequenza ridotta f ; $|E^*|_{\text{RIF}}$ e ϕ_{RIF} = modulo complesso e l'angolo di fase del materiale di riferimento alla frequenza ridotta f .

I RISULTATI SPERIMENTALI

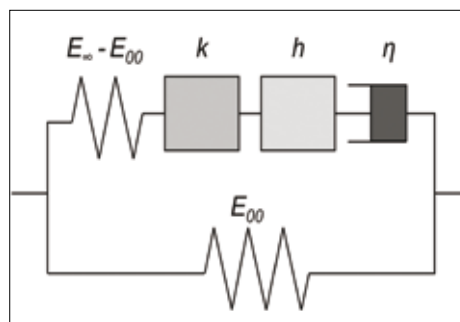
Determinazione della resistenza a trazione indiretta

Le Figure 12A e 12B mostrano le risultanze sperimentali delle prove di resistenza per trazione indiretta, analizzando separatamente il contributo del triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente polimeri SBS (Figura 12A) e APP (Figura 12B): si riportano i valori di Resistenza a Trazione Indiretta (R_{ti}), Coefficiente di Trazione Indiretta (CTI) e Cracking Tolerance Index (CTIndex), con indicazione della dispersione dei dati.

L'utilizzo di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente polimeri SBS non influenza in maniera sensibile la resistenza R_{ti} , che varia tra 1,4 e 1,5 MPa per tutte le miscele indagate. Altresì, in termini di CTI, non si riscontra differenza tra i conglomerati contenenti bitume 70/100 prodotti con e senza



9. Rappresentazione grafica dei parametri relativi al CTIndex



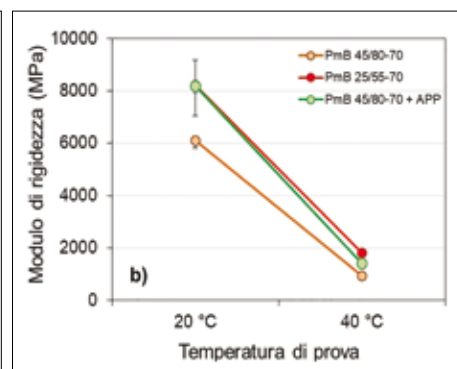
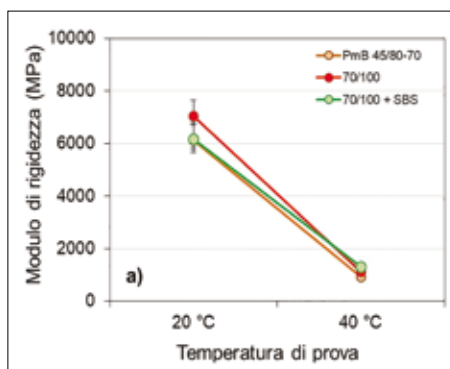
10. Rappresentazione del modello 2S2P1D



11. Configurazione in trazione/compressione per le prove di modulo complesso

triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS, mentre l'utilizzo di bitume modificato PmB 45/80-70 comporta una riduzione del valore rilevato. I risultati relativi alla propagazione di fessure post-rottura mostrano una migliore prestazione del bitume modificato PmB 45/80-70, il quale è caratterizzato da un comportamento sensibilmente più performante rispetto le altre due miscele prodotte con bitume di base 70/100 che invece mostrano valori comparabili tra loro.

