



Rapporto finale

Valutazione della resistenza alla fessurazione di riflessione del geocomposito Autotene Asfaltico Antipumping HE/TVP

Prof. Ing. Francesco Canestrari
Prof. Ing. Gilda Ferrotti

Settembre 2023

INDICE

1. Premessa	3
2. Materiali impiegati	5
2.1. CONGLOMERATO BITUMINOSO NON MODIFICATO PER STRATI DI BINDER (BU).....	5
2.2. CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATI DI BASE (BM.A)	5
2.3. CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATO DI BINDER (BM.B)	6
2.4. GEOCOMPOSITO	7
3. Programma sperimentale	8
3.1. CONFEZIONAMENTO DI PIASTRE E PROVINI BISTRATO.....	8
3.1.1. <i>Preparazione delle piastre bistrato mediante Roller Compactor</i>	8
3.1.2. <i>Realizzazione di provini bistrato</i>	12
3.2. PROVE REFLECTIVE CRACKING (RC)	13
3.3. PROGRAMMA SPERIMENTALE	20
4. Analisi dei risultati	22
4.1. RISULTATI CONGLOMERATO BITUMINOSO NON MODIFICATO PER STRATI DI BINDER (BU)	22
4.2. RISULTATI CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATI DI BASE (BM.A)	24
4.2.1. <i>Carico applicato pari a 750 N</i>	24
4.2.2. <i>Carico applicato pari a 660 N</i>	26
4.3 RISULTATI CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATO DI BINDER (BM.B)	27
4.4. CONFRONTO TRA LE DIVERSE TIPOLOGIE DI CONGLOMERATO BITUMINOSO	29
5. Conclusioni.....	33
Bibliografia.....	35

1. Premessa

Il presente documento descrive i principali risultati ottenuti nell'ambito della sperimentazione avente come oggetto la valutazione delle prestazioni in termini di resistenza alla fessurazione di riflessione di sistemi bistrato rinforzati con geocompositi.

I geocompositi ottenuti dall'accoppiamento di una membrana elastomerica auto-termo-adesiva in bitume modificato con polimero (SBS) e di una armatura costituita da un geosintetico di rinforzo (geotessili e/o geogriglie), possono essere considerati una valida tecnica per il risanamento delle pavimentazioni stradali e possono essere applicati all'interfaccia tra il sub-strato fresato (se la rimozione degli strati legati è parziale) e la nuova pavimentazione, senza la necessità di risagomature in conglomerato bituminoso.

Tali materiali permettono infatti di realizzare, all'interfaccia tra vecchia e nuova pavimentazione, un interstrato di assorbimento delle tensioni (*stress absorbing membrane interlayer* SAMI) e di rinforzo strutturale della pavimentazione, coniugando i vantaggi dell'applicazione della membrana a quelli dell'utilizzo di geosintetici di rinforzo. Al contempo, i geocompositi garantiscono una protezione degli strati sottostanti nei confronti della penetrazione dell'acqua e contrastando la risalita in superficie di acqua e particelle fini provenienti dagli strati non legati (*effetto pumping*). In tal senso, i benefici derivanti dall'impiego dei geocompositi in campo stradale (i.e. riduzione dello stato tenso-deformativo all'interno della sovrastruttura) sono stati più volte evidenziati dagli studi eseguiti dall'Università Politecnica delle Marche, sia in termini di indagini di laboratorio che su campi prova in vera grandezza [1,2,3,4,5], dimostrando i vantaggi apportati dal sistema di rinforzo con particolare riferimento alla propagazione delle fessure e all'accumulo delle deformazioni permanenti. Tali studi hanno messo in evidenza come l'impiego di geocompositi possa apportare notevoli vantaggi in termini di vita utile a parità di materiali e geometria del pacchetto strutturale (intervento "isospessore"). I vantaggi ottenibili in sito non possono ovviamente prescindere dalla necessità di richiedere opportune caratteristiche chimico-fisiche-meccaniche per i geocompositi e da una sua corretta installazione in opera.

Gli interventi che prevedono l'impiego dei geocompositi per il risanamento delle pavimentazioni hanno, inoltre, ripercussioni positive anche in termini di sostenibilità economica e ambientale richiedendo un minore sfruttamento di materie prime non rinnovabili (aggregati e bitume), produzione di minori quantitativi di materiale e relativa riduzione delle emissioni inquinanti, accompagnate da minori esigenze di trasporto e movimentazione materiali da e verso i siti produttivi.

