

Membrane bituminose “senza fine” “Never-ending” bituminous waterproofing sheets

Riassunto

L'articolo presenta una sintesi di un ampio e complesso studio sperimentale basato sulla valutazione del contributo prestazionale del triturato di membrana riciclata sul comportamento reologico dei conglomerati bituminosi. Tale studio ha previsto, preliminarmente alla valutazione di idoneità, una complessa definizione del processo industriale di trasformazione, dal rifiuto membrana al triturato di membrana riciclata, giungendo alla realizzazione di un impianto di produzione in scala reale coperto da brevetto. Tale processo è in grado di garantire costanza e uniformità di produzione alla luce delle variabili reologiche individuate (composizione del rifiuto, caratteristiche reologiche della parte bituminosa, caratteristiche chimiche dei polimeri contenuti nel rifiuto), rendendo tecnologicamente gestibile la progettazione di conglomerati bituminosi con l'utilizzo di triturato di membrana riciclata.

I risultati della sperimentazione verranno presentati in presenza alla 14esima conferenza internazionale ISAP (International Society of Asphalt Pavement) che si terrà a Montreal (Canada) dal 2 al 7 Giugno 2024. Contestualmente troveranno divulgazione sulla rivista scientifica ASTM Journal of Testing and Evaluation, per la quale è attualmente in fase di revisione.

This article introduces a synthesis of a larger and complex pilot investigation surrounding the evaluation of the performance contribution of the recycled membrane granules on the rheological test and behaviour of the bituminous conglomerate (asphalt).

Prior to receiving its compliance evaluation, the investigation predicted a complex description of the industrial transformation process, ranging from the waste granules to recycled membrane granules, and leading to the creation of a production facility, equipped with relative patent.

Thanks to the identified rheological variables (waste composition, rheological features of the bitumen part, chemical features of the polymers included in the waste), it feels safe to say that such a process is capable of guaranteeing continuity and uniformity to the production stream, thus allowing the technical design and creation of the bituminous conglomerate via the recycled membrane granules.

Summary

L'utilizzo della membrana bituminosa impermeabilizzante riciclata nei conglomerati bituminosi chiusi, una valutazione prestazionale

1. Introduzione

Le membrane impermeabilizzanti bitume-polimero sono nate in Italia nella seconda metà degli anni Sessanta e il loro utilizzo si è diffuso rapidamente in Europa e in altri Paesi¹.

L'invenzione delle membrane, abitualmente dette guaine, ha permesso al bitume di mantenere il suo ruolo di impermeabilizzante preferito, dopo l'asfalto naturale, i cartoni bitumati, il bitume ossidato e le emulsioni².

Il costo finale di questo prodotto e le sue particolari caratteristiche, nonché la facilità di applicazione, lo resero fin dall'inizio competitivo con gli altri sistemi impermeabilizzanti: furono soppiantati i tradizionali cartoni bitumati. Le membrane per impermeabilizzazione sono in genere costituite da una successione di strati e precisamente, dall'alto al basso³:

- strato antiadesivo (sabbietta, talco o film poliolefinico) o in alternativa strato coprente (scaglie di ardesia o basalto);
- compound bituminoso (miscela bitume e polimeri) fillerizzato;
- armatura (tessuto non tessuto di poliestere, velo di vetro, tessuti di vetro, etc.) impregnata con compound bituminoso;
- compound bituminoso fillerizzato;
- strato antiaderente (film o tessuto non tessuto poliolefinico, sabbietta).

Il compound bituminoso è costituito da bitume ad alta penetrazione (ad esempio 160-220 dmm) e da percentuali variabili di polimeri (circa 10-15% nel caso

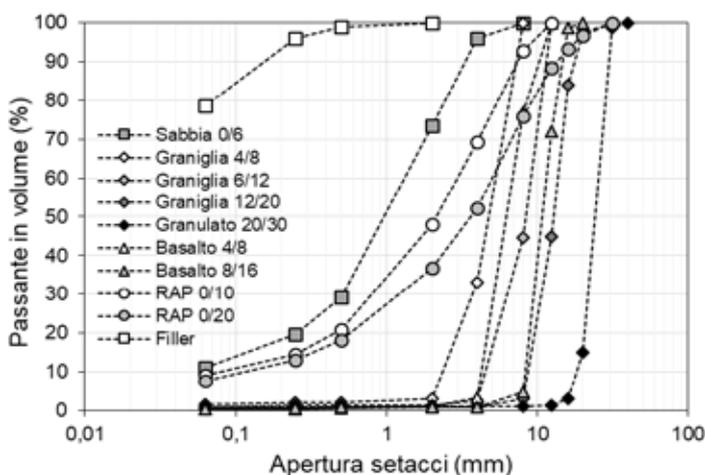
di SBS e circa 5-20% nel caso di APP), miscelati a circa 190-200 °C per alcune ore. Il filler, generalmente carbonato di calcio, viene aggiunto per migliorare la tixotropia e abbassare il prezzo del compound. I polimeri utilizzati prevalentemente nella produzione italiana sono di natura olefinica (specialmente poli-propilene e copolimeri), anche se vengono prodotte membrane contenenti elastomeri come SBS.

La tipologia di polimero, così come la percentuale utilizzata, dipende dal tipo di applicazione; variando la tipologia di polimero, si possono produrre membrane per impermeabilizzazione con differenti caratteristiche, specialmente per quanto riguarda la resistenza alle basse e alle alte temperature⁴. I polimeri SBS hanno la capacità di migliorare le proprietà elastiche e di recupero di deformazione del bitume base modificato utilizzato, preferendone quindi l'utilizzo in zone climaticamente più fredde. Al contrario i polimeri APP risultano più adatti per aree geografiche più calde, in quanto rendono il bitume più resistente alle alte temperature per la minor suscettibilità al fenomeno dell'ossidazione⁵.

Negli Stati Uniti più di 11 milioni di tonnellate di membrane bituminose vengono rimosse annualmente, di cui il 90% deriva da materiale al termine della vita utile di servizio e il 10% da scarti difettosi di fabbrica. Allo stesso tempo in Europa vengono prodotte circa 2 milioni di tonnellate annue di rifiuti derivanti da membrane bituminose⁶.

L'eventuale riciclaggio di tale materia prima può comportare numerosi vantaggi: il potenziale ecologico proprio delle membrane viene recuperato e gli

Fig. 1
Distribuzioni granulometriche degli aggregati



impatti ambientali, che derivano da questa modalità di gestione, sono nulli; vi è poi un risparmio di produzione di materie prime vergini sia in fase di riciclo in produzione sia in fase di riciclo in altri sistemi industriali. A maggior ragione nel settore delle pavimentazioni stradali c'è un interesse crescente da parte di entrambi i comparti produttivi: i produttori di membrane hanno un vantaggio economico derivante dai costi di smaltimento mentre i produttori di conglomerato hanno un vantaggio economico sul minor sfruttamento di materie prime vergini. Le emissioni in atmosfera e il consumo di risorse non rinnovabili risultano altresì ridotte.

Il programma sperimentale svolto nel presente progetto di ricerca mira quindi alla valutazione prestazionale dell'utilizzo di membrane bituminose impermeabilizzanti di recupero nei conglomerati bituminosi ad uso stradale (indicato di seguito come triturato di membrana impermeabilizzante). Lo studio è stato esteso a due tipi di membrane, caratterizzate da diversi tipi di polimeri nella miscela bitume/polimero, sviluppandolo in due macro-aree: quella della valutazione su scala legante bituminoso e quella della valutazione su scala conglomerato bituminoso.

