

Ricerca Sperimentale – 2018/2019

VERIFICA DELLE PRESTAZIONI DI UN BITUME  
MODIFICATO CON POLVERINO DI GOMMA  
DA MACINAZIONE PNEUMATICO FINE USO

# **SINTESI DEL RAPPORTO DI RICERCA**

Autori:

*Ing. Antonio Suma*

*Dott.ssa Serafina Fusaro*

*Ing. Francesco P. Santella*

## 1. Introduzione e obiettivi della ricerca

L'aumento del traffico veicolare e la crescente richiesta di realizzazione di nuove infrastrutture stradali in paesi del mondo con temperature estreme (eccessivamente alte o eccessivamente basse) hanno, nel corso degli anni, aumentato la domanda di utilizzo di leganti bituminosi che possano avere caratteristiche tali da poter essere impiegati per la produzione di conglomerati ad elevate prestazioni meccaniche capaci altresì di avere una maggiore durata nel tempo e una minore necessità di interventi di manutenzione.

Ciò ha portato la ricerca nel campo delle pavimentazioni stradali allo studio di nuovi leganti bituminosi con caratteristiche prestazionali migliori di un bitume tradizionale e di conseguenza all'utilizzo di nuove tecnologie per la produzione di conglomerati con caratteristiche prestazionali più elevate.

Diversi sono stati negli anni i tentativi di produrre leganti bituminosi che possano soddisfare tali nuove necessità.

Una delle metodologie attualmente utilizzate per modificare i leganti è quella di miscelarli con polimeri elastomerici (gomme sintetiche) o plastomerici (materie plastiche) formando un bitume cosiddetto "modificato" che grazie alle sue migliori caratteristiche prestazionali, apporta un grosso contributo alla produzione dei conglomerati con prestazioni più elevate. Secondo tale tecnologia i leganti vengono modificati industrialmente mediante una intima miscelazione ottenuta con l'utilizzo di apparecchiature altamente tecnologiche e con una successiva fase di maturazione del prodotto ottenuto.

L'uso dei bitumi modificati nella produzione di conglomerato bituminoso genera una migliore coesione ed adesione degli inerti, conferendo al manto stradale migliori performance in termini di resistenza alle sollecitazioni, maggiore durabilità nel tempo, nonché migliori prestazioni alle alte e basse temperature. Di contro, però, ciò comporta non solo un grande dispendio di energia sia nella fase di produzione che di maturazione ma anche un sostanziale impegno economico ed un impatto ambientale non indifferente.

Lo scopo della nostra ricerca è stato quello di produrre un legante bituminoso modificato che possa diminuire sensibilmente il dispendio di energia, abbattere i costi di produzione e salvaguardare l'ambiente ma che abbia, tuttavia, caratteristiche prestazionali simili a quelle di un bitume modificato con polimeri vergini e comunque migliori di quelle dei bitumi tradizionali.

L'obiettivo è stato quello di modificare, attraverso un semplicissimo processo di produzione, un legante bituminoso tradizionale, aggiungendo polverino di gomma proveniente dalla frantumazione di pneumatici a fine uso (PFU) e agenti reticolanti.

La scelta dell'utilizzo del polverino di gomma come modificatore del bitume è stata fatta in un'ottica di salvaguardia dell'ambiente scegliendo di utilizzare prodotti di macinazione di pneumatici massimizzando al contempo il recupero e riciclaggio di materiali altrimenti destinati a rifiuto.

È anche necessario aggiungere una serie di vantaggi economici derivanti dalla riduzione dei costi di manutenzione delle strade e l'estensione della loro vita utile.

L'idea della modifica del legante, attraverso una semplice procedura da noi standardizzata, è indirizzata alla produzione di un conglomerato bituminoso, attraverso il cosiddetto processo "dry", con l'aggiunta di polverino di gomma direttamente al mescolatore congiuntamente ad aggregati e bitume.

Per migliorare il controllo dell'interazione tra bitume e gomma sono stati utilizzati agenti reticolanti capaci di modificare la struttura chimica dei due elementi creando una connessione all'interno della matrice formando una struttura a rete tridimensionale che rende più stabile il prodotto.