Il presente studio ha indagato le caratteristiche di resistenza alla fessurazione di riflessione di sistemi bistrato realizzati con conglomerati bituminosi non modificati e modificati con polimeri SBS, caratterizzati dalla presenza del geocomposito AUTOTENE ASFALTICO ANTIPUMPING HE/TVP all'interfaccia. Tali sistemi rinforzati sono stati confrontati con i corrispondenti sistemi di riferimento non rinforzati. In particolare, le prestazioni del geocomposito sono state investigate considerando tre diverse tipologie di conglomerato bituminoso:

- conglomerato bituminoso per strati di binder (collegamento) confezionato con bitume non modificato (codificato BU);

- conglomerato bituminoso per strati di base confezionato con bitume modificato con polimeri SBS, comunemente impiegato in ambito autostradale (codificato BM.A);
- conglomerato bituminoso per strati di binder (collegamento) confezionato con bitume modificato con polimeri SBS, per usi non autostradali (codificato BM.B).

Con tali miscele sono stati preparati provini bistrato, rinforzati e non, mediante apparecchiatura Roller Compactor che sono stati successivamente opportunamente tagliati per essere sottoposti alla prova di Reflective Cracking, messa a punto presso l'Università Politecnica delle Marche. Il relativo protocollo di prova permette di simulare il ripetuto passaggio di una ruota al di sopra di un sistema bistrato fessurato, per valutare le caratteristiche di resistenza alla risalita di una fessura preesistente.

Il presente documento è articolato in capitoli che illustrano le caratteristiche dei materiali impiegati, le modalità di preparazione dei provini, la metodologia di prova, il programma sperimentale, l'elaborazione e l'analisi dei risultati ed infine le principali conclusioni maturate al termine dell'intera indagine.

Il Responsabile Scientifico del progetto di ricerca illustrato nel presente documento è il Prof. Francesco Canestrari, ordinario di "Strade, Ferrovie e Aeroporti" presso il DICIA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura) dell'Università Politecnica delle Marche.

Alle attività sperimentali ha collaborato principalmente la Prof.ssa Gilda Ferrotti, oltre al contributo fornito dall'Ing. Valentina Scaramucci.

2. Materiali impiegati

Nel seguito sono riportate le proprietà fisiche e meccaniche delle diverse tipologie di conglomerato bituminoso impiegato e del geocomposito oggetto di studio, con l'obiettivo di fornire un quadro completo sulle caratteristiche dei materiali, utile anche in fase di interpretazione dei risultati sperimentali.

2.1. CONGLOMERATO BITUMINOSO NON MODIFICATO PER STRATI DI BINDER (BU)

Il conglomerato bituminoso per strati di binder confezionato con bitume non modificato è caratterizzato da una dimensione massima dell'aggregato pari a 16 mm.

Esso viene prodotto con il 20% di fresato, filler calcareo e quattro differenti pezzature di aggregato vergine:

- Graniglia 12/20
- Graniglia 7/12
- Sabbia frantumata lavata 0/4
- Sabbia frantumata polverone 0/2

Il fuso di riferimento e la curva granulometrica della miscela sono riportati in Figura 2.1. Il legante impiegato è un bitume non modificato 50/70 (norma UNI EN 12591) dosato con una percentuale pari al 4,6% rispetto al peso della miscela.