2. Materiali e metodologie

La seguente sezione contiene informazioni relative alle proprietà delle materie prime selezionate, l'attrezzatura sperimentale utilizzata, nonché i metodi di analisi adottati per l'interpretazione dei risultati.

2.1 I materiali utilizzati e le loro proprietà

I materiali utilizzati consistono in aggregati naturali, granulato di conglomerato bituminoso (successivamente indicato come fresato o RAP), filler, due leganti bituminosi modificati con polimeri e una tipologia di triturato di membrana impermeabilizzante.

Proprietà	Norma di riferimento	u.m.	Valore PG 76-22	PG 82-16	
Penetrazione	UNI EN 1426	dmm	48	35	
Punto di rammollimento	UNI EN 1427	°C	73.4	72.6	
Viscosità Brookfield @ 160°C	UNI EN 13302	Pa·s	0.490	0.625	
Performance Grade (PG)	ASTM D7643	-	76-22	82-16	
PG continuo		-	76.4-22.9	85.6-18.5	
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) @ 58°C	UNI EN 16659	J _{nr} (0.1 kPa)	kPa ⁻¹	0.12	0.05
		J _{nr} (3.2 kPa)	kPa ⁻¹	0.15	0.07
		%R (0.1 kPa)	%	61.2	71.9
		%R (3.2 kPa)	%	53.6	66.6
Linear Amplitude Sweep (LAS) @ 22 °C	AASHTO T391-20	N _f (2.5%)	-	7.1E+06	4.2E+06
		N _f (5.0%)	-	9.7E+04	5.9E+04
		N _f (15%)	-	1.1E+02	6.9E+01

Tab. 1
Proprietà dei bitumi utilizzati

Gli aggregati

I conglomerati bituminosi confezionati in laboratorio sono composti da aggregati di diversa natura petrografica, a seconda dello strato della pavimentazione sottoposto a studio. Le distribuzioni granulometriche dei suddetti aggregati, compreso il filler, vengono riportate in **Fig. 1**. Sono stati utilizzati: filler carbonatico, sabbia calcarea (frazione 0/6), graniglie e fresati calcarei (frazioni 4/8, 6/12, 12/20, 20/30) e graniglie basaltiche (frazioni 4/8 e 10/16). Le due tipologie di fresato selezionate, frazioni 0/10 e 0/20, sono caratterizzate da un contenuto di bitume residuo rispettivamente pari al 5,0% ed al 4,5%.

I leganti bituminosi modificati con polimeri

I conglomerati bituminosi analizzati sono stati miscelati utilizzando due bitumi modificati con polimeri, un bitume modificato Hard PmB 45/80-70 (PG 76-22) e un bitume modificato Alto Modulo PmB 25/55-70 (PG 82-16). Sono state determinate le principali caratteristiche empiriche e prestazionali, come riportato in **Tab. 1**.

Il bitume PmB 25/55-70 è caratterizzato da migliori prestazioni ad elevate temperature di esercizio se paragonato al bitume PmB 45/80-70, seppur è possibile evidenziare una minore resistenza alle sollecitazioni cicliche di fatica a temperature intermedie (rappresentata dalla prova LAS). In termini di prestazione a fessurazione termica, il bitume PmB 45/80-70 è caratterizzato da una temperatura minima di esercizio inferiore rispetto al bitume PmB 25/55-70.



Fig. 2
Il triturato di membrana bituminosa utilizzato

Il granulato di membrana impermeabilizzante

Il processo di produzione da cui deriva il triturato di membrane impermeabilizzante consiste in una linea produttiva che assicura da un lato la separazione tra membrane di diversa carica polimerica (APP vs SBS) e dall'altro la completa rimozione di elementi e agenti contaminanti quali residui di legno, conglomerati cementizi, acciaio e rifiuti generici. Tale procedura è attualmente sottoposta a richiesta di brevetto (ulteriori dettagli risultano ad oggi confidenziali e non divulgabili).

In questo articolo, per esigenze di sintesi, sarà trattato esclusivamente il triturato di membrana impermeabilizzante contenente bitume modificato con polimeri APP (è stato studiato anche quello contenente bitume modificato con polimeri SBS), il quale è caratterizzato da un contenuto di legante medio di circa il 49% sulla massa del granulato stesso (**Fig. 2**).

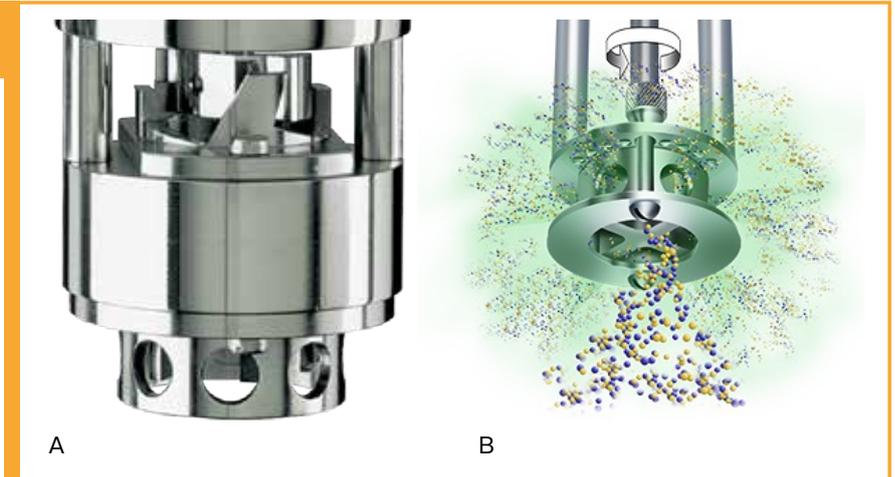
2.2 L'ottimizzazione del dosaggio di triturato di membrana impermeabilizzante

La produzione delle mescole bituminose

L'analisi sperimentale ha valutato l'aggiunta del triturato di membrana impermeabilizzante al bitume PG 76-22 mediante metodo "a secco", ovvero sotto forma di materiale triturato contenente tutti i componenti (come da **Fig. 2**). I dosaggi adottati sono stati pari a 10% e 20% sulla massa totale della mescola bituminosa. Le operazioni di miscelazione sono state eseguite mediante un miscelatore ad alta velocità di taglio, tradizionalmente utilizzato per la modifica del bitume, e un bagno d'olio termostato, utilizzato per mantenere la temperatura operativa costante a 190 °C (**Fig. 3A**). Il processo di miscelazione è stato eseguito per 1 ora, verificato come tempo necessario per ottenere una distribuzione ottimale del triturato nel legante, a una velocità di taglio di 1800 giri/minuto. La rotazione ad alta velocità delle eliche del rotore, all'interno della testa di miscelazione, eserci-

Fig. 3
Il miscelatore ad alta velocità di taglio

ta una potente aspirazione, movimentando i materiali liquidi e solidi verso l'alto dal fondo del recipiente e al centro della testa di miscelazione. I materiali espulsi dalla testa vengono proiettati radialmente ad alta velocità verso le pareti del recipiente utilizzato. Il ciclo di miscelazione viene mantenuto costante aspirando continuamente materiale all'interno della testa di miscelazione (**Fig. 3B**).



