

STUDIO DEL DOSAGGIO MASSIMO DI GRANULATO NEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

Autori: Stefano **Tattolo**, Simone **Raschia**



<STRADE & AUTOSTRADE>

PROGETTAZIONE, COSTRUZIONE E GESTIONE DI
STRADE • AUTOSTRADE • PONTI • GALLERIE • FERROVIE

Il **bimestrale tecnico** con focus sulla realizzazione, la progettazione,
la manutenzione e la gestione di **infrastrutture di trasporto**

Edicem Milano Anno XXXI (1998-2025) 176 3/2026
Prestazioni Tech. - D.L. 20/2023 (L. 10/2023) D.L. 20/2023 (L. 10/2023)
D.L. 20/2023 (L. 10/2023) D.L. 20/2023 (L. 10/2023)

<STRADE & AUTOSTRADE>

COSTRUZIONE E MANUTENZIONE DI STRADE, AUTOSTRADE E FERROVIE
Progetti • Grandi infrastrutture • Cantieri • Impianti • Ambienti • Macchine • Tecnologie • Materiali • Aziende

FOCUS ON: CANTIERI • MACCHINE www.stradeeautostrade.it

Finitrice gommata VÖGELE Super 1803-SX,
the legend on wheels

WIRTGEN GROUP

SPECIALE SAMOTER A VERONA
Addeguamento semiponte
Londal: oltre 25 anni
di esperienza e verifiche
per il Ponte della Pace
Rinnovo il Cavalcavia
per il Centro San Giovanni

INFRASTRUTTURE
Alla scoperta
del CRES di Roma
Kilob smart bott
una vita per la sicurezza
Dutabidil: innovazione
per il data center
Tecnologie geospaziali
per il cantiere stradale

TECNOLOGIE
Val'Air, la tech francese
per la strada italiana
Alta tecnologia per alti
spessori di cemento
Hamm: la digitale per
l'edilizia e non solo
Massacco T: evolve
le soluzioni di noleggio

MACCHINE

PROMETECHNOLOGIES
Progettare il futuro

Progettare il futuro



STUDIO DEL DOSAGGIO MASSIMO DI GRANULATO NEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

UNO STUDIO CHE EMERGE DALLA NECESSITÀ DI RIDURRE LE LUNGHE TEMPISTICHE DI LABORATORIO NECESSARIE ALLA DETERMINAZIONE DEL DOSAGGIO MASSIMO DI GRANULATO DI CONGLOMERATO BITUMINOSO NEI CONGLOMERATI SENZA PENALIZZARNE LA RESISTENZA A FATICA

Negli ultimi decenni la necessità di investire nella sostenibilità dell'industria dei conglomerati bituminosi e nella manutenzione delle infrastrutture stradali ha indirizzato molti sforzi verso l'esplorazione di tecniche per ridurre l'uso di materiali vergini e riciclare diversi tipi di rifiuti e sottoprodotti, primo su tutti il granulato di conglomerato bituminoso (da qui in avanti citato come "granulato" o "RAP") [1]. Le ingenti quantità di granulato che vengono generate, congiuntamente all'avvento dei recenti Criteri Ambientali Minimi relativi al settore stradale ("CAM Strade"), spingono le stazioni appaltanti di qualsiasi grado ad aumentare le percentuali massime di granulato che possono essere riciclate nei diversi tipi di conglomerato. Tuttavia, è ben noto che il bitume ossidato incluso nel granulato può portare a una eccessiva fragilità delle miscele, comportando il rischio di decadimenti prestazionali prematuri della sovrastruttura stradale [2]. Per questo motivo, la necessità di riciclare alti contenuti di granulato nei nuovi materiali ha portato allo sviluppo di nuove tecnologie atte a compensare la prevedibile perdita di prestazioni, tra cui si citano i leganti modificati.