Per il raggiungimento degli obiettivi prefissati è stata necessaria la caratterizzazione delle miscele mediante alcune prove tradizionali quali: determinazione della penetrazione, determinazione del punto di rammollimento, determinazione del ritorno elastico e determinazione della viscosità dinamica.

È doveroso chiarire che la presenza dei granuli del polverino di gomma nel bitume rende alcune di queste prove non attendibili, infatti, la presenza fisica di particelle di gomma può generare comportamenti anomali durante l'esecuzione delle prove di laboratorio. Per tale ragione, e nel rispetto delle nuove norme prestazionali SHRP (Strategic Highway Research Program), che permettono la classifica dei bitumi secondo le prestazioni richieste al legante una volta messo in opera, si è scelto di analizzare anche il comportamento viscoelastico del bitume mediante l'utilizzo di un reometro rotazionale attraverso il quale si sono valutate le caratteristiche di resistenza e di deformazione di campioni confezionati in laboratorio.

## *2. Procedura di modifiche*

Si è proceduto a modificare un bitume tradizionale, attraverso una procedura standardizzata, eseguita in laboratorio, in grado di simulare i tempi di contatto del bitume con il polverino durante la fase di produzione, dal momento dell'immissione degli ingredienti nel miscelatore, al momento della stesa del conglomerato bituminoso su strada.

La procedura di confezionamento è consistita nell'aggiunta di una determinata percentuale di polverino di gomma e di agenti reticolanti sotto determinate condizioni di temperatura, velocità e tempi di mescolazione, e di produrre miscele differenti per quantitativi e tipologia di agente reticolante ma con la medesima quantità di polverino di gomma.

I campioni confezionati sono stati tutti caratterizzati secondo prove tradizionali e secondo prove reologiche. I valori ottenuti sono stati successivamente confrontati con i valori caratteristici dei due bitumi di riferimento attualmente in commercio: un bitume tradizionale 50/70, in seguito nominato BB (Bitume di Base) e un bitume hard modificato con polimeri di tipo SBS (Styrene-Butadiene-Styrene), in seguito nominato BMP (Bitume Modificato con Polimeri).

### 3. Analisi risultati

Sono stati confezionati 12 campioni con la medesima percentuale di polverino di gomma (10%) e percentuali variabili tra lo 0,5%, l'1% e il 2% di quattro diversi tipi di agenti reticolanti prodotti dall'azienda Activa Srl.

Sono state eseguite le prove tradizionali per valutare le caratteristiche fisiche e le prove reologiche per valutare il comportamento viscoelastico in termini di modulo complesso  $G^*$  (capacità di resistere alle deformazioni) e angolo di fase  $\delta$  (risposta alla sollecitazione).

Pur avendo analizzato tutti i campioni e avendo ottenuto buoni risultati per tutte le miscele, vengono di seguito riportati i risultati dei due migliori campioni, BM4<sub>(0,5%)</sub> e BM5<sub>(0,5%)</sub> ottenuti con due agenti reticolanti specifici alla percentuale di agente reticolante pari allo 0,5%.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalla prova palla/anello, dalla prova di penetrazione e dalla prova di ritorno elastico (tabella 1).

LEGANTI	PALLA-ANELLO (°C)	PENETRAZIONE (dmm)	RITORNO ELASTICO (%)
BB 50/70	49	61	12,5
BM4 <sub>(0,5%)</sub>	52,5	43,3	46,8
BM5 <sub>(0,5%)</sub>	53,5	33	40

Tabella 1 - Valori ottenuti dalle prove di palla-anello, penetrazione e ritorno elastico

