

# Il legante alla prova del conglomerato

DIAMO SEGUITO ALL'ARTICOLO DEDICATO, SUL NUMERO SCORSO, AL NUOVO LEGANTE DRENOVAL PBT (PERPETUAL BINDER TECHNOLOGY) ENTRANDO NEL DETTAGLIO TECNICO DI UNA SERIE DI PROVE EFFETTUATE IN COLLABORAZIONE CON LE UNIVERSITÀ SU CAMPIONI DI CONGLOMERATO PRODOTTO E STESO PER UN IMPORTANTE CANTIERE ALTOATESINO: DA UN CONFRONTO EFFETTUATO TRAMITE APPLICAZIONE DELLA MECCANICA DELLA FRATTURA ALLA VALIDAZIONE DI UNA COSPICUA SERIE DI PARAMETRI PRESTAZIONALI.

**I**l laboratorio R&D del settore pavimentazioni stradali di Valli Zabban ha studiato e sviluppato un nuovo legante HiMA 25/55-80 per la costruzione di pavimentazioni ecosostenibili a lunga durata. Il nuovo legante Drenoval PBT (Perpetual Binder Technology) è stato testato in laboratorio con prove prestazionali che ne hanno evidenziato un ottimo comportamento sia

in termini di resistenza alle deformazioni permanenti che in termini di resistenza alle fessurazioni termiche e a fatica (abbiamo approfondito le caratteristiche di questa soluzione tecnica stradale ad alta innovazione sul numero scorso, *leStrade* 1-2/2022). Questi test, tuttavia, non sono sufficienti per quantificare l'aumento della vita utile di una pavimentazione impiegando Drenoval PBT rispetto a un tradi-

**1. Visuale del campo prove in Alto Adige**



**Massimo Paolini**  
Direttore Tecnico  
Valli Zabban SpA

**Gabriele Tebaldi**  
Università di Parma

**Edoardo Bocci**  
Università e-Campus

zionale bitume modificato di tipo Hard. Per questa ragione, è stato necessario eseguire prove prestazionali sul conglomerato prodotto con il nuovo legante. "Impastando" il materiale in laboratorio non è però possibile simulare l'invecchiamento del legante causato da produzione, trasporto e stesa del conglomerato. Per produrre campioni di conglomerato per le prove a fatica che fossero i più rappresentativi possibili, è stato pertanto necessario realizzare un campo prove che permettesse di compattare i provini con la pressa giratoria direttamente alla stesa. Il campo prove sarebbe poi servito anche per tenere monitorato il conglomerato nel tempo per valutarne il decadimento, soprattutto se si fosse riusciti ad allestirlo su una strada che avesse importanti escursioni termiche e un elevato volume di traffico. Per questo motivo, è stato chiesto alla Provincia Autonoma di Bolzano la possibilità di realizzare il campo prove sulla sua rete viaria. La Provincia, da parte sua, ha dato la disponibilità per eseguire il campo prove sulla SP 49 in Val Pusteria, nella nuova strada di accesso alla SP 244 della Val Badia nell'ambito di un appalto in capo alle imprese Strabag e Alpenbau. Il conglomerato è stato prodotto e steso dall'impresa Kofler&Rech.

Per valutare le prestazioni della miscela, soprattutto in termini di durata, è stato scelto di testare un conglomerato prodotto di binder in quanto, insieme alla base, è quello che dovrebbe durare più a lungo per garantire l'ecosostenibilità della pavimentazione. Nel campo prove sono state stese due tipologie di binder prodotti entrambi con la stessa curva granulometrica e percentuale di legante andando a variare soltanto il tipo di bitume. Il conglomerato è stato prodotto nell'impianto Amman dell'impresa Kofler&Rech a una temperatura di uscita dal mescolatore di 165 °C. I campioni di conglomerato sono stati prelevati alla stesa e compattati immediatamente sul laboratorio mobile con la pressa giratoria a un N design di 110 giri. Dato l'elevato numero di provini da dover compattare per le prove richieste e non

volendo riscaldare ulteriormente il conglomerato per non andare ad alterarne le caratteristiche, sono stati impiegati 2 laboratori mobili, uno Valli Zabban e uno della Provincia Autonoma di Bolzano.

La curva granulometrica risultata dalle analisi è riportata in fig. 2, mentre il contenuto di legante riscontrato è stato del 4,8% sul peso degli inerti. Di seguito, entriamo nel dettaglio dei risultati delle prove effettuate sul conglomerato. In primo passaggio valuteremo la differenza del decadimento prestazionale tra un conglomerato prodotto con bitume modificato tradizionale e uno prodotto con Drenoval PBT tramite l'applicazione della meccanica della frattura. Infine, presenteremo i risultati di un'analisi sperimentale delle prestazioni di conglomerati bituminosi con legante Drenoval PBT, nonché della validazione in campo prove.

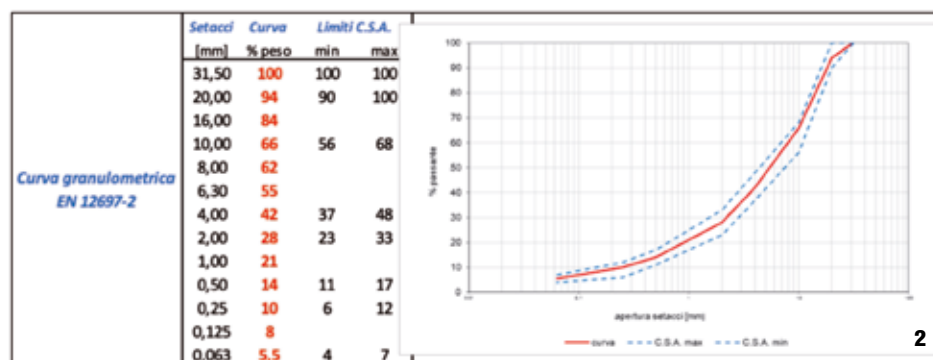
## Decadimento prestazionale e meccanica della frattura

Lo studio (sviluppato, nello specifico, dall'Università di Parma) alla base delle seguenti considerazioni si è focalizzato sulla valutazione delle differenze di decadimento prestazionale tra un conglomerato bituminoso prodotto con bitume modificato tradizionale e un conglomerato bituminoso prodotto con Drenoval PBT, utilizzando uno dei più completi approcci per la definizione della risposta a fatica basato sulla meccanica della frattura. Lo studio del comportamento a fatica delle miscele è certamente uno dei metodi più completi, poiché fornisce dettagli fondamentali sulla loro risposta dinamica e sulla conseguente vita utile. È noto che la fatica nel conglomerato bituminoso è dovuta a un danno cumulativo alla base degli strati legati a bitume che, nel tempo, provoca la formazione di fessure, portando inevitabilmente l'infrastruttura al collasso. Il fenomeno di innesco e propagazione della frattura ricopre quindi un ruolo fondamentale nella corretta identificazione della risposta prestazionale di un dato materiale a lungo termine.