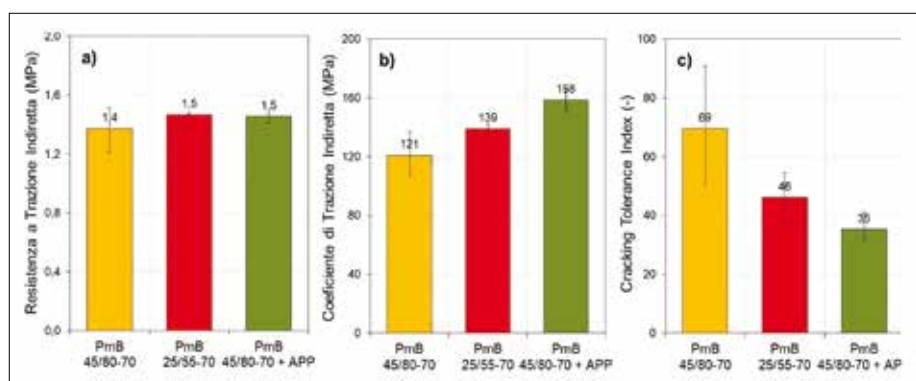
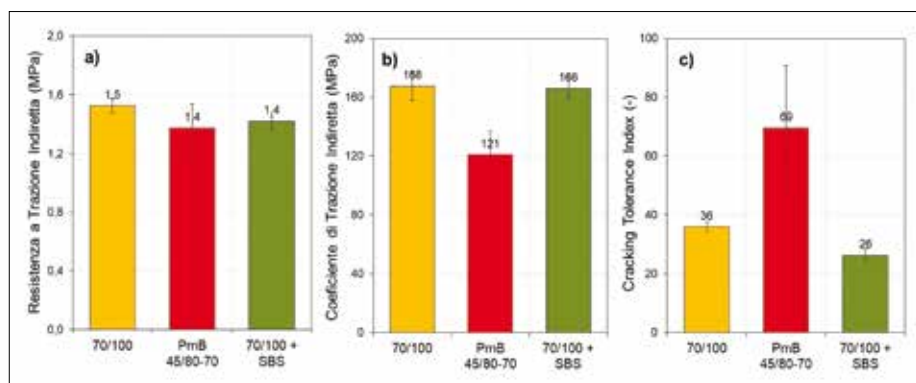
L'utilizzo di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente polimeri APP non evidenzia un chiaro contributo in termini di resistenza R_{IT} , la quale anche in



13A e 13B. Moduli di rigidezza delle miscele investigate

questo caso varia tra 1,4 e 1,5 MPa. In termini di CTI, l'aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente

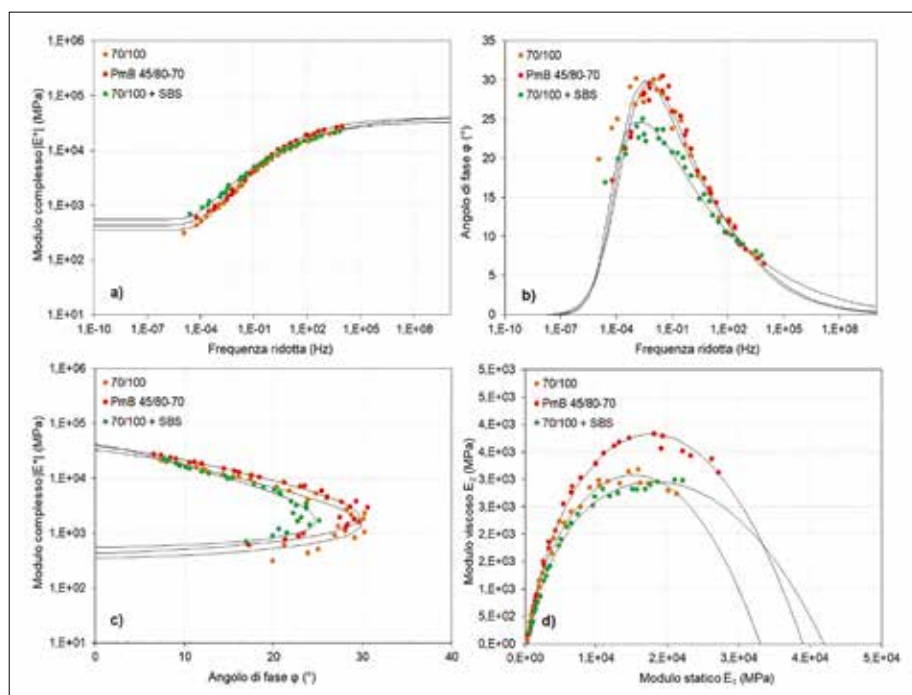
APP comporta un aumento del valore rilevato rispetto al bitume modificato PmB 45/80-70, superando allo stesso tempo il valore relativo al bitume modificato PmB 25/55-70. I risultati inerenti alla propagazione di fessure post-rottura mostrano una migliore prestazione del bitume modificato PmB 45/80-70: l'aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP comporta una riduzione significativa del dato rilevato.