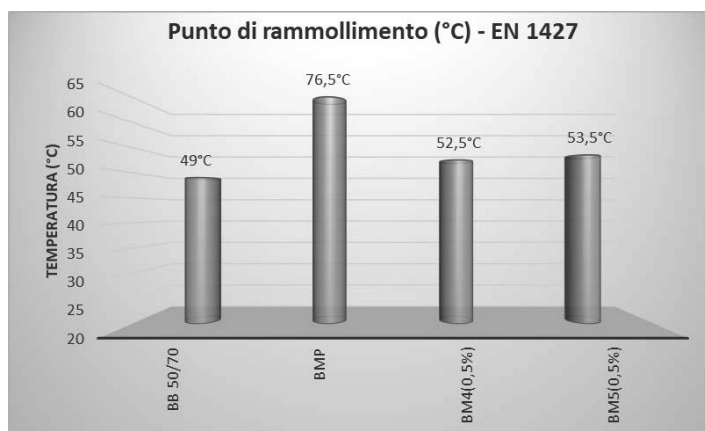


Figura 1 – Grafico dei valori ottenuti dalle prove di palla-anello

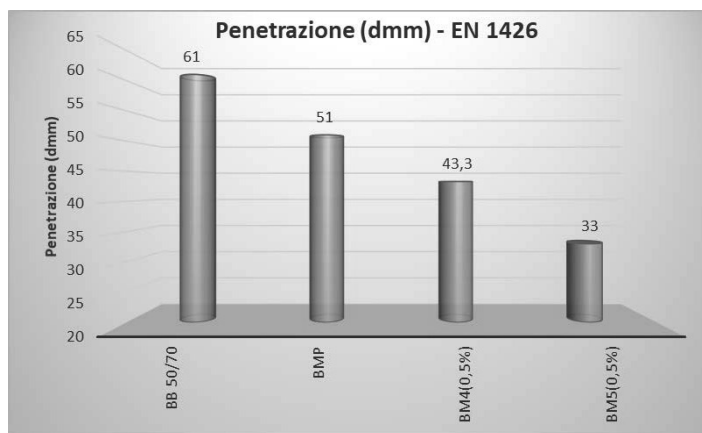


Figura 2 – Grafico dei valori ottenuti dalle prove penetrazione

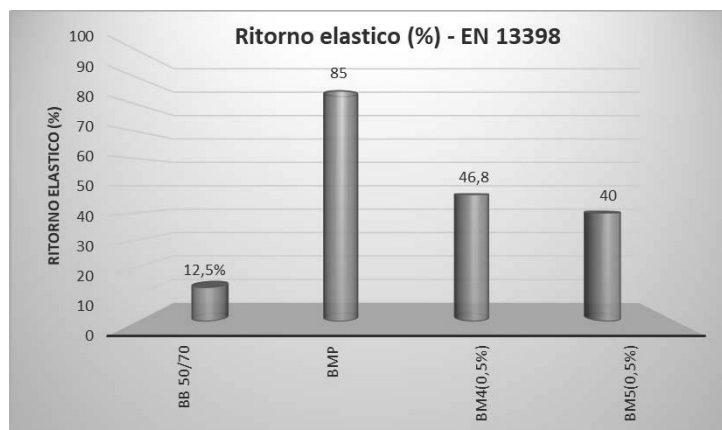


Figura 3 – Grafico dei valori ottenuti dalle prove di ritorno elastico

Dalla tabella di figura 1 e dai grafici di fig. 1, 2 e 3 si nota come la presenza del polverino di gomma, congiuntamente all'utilizzo degli agenti reticolanti:

- innalzano il punto di rammollimento;
- fanno diminuire i valori relativi alla penetrazione;
- migliorano il ritorno elastico.

Dai dati ottenuti sulle viscosità di tutti i tipi di legante testati oggetto di studio, ricavati tutti con il viscosimetro rotazionale, si è potuto costruire le curve che descrivono l'andamento della viscosità in funzione della temperatura.

Di seguito vengono riportati i grafici di confronto tra le viscosità ottenute alla percentuale pari allo 0,5% di agente reticolante dei due migliori campioni di legante.

