

PAVIMENTAZIONI AD ELEVATE PRESTAZIONI CON ALTE PERCENTUALI DI MATERIALE DI RICICLO

VALLI ZABBAN E IL LABORATORIO DI STRADE LUIGI TOCCHETTI DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II IN SINERGIA PER L'ANALISI PRESTAZIONALE DEL PRIMO PACCHETTO DI PAVIMENTAZIONE REALIZZATO CON TECNOLOGIA VZ PBT PER STRADE ANAS EXTRAURBANE AD ELEVATA PERCORRENZA

Le nuove tecnologie stradali orientate alla sostenibilità ambientale del ciclo di vita di una pavimentazione hanno come principale obiettivo quello di ridurre il consumo di risorse vergini mantenendo inalterate, o addirittura migliorando, le caratteristiche prestazionali dei materiali da costruzione e la durabilità dell'intera sovrastruttura, così da ridurre la frequenza dei successivi interventi di manutenzione ordinaria e/o straordinaria e i conseguenti impatti sull'ambiente. Tale obiettivo si concretizza nel concetto di pavimentazione "perpetua" (Perpetual Asphalt Pavement), intesa come sovrastruttura che, se adeguatamente mantenuta con interventi preventivi atti a

redistribuire lo stato di sollecitazione negli strati più superficiali, garantisce una vita utile anche superiore a 50 anni [1]. La crescente attenzione agli aspetti ambientali relativi alle attività di costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali risulta ad oggi necessaria in vista della imminente emanazione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) per la progettazione e i lavori inerenti a costruzione, manutenzione e adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali, criteri attraverso i quali le stazioni appaltanti individueranno la soluzione progettuale o il prodotto migliore sotto il profilo ambientale lungo l'intero ciclo di vita.

Basandosi su tutti i principi sopra esposti, Valli Zabban ha messo a punto una nuova tecnologia da applicare all'intero pacchetto della pavimentazione, chiamata PBT (Perpetual Binder Technology). Questa comprende una gamma di bitumi modificati con polimeri di diversa natura finalizzati al ripristino delle proprietà viscoelastiche dei leganti bituminosi in conglomerati a caldo prodotti con elevate percentuali di RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) e un'emulsione bituminosa modificata appositamente formulata per migliorare la lavorabilità e l'addensamento del conglomerato di base riciclato a freddo, facilitando l'uscita dell'acqua contenuta durante la compattazione con il rullo gommato, riducendo così i tempi di maturazione. Ulteriori studi reologici sul legante Rigeneral PBT sono stati pubblicati su "Strade & Autostrade" n° 156 Novembre/Dicembre 2022 a



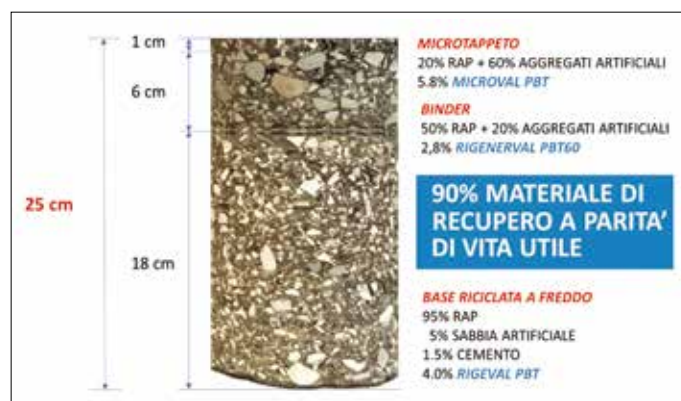
1. Una panoramica del sito di stesa



2. Il materiale prelevato alla finitrice



3. I provini compattati in sito



4. La stratigrafia della pavimentazione

pag. 88, mentre una preliminare caratterizzazione prestazionale dei conglomerati bituminosi con legante Rigenerval PBT è stata pubblicata su "Strade & Autostrade" n° 158 Marzo/Aprile 2023 a pag. 87.