12A e 12B. Risultati relativi ad utilizzo di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente polimeri SBS (12A) polimeri APP (12B)

Modulo di rigidezza per trazione indiretta

I risultati relativi alle prove di modulo di rigidezza per trazione indiretta sono illustrati nelle Figure 13A e 13B. I valori riportati con relative barre di dispersione si riferiscono alla media di misure eseguite su tre provini. In Figura 13A vengono confrontate le miscele relative all'aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS: i dati riscontrati a 40 °C non evidenziano particolari differenze fra le tre miscele investigate, mentre a 20 °C si registra un valore più alto per il conglomerato confezionato con bitume 70/100 a fronte di valori più bassi, ma prossimi

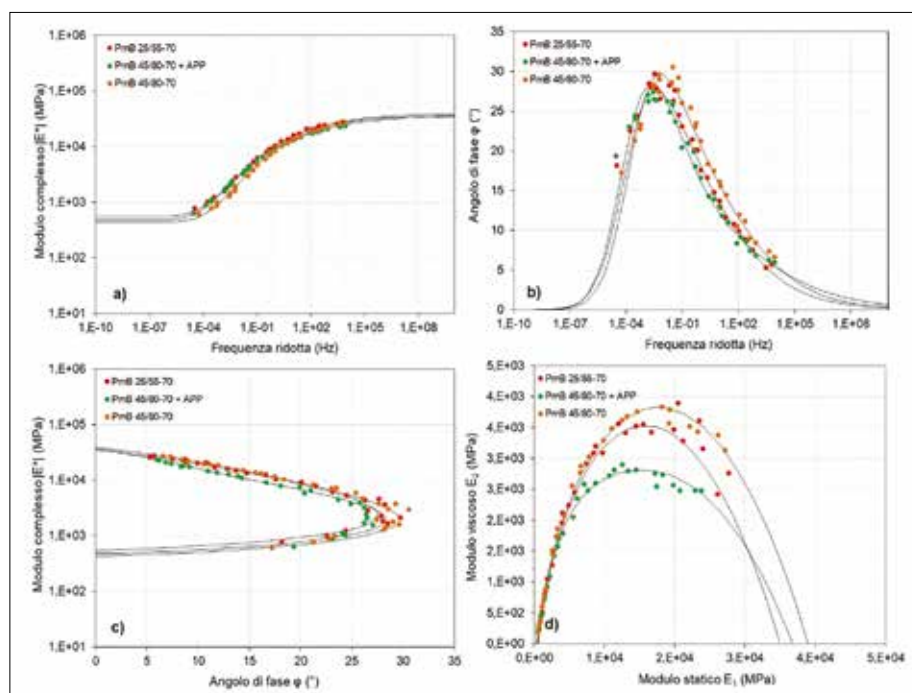


14. Risultati di modulo complesso con applicazione di modello 2S2P1D di miscele con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS ($T_{REF} = 20\text{ °C}$): a) curva maestra del valore di modulo; b) curva maestra dell'angolo di fase; c) Piano di Black; d) Piano Cole-Cole

tra loro, per gli altri due conglomerati prodotti con bitume PmB 45/80-70 e bitume 70/100 con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS.