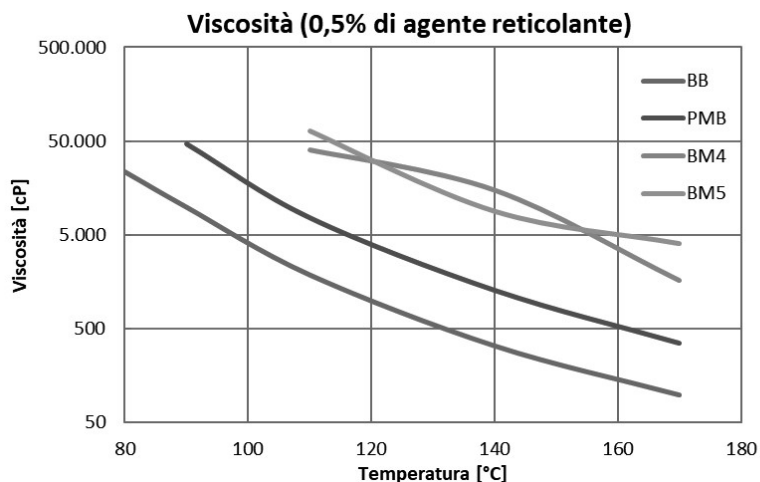


Figura 4 – Grafico della viscosità dinamica con 0,5% di Agente

	BB	PMB	BM4 <sub>(0,5%)</sub>	BM5 <sub>(0,5%)</sub>
T	Viscosità	Viscosità	Viscosità	Viscosità
[°C]	[cP]	[cP]	[cP]	[cP]
110	1865	7680	39700	63500
140	327	1293	14850	8840
170	98	352	1632	3996

Tabella 2 - Valori delle viscosità dinamica al variare della temperatura

L'aumento delle viscosità è un fenomeno atteso e per lo più inevitabile in bitumi modificati con polimeri a causa dell'aumento della consistenza apportata dalla presenza di particelle polimeriche. Tale fenomeno può generare comportamenti anomali durante l'esecuzione delle prove di laboratorio ma soprattutto durante la produzione e la stesa dei conglomerati bituminosi su strada.

Per tale motivo e per meglio caratterizzare i leganti prodotti si è scelto di valutare il comportamento viscoelastico del legante mediante l'utilizzo del reometro rotazionale Haake RT10.

Le impostazioni strumentali e le procedure di prova del reometro hanno permesso di ricavare i valori del MODULO COMPLESSO  $G^*$  e l'ANGOLO DI FASE  $\delta$  dei leganti. Attraverso la

determinazione di questi valori siamo in grado di valutare il comportamento viscoelastico dei campioni al variare delle tensioni e delle deformazioni imposte nello strumento.

I valori ottenuti sono stati diagrammati ai fini della costruzione delle MASTER CURVE o Curve Maestre utili a stabilire l'andamento viscoelastico dei vari tipi di legante.

La costruzione delle curve è avvenuta mediante una traslazione delle curve ottenute dai test a quattro diverse temperature, attraverso procedimenti matematici che permettono di assimilarle ad un'unica curva rappresentativa del comportamento viscoelastico del bitume alla temperatura di 25°C.