La frattura nel conglomerato bituminoso ha generalmente inizio con l'innesco di micro-fratture che tendono a coalizzarsi e a propagarsi formando macro-fratture che portano il materiale al collasso. Il fenomeno non risulta di semplice interpretazione a causa dell'eterogeneità e della natura visco-elasto-plastica del materiale. Il modello interpretativo "HMA (Hot Mix Asphalt) Fracture Mechanics", sviluppato presso l'Università della Florida e basato sui principi della meccanica della frattura, fornisce un approccio completo per la determinazione dei limiti di rottura del conglomerato bituminoso poiché tiene conto sia dell'innesco che della propagazione della frattura, considera stati tensionali ge-

### 2. Curva granulometrica risultata dalle analisi

### 3. Provini alla pressa giratoria e laboratorio mobile



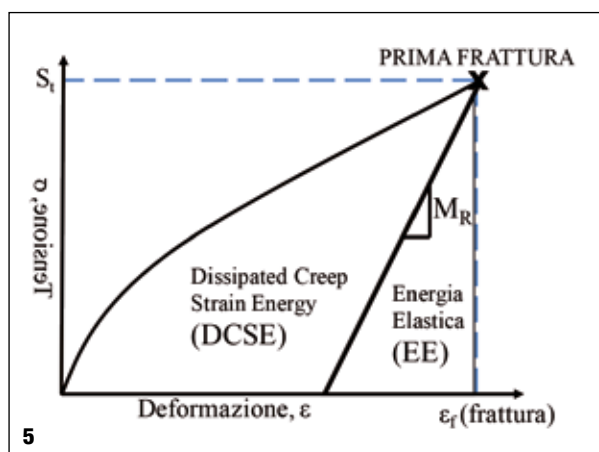
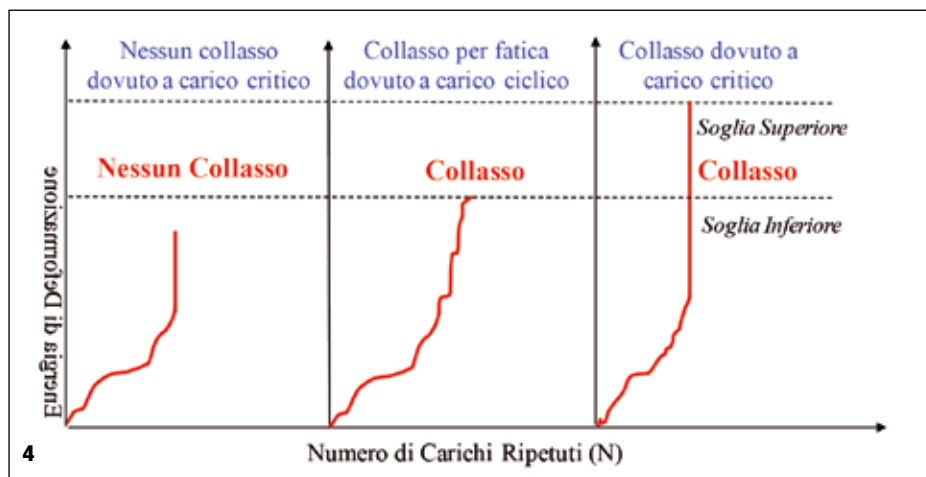
neralizzati, interpreta il comportamento del conglomerato come viscoelastico.

L'implicazione che sta alla base di tale modello è che non è sufficiente monitorare i cambiamenti relativi a un singolo parametro (resistenza o rigidità) per valutare gli effetti del micro e macro danno sulle miscele; piuttosto la modifica di tali parametri è da attribuire alle variazioni nelle proprietà visco-elastiche delle miscele. Il modello introduce il concetto dell'esistenza di una soglia energetica come parametro chiave per l'interpretazione del meccanismo di fessurazione nei conglomerati bituminosi. Tale concetto si basa sull'osservazione che il micro-danno, ovvero il danno non associato all'innesco e propagazione della frattura, risulta totalmente autoriparabile, mentre il macro-danno, ovvero la formazione di una vera e propria frattura, è a tutti gli effetti irreversibile. Questo indica che esiste una soglia di danno al di sotto della quale le fratture risultano completamente autoriparabili, come mostrato in fig. 4.

La frattura nei conglomerati bituminosi si può sviluppare secondo due modalità definite da due diverse soglie energetiche. La soglia inferiore, *Dissipated Creep Strain Energy* (DCSE), è associata a un'applicazione del carico di tipo ciclico: il materiale è soggetto a una frattura irreversibile quando la percentuale di danno accumulato supera la percentuale di autoriparazione del materiale. La soglia superiore, *Fracture Energy* (FE) corrisponde invece all'energia richiesta dal conglomerato per arrivare a rottura con una singola applicazione di carico. È stato dimostrato che questi due parametri sono facilmente calcolabili utilizzando la curva sforzo-deformazioni orizzontali ottenuta da una prova di trazione indiretta: il parametro FE corrisponde all'area sottesa dalla curva nel punto di innesco della macro-frattura, mentre il parametro DCSE corrisponde al FE meno l'Energia Elastica (EE), come mostrato in fig. 5. Sulla base di questo modello si è individuato che sono sufficienti 5 proprietà del materiale per definirne le prestazioni in termini di resistenza alla rottura e all'accumulo di deformazioni permanenti. Questi parametri si ottengono da 3 test in configurazione di trazione indiretta secondo la procedura Superpave IDT.

### Materiali impiegati

I leganti impiegati sono un bitume modificato tradizionale Drenoval HARD M e il nuovo bitume Drenoval PBT (tab. 1). I conglomerati sono stati confezionati impiegando la stessa curva granulometrica e lo stesso tipo di aggregati al fine di ridurre al minimo le variabili che potessero influenzarne il comportamento globale. La granulometria è quella tipica di una miscela per strati di binder con dimensione massima degli aggregati pari a 16 mm, entrambi presenti con la stessa percentuale sul peso degli aggregati pari al 4.8%. Le miscele sono state compattate direttamente alla stesa con il laboratorio Mobile di Valli Zabban e quello della Provincia Autonoma di Bolzano. La compattazione è stata effettuata con pressa giratoria settata per garantire la stessa percentuale di vuoti pari a circa il 3-4%. Per semplicità le miscele verranno denominate HM (prodotta con bitume modificato tradizionale Drenoval Hard M) e PBT (prodotta con bitume Drenoval PBT).