Performance Grade (PG) Continuo

Il dosaggio ottimale di triturato di membrana impermeabilizzante nel bitume PG 76-22 è stato valutato in termini di Performance Grade (PG) continuo (in accordo alla normativa ASTM D7643). A differenza del PG determinato tradizionalmente, il PG continuo non viene assunto in base agli "scatti" di temperatura imposti dalla normativa ASTM D6373, ma vengono rilevate esattamente le temperature in corrispondenza delle quali risultano rispettati i requisiti richiesti alle alte, medie e basse temperature di esercizio. A tal fine sono stati utilizzati un Dynamic Shear Rheometer (DSR), un Bending Beam Rheometer (BBR) e procedure di invecchiamento a breve termine tramite Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) e a lungo termine tramite Pressure Ageing Vessel (PAV). Il dosaggio ottimale è stato assunto come quello necessario a conferire lo stesso PG continuo tra bitume modificato Hard PG 76-22 con triturato di guaina e bitume Alto Modulo PG 82-16.

2.3 Il confezionamento dei conglomerati bituminosi

L'analisi delle caratteristiche meccaniche è stata svolta su un totale di 9 miscele di conglomerato bituminoso prodotte in laboratorio, suddivise in gruppi

a seconda dello strato della pavimentazione considerato: tappeto di usura, binder e base. Ciascuno di questi materiali è stato prodotto con bitume modificato Hard (PG 76-22), bitume Alto Modulo (PG 82-16) e bitume modificato Hard con aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante.

I materiali destinati ai diversi strati della pavimentazione sono stati progettati in termini granulometrici al fine di rispettare i fusi di riferimento imposti dal Capitolato Speciale d'Appalto ANAS S.p.A. I dosaggi di ciascun componente, così come la curva granulometrica di progetto, vengono riportati rispettivamente in **Tab. 2** e **Fig. 4**. Il quantitativo di fresato è anch'esso in accordo a quanto stabilito nel succitato

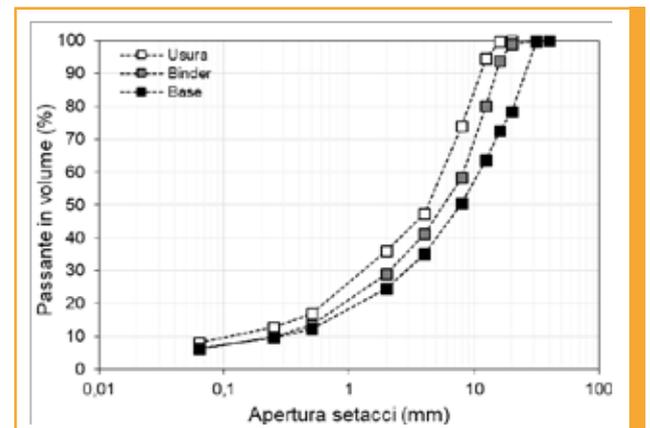


Fig. 4
Distribuzione granulometrica di progetto degli strati della pavimentazione investigati

Strato	Calcare					Basalto		RAP		Filler
	0/6	4/8	6/12	12/20	20/30	4/8	10/16	0/10	0/20	
Usura	33%					29%	19%	15%		4%
Binder	24%	10%	10%	34%				10%	10%	2%
Base	15%	10%	5%	19%	23%			10%	15%	3%

Strato	Legante	% Bitume riferito al conglomerato bituminoso			
		Vergine	RAP	Guaina	Totale
Base	PmB 45/80-70	2.9	1.2		4.1
	PmB 25/55-70				
	PmB 45/80-70 + APP	2.5		0.4	
Binder	PmB 45/80-70	3.5	1.0		4.5
	PmB 25/55-70	3.5			
	PmB 45/80-70 + APP	3.1		0.4	
Usura	PmB 45/80-70	4.5	0.8		5.3
	PmB 25/55-70	4.5			
	PmB 45/80-70 + APP	4.0		0.5	

Tab. 3
Dosaggi di bitume relativi alle miscele investigate

CSA, ovvero 15% in tappeti di usura, 20% in strati di binder e 25% in strati di base.

Il contenuto di bitume totale è stato adottato costante per ogni strato prodotto, correggendo il quantitativo di bitume vergine in funzione del bitume d'apporto del fresato e del triturato di membrana impermeabilizzante. Di conseguenza, i materiali per strato di base, binder e tappeto sono stati prodotti rispettivamente con il 4,1%, 4,5% e 5,3% di bitume totale sul peso della miscela (**Tab. 3**).

La compattazione in laboratorio dei campioni da sottoporre a caratterizzazione meccanica è stata effettuata con pressa a taglio giratoria, diametro dei provini pari a 150 mm, pressione costante di 600 kPa, velocità di rotazione pari a 30 giri/min ed angolo interno di 1,25°. Tutti i campioni sono stati realizzati ad altezza imposta, così da ottenere (a parità di massa) proprietà volumetriche identiche e non influenti sui risultati ottenuti. I vuoti di progetto ottenuti e misurati sono pari al 3,0 ± 0,5% per tappeti di usura e al 4,5 ± 1,5% per binder e base.

2,4 La caratterizzazione meccanica dei conglomerati bituminosi

I conglomerati bituminosi prodotti sono stati caratterizzati meccanicamente in termini di Resistenza a Trazione Indiretta (Rti), Cracking Tolerance Index (CTIndex) e Modulo Complesso.

Resistenza a Trazione Indiretta (Rti)

La Resistenza a Trazione Indiretta è stata misurata in accordo alla normativa UNI EN 12697-23, per mezzo di una pressa statica in controllo di velocità di spostamento pari a 50 ± 2 mm/min.

Cracking Tolerance Index (CTIndex)

La tendenza a contrastare la propagazione di fessure delle miscele bituminose è stata valutata seguendo la procedura IDEAL-CT descritta nella normativa ASTM D8225. Tale analisi è derivabile dalla curva sforzo-deformazione ottenuta dalle prove di Resistenza a Trazione Indiretta, dalle quali viene estrapolato il Cracking Tolerance Index (CTIndex) come in **Fig. 5**, dove:

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \cdot \frac{s_{75}}{D} \cdot \frac{G_f}{|m_{75}|} \cdot 10^6 \quad (1)$$

G_f è l'energia di collasso del provino (kJ/mm), $|m_{75}|$ è il valore assoluto della pendenza della retta tangente al punto corrispondente al 75% del carico massimo post-rottura, s_{75} è lo spostamento relativo al punto corrispondente al 75% del carico massimo post-rottura (mm), t è lo spessore del provino (mm) e D è il diametro del provino (mm).

Il parametro CTIndex rappresenta il comportamento post-rottura del conglomerato bituminoso ed è assimilabile alla pendenza della retta tangente al punto

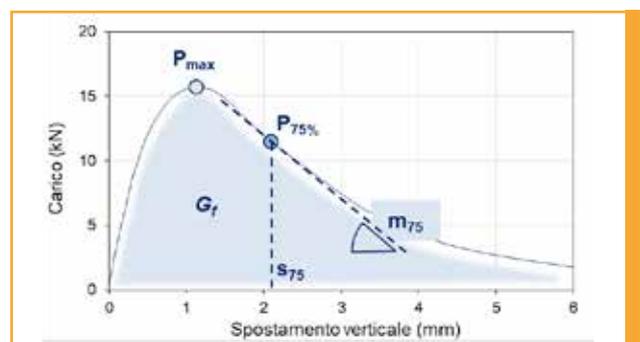


Fig. 5
Rappresentazione analisi IDEAL-CT

della curva sforzo-deformazione decrescente pari al 75% del carico massimo registrato. Tanto più è elevato il valore riscontrato, tanto migliori saranno le proprietà duttili del conglomerato analizzato in quelle condizioni.