I bitumi modificati (Polymer-modified Bitumen, PmB) ed altamente modificati con polimeri (Highly Polymer-modified Bitumen, HPmB) rappresentano una valida soluzione per far fronte a elevati dosaggi di granulato, poiché la presenza di polimeri stirene-butadiene-stirene (SBS), in dosaggi crescenti, conferisce alla miscela bituminosa adeguate caratteristiche di duttilità in grado di migliorare la scarsa resistenza alla fessurazione dovuta al legante apportato dal granulato [3].

Al fine di soddisfare gli attuali obiettivi ambientali, la principale esigenza dell'industria stradale è di valutare il contenuto massimo di granulato utilizzabile nella produzione dei materiali per uno specifico progetto senza comprometterne negativamente la resistenza a fatica. In linea generale, questo aspetto viene affrontato in laboratorio mediante l'esecuzione di prove a fatica con dosaggi di granulato crescenti, comportando inevitabilmen-

te tempistiche tecniche particolarmente lunghe e dispendiose [4]. D'altro canto, le prove di fatica tradizionali rappresentano una procedura di laboratorio ben nota e consolidata per confrontare diversi materiali in termini di resistenza e riscontrando una diretta applicazione nel progetto della pavimentazione, senza tuttavia offrire la possibilità di prevedere direttamente la vita utile della stessa [5].

Parallelamente, la caratterizzazione a fatica su scala legante bituminoso risulta vantaggiosa per quanto riguarda le quantità di materiali necessarie ed i tempi sperimentali, sebbene le sollecitazioni applicate al campione di prova non siano rappresentative delle reali sollecitazioni che il legante subisce nelle condizioni di esercizio dell'infrastruttura [6].

Di conseguenza, il presente articolo espone una procedura di laboratorio su scala legante bituminoso al fine di determinare il contenuto massimo di granulato che può essere utilizzato nel confezionamento di un conglomerato bituminoso garantendo le proprietà di resistenza a fatica richieste, ovvero paragonabili a quelle della miscela di riferimento.



1. Stesa di conglomerato bituminoso ad elevato contenuto di granulato

MATERIALI E PROGRAMMA SPERIMENTALE

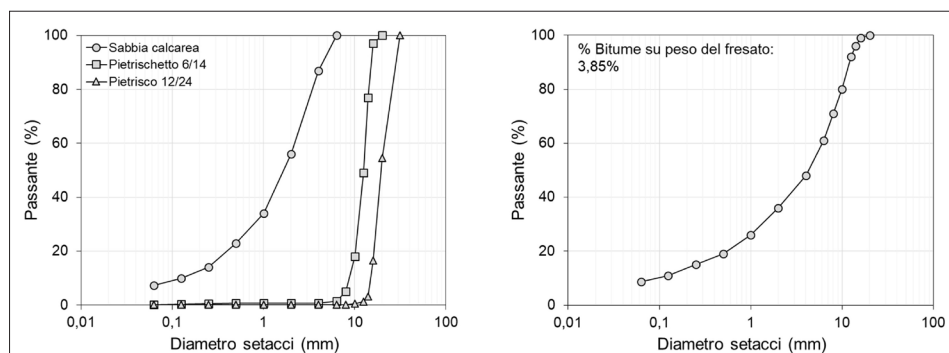
I leganti bituminosi e gli aggregati

Lo studio è stato condotto utilizzando tre leganti bituminosi: due bitumi modificati PmB, un PG 70-10 e un PG 82-10, ed un legante non modificato (PG 58-22) artificialmente "invecchiato" per simulare un legante derivante da granulato di conglomerato bituminoso (Tabella 1). Il legante invecchiato è stato ottenuto mediante un protocollo di invecchiamento a breve termine (Rolling Thin Film Oven Test - RTFOT) seguito da due procedure consecutive di invecchiamento a lungo termine (Pressure Ageing Vessel - PAV) eseguite a 100 °C [7].