In collaborazione con la Struttura Territoriale ANAS delle Marche, l'Impresa Nasoni Costruzioni e l'Università degli Studi di Napoli Federico II, lo scorso Maggio 2023 Valli Zabban ha effettuato una stesa sperimentale sulla S.S. 73 bis di Bocca Trabaria in località Calmazzo (PU) (Figura 1), una strada extraurbana a elevata percorrenza gestita da ANAS SpA: questo con l'obiettivo di testare la realizzazione, le prestazioni e la durabilità di un pacchetto di pavimentazione flessibile caratterizzata dall'impiego di leganti bituminosi con tecnologia PBT massimizzando il quantitativo di materiali riciclati e garantendo, allo stesso tempo, una vita utile della sovrastruttura superiore a quella di una soluzione convenzionale.

LA STRATIGRAFIA DI PROGETTO

La sovrastruttura messa in opera, di spessore complessivo pari a 25 cm, ha previsto la seguente stratigrafia:

- 18 cm di base riciclata a freddo in sito composta granulometricamente da 95% di fresato e 5% di sabbia da recupero e legata con 1,5% cemento e 4,0% emulsione bituminosa del tipo Rigeval PBT;
- 6 cm di binder a caldo contenente 50% fresato, 20 % di aggregati artificiali e 30% di aggregati calcarei con l'aggiunta del 2,8% di bitume modificato Rigenerval PBT60;
- 1 cm di usura avente il 20% di fresato riciclato a caldo con l'aggiunta di un 60% di aggregati artificiali e 20% di aggregato basaltico legati da un 5,8% di bitume modificato Microval PBT.

Da ciò deriva che più del 90% in peso degli aggregati impiegati per la costruzione della sovrastruttura non ha origine naturale, rispondendo pienamente ai requisiti

ambientali di circolarità e di riduzione del consumo di risorse primarie, risorse energetiche ed emissioni inquinanti associate all'estrazione e lavorazione di materie prime. Al contempo, l'introduzione di uno specifico bitume modificato per un microtappeto da 1 cm ha permesso non solo una facilitazione della stesa e della compattazione, ma anche l'ottenimento di una elevata resistenza alle deformazioni permanenti, fessurazioni a fatica e fessurazioni termiche.

LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

La sperimentazione ha preso avvio contestualmente alla fase di stesa della pavimentazione con il prelievo alla finitrice di campioni di conglomerato bituminoso per strato di usura e il confezionamento tramite compattazione con pressa a taglio girettoria del laboratorio mobile di Valli Zabban, presente in sito, di provini di conglomerato bituminoso per strati di base a N_{finale} pari a 180 giri e binder a N_{finale} pari a 200 giri (Figure 2 e 3).

I materiali sono stati successivamente sottoposti a specifici test meccanici presso il laboratorio di Strade Luigi Tocchetti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

L'elenco delle prove meccaniche eseguite è riassunto in Figura 5.

PROPRIETÀ	STANDARD DI RIFERIMENTO	STRATO DI BASE	STRATO DI BINDER	STRATO DI USURA
Distribuzione granulometrica	UNI EN 933-1		✓	✓
Contenuto di bitume	UNI EN 12697-01		✓	✓
Peso specifico	UNI EN 12697-06		✓	✓
Percentuale dei vuoti	UNI EN 12697-08		✓	✓
Resistenza a trazione indiretta @25 °C	UNI EN 12697-23	✓	✓	✓
Energia di rottura @25 °C	-	✓	✓	✓
Modulo di rigidezza @10, 20, 40 e 60 °C	UNI EN 12697-26		✓	✓
Resistenza a fatica @10°C	UNI EN 12697-24		✓	✓
Prova di ormaiamento @60 °C	UNI EN 12697-22		✓	

5. I test di laboratorio

I REQUISITI TECNICI DA CSA

La prima verifica delle prestazioni volumetriche e meccaniche è stata eseguita per l'accertamento dei limiti imposti dal Capitolato Speciale di Appalto (CSA) ANAS.