**4. Modalità di innesco delle fratture nel conglomerato bituminoso sulla base del concetto di soglia energetica**

**5. Stima delle due soglie energetiche per il conglomerato bituminoso**

**6. Configurazione di prova del test IDT**

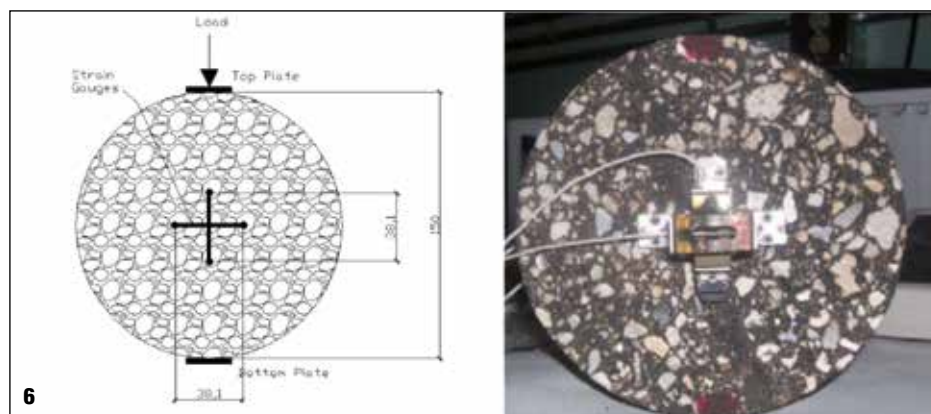
### Metodologia di prova

I parametri per l'identificazione della risposta a fatica dei conglomerati bituminosi si ottengono da 3 semplici test in configurazione di trazione indiretta secondo la procedura

**TAB. 1 CARATTERISTICHE DEI BITUMI A CONFRONTO**

Caratteristiche	Drenoval Hard M	Drenoval Pbt
Penetrazione a 25°C (dmm)	48	50
Punto di Rammollimento (°C)	72.0	98.0
Coesione – Force Ductility Test a 10°C (J/cm <sup>2</sup> )	3.28	7.44
Viscosità dinamica a 160 °C (Pa·s)	0.44	0.62
RTFOT a 163°C		
Permanent deformation (T °C = G*/senδ ≥ 2.2 kPa)	75	87
Multi Stress Creep Recovery JNR 3,2 Pa a 64°C (kPa-1)	0.299	0.038
Multi Stress Creep Recovery R 3,2 Pa a 64°C (kPa-1)	54.8	92.1
RTFOT + PAV		
Fatigue cracking (T °C = G*·senδ ≤ 5000kPa)	21	15
Low Temperature cracking (BBR T °C=S ≤ 300MPa)	-18	-24





Superpave IDT alla temperatura di 10°C per garantire che il materiale mantenga un comportamento viscoelastico. Si utilizza un provino cilindrico, di 150 mm di diametro e 30 mm di spessore, ottenuto tagliando i provini compattati tramite pressa giratoria, scartando i dischi alle estremità per evitare problemi legati a densità non omogenee. Il provino viene posizionato su due piattini, uno inferiore ed uno superiore larghi 25,4 mm e lunghi 50,8 mm. Sul provino vengono inoltre applicati due estensimetri di lunghezza 38,1 mm con la funzione di misurare le deformazioni orizzontali e verticali che il provino subisce durante l'applicazione del carico, come mostrato in fig. 6. I 3 test sono stati effettuati in maniera sequenziale sullo stesso provino e sono di seguito descritti.

#### Modulo Resiliente (MR)

Il Modulo Resiliente è definito come il rapporto tra la tensione applicata  $\sigma(t)$  e la deformazione recuperabile sotto carico ciclico  $\epsilon_r$ . La prova è effettuata in controllo di carico applicando un'onda impulsiva che prevede un'applicazione di una sollecitazione per 0,1 secondi, seguita da un periodo di riposo di 0,9 secondi, mantenendo le deformazioni orizzontali in range viscoelastico.

#### Prova di Creep Statico

La prova è condotta in modalità di controllo di carico applicando una sollecitazione statica (per 1000 secondi), selezionata per mantenere la deformazione orizzontale nell'intervallo viscoelastico lineare. Dal test di creep statico si ottengono due diversi parametri tra loro correlati: il creep

compliance e l'm-value che vengono descritti tramite la curva di creep. Il creep compliance è definito come il rapporto tra la deformazione dipendente dal tempo  $\epsilon(t)$  e la sollecitazione applicata  $\sigma(t)$  a 1000 secondi, mentre il parametro m-value coincide con il coefficiente angolare della parte finale della curva. La curva di creep statico rappresenta quindi la dipendenza del comportamento del conglomerato bituminoso dal tempo; è quindi solitamente utilizzata per valutare il tasso di accumulo delle deformazioni permanenti.

#### Test a rottura

Il test di trazione indiretta viene effettuato per determinare i limiti di rottura del conglomerato: resistenza a trazione indiretta ( $T_s$ ), deformazione ultima ( $\epsilon_f$ ), FE e DCSE. Il test viene effettuato imponendo una velocità di abbassamento trasversale pari a 0,084 mm/sec. Lo stato tensionale al centro del provino viene stimato attraverso la seguente equazione [3]:

$$T_s = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

In cui P è il carico applicato (N), t lo spessore (mm) e D il diametro (mm) del provino in esame. La Fracture Energy (FE) viene calcolata come l'area sottesa dalla curva sforzo-deformazioni orizzontali, al punto di innesco della prima macro-frattura, mentre la Dissipated Creep Strain Energy (DCSE) è data dalla FE meno il contributo elastico Elastic Energy (EE) facilmente ottenibile dal Modulo Resiliente precedentemente calcolato.