Modulo Complesso $|E^*|$

Le determinazioni di Modulo Complesso sono state eseguite in configurazione di trazione-comprensione



Fig. 6
Configurazione di prova delle prove di modulo complesso

su provini cilindrici (diametro pari a 100 mm ed altezza pari a circa 130 mm), carotati e rettificati da provini di diametro pari a 150 mm e altezza pari a circa 150 mm (**Fig. 6**). I test sono stati eseguiti con l'ausilio di una pressa servo-idraulica da 30 kN in controllo di carico. Le temperature di prova sono state 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C e 50 °C, ciascuna preceduta da un periodo di condizionamento di circa 3 ore. Le frequenze di prova sono state 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz.

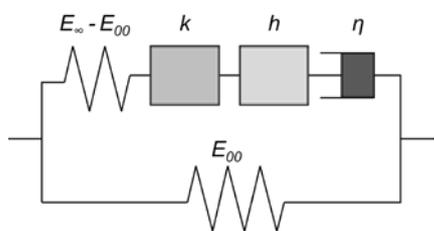


Fig. 7
Rappresentazione del modello 2S2P1D

Il modello reologico 2S2P1D

I risultati di Modulo Complesso sono stati analizzati utilizzando il modello reologico 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic Elements, 1 Dashpot), ampiamente adottato in letteratura perché capace di descrivere, tramite parametri specifici, il comportamento visco-elastico globale della miscela di conglomerato bituminoso analizzata⁷.

Esso è composto da 2 molle, 2 elementi parabolici ed un dissipatore viscoso (**Fig. 7**).

L'equazione analitica del modello 2S2P1D si riferisce ad una temperatura di riferimento TREF arbitrariamente fissata:

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_{\infty} - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (2)$$

dove: E_{00} è il modulo di rigidità statico per $\omega \rightarrow 0$ (MPa), E_{∞} è il Modulo di Rigidità Vetroso per $\omega \rightarrow \infty$ (MPa), δ è una costante di calibrazione, k e h sono esponenti parabolici tali che $0 < k < h < 1$, ω è la pulsazione ($= 2\pi f$), f è la frequenza (Hz), i è il numero immaginario ($i^2 = -1$), β è un parametro legato alla viscosità newtoniana tale che $\eta = (E_{\infty} - E_{00})\beta\tau_E$, τ_E è il tempo caratteristico, ed è l'unica variabile influenzata dalla temperatura T:

$$\tau_E(T) = a_T(T) \cdot \tau(T_{REF}) \quad (3)$$

dove: $a_T(T)$ è il fattore di traslazione alla temperatura T, $\tau_E(T) = \tau(T_{REF})$ alla temperatura di riferimento TREF. Il modello 2S2P1D permette dunque di descrivere il comportamento nel campo visco-elastico lineare del materiale studiato con la determinazione di 7 costanti (E_{00} , E_{∞} , k , h , δ , β , τ_E). Nel presente studio è stata assunta TREF = 20 °C.

3. I risultati

Questa sezione contiene l'analisi dei risultati ottenuti.

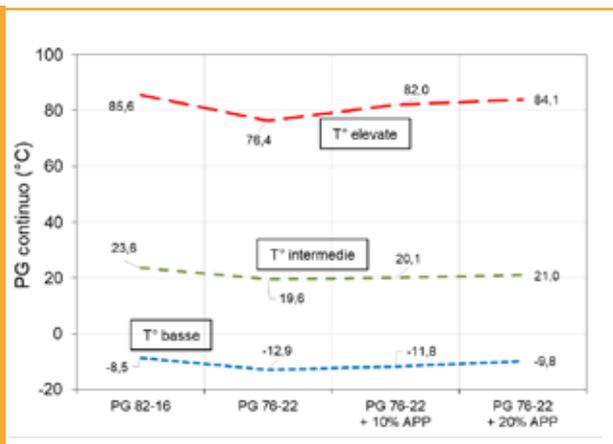


Fig. 8
PG continuo delle mescole bituminose analizzate

3.1 L'ottimizzazione del dosaggio di triturato di membrana impermeabilizzante

In **Fig. 8** sono mostrati i risultati in termini di PG continuo delle mescole bituminose sottoposte a prova. Le risultanze sperimentali ottenute sono state paragonate a quelle relative al bitume Alto Modulo PG 82-16 preso come riferimento.

In generale, il bitume PG 76-22 è caratterizzato da temperature di esercizio alte, intermedie e basse inferiori rispetto al bitume PG 82-16 con la maggior differenza riportata per le alte temperature. Ciò sta ad indicare una minore resistenza all'ormaiamento e una maggiore resistenza alla fatica e alla fessurazione termica per il bitume PG 76-22.

L'aggiunta incrementale del 10% e del 20% di triturato di membrana impermeabilizzante provoca un aumento delle tre temperature di servizio, migliorando le proprietà di resistenza all'ormaiamento e penalizzan-

do le prestazioni alle temperature intermedie e basse. I valori ottenuti dalla miscela bituminosa composta dall'80% di bitume PG 76-22 e dal 20% di triturato di membrana impermeabilizzante sono paragonabili alle prestazioni relative al bitume Alto Modulo PG 82-16, pertanto quest'ultimo dosaggio è stato adottato per la seconda fase di caratterizzazione meccanica delle miscele di conglomerato bituminoso.

3.2 Resistenza a Trazione Indiretta (Rti) e Cracking Tolerance Index (CTIndex)

La **Fig. 9** mostra i risultati in termini di (A) Resistenza alla Trazione Indiretta e (B) CTIndex ottenuti dalle miscele studiate. I grafici mostrano i valori medi calcolati, nonché le barre di errore che rappresentano la variabilità delle risultanze sperimentali.

In termini di Rti, il valore medio più elevato è caratteristico dei conglomerati prodotti con bitume PG 82-16 rispetto al PG 76-22, a prescindere dallo strato della pavimentazione considerato. Inoltre, nel caso del bitume PG 82-16, il valore di Rti medio calcolato decresce a partire dalla base fino al tappeto di usura. Oltre alla distribuzione granulometrica, anche il contenuto di fresato è una variabile significativa tra i tre tipi di miscele investigate ed entrambi gli aspetti giustificano la differenza riscontrata. Considerando invece le miscele prodotte con bitume modificato Hard PG 76-22, i risultati ottenuti in termini di Rti non sono significativamente differenti.