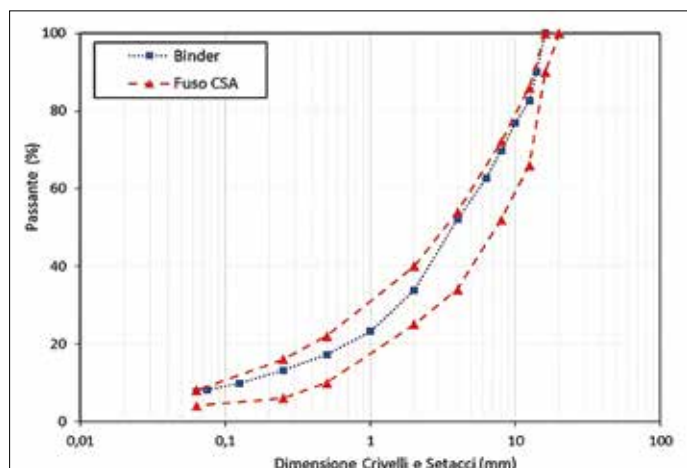
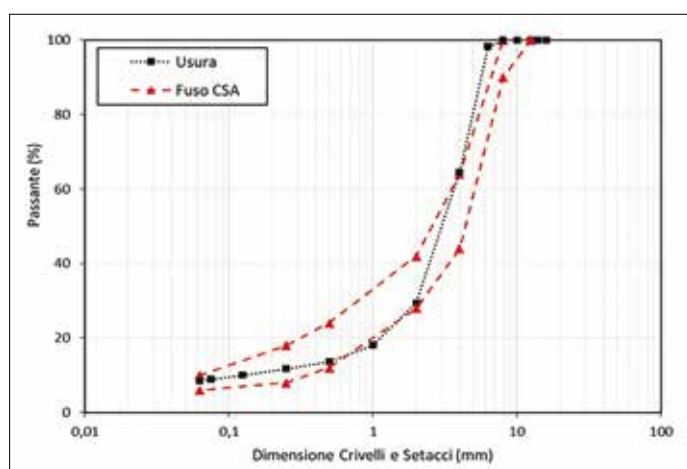
La verifica dell'assortimento granulometrico, così come la determinazione della percentuale di bitume e verifica dei vuoti a N_{finale} , è stata eseguita sulle sole miscele a caldo, ossia per lo strato di binder e usura. Dalle Figure 6A e 6B, dove sono illustrate le curve



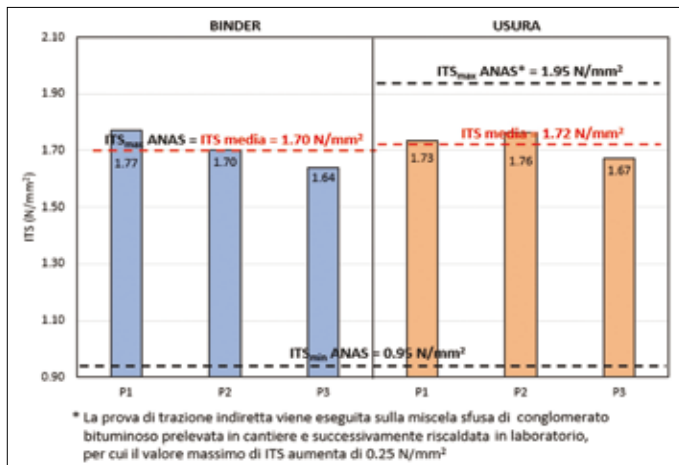
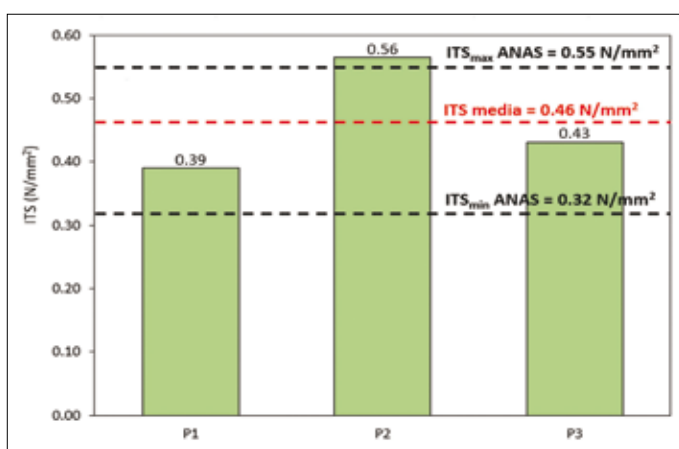
7. L'estrattore automatico a ciclo chiuso