#### Valutazione delle prestazioni

Entrambi i conglomerati bituminosi, HM e PBT, sono stati sottoposti al Superpave IDT su un totale di 10 provini, 5 per ogni miscela. I risultati medi ottenuti sono evidenziati in tab. 2. Il Modulo Resiliente è un indicatore della rigidità elastica del materiale. I risultati mostrano che entrambe le miscele raggiungono valori di Modulo Resiliente altamente soddisfacenti (superiori a 10 GPa). Era già stato evidenziato in precedenti studi che a piccoli valori di deformazione e/o brevi tempi di carico, il quantitativo e il tipo di modifica non hanno una significativa influenza sul responso elastico del conglomerato, che è invece maggiormente attribuibile allo scheletro litico della miscela. Bisogna però sottolineare che la miscela realizzata con bitume PBT risulta meno rigida di quella contenente bitume HM, mostrando quindi un comportamento globalmente meno fragile. Maggiore è infatti il valore del Modulo Resiliente, più ripida risulta la pendenza della curva sforzo-deformazioni mostrata in fig. 5. La curva di creep statico è invece indicativa della tendenza del materiale ad accumulare le deformazioni permanenti. In particolare, il valore di creep compliance registrato a 1000 secondi è una misura del tasso di deformazione permanente: essendo il processo di crescita della frattura manifestato da elevate deformazioni accumulate, le miscele con elevato valore di creep mostrano elevati tassi di crescita della frattura. L'm-value rappresenta il coefficiente angolare della parte finale della curva di creep statico: più alta è la pendenza, più è elevato il tasso di deformazione permanente.

TAB. 2 RISULTATI DELLE PROVE SECONDO PROCEDURA SUPERPAVE IDT

Conglomerato bituminoso	HM	PBT
Modulo Resiliente (GPa)	17.30	12.52
Creep Compliance @1000 seconds (1/GPa)	1.65	1.11
m-value	0.46	0.39
Resistenza a Trazione (MPa)	2.51	2.53
Deformazione ultima (10-6)	747	1264
Dissipated Creep Strain Energy - DCSE (kJ/m <sup>3</sup> )	0.92	1.863
Fracture Energy - FE (kJ/m <sup>3</sup> )	1.19	2.13

Il processo di crescita delle fessure è chiaramente funzione dell'accumulo di deformazioni permanenti, quindi le miscele con alti valori di m-value e creep compliance mostrano tassi più rapidi di crescita delle fessure.

Studi precedenti hanno evidenziato come miscele ad elevate prestazioni mostrino valori di creep in un range tra 2,0 e 1,5 (1/GPa) e di m-value tra 0,5 e 0,3 [4,5]. Entrambe le miscele mostrano valori altamente soddisfacenti ovvero creep inferiori a 2.0 (1/GPa) e m-value inferiori a 0.5. In fig. 7 sono messe a confronto le curve di creep compliance ottenute per le due miscele: si evince come la presenza del bitume PBT porti a una forte riduzione del tasso di deformazione permanente rispetto alla miscela contenente bitume HM, portando a valori significativamente inferiori di accumulazione del micro-danno (33%).

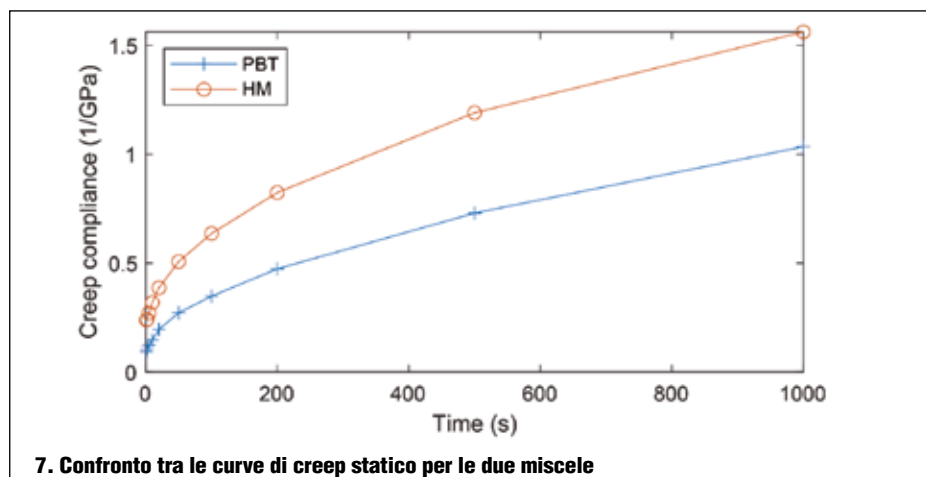
Dal test di rottura si sono ricavati i valori di resistenza a trazione indiretta  $T_s$ , la relativa deformazione ultima  $\epsilon_f$  (individuati al punto di innesco della prima macro-frattura) e i due parametri energetici FE e DCSE. Come si può osservare in fig. 8a, i valori della resistenza a trazione indiretta dei due materiali sono assolutamente confrontabili. Questo risultato non è inaspettato in quanto già precedenti ricerche avevano confermato come questo parametro, valutato singolarmente, non è indicativo della risposta prestazionale del conglomerato bituminoso, poiché poco sensibile al contributo visco-elastico apportato dal legante. La resistenza a trazione indiretta diventa significativa se associata alla deformazione ultima al momento di innesco della frattura (fig.8b). Si osserva infatti una importante variazione del tenore deformativo prima del raggiungimento del collasso: la miscela PBT mostra una capacità deformativa pari a quasi il doppio di quella della miscela HM.

Questa peculiarità della miscela PBT si riflette sul raggiungimento di soglie energetiche significativamente maggiori di quelle raggiunte dalla miscela HM che comunque mostra ottimi valori di soglia (maggiore di 1 per la Fracture Energy e maggiore di 0,8 per la DCSE, come da letteratura). La presenza del bitume PBT è quindi in grado di incrementare notevolmente le prestazioni di un conglomerato bituminoso in termini di resistenza a rottura e a fatica anche rispetto a un conglomerato confezionato con bitume modificato ad elevate prestazioni.