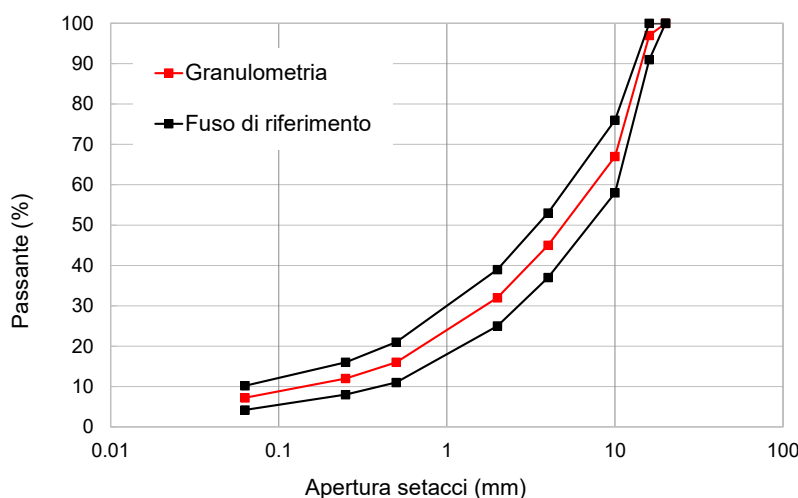


Figura 2.1 Curva granulometrica conglomerato bituminoso BU per strati di binder

2.2. CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATI DI BASE (BM.A)

Il conglomerato bituminoso per strati di base, comunemente impiegato in ambito autostradale, è stato confezionato con bitume modificato con polimeri SBS. La miscela, caratterizzata da una dimensione massima dell'aggregato pari a 31,5 mm, è prodotta utilizzando il 30% di fresato e tre differenti pezzature di aggregato vergine:

- Graniglia 16/22,4
- Graniglia 6,3/16
- Sabbia 0/4

Il fuso di riferimento e la curva granulometrica sono riportati in Figura 2.2.

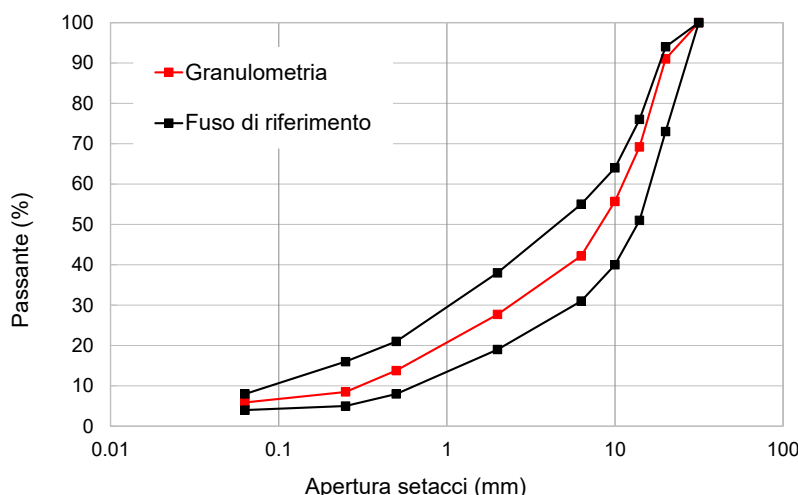


Figura 2.2 Curva granulometrica conglomerato bituminoso BM.A per strati di base

Il legante impiegato è un bitume modificato con polimeri SBS “Hard” dosato con una percentuale pari al 4,1% rispetto al peso della miscela. Le caratteristiche del bitume, desunte da precedenti studi, sono riportate in Tabella 2.1.

Tipo di bitume	BITUME MODIFICATO di tipo “HARD”			
Caratteristica	Norma di riferimento	Unità di misura	Valori di riferimento	Valori rilevati
Percentuale di polimero	-	[%]	3.8	-
Penetrazione @ 25°C	EN 1426	[dmm]	50-70	54
Punto di rammollimento	EN 1427	[°C]	≥ 65	71
Ritorno elastico @ 25°C; 25 cm/min	EN 13398	[%]	≥ 50	89
Viscosità dinamica @ 135°C	ASTM D4402	[Pa·s]		1.24
Caratteristica dopo RTFOT				
Variazione di massa massima ±	EN 12607-1	[%]	≤ 0.5	0.1
Penetrazione @ 25°C	EN 1426	[%]	≥ 50	50
Punto di rammollimento	EN 1427	[°C]	≥ 65	77
PERFORMANCE GRADE (PG)		82-16		

Tabella 2.1 Caratteristiche del bitume modificato “hard”

2.3. CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATO DI BINDER (BM.B)

Il conglomerato bituminoso per strato di binder confezionato con bitume modificato con polimeri SBS è caratterizzato da una dimensione massima dell'aggregato pari a 16 mm. La miscela è prodotta utilizzando il 20% di fresato, filler calcareo e tre differenti pezzature di aggregato vergine:

- Graniglia 12/20
- Graniglia 7/12
- Sabbia 0/4

Il fuso di riferimento e la curva granulometrica sono riportati in Figura 2.3.