granulometriche dello strato di binder e di usura, si può notare come la granulometria dell'usura (Figura 6A) non ricada completamente nel fuso ANAS, a differenza dello strato di binder (Figura 6B), in quanto la dimensione massima dell'aggregato è risultato essere pari a 10 mm, garantendo così uno spessore di 1 cm in fase di stesa.

La verifica del contenuto di bitume eseguita in accordo alla Norma UNI EN 12697-01 è stata eseguita mediante l'utilizzo di un estrattore automatico a ciclo



6A e 6B. Le curve granulometriche: lo strato di usura (6A) e di binder (6B)



9A e 9B. La resistenza a trazione indiretta vs CSA per lo strato di base (9A) e gli strati di binder e usura (9B)

PROPRIETÀ	STANDARD DI RIFERIMENTO	UNITÀ DI MISURA	STRATO DI BINDER		STRATO DI USURA	
			VALORE MISURATO	LIMITE CSA	VALORE MISURATO	LIMITE CSA
Peso specifico	UNI EN 12697-06	g/cm ³	2,668	-	2,873	-
Percentuale dei vuoti @Nfinale	UNI EN 12697-08	%	2,84	>2	2,05	>2
Percentuale di bitume	UNI EN 12697-01	%	4,79	4÷5,3	5,67	4,5÷6,1

8. I risultati delle caratteristiche volumetriche

clo chiuso per la separazione, l'estrazione del bitume, filler ed aggregati dalla miscela di conglomerato (Figura 7). I risultati ottenuti, riportati in Tabella 2, risultano perfettamente in linea con quanto richiesto dal CSA.

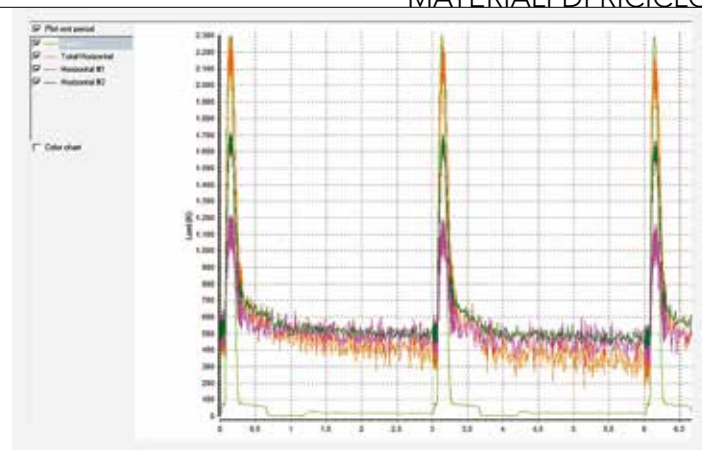
Essendo la percentuale dei vuoti attesa da CSA superiore al 2%, la determinazione

degli stessi è stata effettuata mediante procedura SSD, così come suggerito dall'appendice A della Norma UNI EN 12697-06; dai risultati riportati in Figura 8 si evince che entrambe le miscele di usura e binder rispettano a pieno i limiti.

La massima tensione di trazione dei provini confezionati per ogni tipologia di miscela, in questo caso anche per lo strato di base, è stata misurata in accordo alla Norma UNI EN 12697-23, per la determinazione del parametro ITS. La temperatura di prova è stata di 25 °C e nel caso dei provini per la miscela dello strato di base, prima dell'esecuzione del test, gli stessi sono stati sottoposti a un processo di maturazione in stufa a 40 °C per tre giorni. Dalle Figure 9A e 9B, le tre miscele testate si mostrano in linea con i rispettivi limiti di CSA.