In Figura 13B vengono confrontate le miscele relative all'aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente

del modulo di rigidezza e dell'angolo di fase, il piano di Black e il piano Cole-Cole. Contestualmente, viene anche mostrato il modello 2S2P1D calibrato con i dati sperimentali, il quale caratterizza con buona approssimazione il comportamento reologico dei materiali analizzati (valori in Figura 16).



15. Risultati di modulo complesso con applicazione di modello 2S2P1D di miscele con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP ($T_{REF} = 20\text{ °C}$): a) curva maestra del valore di modulo; b) curva maestra dell'angolo di fase; c) Piano di Black; d) Piano Cole-Cole

APP: i dati riscontrati a 40 °C registrano un valore più alto per le miscele con bitume alto modulo PmB 25/55-70, seguito dalle miscele prodotte con la combinazione di bitume PmB 45/80-70 e triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP e infine con bitume PmB 45/80-70.

I dati relativi alla misura eseguita a 20 °C evidenziano un valore più basso per il conglomerato confezionato con bitume PmB 45/80-70 a fronte di valori superiori e prossimi tra loro degli altri due conglomerati con bitume PmB 25/55-70 e bitume PmB 45/80-70 con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP.

Modulo complesso (trazione/compressione)

I risultati relativi alle prove di modulo complesso vengono mostrati in Figura 14 (relativamente a prove con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS) e in Figura 15 (relativamente a prova con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP). I risultati mostrati comprendono le curve maestre

In generale è possibile confermare che l'introduzione di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata ha un evidente influenza rispetto alle omologhe miscele senza triturato. In particolare, i valori asintotici di rigidezza sono più elevati in caso di utilizzo di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata, così come i parametri relativi alla dissipazione viscosa delle sollecitazioni risultano inferiori. Questo aspetto è ulteriormente visibile con l'analisi dei valori di modulo viscoso E_2 riscontrabili dai piani Cole-Cole.

Al fine di poter paragonare i conglomerati contenenti triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS e APP ai conglomerati contenenti rispettivamente bitumi PmB 45/80-70 e PmB 25/55-70, vengono applicate le relazioni di confronto espresse dalle equazioni (4) e (5). Le analisi vengono mostrate in Figure 17A, 17B, 18A e 18B, dove gli assi delle ascisse posizionati a 0% e 0° di deviazione del modulo complesso e dell'angolo di fase rappresentano i materiali presi a riferimento (ovvero il conglomerato con bitume 70/100

		E_{00}	E_{∞}	K	H	δ	τ_E	β
		(GPa)	(GPa)	(-)	(-)	(-)	(S)	(-)
SBS	70/100	350	33000	0.225	0.563	3.7	0.27	150
	70/100 + SBS	550	42000	0.165	0.440	3.0	0.08	400
	PmB 45/80-70	430	39000	0.232	0.560	3.3	0.21	400
APP	PmB 45/80-70 + APP	480	36800	0.180	0.530	3.0	0.38	400
	PmB 25/55-70	550	35000	0.235	0.550	3.0	0.6	400

16. Parametri modello 2S2P1D

nelle Figure 17A e 17B e quello con bitume PmB 45/80-70 nelle Figure 18A e 18B).

Il conglomerato bituminoso prodotto con bitume modificato PmB 45/80-70 risulta generalmente più rigido rispetto a quello prodotto con bitume 70/100 in tutto il range di frequenze, mentre l'angolo di fase si discosta lievemente in valori compresi tra $\pm 2^\circ$. L'aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS conferisce un comportamento sensibilmente differente, mostrando un marcato aumento di rigidità alle basse frequenze/alte temperature e una diminuzione di rigidità alle alte frequenze/basse temperature. Allo stesso modo, anche l'angolo di fase è caratterizzato da un andamento differente rispetto alla miscela prodotta con bitume PmB 45/80-70, mostrando inoltre una variazione maggiore.