Il legante impiegato è un bitume modificato, codificato come PMB 45/80-70 in accordo con la norma UNI EN 14023 ed è presente in percentuale pari al 5,2% rispetto al peso della miscela.

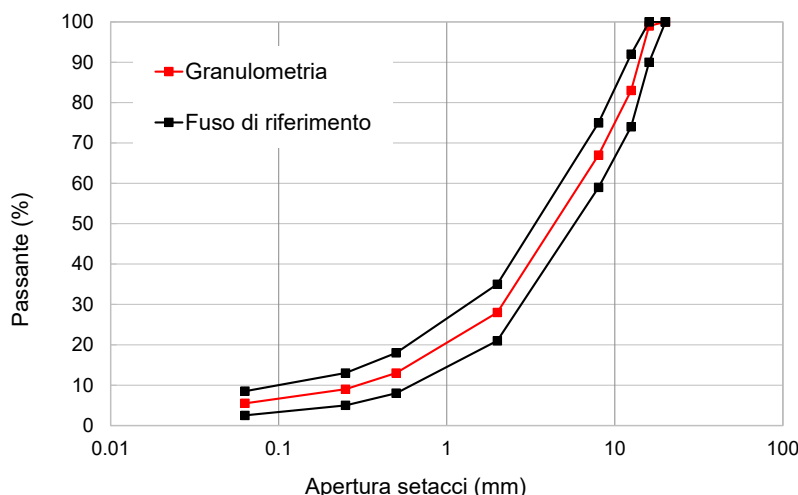


Figura 2.3 Curva granulometrica conglomerato bituminoso BM.B per strati di binder

2.4. GEOCOMPOSITO

Il geocomposito AUTOTENE ASFALTICO ANTIPUMPING HE/TVP, impiegato nella presente sperimentazione, viene classificato dal produttore come membrana auto-termo-adesiva per impermeabilizzazione, rafforzamento e ripartizione dei carichi. Tale materiale viene prodotto in rotoli di lunghezza pari a 10÷15 m e larghezza 1 m; se conservato in luogo asciutto, coperto e a una temperatura compresa tra i +5°C e +40°C, rimane inalterato per un periodo di almeno 12 mesi.

Il geocomposito è dotato di un film siliconato removibile inferiore che ne preserva la mescola termo-adesiva (Figura 2.4sx) mentre la superficie superiore dispone di una finitura di sabbia e minerali esenti da silice libera (Figura 2.4dx), che evita l'incollaggio delle spire del rotolo e funge da intermediario di adesione. Il rinforzo è costituito da una rete in fibra di vetro. La finitura in sabbia esercita, inoltre, una benefica azione durante le operazioni di stesa in opera del conglomerato bituminoso evitando l'incollaggio delle ruote dei mezzi di cantiere, specialmente alle alte temperature.

Il geocomposito in esame ha un comportamento meccanico isotropo con valori di resistenza a trazione Longitudinale e Trasversale pari, in entrambi i casi, a 40 kN/m e allungamento Longitudinale e Trasversale a rottura delle fibre dell'armatura pari, in entrambi i casi, pari a 4%.



Figura 2.4 sx) superficie inferiore termo-adesiva protetta da film siliconato removibile; dx) superficie superiore del geocomposito

3. Programma sperimentale

3.1. CONFEZIONAMENTO DI PIASTRE E PROVINI BISTRATO

Nel presente paragrafo viene illustrato il protocollo seguito per il confezionamento dei sistemi bistrato e la preparazione dei corrispondenti provini da impiegare per l'esecuzione delle prove di Reflective Cracking.

3.1.1. Preparazione delle piastre bistrato mediante Roller Compactor

Le piastre bituminose bistrato utilizzate per l'esecuzione delle prove sono state ottenute mediante l'impiego del compattatore a rullo (Roller Compactor). Il Roller Compactor è un'apparecchiatura di laboratorio (Figura 3.1 e Figura 3.2) che, avvalendosi di un dispositivo motorizzato ad aria compressa, permette la compattazione di piastre in conglomerato bituminoso simulando efficacemente la condizione di addensamento che si verifica in sito con l'impiego di rulli metallici (UNI EN 12697-33). Lo schema di compattazione è riprodotto in Figura 3.3.