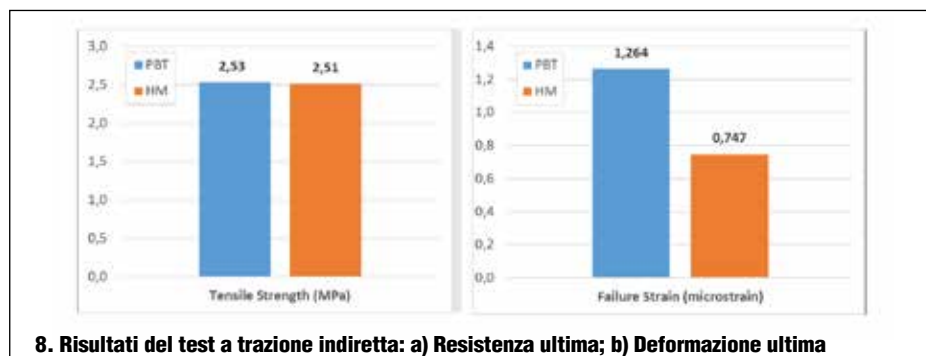
Il parametro Fracture Energy può essere utilizzato anche per stimare una curva di decadimento della resistenza a fatica della miscela nel tempo. Utilizzando una curva di decadimento caratterizzante una miscela di binder confezionato con bitume modificato DDL, ottenuta campionando e testando negli anni carote estratte direttamente in sito, si può fare una previsione delle due curve di decadimento caratterizzanti le due miscele HM e PBT. Come mostrato in fig. 10, il conglomerato realizzato con bitume PBT ha una aspettativa di vita utile nettamente superiore rispetto agli altri conglomerati, la quale può essere stimata maggiore di 30 anni (circa il 30% in più rispetto a miscele già altamente performanti).

## Validazione delle prestazioni

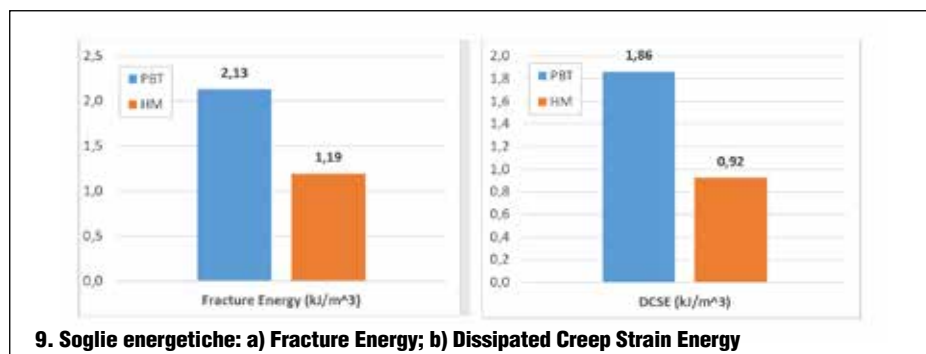
Approfondiamo ulteriormente il "caso Drenoval PBT" rendendo conto dei risultati di un'ulteriore campagna di pro-



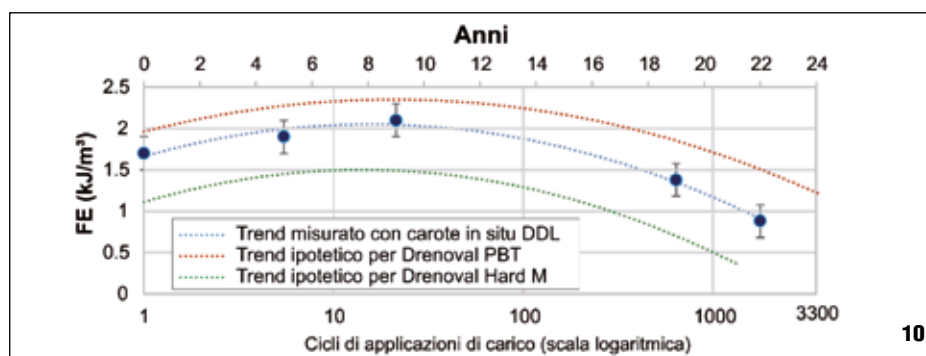
7. Confronto tra le curve di creep statico per le due miscele



8. Risultati del test a trazione indiretta: a) Resistenza ultima; b) Deformazione ultima



9. Soglie energetiche: a) Fracture Energy; b) Dissipated Creep Strain Energy



10

ve prestazionali del conglomerato bituminoso svolte, nello specifico, dall'Università e-Campus, nella medesima cornice del campo prove altoatesino e utilizzando i medesimi campioni. Sui provini compattati in sito con pressa giratoria mediante laboratorio mobile è stata effettuata un'estesa campagna di indagini con l'obiettivo di confrontare le proprietà

**10. Previsione di durata in termini di vita utile della miscela PBT**

**11. Stesa sperimentale e compattazione del conglomerato bituminoso tipo binder con legante Drenoval PBT**

**12. Determinazione del contenuto di vuoti:**  
(a) misurazione delle dimensioni del provino,  
(b) valori dei vuoti dei conglomerati bituminosi HM e PBT

**13. Determinazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta:**  
(a) esecuzione della prova,  
(b) valori di ITSM dei conglomerati bituminosi HM e PBT



11a



11b

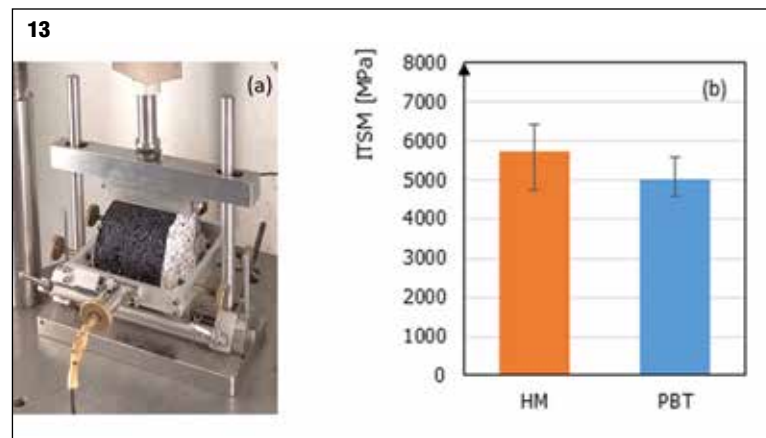
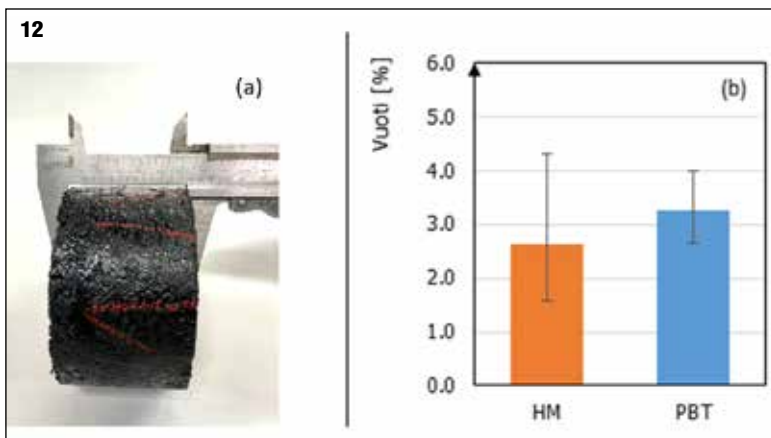
volumetriche, meccaniche, reologiche e prestazionali delle miscele realizzate con i differenti leganti (di seguito indicate con le sigle "HM" e "PBT").