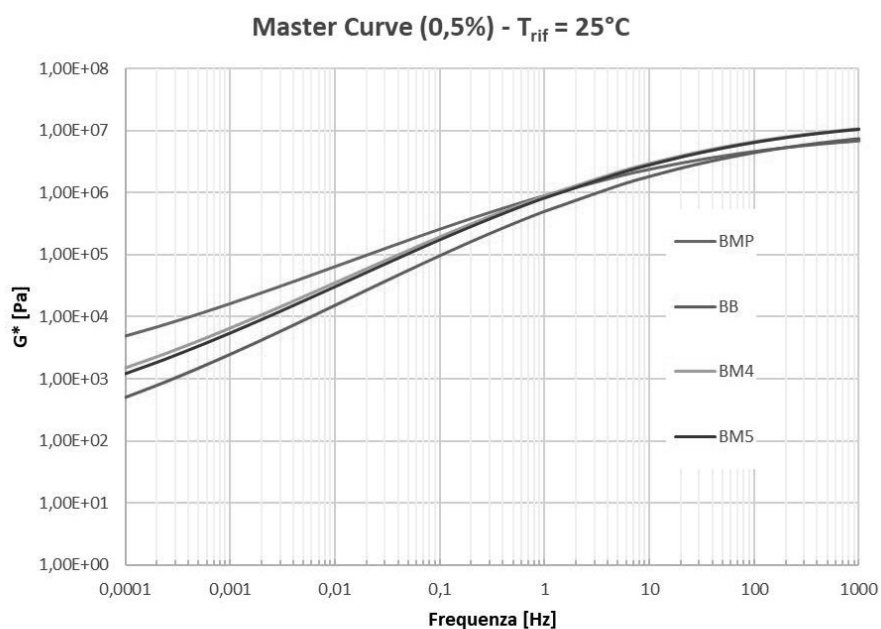


Figura 5 – Master Curve Modulo Complesso  $G^*$  con 0,5% di agenti reticolanti –  $T_{rif} = 25^{\circ}\text{C}$

Analizzando le master curve relative al modulo di deformazione  $G^*$  con la presenza dello 0,5% di agente reticolante, (vedi grafici di figura 5 e 6), si nota che:

- alle basse frequenze corrispondenti a temperature di esercizio maggiori i campioni  $\text{BM4}_{(0,5\%)}$  e  $\text{BM5}_{(0,5\%)}$  hanno valori di  $G^*$  superiori al bitume tradizionale 50/70. Hanno, cioè, una resistenza maggiore alla restituzione delle deformazioni;

- alle alte frequenze, corrispondenti a temperature di esercizio maggiori, i valori di  $G^*$  dei leganti BM4<sub>(0,5%)</sub> e BM5<sub>(0,5%)</sub> tendono ad uno stesso valore del modulo vetroso, più alto del modulo vetroso del BB. Il MODULO VETROSO è il valore di  $G^*$  corrispondente ad un angolo di fase pari 0. A questo valore di modulo di deformazione e di angolo di fase il legante tende ad assumere il comportamento di un corpo solido.
- alle medie frequenze, frequenze generate dal traffico veicolare ed in particolare dei mezzi pesanti, si può osservare che i leganti possiedono caratteristiche di resistenza maggiori rispetto al bitume tradizionale e, cosa interessante, tutti tendono ad avere valori di  $G^*$  simili a quello del bitume modificato con polimeri vergini SBS.

Per quanto riguarda invece le master curve dell'angolo di fase  $\delta$  si può notare che tutti i vari tipi di bitumi prodotti e testati hanno il medesimo comportamento:

- alle basse frequenze corrispondenti a più alte temperature di esercizio, tutti i tipi di bitume testati hanno valori dell'angolo di fase piuttosto simili ( $\sim 80^\circ$ ) e comunque minori dei valori dell'angolo di fase del bitume tradizionale 50/70 ( $\sim 90^\circ$ ). Essi, cioè, possiedono una maggiore componente elastica rispetto al bitume tradizionale 50/70;
- alle alte frequenze, corrispondenti a temperature di esercizio minori, tutti i tipi di bitume possiedono un angolo di fase più basso (dai  $10^\circ$  ai  $20^\circ$ ) rispetto ai bitumi di riferimento (intorno ai  $20^\circ$ ). Questo dimostra che alle basse temperature i bitumi diventano troppo rigidi perdendo la loro viscosità ed aumentandone l'elasticità;
- alle medie frequenze, frequenze generate dal traffico veicolare, i bitumi BM4<sub>(0,5%)</sub> e BM5<sub>(0,5%)</sub> possiedono angoli di fase simili ( $50\div 60^\circ$ ) e quindi medesime caratteristiche viscoelastiche migliori, comunque, del bitume tradizionale BB.