Il Roller Compactor opera con 4 livelli di pressione p_1 , p_2 , p_3 e p_4 , che variano all'interno di un intervallo prestabilito:

- p_1 è compresa tra 0 e 2.5 bar;
- p_2 , p_3 e p_4 sono comprese tra 0 a 10 bar.

Tali livelli possono essere regolati attraverso dei manometri (uno per ogni livello) collocati sul pannello di controllo (Figura 3.1). Inoltre, esiste la possibilità di settare il numero di passaggi che il rullo deve eseguire per ciascun livello di pressione. Il numero di passaggi può variare tra 0 e 100 (per il livello 1 il numero minimo di passaggi è 2). Con il compattatore a rullo è possibile realizzare piastre di dimensioni $305 \times 305 \text{ mm}^2$ e altezza variabile tra 30 mm e 80 mm, grazie all'uso di casseri in acciaio di forma quadrata (Figura 3.4). L'esatta altezza della piastra può essere regolata agendo su una guida (Figura 3.5) collocata nella parte posteriore del macchinario (l'altezza può variare da un minimo di 40 mm ad un massimo di 100 mm).

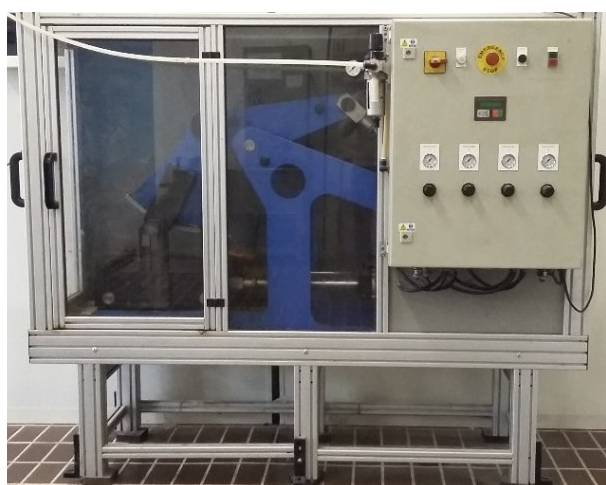


Figura 3.1 Roller Compactor

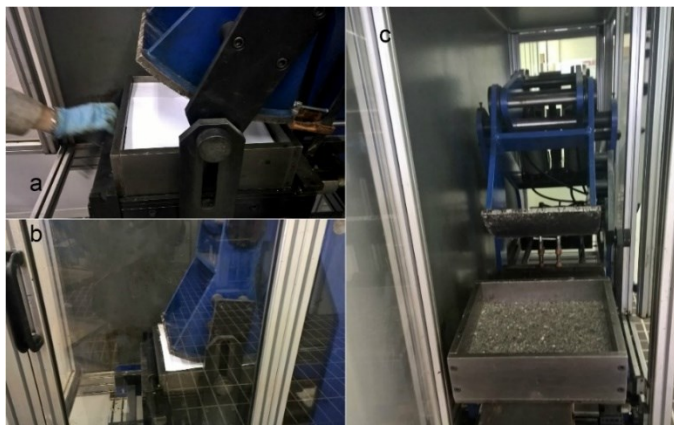


Figura 3.2 Roller Compactor: fasi di compattazione

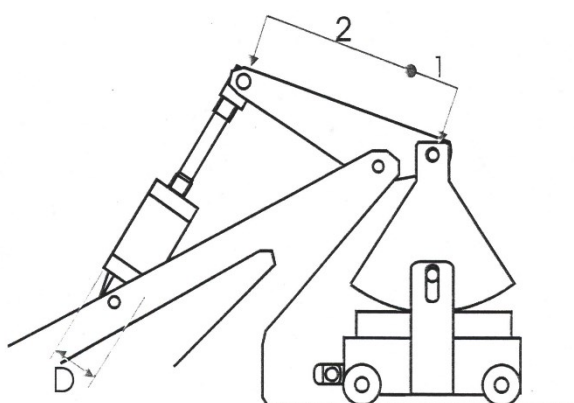


Figura 3.3 Schema di funzionamento Roller Compactor

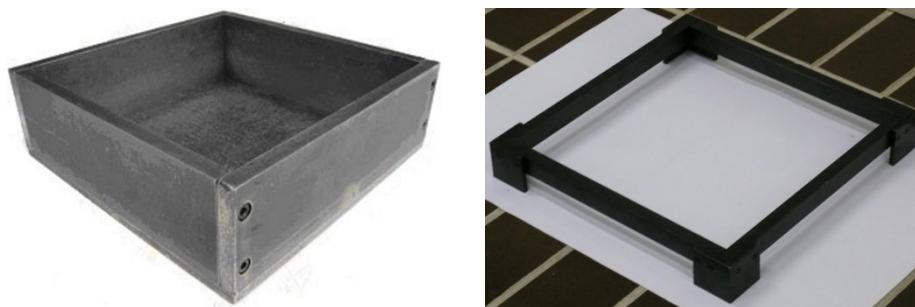


Figura 3.4 sx) Cassero per preparazione piastre bituminose; b) collare per contenimento materiale non ancora compattato



Figura 3.5 Guida per la regolazione dell'altezza delle piastre

La procedura di confezionamento delle piastre bistrato si articola nelle seguenti fasi operative:

- confezionamento dello strato inferiore,
- realizzazione dell'interfaccia con o senza geocomposito,
- confezionamento dello strato superiore.

Per la realizzazione dello strato inferiore occorre riscaldare un quantitativo di materiale tale da raggiungere, in corrispondenza dell'altezza finale impostata, la percentuale di vuoti desiderata (quest'ultima risulta definita in funzione dell'altezza dello strato e della massa volumica del materiale). Il conglomerato bituminoso viene scaldato per 3 ore alla temperatura di compattazione (i.e. 160 °C nel caso di conglomerato bituminoso modificato e 140°C nel caso di conglomerato non modificato) e successivamente versato nel cassero, anch'esso caldo, precedentemente assemblato e oliato (per facilitare la successiva fase di scasseratura). Si procede, quindi, alla compattazione mediante il compattatore a rullo dopo aver impostato l'altezza finale desiderata dello strato da compattare (nel caso in esame 4 cm).