### Risultati sperimentali

Al fine di verificare la lavorabilità della miscela PBT, è stato misurato il contenuto di vuoti dei provini compattati con pressa giratoria a 100 giri secondo la norma UNI EN 12697-8. In particolare, la massa volumica apparente è stata determinata in base alle dimensioni del provino mentre la massa volumica massima è stata calcolata matematicamente in base alla densità e alla proporzione dei componenti (aggregato e bitume). Come illustrato in fig. 12, le miscele HM e PBT hanno mostrato entrambe un contenuto di vuoti relativamente basso (circa 3%). Ciò conferma che il legante Drenoval PBT, appositamente formulato per avere una viscosità confrontabile con quella dei tradizionali bitumi hard, consente di ottenere facilmente un buon grado di addensamento della miscela.

Il comportamento meccanico dei conglomerati bituminosi è stato investigato attraverso prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) alla temperatura di 20 °C, secondo la norma UNI EN 12697-26 - Annex C. I risultati di fig. 13 evidenziano una rigidezza paragonabile tra le miscele HM e PBT, con valori intorno a 5000-5500 MPa nelle condizioni di prova (temperatura di 20 °C, tempo di carico di 124 ms).

Per esaminare con maggior precisione le proprietà visco-elastiche dei due materiali sono state eseguite prove dinamiche monoassiali a compressione a differenti temperature (tra 5 e 50 °C) e frequenze (tra 0,1 e 20 Hz) per la determinazione del modulo complesso, secondo la norma statunitense AASHTO T378. Tale protocollo di prova prevede l'applicazione di onde di carico sinusoidali che determinano sul provino una deformazione verticale costante e relativamente piccola ( $50 \times 10^{-6}$  mm/mm), in modo da sollecitare il materiale all'interno del campo di visco-elasticità lineare. Il rapporto tra l'ampiezza delle onde di carico e di





deformazione ed il loro sfasamento temporale definiscono rispettivamente il modulo complesso  $|E^*|$  e l'angolo di fase  $\varphi$  del conglomerato bituminoso (fig. 14).

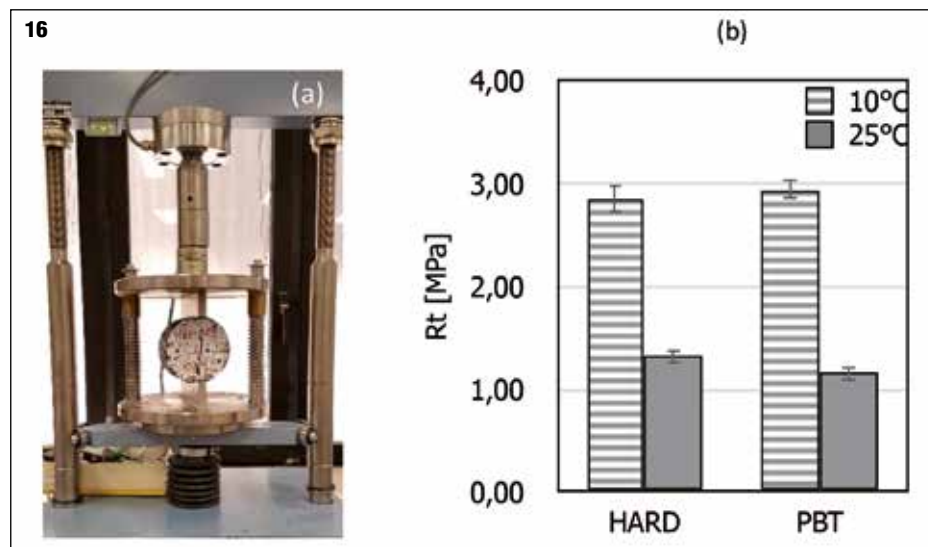
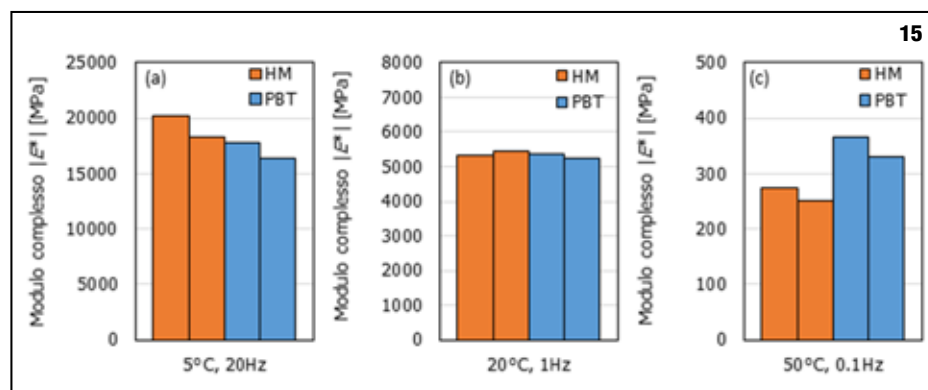
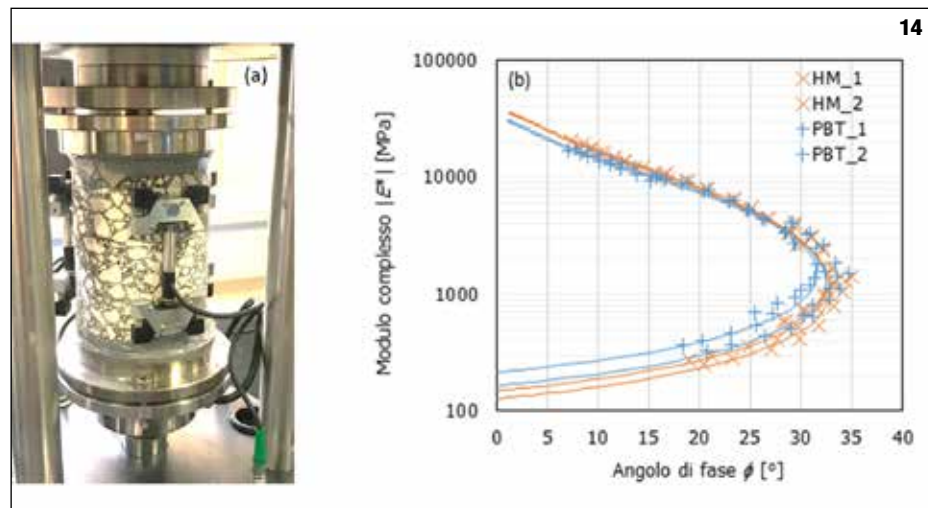
Il grafico di fig. 14b mostra il comportamento reologico dei conglomerati bituminosi HM e PBT nel diagramma di Black, dove la norma del modulo complesso  $|E^*|$  (o più semplicemente "modulo complesso") è rappresentata in funzione dell'angolo di fase  $\varphi$  al variare di temperatura e frequenza di prova.