10A e 10B. Le prova di rigidezza



11. I risultati test di rigidezza per strati di usura e binder

LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA AVANZATA

Una delle principali funzioni di una sovrastruttura stradale è quella di assorbire i carichi dalla superficie e distribuirli lungo la profondità.

Tali tensioni vengono ripartite sul sottofondo tenendo conto delle sue massime capacità. Il conglomerato bituminoso, attraverso la definizione del modulo di rigidezza, esprime la sua abilità nel distribuire le tensioni negli strati sottostanti, quando sottoposto a continui cicli di carico legati al traffico veicolare e soggetto ad escursioni termiche che ne modificano la risposta deformativa.

Per tenere conto di questi effetti, le miscele per lo strato di binder e di usura sono state sottoposte a prova di rigidezza in accordo alla Norma UNI EN 12697-26 in configurazione di trazione indiretta (appendice C) a quattro differenti temperature di 10, 20, 40 e 60 °C mediante l'applicazione di un carico del tipo semisenverso in controllo di deformazione (Figure 10A e 10B):

$$ITSM = \frac{F \cdot (v + 0.27)}{z \cdot h} \quad (1)$$

dove:

- ITSM = Modulo di rigidezza (MPa);
- F = Carico di picco (N);
- ν = Modulo di Poisson;
- Z = Deformazione orizzontale (mm);
- H = spessore provino (mm).

In Figura 11 sono riportati i valori di rigidezza misurati per le miscele di binder ed usura, da cui è possibile notare il considerevole incremento di resistenza alle alte temperature di 40 e 60 °C. Se rapportati ai tradizionali valori di modulo di miscele contenenti bitume tal quale, le miscele messe in opera per la stesa sperimentale mostrano una rigidezza mediamente tre volte superiore.

Tale risultato è certamente dovuto al bitume PBT presente in miscela, uno dei compiti fondamentali del quale è per l'appunto quello di migliorare la resistenza all'accumulo alle deformazioni

permanenti, che possono facilmente generarsi quando la miscela è sottoposta ad un innalzamento delle temperature che ne modifica lo stato fisico.

Uno dei problemi più comuni della pavimentazione è legato alla fessurazione della superficie.

L'identificazione e la caratterizzazione delle proprietà di frattura delle miscele di conglomerato bituminoso risultano significativamente importanti per una migliore progettazione della pavimentazione.

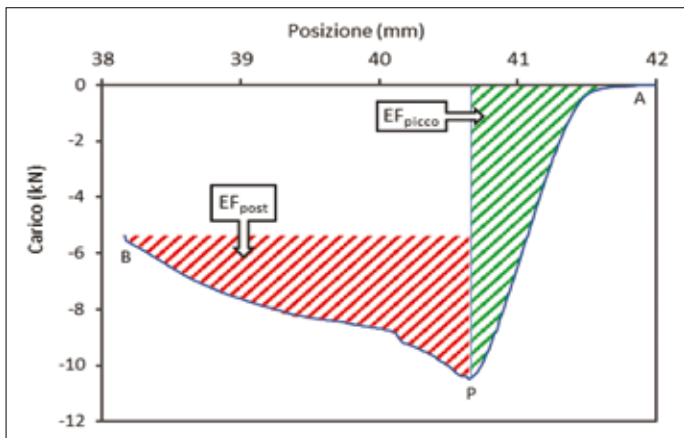
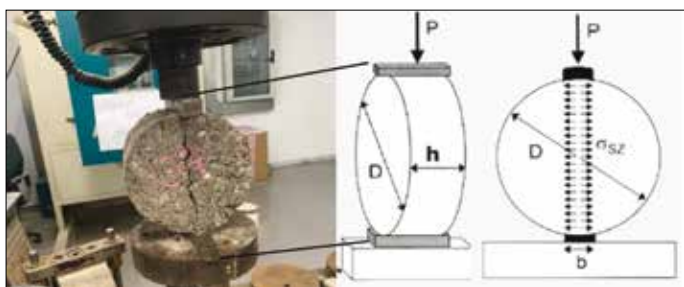
L'energia di frattura viene definita come la misura del potenziale a resistere alla rottura [2]. Per la presente sperimentazione sono state calcolate sia l'energia necessaria per formare una nuova frattura, chiamata energia al picco (EF_{picco}) e sia l'energia necessaria per la risalita della frattura lungo la profondità, definita energia post picco (EF_{post}) (Figure 12A e 12B):