Come si può osservare dai risultati in termini di Performance Grade (PG) alla temperatura intermedia di esercizio (PG-IT), il legante PG 82-10 è caratterizzato da una temperatura intermedia inferiore rispetto al legante PG 70-10 indicando quindi un grado di modifica maggiore. Gli aggregati utilizzati per la produzione delle miscele bituminose sono stati campionati presso l'impianto di produzione selezionato per lo studio. Sono state considerate due frazioni di aggregato grosso (6/14 e 12/24), una frazione di aggregato fine (0/4), un filler calcareo ed un granulato di conglomerato bituminoso con dimensione massima nominale dell'aggregato pari a 20 mm. Il contenuto residuo di bitume del granulato è pari al 4,01% in massa rispetto agli aggregati estratti (immagine 2). Il conglomerato bituminoso di riferimento è un materiale per strato di base contenente il 20% di granulato di conglomerato bituminoso e confezionato con il bitume modificato PG 70-10 in misura pari al 4,36% sul peso della miscela. Tale quantitativo è da intendersi comprensivo del bitume di apporto del granulato e di quello vergine. L'assortimento granulometrico di progetto ed il relativo fuso di riferimento vengono riportati nell'immagine 3.

PROPRIETÀ	NORMA	VALORE			
		PG 70-10	PG 82-10	PG 58-22	
				Vergine	Invecchiato
Penetrazione (dmm)	UNI EN 1426	43	68	83	12
Temperatura di rammollimento (°C)	UNI EN 1427	67.2	81.0	45.9	96.8
Ritorno elastico (%)	UNI EN 13398	82	98	-	-
Viscosità @ 160 °C (Pa·s)	UNI EN 13302	0.270	0.508	0.090	1.058
PG-IT (°C)	ASTM D6373	24	21	-	-

Tabella 1. Proprietà dei leganti bituminosi utilizzati



2. Distribuzioni granulometriche: a) inerti vergini; b) granulato di conglomerato bituminoso

La metodologia

Il programma sperimentale è stato articolato in due fasi successive: una prima analisi su scala legante bituminoso e una seconda indagine su scala conglomerato bituminoso.

Fase 1. Studio leganti bituminosi

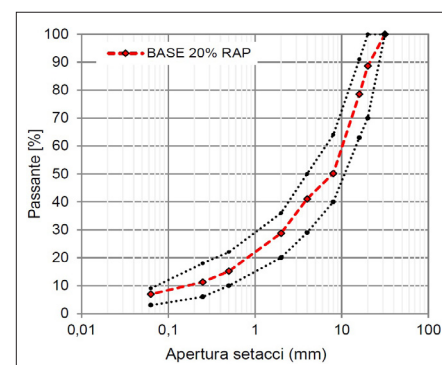
L'obiettivo di questa fase è stato di determinare il contenuto massimo ammissibile di legante invecchiato (20%, 30% o 40%) utilizzabile con il legante PG 82-10, in modo da ottenere una resistenza a fatica comparabile a quella di una miscela bituminosa di riferimento (bitume PG 70-10 con il 20% di legante invecchiato). Le quattro miscele di legante bituminoso sono state caratterizzate in termini di Performance Grade alla temperatura intermedia (PG-IT) e mediante il test Linear Amplitude Sweep (LAS) (AASHTO TP 101), eseguito sia a 20 °C sia alla temperatura PG-IT, dopo l'applicazione di un protocollo di invecchiamento a lungo termine del blend bituminoso (RTFOT + PAV). Le prove sono state eseguite tramite Dynamic Shear Rheometer (DSR).

Fase 2. Studio conglomerati bituminosi

In questa fase sono state prodotte e testate tre miscele bituminose: (1) miscela prodotta in laboratorio con bitume PG 70-10 e il 20% di granulato; (2) miscela prodotta in laboratorio con bitume PG 82-10 e il contenuto massimo di granulato come definito dalla precedente fase; (3) miscela prodotta e campionata presso l'impianto di produzione del conglomerato con bitume PG 82-10 e il contenuto massimo di granulato come definito dalla precedente fase. È bene sottolineare che in questo studio non sono stati adottati additivi rigeneranti.