Dal grafico si può osservare che le curve blu (conglomerato PBT) sono posizionate "all'interno" delle curve rosse. In particolare, si può notare che i valori di angolo di fase dei provini PBT risultano inferiori rispetto a quelli dei provini HM, denotando una maggiore elasticità. Inoltre, nella parte alta del grafico (corrispondente alle basse temperature) il modulo complesso dei provini PBT risulta inferiore rispetto a quelli dei provini HM. Viceversa, nella parte bassa del grafico (corrispondente alle alte temperature) i valori di  $|E^*|$  dei provini PBT sono maggiori rispetto a quelli dei provini HM.

Questo risultato può essere osservato meglio dagli istogrammi di fig. 15, che mettono a confronto il modulo complesso dei due conglomerati a bassa, media ed alta temperatura. Alla temperatura di 20 °C (fig. 15b) i provini HM e PBT mostrano una rigidità confrontabile di circa 5300 MPa. Alla temperatura di 5 °C (fig. 15a) il conglomerato HM ha un comportamento più rigido ( $|E^*| \approx 19000$  MPa), e di conseguenza più fragile, rispetto al conglomerato PBT ( $|E^*| \approx 17000$  MPa). Alle temperature di 50 °C (fig. 15c) la miscela PBT mostra valori di modulo complesso maggiori rispetto alla miscela HM (350 MPa contro 250 MPa, circa). Tale risultato conferma quanto osservato dagli studi effettuati sul bitume Drenoval PBT: l'estensione del performance grade del legante si riflette sulle prestazioni del conglomerato che alle alte temperature presenta maggiore rigidità, quindi maggiore resistenza alle deformazioni permanenti e all'ormaiamento, mentre alle basse temperature risulta meno rigido, quindi meno fragile e più resistente alla fessurazione.

Le proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi HM e PBT sono state valutate anche in termini di resistenza a trazione indiretta (Rt) alle temperature di 10 °C e 25 °C, secondo la norma UNI EN 12697-23. I risultati in fig. 16 mostrano analoghi valori di Rt per le miscele HM e PBT ad entrambe le temperature di prova. In particolare, si sottolinea che le resistenze a trazione indiretta misurate alla temperatura di 25 °C sono risultate conformi ai requisiti tipicamente previsti dalle norme tecniche di Capitolato per i conglomerati bituminosi con bitume modificato (Rt compreso tra 0,95 e 1,70 MPa).

Dai dati registrati durante la prova di resistenza a trazione indiretta è stato calcolato un ulteriore parametro denominato Cracking Tolerance index (CT-index). Tale grandezza, definita dalla norma statunitense ASTM D8225-19, descrive la capacità del materiale di sopportare le deformazioni imposte (duttilità) ed opporsi alla propagazione delle fessure una volta raggiunta la rottura. Il CT-index si determina mediante la seguente equazione:

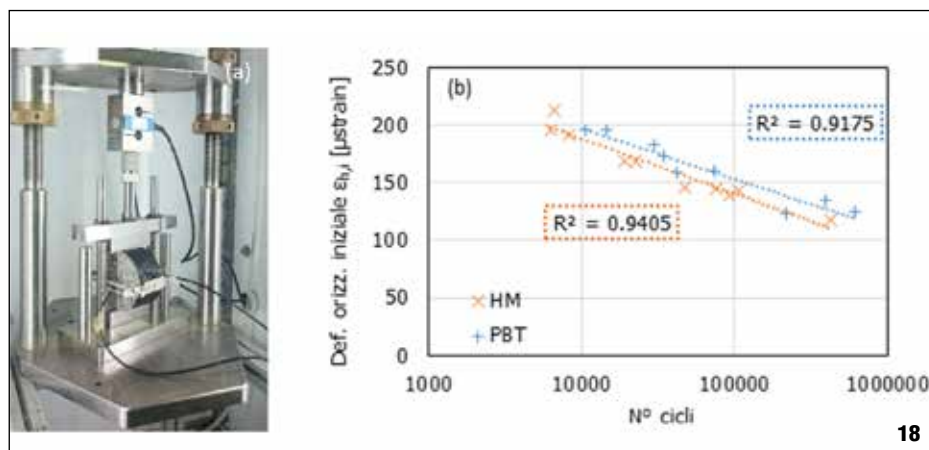
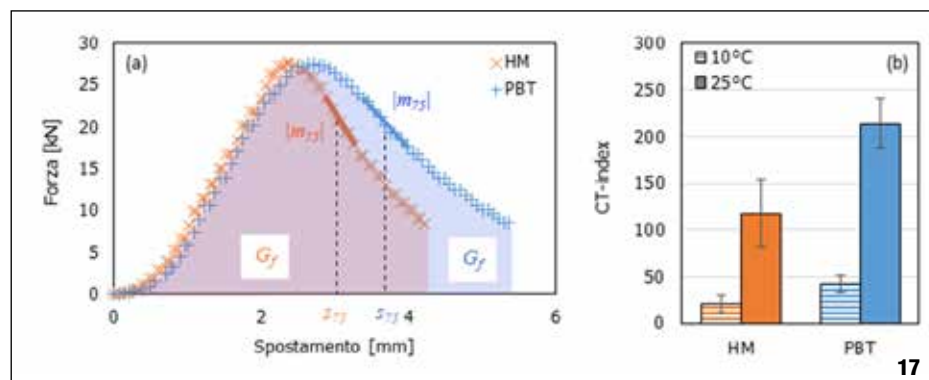


$$CT\text{-index} = \frac{h}{62} \cdot \frac{G_f}{|m_{75}|} \cdot \frac{s_{75}}{D}$$

dove  $h$  e  $D$  sono rispettivamente l'altezza ed il diametro del provino,  $G_f$  è l'energia di frattura, cioè il rapporto tra l'area sottesa dalla curva forza-spostamento e la sezione del provino ( $D \times h$ ),  $s_{75}$  è lo spostamento quando la forza è pari al 75% del valore di picco e  $|m_{75}|$  è la pendenza post-rot-