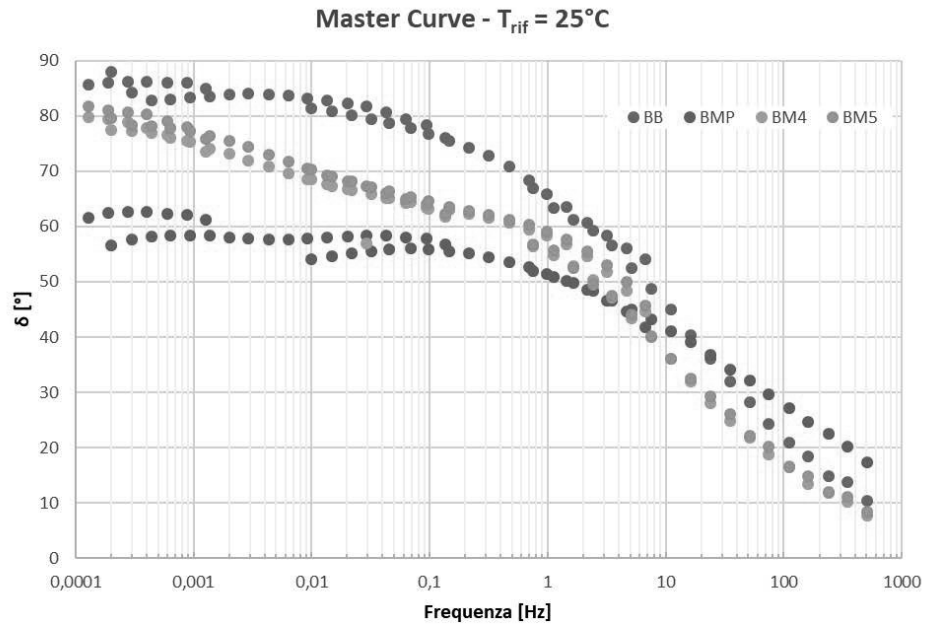


Figura 6 – Grafico dell'angolo di fase  $\delta$  con 0,5% di agenti reticolanti –  $T_{rif} = 25^{\circ}\text{C}$

Di seguito sono tabellati i valori del modulo di deformazione e dell'angolo di fase dei leganti  $\text{BM4}_{(0,5\%)}$  e  $\text{BM5}_{(0,5\%)}$  corrispondenti alle basse frequenze, alle medie frequenze e alle alte frequenze.

Basse frequenze (0,0001 Hz)	BB	$\text{BM4}_{(0,5\%)}$	$\text{BM5}_{(0,5\%)}$
$G^*$ [kPa]	0,503	1,502	1,212
$\delta$ [°]	85,59	79,83	81,66

Tabella 3 – Valori del modulo di deformazione  $G^*$  e dell'angolo di fase  $\delta$  alle basse frequenze ( $T_{rif} = 25^{\circ}\text{C}$ )

Medie frequenze (1 Hz)	BB	BM4 <sub>(0,5%)</sub>	BM5 <sub>(0,5%)</sub>
G* [kPa]	500,798	889,651	824,071
δ [°]	65,85	59,09	56,82

Tabella 4 – Valori del modulo di deformazione  $G^*$  e dell'angolo di fase  $\delta$  alle basse frequenze ( $T_{rif} = 25^\circ\text{C}$ )

Alte frequenze (1000 Hz)	BB	BM4 <sub>(0,5%)</sub>	BM5 <sub>(0,5%)</sub>
G* [kPa]	7419,7	10765,9	10523,7
δ [°]	10,38	7,18	8,37

Tabella 5 – Valori del modulo di deformazione  $G^*$  e dell'angolo di fase  $\delta$  alle alte frequenze ( $T_{rif} = 25^\circ\text{C}$ )

Secondo le norme SHRP i leganti sono classificati in base alla sigla PG (Performance Grade) seguita da due numeri: il primo relativo alla temperatura massima intesa come media dei sette giorni più caldi dell'anno), il secondo inteso come temperatura più bassa rilevata sulla strada.