L'apporto di triturato di membrana bituminosa riciclata conferisce globalmente valori di Rti più elevati rispetto alle miscele con solo bitume PG 76-22, con-

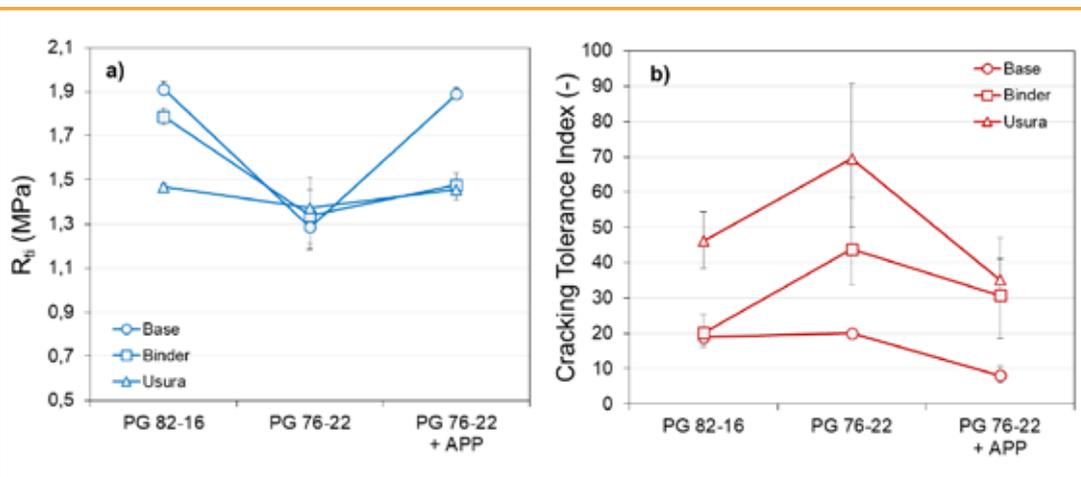


Fig. 9
(A) Resistenza a trazione indiretta Rti, e
(B) Cracking Tolerance Index

fermando il suo effetto a temperature intermedie. I materiali degli strati di usura e base con triturato di membrana impermeabilizzante sono caratterizzati da valori di resistenza simili rispetto a quelli prodotti con bitume Alto Modulo PG 82-16, contrariamente a quanto riscontrato per i materiali per strati di binder. In termini di CTIndex, le miscele di conglomerato prodotte con bitume modificato Hard PG 76-22 hanno mostrato una migliore duttilità nei confronti della fessurazione rispetto alle miscele prodotte con bitume Alto Modulo PG 82-16. Inoltre, le prestazioni migliori sono state rilevate per i conglomerati dello strato superficiale, seguiti da quelli per strato di binder e di base, indipendentemente dalle componenti bituminose considerate. Come precedentemente considerato per i risultati di resistenza, anche la differenza nei valori del CTIndex può essere attribuita alla diversa distribuzione granulometrica ed al contenuto di fresato. L'aggiunta di triturato di membrana riciclata al bitume PG 76-22 provoca una diminuzione del CTIndex, conferendo proprietà di resistenza alla fessurazione simili ai conglomerati con bitume PG 82-16.

Correlazione tra la resistenza alla fessurazione a temperature intermedie e basse

Il parametro CTIndex relativo ai conglomerati bituminosi è stato misurato a 25 °C, mentre le caratteristiche prestazionali dei leganti alle basse temperature di servizio sono state misurate tramite reometro flessionale (BBR) alle temperature -12 °C, -18 °C e -24 °C. La possibile correlazione tra le proprietà misurate con il BBR (grado di rilassamento – creep rate

m) a basse temperature e la suscettibilità alla fessurazione delle miscele (CTIndex), misurata a temperature intermedie, può aiutare tecnologi e produttori di conglomerati e leganti bituminosi a prevedere e regolare le proprietà relative alla fessurazione dei propri prodotti analizzando solo una dei due parametri⁸. La **Fig. 10** mette in correlazione i valori di CTIndex ottenuti dalle miscele di conglomerato analizzate e il valore di grado di rilassamento (creep rate) a 60 secondi (m60) ottenuto con i test eseguiti con BBR a tre temperature di prova. Ai fini dell'analisi dei risultati è importante sottolineare che i valori relativi ai conglomerati bituminosi (CTIndex) differiscono da quelli relativi ai leganti (m60) per la presenza di fresato (il fresato non risulta presente nell'indagine reologica effettuata con BBR).

Dall'analisi dei dati emerge una buona correlazione tra i due parametri posti a confronto, in quanto un incremento del CTIndex è legato ad un incremento del valore di m60 (**Fig. 10A** e **Fig. 10B**). Nel caso in cui il CTIndex venga posto a confronto del valore m60 misurato a -24 °C, le basse temperature di prova non conferiscono una correlazione accettabile. In generale, per i casi indagati, è quindi possibile stabilire una correlazione tra la resistenza alla fessurazione a temperature intermedie delle miscele di conglomerato bituminoso con le proprietà fessurative dei relativi leganti alle basse temperature.

3.3 Modulo complesso |E*|

In **Tab. 4** sono elencati i parametri del modello 2S2P1D per le miscele di conglomerato bituminoso studiate. La qualità del processo di modellazione e

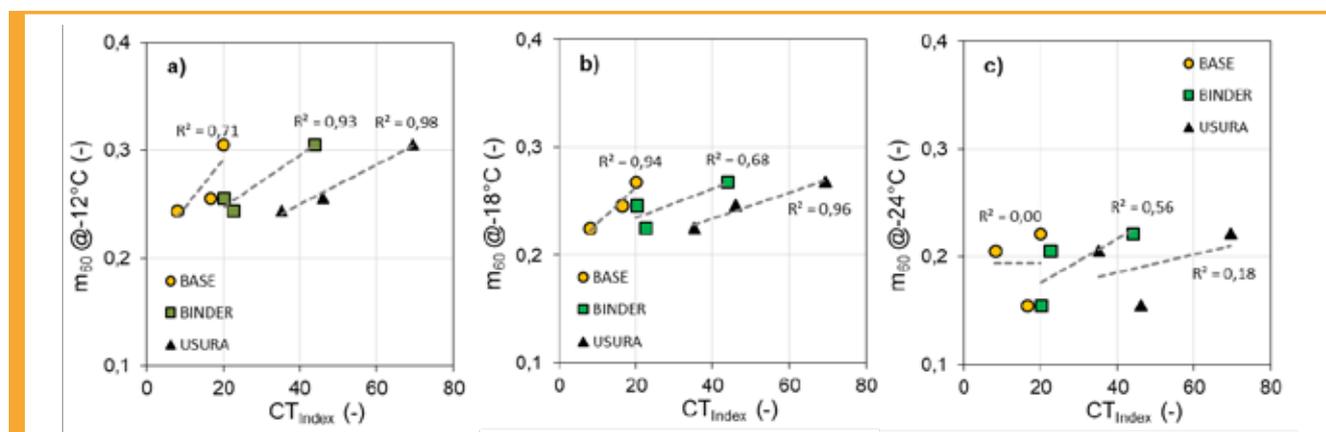


Fig. 10 Correlazione tra CTIndex @ 25 °C e m60 @ (A) -12 °C, (B) -18 °C e (C) -24 °C

Strato	Legante bituminoso	E_{00} (MPa)	E_{∞} (MPa)	k (-)	h (-)	δ (-)	τ_E (s)	β (-)
Usura	PG 82 - 16	550	35000	0.24	0.55	3.0	0.6	400
	PG 76 - 22	430	39000	0.23	0.56	3.3	0.2	
	PG 76 - 22 + APP	480	36800	0.18	0.53	3.0	0.4	
Binder	PG 82 - 16	550	38000	0.24	0.55	2.6	1.3	
	PG 76 - 22	700	44400	0.20	0.55	2.9	0.4	
	PG 76 - 22 + APP	650	39000	0.20	0.56	3.0	0.9	
Base	PG 82 - 16	450	37000	0.23	0.55	2.2	1.1	
	PG 76 - 22	900	43800	0.18	0.52	2.6	0.5	
	PG 76 - 22 + APP	650	41000	0.18	0.50	2.8	2.7	

Tab. 4 Parametri del modello 2S2P1D

lo scostamento tra i dati sperimentali e il modello adottato viene mostrata nelle **Figg. 11** e **12**, rispettivamente in termini di valore di modulo complesso e angolo di fase.