$$EF_{picco} = \frac{\int_A^P f(x)}{Ad} \quad (J/m^2) \quad (2)$$

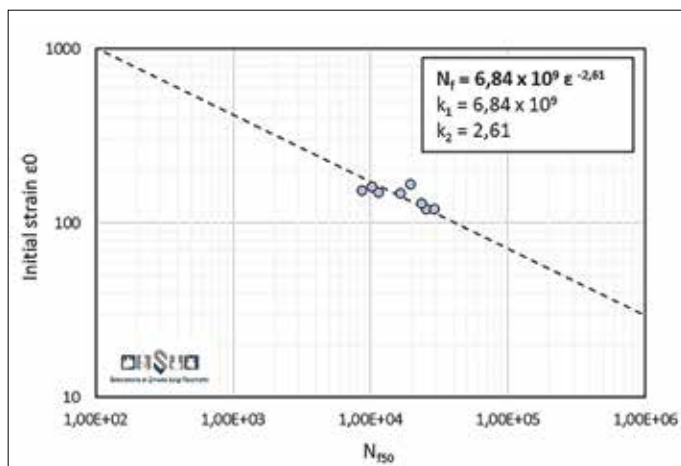
$$EF_{post} = \frac{\int_P^B f(x)}{Ad} \quad (J/m^2) \quad (3)$$

dove:

- $\int_A^P f(x)$ = lavoro necessario a innescare la fessura (J);
- $\int_P^B f(x)$ = lavoro necessario per l'innesco della fessura (J);
- Ad = area della superficie diametrale (mm^2).



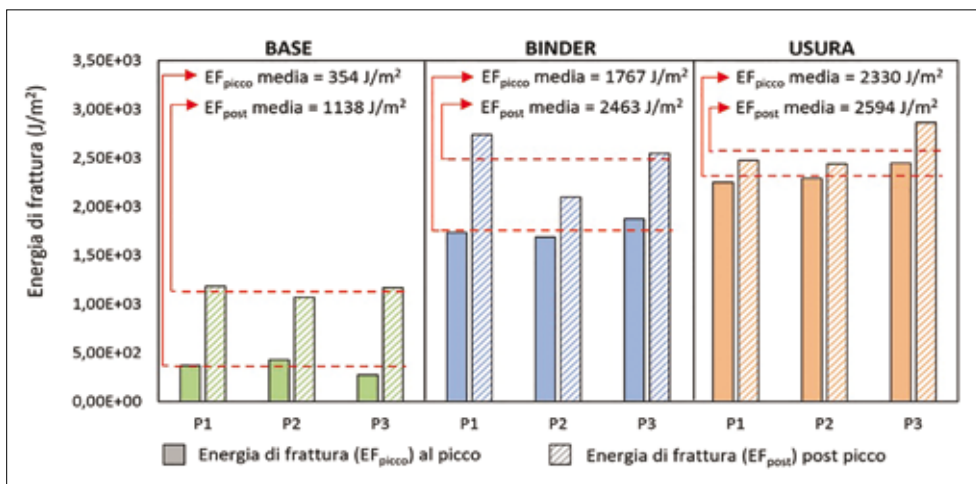
12A e 12B. La configurazione di prova per la determinazione dell'energia di frattura



14. La retta di fatica per lo strato di binder

Il continuo carico e scarico nel tempo dovuto al passaggio dei veicoli fa sì che all'interno della pavimentazione si generino delle microlesioni fino alla comparsa in superficie. Il continuo accumulo di queste fessurazioni porta ad una riduzione della capacità meccanica, se non addirittura portante della pavimentazione, fino al degrado completo e quindi la conseguente perdita di funzionalità.