Le miscele bituminose di laboratorio sono state confezionate

a 180 °C previo riscaldamento degli aggregati, del granulato e del bitume alla stessa temperatura e compattate a 160 °C. La compattazione è stata eseguita mediante pressa a taglio girevole, realizzando provini di diametro pari a 150 mm e un'energia di compattazione pari a 120 giri.



3. Curva granulometrica di progetto del conglomerato bituminoso di riferimento

La miscela prodotta in impianto è stata campionata durante la realizzazione di un campo prova e compattata tramite laboratorio mobile senza riscaldamento aggiuntivo a 160 °C. Il protocollo di compattazione è stato lo stesso descritto in precedenza.

La caratterizzazione delle miscele ha incluso la determinazione del contenuto di vuoti d'aria, la prova di resistenza a trazione indiretta a 25 °C (UNI EN 12697-23), il modulo di rigidezza a trazione indiretta a 5 °C, 20 °C e 40 °C (UNI EN 12697-26 – Allegato C) e la prova di fatica a trazione indiretta a 20 °C (UNI EN 12697-24 – Allegato E).

I RISULTATI SPERIMENTALI

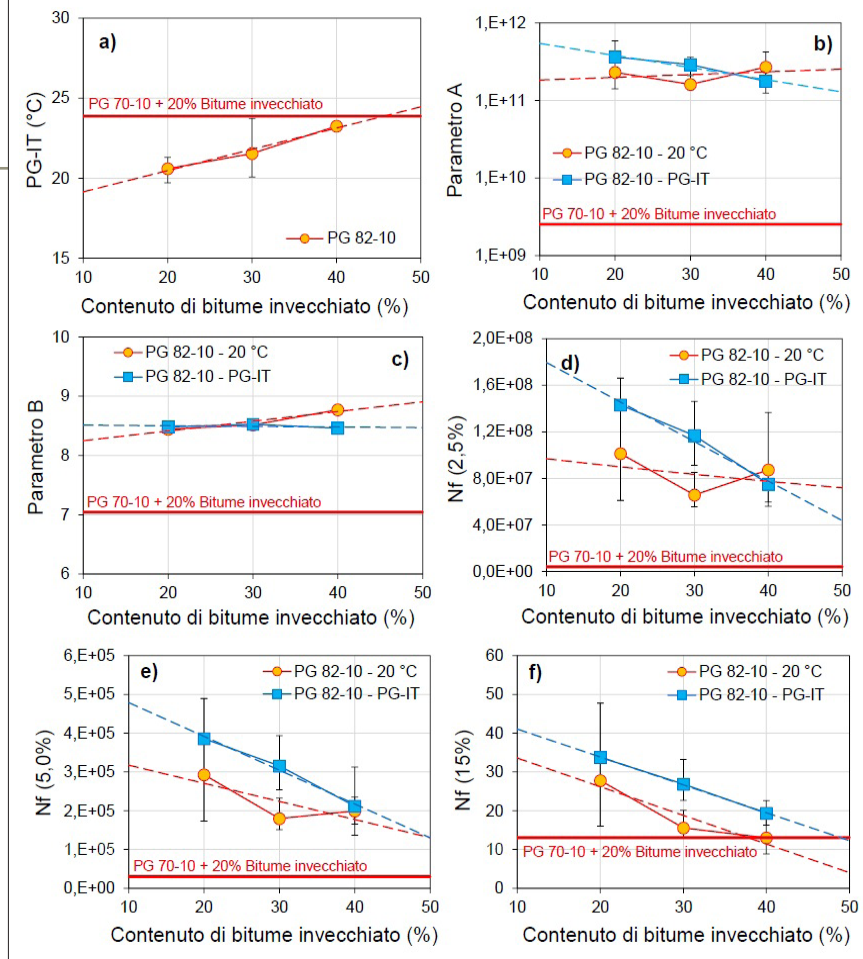
Leganti bituminosi

I risultati ottenuti dalle prove su scala legante bituminoso sono riportati in Figura 4. I risultati sono presentati come media di tre campioni testati per ciascun blend, in termini di Performance Grade alla temperatura intermedia (PG-IT) (Fig. 4a) e di prove Linear Amplitude Sweep (LAS) (Immagini 4b, 4c, 4d, 4e e 4f). I valori relativi al legante di riferimento (PG 70-10 con il 20% di legante invecchiato) sono rappresentati mediante una linea rossa, e sono inoltre riportate le linee relative all'interpolazione dei dati rilevati sulle miscele bituminose confezionate con legante di base PG 82-10.

Il valore medio riscontrato della temperatura intermedia (PG-IT) per la miscela di riferimento è di 23,9 °C, mentre i valori del PG-IT ottenuti dalle mescole contenenti il legante PG 82-10 sono pari a 20,6 °C, 21,5 °C e 23,3 °C con rispettivamente il 20%, 30% e 40% di legante invecchiato (Fig. 4a). Come era lecito aspettarsi, tale temperatura aumenta all'aumentare del contenuto di legante ossidato, suggerendo quindi un peggioramento delle prestazioni a fatica. Sulla base di questi risultati, la determinazione del PG-IT indica un contenuto massimo di granulato in combinazione al legante PG 82-10 pari a circa il 45%.