I parametri così definiti, $\text{dev}|E^*|$ e $\text{dev } \varphi$, sono calcolati come di seguito:

$$\text{dev } |E^*| (\%) = \frac{|E^*|_{2S2P1D} - |E^*|_{\text{exp}}}{|E^*|_{2S2P1D}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\text{dev } \varphi (^\circ) = \varphi_{2S2P1D} - \varphi_{\text{exp}} \quad (5)$$

dove: $|E^*|_{2S2P1D}$ è il valore di modulo $|E^*|$ modellato alla frequenza ridotta f_{rid} (MPa), $|E^*|_{\text{exp}}$ è il valore di modulo sperimentale $|E^*|$ alla frequenza ridotta f_{rid} (MPa), φ_{2S2P1D} è il valore di angolo di fase φ modellato alla frequenza ridotta f_{rid} ($^\circ$), e φ_{exp} è il valore di angolo di fase φ sperimentale alla frequenza ridotta f_{rid} ($^\circ$).

Le **Figg. 11** e **12** mostrano la qualità della modellazione relativa ai conglomerati bituminosi per strati di (A) base, (B) binder e (C) tappeti di usura. Viene riscontrata globalmente una deviazione pari a $\pm 15\%$ rispetto alla norma del modulo complesso $|E^*|$ e \pm

3° per l'angolo di fase φ . Di conseguenza è ragionevole supporre che le proprietà meccaniche misurate possano essere adeguatamente approssimate con il modello 2S2P1D.

Per analizzare la differenza tra le diverse miscele nell'intero intervallo di frequenze, la deviazione della norma del modulo complesso e dell'angolo di fase tra un materiale specifico e un materiale di riferimento viene misurata sulle curve maestre del modello 2S2P1D.

Per questo motivo, le equazioni (4) - (5) vengono adattate come segue:

$$\text{dev } |E^*| (\%) = \frac{|E^*|_{2S2P1D,\text{mix}} - |E^*|_{2S2P1D,\text{ref}}}{|E^*|_{2S2P1D,\text{ref}}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$\text{dev } \varphi (^\circ) = \varphi_{2S2P1D,\text{mix}} - \varphi_{2S2P1D,\text{ref}} \quad (7)$$

dove: $|E^*|_{2S2P1D,\text{mix}}$ è il valore di $|E^*|$ modellato della miscela da sottoporre ad analisi (MPa), $|E^*|_{2S2P1D,\text{ref}}$ è il valore di $|E^*|$ modellato della miscela assunta come riferimento (MPa), $\varphi_{2S2P1D,\text{mix}}$ è il valore di φ modellato della miscela da sottoporre ad analisi ($^\circ$), e $\varphi_{2S2P1D,\text{ref}}$

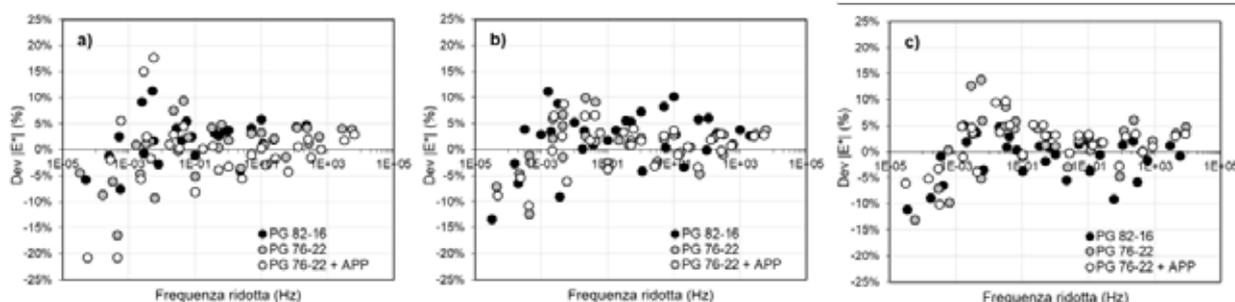


Fig. 11 Deviazione tra modello 2S2P1D e dati sperimentali per valori di modulo complesso (TREF = 20 °C) di (A) C.B. per strati di base, (B) C.B. per strati di binder e (C) C.B. per strati di usura

è il valore di φ modellato della miscela assunta come riferimento ($^{\circ}$).

I conglomerati bituminosi assunti come riferimento sono stati quelli prodotti con il bitume modificato Hard PG 76-22, dai quali è stata calcolata la relativa deviazione per miscele con bitume Alto Modulo PG 82-16 e bitume PG 76-22 con aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante.

Le **Figg. 13, 14 e 15** mostrano i risultati delle deviazioni associate alle equazioni (6) e (7) rispettivamente per conglomerati bituminosi per strati di usura, binder e base.

I risultati ottenuti mostrano che i conglomerati bitu-

minosi confezionati con bitumi PG 82-16 e PG 76-22 con triturato di membrana impermeabilizzante hanno un comportamento reologico differente in termini di Modulo Complesso e Angolo di Fase rispetto alle miscele prodotte con bitume modificato Hard PG 76-22, indipendentemente dal conglomerato bituminoso dello strato considerato. La differenza è maggiormente visibile alle basse frequenze (o alte temperature), mentre alle alte frequenze (o basse temperature) lo scostamento tra le miscele analizzate tende a ridursi.

In termini di Modulo Complesso $|E^*|$, le curve maestre dei materiali analizzati sono caratterizzate da

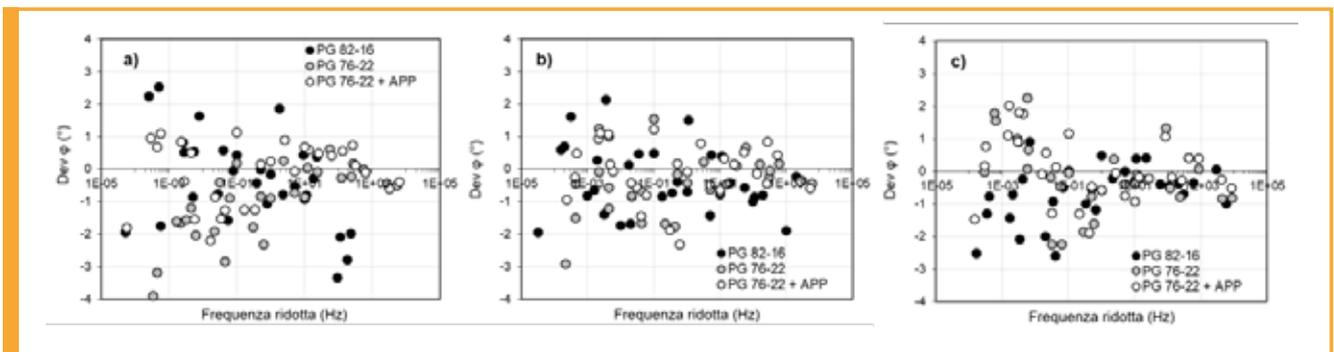


Fig. 12 Deviazione tra modello 2S2P1D e dati sperimentali per valori di angolo di fase (TREF = 20 °C) di (A) C.B. per strati di base, (B) C.B. per strati di binder e (C) C.B. per strati di usura