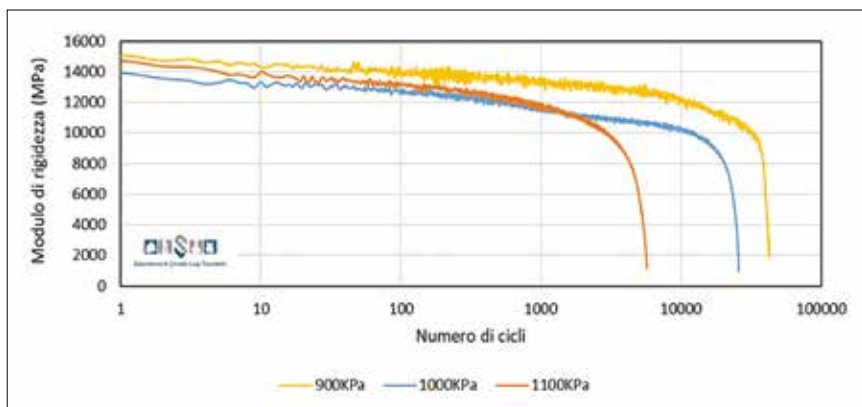
La prova che meglio simula e valuta gli effetti di questa condizione è la prova di fatica, che per il presente lavoro è stata eseguita sulle miscele per lo strato di usura e binder in accordo alla Norma UNI EN 12697-24 (appendice E). I livelli di sollecitazione adoperati per l'esecuzione della prova, ossia i minimi livelli di sollecitazione a cui è stato possibile apprezzare valori di deformazioni rientranti nell'intervallo di 70-400 μ s, sono stati pari a 900, 1.000 e 1.100 kPa. Già questa è stata una prima risposta alla elevata resistenza a fatica delle miscele, in quanto un valore di sollecitazione standard definito da Norma è pari a 250 kPa.



13. L'energia di frattura al picco e post picco

Come riportato in Figura 13, l'energia al picco calcolata per le tre miscele risulta soddisfare i valori minimi suggeriti da letteratura ($EF_{piccolo} + EF_{post} = 500 J/m^2$) [3]. In particolare, in tutti e tre i casi il valore di EF_{post} risulta superiore ad $EF_{piccolo}$, da cui si può dedurre una maggiore resistenza nel contenere la fessura prima che questa si manifesti in superficie.

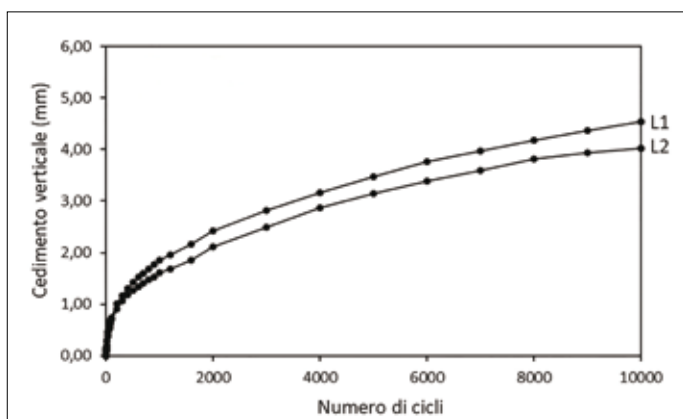
Sebbene lo strato di usura sia stato messo in opera per uno spessore di un solo centimetro, dai risultati emerge che la maggiore resistenza all'innesco e propagazione della fessura è restituito per l'appunto dallo strato di usura.



15. L'andamento del modulo di rigidezza dello strato di usura al variare dei cicli di carico



16. La preparazione delle lastre bistrato ed esecuzione del test di ormaimento



17. I risultati prova di ormaimento

In aggiunta, l'elevata capacità di resistere all'innesco e propagazione della fessura viene confermata dai risultati della prova di fatica. Per lo strato di binder, come riportato in Figura 14, i risultati sono stati espressi mediante la rappresentazione della retta a fatica, la quale mostra parametri di regressione (k_1 e k_2) elevati rispetto agli standard [4]; per lo strato di usura, in Figura 15 è riportato, al variare dei cicli di carico, l'andamento del modulo di rigidezza il quale mostra valori crescenti al crescere dei livelli di sollecitazione applicati.