Terminata questa prima fase e atteso il raffreddamento dello strato inferiore (circa 3 ore), è possibile procedere con la preparazione dell'interfaccia desiderata (con o senza geocomposito).

Successivamente, al di sopra dell'interfaccia viene versato, previo riscaldamento (per 3 ore alla temperatura di compattazione), il conglomerato bituminoso per la realizzazione dello strato superiore. Una volta impostata nel Roller Compactor l'altezza finale dell'intero bistrato (8 cm nel caso in esame), viene eseguita la compattazione con l'accorgimento di eseguirla nella stessa direzione di azione del rullo già adottata per lo strato inferiore (al fine di simulare scrupolosamente le procedure seguite in sito).

La scasseratura del sistema bistrato così preparato viene effettuata il giorno successivo alla compattazione per dar modo al materiale di raffreddarsi completamente e assumere consistenza.

Inoltre, sulla superficie di ciascuna piastra bistrato viene tracciata con della vernice una linea parallela alla direzione di compattazione al fine di preparare i provini da sottoporre ai test sempre nelle medesime condizioni, anche con riferimento a tale importante parametro.

Nel caso in esame, per procedere al confezionamento delle piastre bistrato, è stato preliminarmente necessario determinare l'esatto quantitativo di materiale, per ciascuna tipologia di conglomerato, da utilizzare per realizzare il singolo strato. Essendo fisse le dimensioni in larghezza e lunghezza del cassero delle piastre (305×305 mm²), tale conteggio è stato predisposto in funzione dello spessore e del contenuto di vuoti che si intendeva raggiungere. In particolare, il caso in esame ha previsto la preparazione di piastre con strati di spessore pari a 4 cm e un contenuto di vuoti pari al 5%.

Per determinare il quantitativo di materiale necessario per confezionare il singolo strato è stato utilizzato il valore della massa volumica massima mediante il quale, noto il tenore di vuoti finale pari al 5%, è stato possibile risalire alla corrispondente massa volumica apparente.

Una volta determinati il volume di ogni strato della piastra (30,5×30,5×4 cm³) da realizzare, noti il contenuto di vuoti e le masse volumiche, si è proceduto al calcolo del quantitativo di materiale da compattare tramite Roller Compactor, per ciascuna tipologia di conglomerato (Tabella 3.1).