I risultati della prova LAS mostrano che entrambi i parametri A e B delle leggi di fatica relative ai leganti prodotti con il bitume PG 82-10 sono sempre superiori ai valori della miscela di riferimento, indipendentemente dalla temperatura di prova (Immagini 4b e 4c). Inoltre, entrambi i parametri non sono significativamente influenzati dall'aumento della quantità di legante invecchiato, e non permettono quindi di definire un contenuto massimo accettabile dello stesso.

Le immagini 4d, 4e e 4f mostrano i risultati delle prove LAS in termini di cicli a rottura a livelli di deformazione crescenti, rispettivamente del 2,5%, 5% e 15%. Viene sottolineato l'effetto negativo dell'aumento del contenuto di legante invecchiato sulla resistenza a fatica. Si osserva che per bassi livelli deformativi (2,5% e



4. Risultati delle prove eseguite su leganti bituminosi: a) valori medi del PG-IT; b) valori medi del parametro A; c) valori medi del parametro B; d) numero medio di cicli a rottura per deformazione pari al 2,5%; e) numero medio di cicli a rottura per deformazione pari al 5%; f) numero medio di cicli a rottura per deformazione pari al 15%

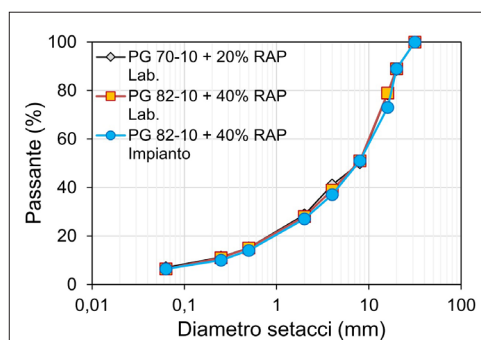
5%), i valori ottenuti a 20 °C sulle miscele contenenti il bitume PG 82-10 risultano meno sensibili all'aumento del contenuto di legante invecchiato rispetto a quelli ottenuti alla temperatura di prova pari al PG-IT. In entrambi i casi, i risultati indicano un contenuto massimo di legante invecchiato superiore al 50% per raggiungere le stesse proprietà del blend di riferimento. Entrambe le linee di tendenza relative alle miscele bituminose a livelli di deformazione più elevati (15%) evidenziano la stessa sensibilità (pendenza della retta di interpolazione) all'aumento del contenuto di legante invecchiato. Tuttavia, i contenuti massimi di legante invecchiato relativi alle temperature di prova 20 °C e PG-IT sono vicini al 40% e al 50%, rispettivamente.