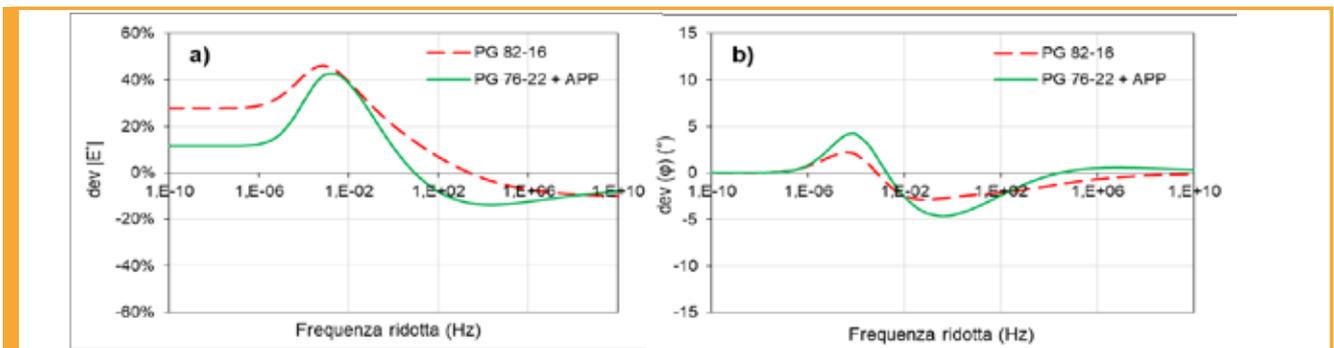


Fig. 13 Analisi dei C.B. per strati di usura (TREF = 20 °C): (A) Curva maestra della norma del Modulo Complesso; (B) Curva maestra dell'Angolo di Fase

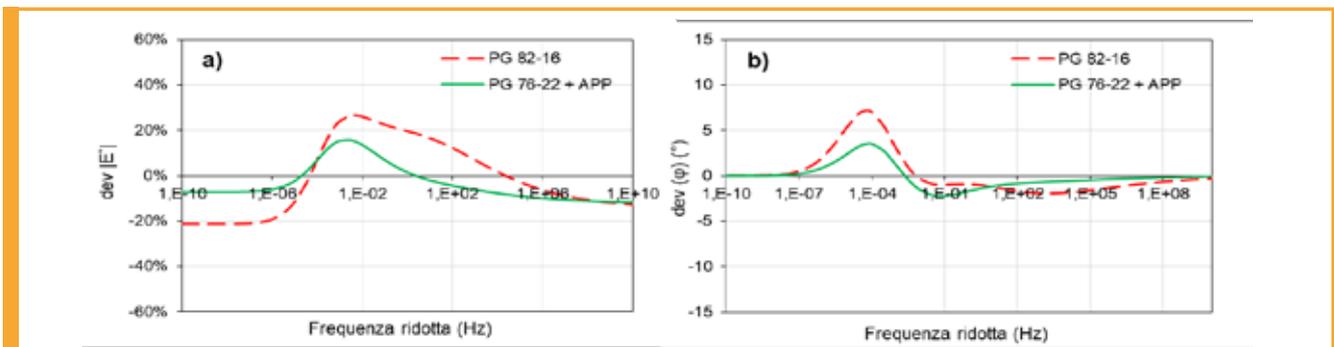


Fig. 14 Analisi dei C.B. per strati di binder (TREF = 20 °C): (A) Curva maestra della norma del Modulo Complesso; (B) Curva maestra dell'Angolo di Fase

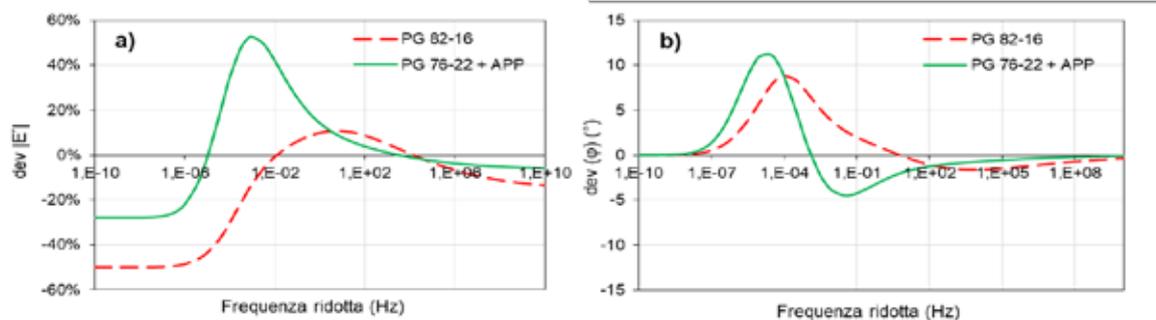


Fig. 15 Analisi dei C.B. per strati di base (TREF = 20 °C): (A) Curva maestra della norma del Modulo Complesso; (B) Curva maestra dell'Angolo di Fase

un valore di rigidità maggiore rispetto alla miscela di riferimento, così come l'andamento mostrato e la forma delle curve suggeriscono comportamenti comparabili tra conglomerati con bitume PG 82-16 e bitume PG 76-22 con aggiunta di triturato di membrana impermeabilizzante.

In termini di Angolo di Fase ϕ , le curve maestre delle miscele analizzate mostrano valori più alti rispetto alla miscela di riferimento, così come i risultati dei conglomerati con bitume PG 82-16 sono simili a quelli ottenuti con bitume PG 76-22 e triturato di membrana riciclata.