Gli elevati volumi di traffico, in combinazione con gli elevati carichi verticali e tangenziali, generano continue deformazioni all'interno della pavimentazione che, accumulandosi, nel tempo producono il fenomeno dell'ormaiamento.

Tale fenomeno risulta particolarmente accentuato negli strati superiori della pavimentazione in conglomerato bituminoso. Per tale motivo, il test di wheel tracking per la valutazione della tendenza delle miscele in esame a deformarsi sotto carico, in accordo alla Norma UNI EN 12697-22- Procedura B, è stato eseguito su lastre bistrato composte da un'usura di 1 cm sovrapposta a uno strato di binder di 6 cm, con l'interposizione di una mano di attacco in emulsione bituminosa modificata (Figura 16). La prova è stata condotta in condizioni bagnate ad una temperatura di 60 °C. I risultati espressi come cedimenti

verticali registrati ad ogni ciclo di carico (10.000 cicli totali), così come mostrato in Figura 17, restituiscono un valore di ormaia finale prossima ai 4 mm, interessando il solo strato di usura.

CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati della sperimentazione condotta è possibile affermare che la tecnologia VZ PBT garantisce la sinergia ottimale tra sostenibilità di tipo ambientale e prestazionale. La nuova tecnologia permette la realizzazione di una sovrastruttura stradale costituita per il 90% da materiale di recupero come quella realizzata sulla S.S. 73 bis di Bocca Trabaria in località Calmazzo (PU). Le evidenze sperimentali sottolineano una spiccata resistenza all'innesco e alla propagazione di fessure, in particolare quando i materiali sono soggetti ad elevati numeri di cicli di carico come indicato dai risultati delle prove di fatica. Al contempo, i bassi valori di ormaia accumulata mettono in luce l'elevata resistenza ai carichi verticali della stratigrafia di progetto nelle condizioni limite di completa immersione in acqua a temperature elevata di 60 °C. Tra i vantaggi principali associati al pacchetto di pavimentazione analizzato nel presente lavoro sperimentale vi è l'utilizzo del microtappeto ad elevate prestazioni di spessore 1 cm, il quale permette di ridurre l'incidenza delle operazioni di manutenzione ordinaria e preventiva, e l'incremento della durabilità strutturale dell'intera sovrastruttura, andando a ridurre la frequenza degli interventi di manutenzione profonda durante la vita utile. La combinazione di tali fattori contribuisce ad una riduzione del costo e dell'impatto ambientale del ciclo di vita della pavimentazione. ■

⁽¹⁾ Professore Associato, Responsabile del Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II

⁽²⁾ Direttore Tecnico di Valli Zabban SpA

⁽³⁾ Ricercatrice presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II

Bibliografia

- [1]. M. Moramarco - "La progettazione delle pavimentazioni perpetue", "Rassegna del bitume" 72/12, 31-44, 2012.
- [2]. H.R. Radeef, N.A. Hassan, A.Z. Abidin, M.Z.H. Mahmud, M.M. Satar, M.M. Warid, Z.H. Al Saffar - "Determining fracture energy in asphalt mixture: a review", in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (vol. 682, No. 1, p. 012069). IOP Publishing, 2021.
- [3]. W. Song, Z. Xu, F. Xu, H. Wu, J. Yin - "Fracture investigation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement using an equivalent energy approach", Engineering Fracture Mechanics, 253, 107892, 2021.
- [4]. F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, G.H. Hamed - "Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt - a laboratory study", Road Materials and Pavement Design, 15(3), 746-756, 2014.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Struttura Territoriale delle Marche di ANAS SpA e l'Impresa Nasoni Costruzioni per la disponibilità e il supporto dato alla stesa sperimentale.