Dall'analisi su scala legante è stato dunque possibile definire un contenuto massimo di legante invecchiato cautelativamente pari al 40%, poiché corrispondente al valore più basso restituito dai diversi parametri indagati. Di conseguenza, le miscele bituminose

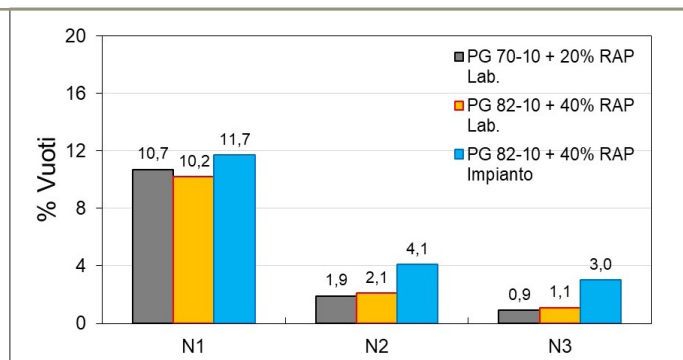
prodotte con il legante PG 82-10 sono state formulate con il 40% di granulato di conglomerato bituminoso.

Conglomerati bituminosi

I tre conglomerati bituminosi investigati in questa fase sono caratterizzati dalla stessa distribuzione granulometrica (immagine 5). I due conglomerati prodotti in laboratorio si riferiscono alla curva granulometrica di progetto, mentre la curva relativa alla miscela prodotta in impianto è stata verificata dopo estrazione del legante (UNI EN 12697-1



5. Curve granulometriche dei conglomerati bituminosi investigati



6. Contenuto di vuoti dei conglomerati bituminosi investigati

e UNI EN 12697-2). Si osserva un'ottima corrispondenza tra i tre conglomerati sottoposti ad analisi.

Nell'immagine 6 si osservano i risultati in termini di contenuto di vuoti medio dei tre conglomerati bituminosi analizzati. Lo studio di laboratorio tra il conglomerato di riferimento e quello contenente il 40% di granulato ha confermato lo stesso tenore di vuoti. I risultati ottenuti invece sul conglomerato prodotto in impianto esprimono un contenuto di vuoti maggiore, dovuto ad una differenza sul contenuto di bitume.

Figura 7 illustra i risultati in termini di resistenza a trazione indiretta (R_{ti}) e coefficiente di trazione indiretta (CTI) misurati a 25 °C su provini compattati ad un'energia di compattazione pari ad N2. Anche in questo caso i risultati ottenuti nella fase di studio di laboratorio evidenziano prestazioni paragonabili, mentre il materiale prelevato in impianto durante le fasi di produzione è caratterizzato da una resistenza a trazione indiretta e da un CTI maggiori, entrambi di circa il 20%. I risultati in termini di modulo di rigidità misurato a tre temperature su provini compattati ad energia di compattazione pari a N2 vengono mostrati nell'immagine 8. I valori riscontrati dalle miscele confezionate in laboratorio evidenziano tendenzialmente una maggior rigidità del conglomerato contenente il 40% di granulato a tutte e tre le

temperature analizzate. Va però sottolineato che tale incremento risulta piuttosto limitato a 5 °C e 20 °C, le quali rappresentano le temperature critiche per valutazioni prestazionali in termini di resistenza a fatica. Il conglomerato contenente il 40% di granulato e prelevato in impianto mostra invece un valore di rigidità mediamente inferiore a 5 °C e significativamente maggiore a 20 °C e 40 °C rispetto agli altri conglomerati.