**14. Determinazione del modulo complesso: (a) esecuzione della prova, (b) valori di  $|E^*|$  e  $\varphi$  dei conglomerati bituminosi HM e PBT**

**15. Valori del modulo complesso  $|E^*|$  a: (a) 5 °C, 20 Hz; (b) 20 °C, 1 Hz; (c) 50 °C, 0,1 Hz**



**16. Determinazione della resistenza a trazione indiretta: (a) esecuzione della prova, (b) valori di Rt dei conglomerati bituminosi HM e PBT**

**17. Determinazione del Cracking Tolerance index: (a) definizione, (b) valori di CT-index dei conglomerati bituminosi HM e PBT**

**18. Determinazione della resistenza a fatica: (a) esecuzione della prova, (b) curve di fatica dei conglomerati bituminosi HM e PBT**

tura della curva forza-spostamento quando la forza è pari al 75% del valore di picco (fig. 17a).

Dal grafico in fig. 17b si può osservare che il conglomerato PBT ha restituito valori di CT-index nettamente superiori rispetto alla miscela HM di riferimento, sia alla temperatura di prova di 10 °C che di 25 °C (da notare che i valori di CT-index sono minori a 10 °C, in quanto le proprietà duttili dei leganti bituminosi diminuiscono quando la temperatura decresce). Tale risultato, come si può evincere dalla fig. 17a, è legato alla differente forma delle curve forza-spostamento registrate nella prova di resistenza a trazione indiretta. I provini con legante PBT hanno infatti mostrato un comportamento maggiormente duttile, in virtù della maggiore area sottesa dalla curva ( $G_f$ ), della minore pendenza nella fase post-rottura ( $|m_{75}|$ ) e della maggiore deformazione sopportata a parità di forza imposta ( $s_{75}$ ). Tale proprietà può essere ricondotta alla notevole elasticità del bitume Drenoval PBT e denota un'elevata resistenza alla fessurazione, sia termica che da fatica.

Allo scopo di verificare le effettive prestazioni del conglomerato PBT in presenza di sollecitazioni cicliche, sono state eseguite prove di resistenza alla fatica secondo la norma UNI EN 12697-24 – Annex E. Il protocollo di prova ha previsto uno sforzo orizzontale variabile tra 300 kPa e 600 kPa, un intervallo temporale di carico/scarico di 0,1/0,4 s ed una temperatura di prova di 25 °C. Dal grafico di fig. 18 si può osservare che il conglomerato PBT, a parità di deformazione imposta, è in grado di sopportare un numero di cicli superiore rispetto al conglomerato HM. La spiccata elasticità del legante PBT, superiore rispetto a quella di un tradizionale bitume modificato

hard, consente dunque alla miscela di sopportare un elevato numero di sollecitazioni cicliche senza rompersi o fessurarsi, confermando quanto già riscontrato dalle prove di resistenza a trazione indiretta statiche (maggiore CT-index).

### Performance vs traffico e fattori climatici

Due conglomerati bituminosi aventi le stesse identiche condizioni di base (curva granulometrica, modalità di compattezza, percentuale dei vuoti) ma composti da due bitumi diversi, Drenoval Hard M e Drenoval PBT, sono stati messi a confronto per valutare l'effettivo contributo apportato dal bitume PBT rispetto a un bitume modificato tradizionale. Per valutare le prestazioni in termini di resistenza a fatica e poter trarre delle conclusioni in termini di vita utile del materiale, si è adottato il modello interpretativo ad oggi più completo nella definizione delle modalità di innesco e propagazione delle fessure nei conglomerati bituminosi, l'approccio HMA Fracture Mechanics sviluppato presso la University of Florida e ampiamente utilizzato da numerosi DOT (Department of Transportation) Statunitensi. I risultati della campagna sperimentale hanno evidenziato il significativo incremento delle prestazioni delle miscele apportato dal bitume PBT rispetto al tradizionale HM. Confrontando infatti i parametri prestazionali analizzati, si è osservato: un minor tenore di rigidità con conseguente minore fragilità; una minore tendenza all'accumulo di deformazioni permanenti (33% in meno) con conseguenti tassi inferiori di sviluppo del micro-danno; una maggiore deformabilità prima del raggiungimento della prima fessura (50%) e soglie energetiche di collasso notevolmente superiori (40%) con conseguente incremento di resistenza a rottura statica e ciclica e quindi a fatica. Stimando infine la previsione di vita utile delle miscele, si è potuto concludere che la miscela realizzata con bitume PBT ha un'aspettativa di vita utile maggiore di 30 anni, pari a oltre il 30% in più rispetto alla miscela realizzata con bitume modificato tradizionale.

La sperimentazione condotta sul conglomerato bituminoso prodotto in impianto con legante Drenoval PBT ha inoltre dimostrato che la miscela possiede medesima lavorabilità e resistenza a trazione indiretta rispetto ad un conglomerato bituminoso di riferimento con bitume modificato hard tradizionale. Tuttavia, i provini confezionati con bitume Drenoval PBT hanno esibito una minore fragilità ed una maggiore resistenza all'ormaiamento in virtù della particolare rigidità, che rispetto alla miscela di riferimento risulta inferiore alle basse temperature e maggiore alle alte temperature (risultato in linea con quanto riscontrato in laboratorio sul legante). Inoltre il conglomerato bituminoso con Drenoval PBT ha mostrato una maggiore duttilità, quindi maggiore resistenza alla fessurazione, ed una migliore prestazione in termini di resistenza alla fatica. A fronte delle evidenze sperimentali, il legante Drenoval PBT consente dunque di ottenere elevate performance delle miscele bituminose nei confronti delle sollecitazioni dovute al traffico e ai fattori climatici, prolungando la vita utile degli strati di pavimentazione e consentendo di rinviare gli interventi di manutenzione e ricostruzione, fortemente impattanti dal punto di vista economico ed ambientale. ■