Sulla scia di queste direttive e con l'utilizzo del reometro rotazionale, siamo stati in grado di costruire le curve del "Rutting Factor" (fattore di deformazione) ottenute come rapporto tra il modulo di deformazione  $G^*$  e il seno dell'angolo di fase  $\delta$ , ricercato a temperature variabili tra 20°C e 90°C, dalle quali siamo stati in grado di ricavare la temperatura limite ( $T_L$ ) per ciascun campione, temperatura alla quale si presentano fenomeni di deformazioni permanenti sotto l'azione di carichi dei veicoli.

Le temperature limite sono le temperature in corrispondenza del valore di  $G^*$  pari a 1 kPa. Esse rappresentano le temperature alle quali si verifica il fenomeno dell'ormaiamento.

I due leganti scelti tra tutti quelli confezionati, il BM4<sub>(0,5%)</sub> ( $T_L=72,5^\circ\text{C}$ ) e il BM5<sub>(0,5%)</sub> ( $T_L=69,5^\circ\text{C}$ ), possiedono una temperatura limite più alta del bitume tradizionale ( $T_L= 68,5^\circ\text{C}$ ).

Ciò significa che l'aggiunta del PFU e degli agenti reticolanti in una percentuale pari allo 0,5% hanno innalzato la temperatura limite rispetto al bitume base.

Per temperature superiori alle temperature limite il conglomerato bituminoso prodotto con questo tipo di leganti inizia a deformarsi sotto l'azione di carichi e le sue deformazioni restano permanenti. Il bitume, cioè, perde la sua viscoelasticità ottimale e diventa plastico.

La determinazione della Temperatura Limite ha permesso di classificare i leganti testati secondo la tabella del Performance Grade in base ai 7 intervalli di temperature:

<b>Performance Grades</b>																																	
Max. Design Temp.	PG 46				PG 52				PG 58				PG 64				PG 70				PG 76				PG 82								
Min. Design Temp.	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	
<b>Original</b>																																	
$\geq 230$ °C	<b>Flash Point</b>																																
$\leq 3$ Pa·s @ 135 °C	<b>Rotational Viscosity</b>																																
$\geq 1.00$ kPa	<b>DSR G*/sin <math>\delta</math> (Dynamic Shear Rheometer)</b>																																
	46				52				58				64				70				76				82								
<b>(Rolling Thin Film Oven) RTFO, Mass Change <math>\leq 1.00\%</math></b>																																	
$\geq 2.20$ kPa	<b>DSR G*/sin <math>\delta</math> (Dynamic Shear Rheometer)</b>																																
	46				52				58				64				70				76				82								
<b>(Pressure Aging Vessel) PAV</b>																																	
20 hours, 2.10 MPa	90				90				100				100				100(110)				100(110)				100(110)								
$\leq 5000$ kPa	<b>DSR G*<math>\sin \delta</math> (Dynamic Shear Rheometer)</b> Intermediate Temp. = [(Max. + Min.)/2] + 4																																
	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	28	
$S \leq 300$ MPa $m \geq 0.300$	<b>BBR S (creep stiffness) &amp; m-value (Bending Beam Rheometer)</b>																																
	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-24
	If BBR m-value $\geq 0.300$ and creep stiffness is between 300 and 600, the Direct Tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement.																																
$\epsilon_t \geq 1.00\%$	<b>DTT (Direct Tension Tester)</b>																																
	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-24