Tipologia conglomerato	Massa volumica max [g/cm ³]	Vuoti [%]	Massa volumica apparente [g/cm ³]	Volume strato [cm ³]	Quantità materiale per strato [kg]
BU	2,490	5	2,366	3721	8,804
BM.A	2,481	5	2,357	3721	8,770
BM.B	2,470	5	2,347	3721	8,731

Tabella 3.1 Quantità di conglomerato bituminoso per ogni strato per ottenere il 5% di vuoti

In totale sono state realizzate in laboratorio 8 piastre bistrato di dimensioni 30,5×30,5 cm² (Figura 3.6), composte da 2 strati, ciascuno di altezza pari a 4 cm:

- 2 piastre in conglomerato bituminoso non modificato per strati di binder (BU), una rinforzata con geocomposito e una non rinforzata;
- 4 piastre in conglomerato bituminoso modificato per strati di base (BM.A), tre rinforzate con geocomposito e una non rinforzata;
- 2 piastre in conglomerato bituminoso modificato per strati di binder (BM.B), una rinforzata con geocomposito e una non rinforzata.

L'adesione del geocomposito sullo strato inferiore realizzato con conglomerato nuovo è affidata alla sola pellicola termo-adesiva di cui è provvisto. Da studi specifici [6,7,8] è infatti emerso che l'applicazione preliminare di emulsione bituminosa potrebbe inibire il potenziale termo-adesivo della membrana inferiore con effetti deleteri sulle prestazioni complessive del sistema.

Evitare l'applicazione di una mano di attacco per il geocomposito permette anche di risparmiare una voce di costo aggiuntiva e di velocizzare i tempi di realizzazione dell'intervento in cantiere e, conseguentemente, di riapertura al traffico.



Figura 3.6 Fasi di confezionamento delle piastre bistrato

3.1.2. Realizzazione di provini bistrato

I provini prismatici per le prove di Reflective Cracking (RC) sono stati ricavati tagliando, tramite sega circolare elettrica raffreddata ad acqua, le piastre bistrato precedentemente prodotte, secondo lo schema riportato in Figura 3.7. I provini sono stati ricavati nella parte centrale della piastra, caratterizzata da un maggiore grado di compattazione ed omogeneità, in modo da ottenere dimensioni finali di prova pari a 10 cm di larghezza, 29,5 cm di lunghezza e 8 cm di altezza.

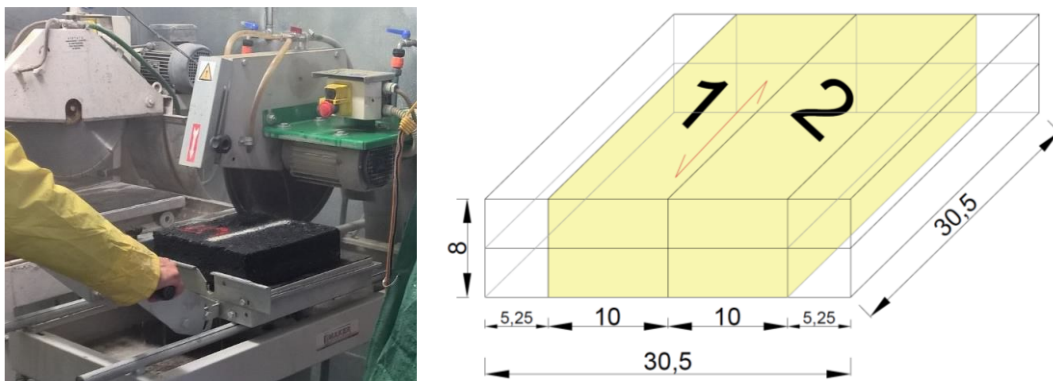


Figura 3.7 Schema per il taglio di provini prismatici

In ogni provino prismatico è stato eseguito un intaglio artificiale di 3 cm di altezza e 0,5 cm di larghezza in mezzzeria a partire dalla base inferiore del provino (Figura 3.8), necessario per simulare la presenza di una fessura o di una discontinuità preesistenti. Successivamente, una delle due superfici laterali di ciascun provino è stata verniciata di bianco in modo da poter rilevare efficacemente il quadro fessurativo che verrà a generarsi in seguito all'esecuzione della prova Reflective Cracking (Figura 3.9). Sulla stessa superficie, è stata inoltre individuata e marcata l'interfaccia in modo tale da poterne valutarne il comportamento durante la risalita della fessura. Infine, ciascun provino è stato individuato tramite un codice identificativo (Figura 3.9).