4. Per concludere

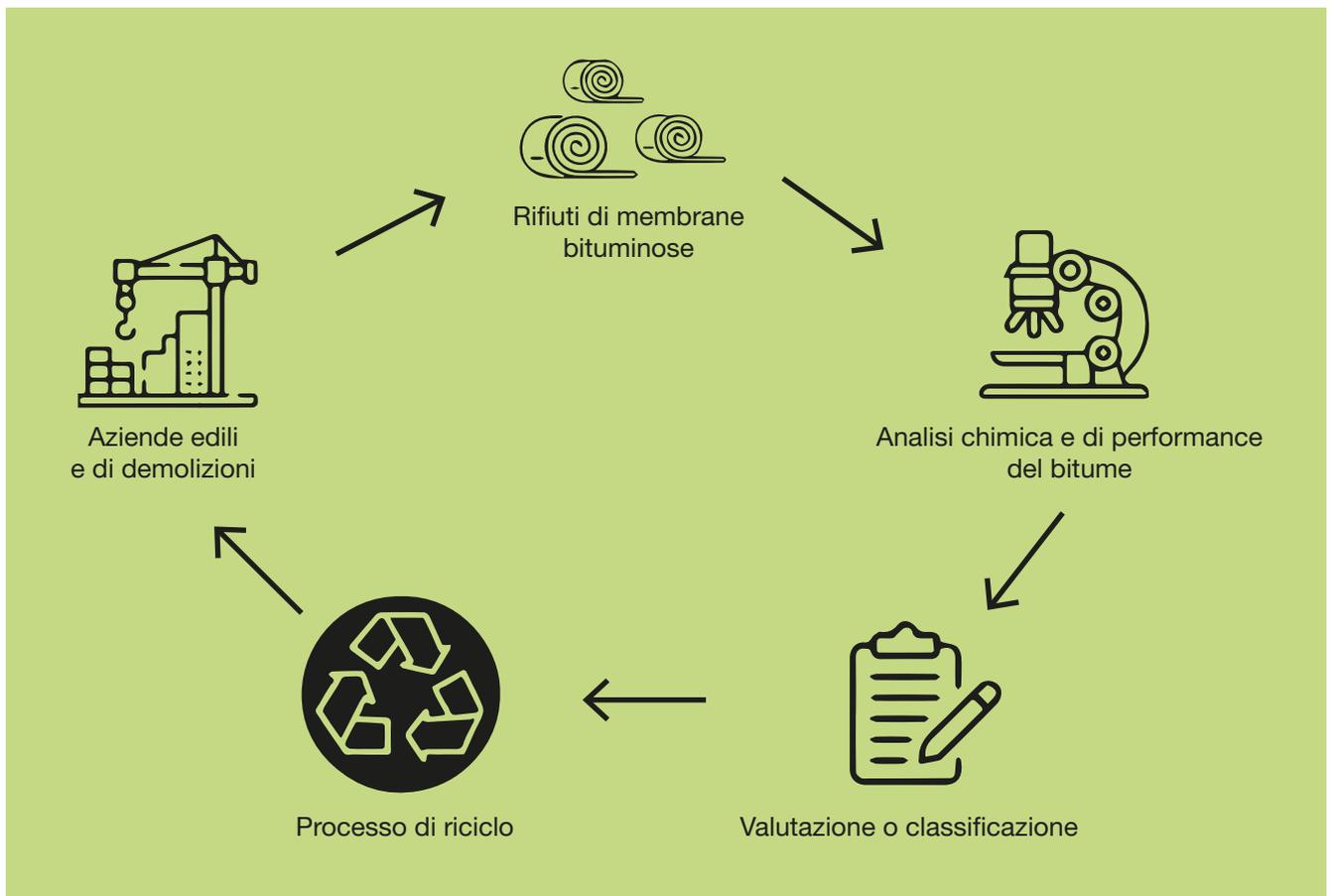
Lo studio ha valutato l'utilizzo di triturato di membrana riciclata in termini di proprietà meccaniche di miscele di conglomerato bituminoso prodotte per i tre strati principali della pavimentazione stradale: tappeto di usura, binder e base. Lo scopo dello studio è stato quello di paragonare (e possibilmente pareggiare) le proprietà meccaniche delle miscele conferite da un bitume Alto Modulo PG 82-16 e una combinazione di bitume PG 76-22 e triturato di membrana riciclata contenente polimeri APP. Il dosaggio del triturato di membrana riciclata è stato valutato mirando allo stesso livello prestazionale alle alte, medie e basse temperature di esercizio tra i due leganti (PG 82-16 e PG 76-22 con triturato di membrana riciclata): la sperimentazione ha confermato tale dosaggio pari al 20% rispetto alla massa totale del legante bituminoso.

In seconda analisi, mantenendo tale rapporto ponderale della parte legante, lo studio delle proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi prodotti

per i tre strati della pavimentazione ha permesso di evidenziare i seguenti risultati:

- La resistenza a trazione indiretta R_{ti} delle miscele contenenti bitume PG 82-16 e bitume PG 76-22 con triturato di membrana riciclata può essere considerata simile con buona approssimazione. I valori di resistenza conferiti dall'utilizzo di bitume PG 76-22 sono globalmente più bassi e l'introduzione di triturato di membrana riciclata provoca un aumento dei valori di resistenza per la presenza di legante invecchiato e ossidato;
- La minore suscettibilità alla fessurazione è stata ottenuta per miscele contenenti bitume PG 76-22, con una migliore prestazione per i materiali per strati di usura, seguiti da quelli per strati di binder e base. I conglomerati bituminosi con bitume PG 82-16 e bitume PG 76-22 con triturato di membrana riciclata sono caratterizzati da proprietà in termini di duttilità simili, seppur inferiori a quelli relativi al bitume PG 76-22;
- In termini di modulo complesso di rigidità, il diverso legante utilizzato (PG 82-16, PG 76-22 e PG 76-22 con triturato di membrana riciclata) ha comportato un diverso comportamento reologico principalmente alle basse frequenze (o alle alte temperature) indipendentemente dal tipo di conglomerato analizzato. Nel campo delle basse frequenze, il bitume PG 82-16 e il bitume PG 76-22 con triturato di membrana riciclata conferiscono valori di rigidità e angolo di fase più elevati del bitume PG 76-22.

Le proprietà meccaniche delle miscele investigate e le relative risultanze sperimentali hanno evidenziato l'idoneità del triturato di membrana riciclata per la produzione di conglomerati bituminosi, con conseguente riduzione della quantità di bitume di apporto che potrà essere dunque progettata e calcolata



considerando il duplice contributo del triturato di conglomerato bituminoso e triturato di membrana riciclata.

Sebbene si sia rilevato come il comportamento reologico dei conglomerati bituminosi prodotti con bitume PG 82-16 sia simile a quello dei conglomerati bituminosi ottenuti con bitume PG 76-22 e triturato di membrana riciclata, si ritiene necessaria una adeguata cautela progettuale da assumere per la validazione della produzione di conglomerati ad alto modulo utilizzando un bitume modificato di tipo Hard con l'aggiunta di triturato di membrana riciclata contenente APP.

La grande influenza reologica sul conglomerato bituminoso esercitata dal triturato di membrana riciclata chiarisce l'importanza del processo industriale necessario alla sua produzione: esso non potrà trascurare la sua caratteristica compositiva (% filler, % bitume, % fibra), la sua composizione chimica (membrane con polimeri SBS, APP, etc.), oltre la messa a punto di processi che possano rendere il triturato compatibile con la produzione dei conglomerati bituminosi (caratteristiche granulometriche, stoccabilità, metodologie di dosaggio, etc.).



BIBLIOGRAFIA

1. Giavarini, C. (2009), *Il riciclaggio nel conglomerato bituminoso delle membrane bitume-polimero*. *Rassegna del Bitume* - SITEB, 62, 33-39
2. EAPA (European Asphalt Pavement Association), *Asphalt pavements on bridge decks*, 2013
3. Puccini, M., Seggiani, M., Castiello, D., & Vitolo, S. (2014), *Use of tannery sludge ash as filler in waterproofing membranes*. *Applied mechanics and materials*, 467, 240-246
4. Plachy, J., Vysoka, J., & Vejmelka, R. (2019, February), *Influence of the quantity of fillers on crucial thermal-technical parameters of bitumen waterproofing sheets*. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 471, No. 3, p. 032001). IOP Publishing
5. Rodriguez, I., Dutt, O., Paroli, R. M., & Mailvaganam, N. P. (1993),

Effect of heat-ageing on the thermal and mechanical properties of APP-and SBS-modified bituminous roofing membranes. *Materials and Structures*, 26, 355-361

6. Sedhay, G. (2014), *Investigating Effects of Amine-based Modifier on Recycled Asphalt Shingles Blending Index* (Doctoral dissertation, North Carolina Agricultural and Technical State University)

7. 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

8. Zhang, Y., Swiertz, D., & Bahia, H. U. (2021), *Use of Blended Binder Tests to Estimate Performance of Mixtures with High Reclaimed Asphalt Pavement/Recycled Asphalt Shingles Content*. *Transportation research record*, 2675(8), 281-293