Tabella 6 – Tabella dei valori del Performance Grade

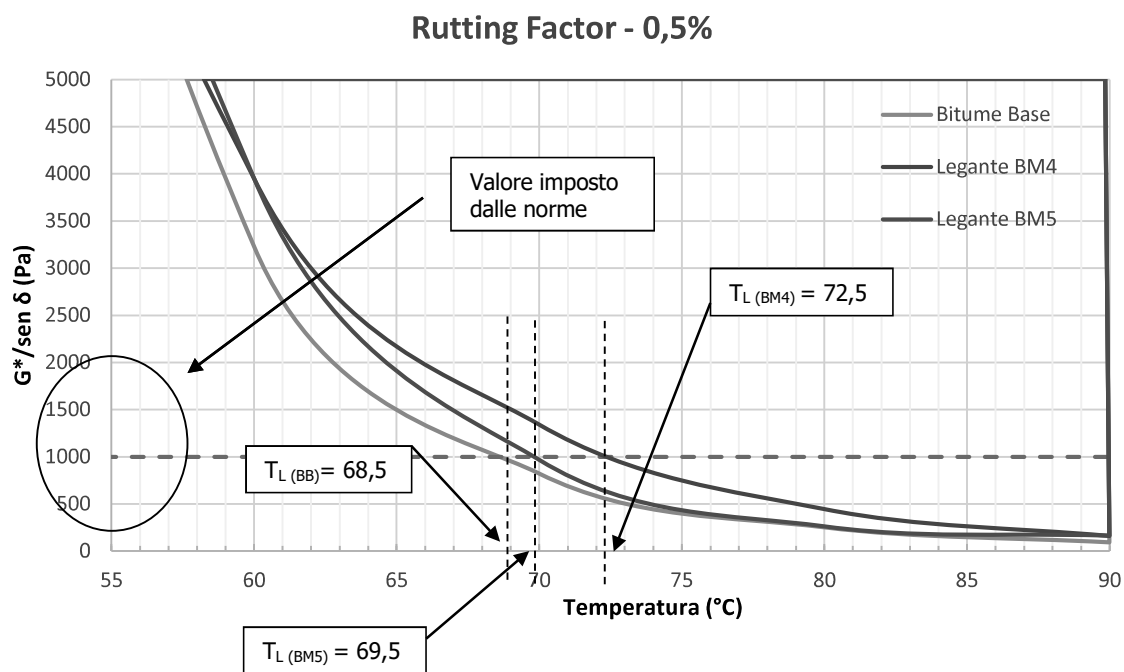


Figura 7 – Grafico delle Curve del “Rutting Factor”

#### 4. Conclusioni

Il lavoro svolto ha messo in risalto i miglioramenti che il polverino di gomma da PFU, congiuntamente all’utilizzo di agenti reticolanti, apporta al bitume di base. Miglioramenti sia dal punto di vista meccanico che funzionale.

Dallo studio reologico dei leganti bituminosi modificati e additivati è emerso come le prestazioni fisiche, meccaniche e reologiche vengano migliorate rispetto a quelle del bitume tal quale, con una diminuzione della rigidità ed un aumento della componente elastica.

Il Performance Grade del legante, inoltre, aumenta il suo intervallo di temperature e si sposta maggiormente a favore delle alte temperature proprio perché il bitume che interagisce con il PFU mantiene una certa duttilità a temperature inferiori rispetto a quanto accade per il legante tal quale.

Mediante l’utilizzo del reometro rotazionale Haake RT10 sono stati ottenuti valori che caratterizzano il comportamento visco-elastico dei leganti confezionati.

Dai risultati ottenuti e dai confronti effettuati con i due bitumi di riferimento, è possibile trarre le seguenti conclusioni:

1. *l'utilizzo del polverino di gomma e degli agenti reticolanti apporta al legante notevoli miglioramenti sia in termini di caratteristiche tradizionali che in termini di comportamento meccanico. Questo lo si nota da:*
  - una diminuzione della penetrazione;
  - un incremento della temperatura di rammollimento;
  - un aumento della percentuale di ritorno elastico;
  - dall'aumento del valore del modulo complesso  $G^*$  come miglioramento della resistenza alla restituzione delle deformazioni sotto azioni di sollecitazioni indotte da carichi,
  - dalla diminuzione dell'angolo di fase  $\delta$  come miglioramento della viscoelasticità;
  
2. *il polverino congiuntamente all'utilizzo degli agenti reticolanti, dà origine ad un bitume modificato che rispetto a quello di partenza ha:*
  - maggiore flessibilità alle basse temperature operative;
  - maggiore rigidità alle alte temperature operative;
  - più ampio intervallo di elastoplasticità (maggiore ampiezza del campo di TL di impiego);
  - migliore correlazione tra viscosità e temperatura con riduzione della suscettività termica;
  - maggiore resistenza ai carichi ed alla fatica;
  - più elevato recupero elastico.