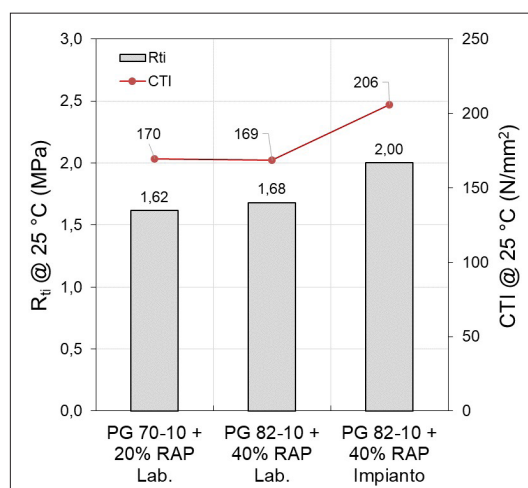
I risultati delle prove di fatica in termini di leggi di fatica sono mostrati nell'immagine 9. Essi indicano parametri comparabili (A , B e ϵ_f) tra la miscela PG 70-10 + 20% RAP prodotta in laboratorio e la miscela PG 82-10 + 40% RAP prodotta in impianto. Allo stesso tempo però la miscela prodotta in laboratorio con il legante PG 82-10 e il 40% di granulato presenta un valore di ϵ_f inferiore, e quindi una resistenza a fatica minore, rispetto alla stessa miscela prodotta in impianto. Tuttavia, a valle dei risultati precedentemente ottenuti, questa differenza potrebbe essere legata a lievi variazioni nelle proprietà del bitume utilizzato.

CONCLUSIONI

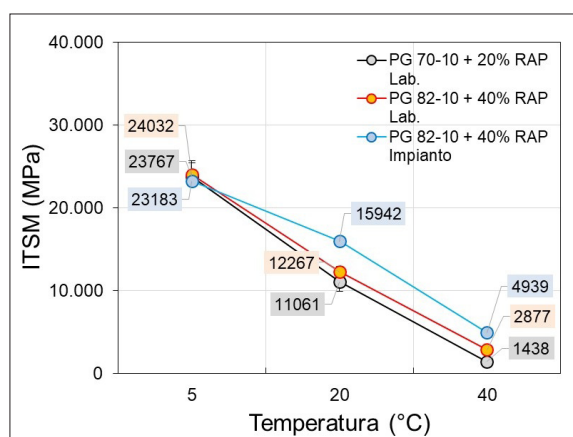
Questo studio ha voluto sviluppare un tema attuale, ovvero quello di ridurre le tempistiche di laboratorio al fine di poter

determinare le prestazioni a fatica di conglomerati bituminosi contenenti elevati dosaggi di granulato di conglomerato bituminoso. Le analisi si sono concentrate su un approccio sperimentale finalizzato a coniugare prove svolte su scala legante bituminoso e su scala conglomerato bituminoso relative a miscele prodotte con due diversi bitumi modificati con polimeri. Il granulato di conglomerato bituminoso utilizzato è stato incrementato dal 20% al 40%. Sono stati messi in evidenza i seguenti risultati:

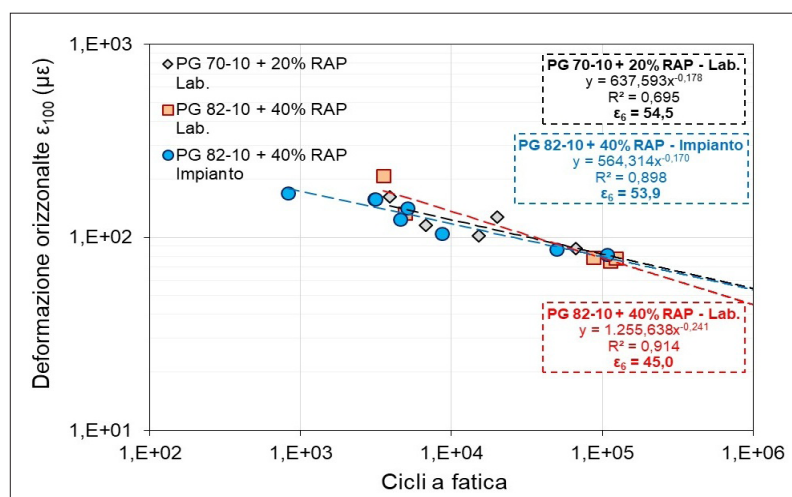
- sono stati considerati diversi parametri di fatica dalle prove LAS