L'aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP al bitume modificato PmB 45/80-70 causa un aumento di rigidità alle basse frequenze/alte temperature e una diminuzione di rigidità alle alte frequenze/basse temperature, aspetto che però risulta caratteristico anche del bitume modificato PmB 25/55-70, rendendo quindi i risultati comparabili. La corrispondenza reologica è riscontrabile anche dal confronto eseguito sui valori dell'angolo di fase.

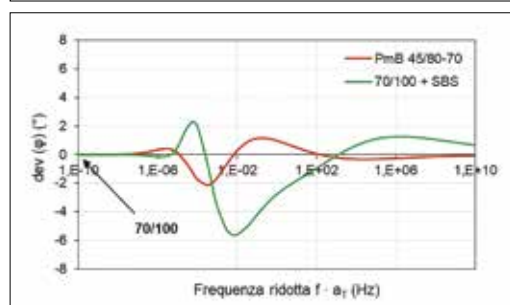
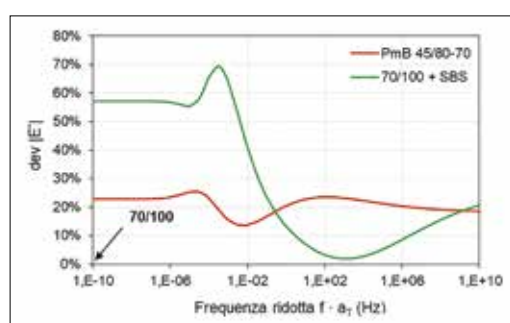
CONCLUSIONI

Il progetto di ricerca ha analizzato le prestazioni di conglomerati bituminosi per strati di usura contenenti triturato proveniente da membrane bituminose impermeabilizzanti riciclate (per completezza si legga la prima parte dell'articolo presentato su "Strade & Autostrade" n° 162 di Novembre/Dicembre 2023 a pag. 112).

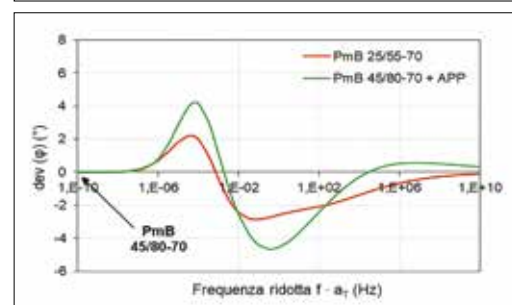
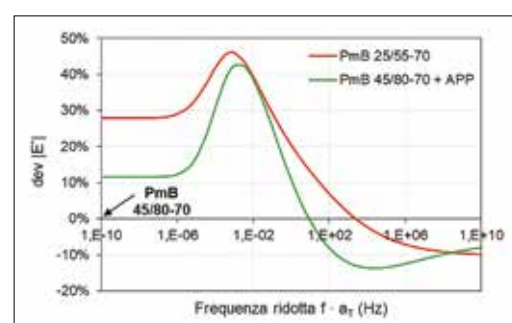
A questo proposito, il programma sperimentale ha previsto l'esecuzione di prove volte alle misure di rigidità, di resistenza e di duttilità dei materiali analizzati. I granuli di membrana impermeabilizzante riciclata sottoposti a

studio sono stati ottenuti da due tipologie di membrane, ovvero contenenti polimeri SBS e polimeri APP. La prima tipologia di triturato è stata combinata con bitume 70/100 e paragonata ad un bitume modificato PmB 45/80-70, mentre la seconda tipologia è stata combinata con bitume PmB 45/80-70 e paragonata ad un bitume alto modulo PmB 25/55-70. Le risultanze sperimentali hanno confermato i seguenti aspetti:

- l'aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata nei conglomerati bituminosi consente una riduzione del bitume di apporto (70/100 o PmB 45/80-70) fino ad un massimo del 15% della quantità totale: il suo utilizzo nei dosaggi riportati non ha influito significativamente sui valori di resistenza riscontrati sugli stessi conglomerati confezionati senza triturato di membrana impermeabilizzante riciclata;
- l'utilizzo di bitume stradale classe 70/100 con un dosaggio di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS pari all'1.6% sulla massa del conglomerato bituminoso in luogo di bitume modificato Hard di classe PmB 45/80-70 ha portato a risultati di rigidità, modulo complesso e comportamento post-rottura (resistenza alla propagazione di fessure) sostanzialmente differenti e non ha conferito al bitume 70/100 le stesse prestazioni del bitume Modificato Hard PmB 45/80-70, il quale è risultato globalmente più duttile e con proprietà viscoelastiche superiori;
- l'utilizzo di bitume PmB 45/80-70 con un dosaggio di triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP pari all'1.0% sulla massa del conglomerato bituminoso



17A e 17B. Confronto curve maestres (TREF = 20 °C) con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente SBS



18A e 18B. Confronto curve maestres (TREF = 20 °C) con triturato di membrana impermeabilizzante riciclata contenente APP

ha conferito caratteristiche prestazionali simili a quelle relative ad un bitume modificato alto modulo di classe PmB 25/55-70. In particolare, la resistenza, le proprietà duttili e il comportamento viscoelastico sono state paragonabili tra le due miscele investigate.

In conclusione, l'utilizzo di triturato ottenuto dalla macinazione di membrane bituminose risulta un'eccellente soluzione nell'ottica di incentivare l'aliquota di materiale riciclato contenuto in conglomerati bituminosi. Con un dosaggio compreso tra 1%÷1,5% sulla massa del conglomerato bituminoso, combinato con un dosaggio tradizionale di granulato di conglomerato bituminoso, è possibile ridurre fino al 30% il dosaggio di bitume vergine di apporto (modificato e non).

È quindi plausibile pianificare possibili sviluppi volti alla verifica di produzione di conglomerati bituminosi su scala industriale, nonché la realizzazione e monitoraggio di campi prova sottoposti al tipico traffico veicolare. Di contro, è doveroso sottolineare l'importanza del processo di selezione della membrana impermeabilizzante riciclata in termini di tipologia di modifica polimerica in essa contenuta (SBS o APP), di contenuto di legante, filler e fibre al fine di poter consentire l'adeguato controllo delle caratteristiche risultanti del conglomerato bituminoso prodotto. Non da ultimo, si evidenzia l'importanza dello sviluppo di un processo industriale, niente affatto banale, per la lavorazione delle membrane impermeabilizzanti da riciclare al fine di poterle portare ad uno stato fisico idoneo all'utilizzo negli abituali processi produttivi di conglomerato bituminoso. ■

⁽¹⁾ Ph.D. Ingegnere, Direttore Ricerca e Sviluppo di STS Mobile Srl

⁽²⁾ Ph.D. Ingegnere, Responsabile Ricerca e Sviluppo di STS Mobile Srl

Bibliografia

- [1]. Giavarini, C. (2009). Il riciclaggio nel conglomerato bituminoso delle membrane bitume-polimero. *Rassegna del Bitume - SITEB*, 62, 33-39.
- [2]. Bustillo Revuelta, M., & Bustillo Revuelta, M. (2021). Bituminous Materials. *Construction Materials: Geology, Production and Applications*, 401-434.
- [3]. Oba, K., & Hugener, M. (1995). Characterization of polymer modified bituminous roofing membranes using chromatography. *Materials and Structures*, 28, 534-544.
- [4]. Merine, G. M., Hagos, E. T., & van de Ven, M. F. C. (2013). Performance of asphalt mixtures with recycled roof membrane. In *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements* (pp. 40-53).
- [5]. Dan Krivit and Associates, Recycled tear-off shingles road construction demonstration in the town of Hassan. Final Report to Minnesota Road Research Board - 31 may, 2007.
- [6]. Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road materials and pavement design*, 4(2), 185-224.