7. Resistenza a trazione indiretta e Coefficiente di trazione indiretta



8. Moduli di rigidità a trazione indiretta



9. Resistenza a fatica

per determinare il contenuto massimo di legante invecchiato. In accordo ai risultati ottenuti in termini di PG-IT e Nf (15%) è stato assunto un contenuto di legante invecchiato pari al 40% come massimo per la produzione dei conglomerati bituminosi da analizzare su scala conglomerato;

- i risultati in termini di resistenza a trazione indiretta e moduli di rigidità evidenziano come le miscele prodotte in laboratorio con il 20% ed il 40% di granulato abbiano caratteristiche del tutto simili. Al contrario il conglomerato bituminoso prodotto in impianto con il 40% di granulato è caratterizzato da resistenza e rigidità globalmente maggiori;
- i risultati delle prove di fatica su scala conglomerato hanno confermato con buona approssimazione quanto osservato su scala legante, in particolar modo con i risultati riscontrati dalla miscela prodotta in impianto durante la realizzazione di un campo prova;
- questo approccio ha permesso di ottenere prestazioni a fatica paragonabili tra i materiali investigati utilizzando un legante modificato con polimeri congiuntamente ad un dosaggio maggiore di granulato rispetto alla miscela di riferimento. Il programma sperimentale in due fasi ha consentito di ottenere tali risultati riducendo sensibilmente le tempistiche di laboratorio.

Studi futuri mireranno alla replicazione di questo approccio considerando diversi tipi di bitumi modificati con polimeri, differenti tipi di additivi rigeneranti e configurazioni differenti delle prove di fatica sulle miscele bituminose. ■

⁽¹⁾ Ing. Direttore Ricerca e Sviluppo STS Mobile Srl

⁽²⁾ Ing. Responsabile Ricerca e Sviluppo STS Mobile Srl

Bibliografia

- [1] Elnaml, I., Mohammad, L. N., Baumgardner, G., Cooper III, S., & Cooper Jr, S. (2024). Sustainability of asphalt mixtures containing 50% RAP and recycling agents. *Recycling*, 9(5), 85.
- [2] Shi, B., Dong, Q., Chen, X., Gu, X., Wang, X., & Yan, S. (2023). A comprehensive review on the fatigue resistance of recycled asphalt materials: Influential factors, correlations and improvements. *Construction and Building Materials*, 384, 131435.
- [3] Zheng, K., Xu, J., & Wang, J. (2023). Viscoelasticity of recycled asphalt mixtures with high content reclaimed SBS modified asphalt pavement. *Sustainability*, 15(3), 2515.
- [4] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016). *Performance Specifications for Asphalt Mixtures*.
- [5] Sudarsanan, N., & Kim, Y. R. (2022). A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 808-835.
- [6] Li, W., Lin, J., Lin, W., & Yu, H. (2025). Fatigue damage evolution mechanism of asphalt binder under variable stress repeated loading. *Polymers*, 17(4), 507.
- [7] Gholami, M., Khodaii, A., & Hajikarimi, P. (2024). Long-term aging simulation of asphalt mixture: A comparative experimental study. *Construction and Building Materials*, 435, 136856.

“La qualità non è un atto ma un’abitudine.”



STS Mobile S.r.l. Servizio Tecnologico Sperimentale

Sede Legale e amministrativa Via G. Conti, 10 • 60131 Ancona (AN) Italy
Tel: +39 071 2865194 • stsmobile@pec.stsmobile.it • www.stsmobile.it