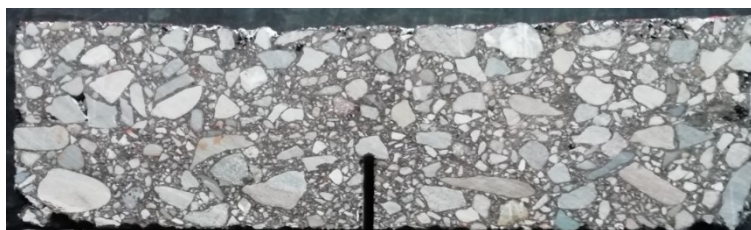


Figura 3.8 Provino prismatico con intaglio artificiale per prova Reflective Cracking.



Figura 3.9 Provino prismatico con intaglio artificiale per prova Reflective Cracking.

3.2. PROVE REFLECTIVE CRACKING (RC)

Per valutare il comportamento dei sistemi bistrato precedentemente descritti rispetto alle più comuni cause di deterioramento di una pavimentazione flessibile, è stata utilizzata una metodologia di prova “originale” volta alla caratterizzazione della resistenza alla fessurazione di riflessione. Tale fenomeno consiste nella propagazione verso l'alto di una fessura (o una discontinuità) presente nel substrato fresato al di sopra del quale realizzare l'intervento di risanamento. Qualora, infatti, la fresatura di una vecchia pavimentazione non abbia asportato tutto il pacchetto in conglomerato e siano rimaste tracce delle fessurazioni preesistenti, all'apice di tali discontinuità (cricche) si genera una concentrazione locale degli sforzi (di taglio e trazione) creati dal passaggio dei veicoli cui lo strato superiore di nuova realizzazione non riesce ad opporsi.

La prova di laboratorio ideata dal gruppo di ricerca dell'UNIVPM si avvale dell'apparecchiatura Wheel Tracker (Figura 3.10), capace di riprodurre in scala ridotta l'azione trasmessa dal traffico veicolare, di norma utilizzata per valutare la resistenza all'ormaiamento delle miscele bituminose (UNI EN 12697-22).



Figura 3.10 Apparecchiatura Wheel Tracker

L'apparecchiatura è costituita da una ruota fissa che scarica, mediante un sistema a leva, un determinato carico verticale su una piastra in conglomerato bituminoso che, ancorata ad un piano mobile, si muove orizzontalmente con moto alternato. Durante la prova, eseguita in condizioni di temperatura e velocità controllate, viene rilevata in continuo, mediante l'utilizzo di un trasduttore verticale da 25 mm, la profondità dell'ormaia prodotta al centro del provino, con una precisione di 0,1 mm.

Nello specifico la ruota, che in condizioni standard scarica sul provino un carico di 520 ± 5 N, ha un diametro esterno compreso tra 200 mm e 205 mm, con un battistrada avente un'impronta di carico rettangolare di larghezza pari a 50 ± 1 mm. Il battistrada, dello spessore di 20 ± 2 mm, è realizzato in gomma piena della durezza di 80 ± 5 IRHD. Il piano a cui è ancorato il provino si muove avanti ed indietro con una corsa pari a 230 ± 5 mm alla frequenza di 21 cicli/min (un ciclo consiste in un passaggio avanti e uno indietro). Il macchinario è interamente alloggiato all'interno di una cella termocontrollata (regolabile da 25 °C a $60\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$) con possibilità di gestire solamente temperature maggiori di quella ambientale poiché la cella non risulta dotata di un circuito refrigerante.

Ad eccezione della temperatura di prova, che va impostata direttamente sul pannello dell'apparecchiatura, il controllo e l'acquisizione dei dati sono effettuati tramite un personal computer su cui è installata una scheda d'interfaccia con il Wheel Tracker e il relativo software. Il software consente di eseguire il corretto posizionamento del trasduttore e di impostare, oltre alle caratteristiche del provino che saranno riportate nel file di output finale (e.g. spessore del provino, temperatura di esecuzione), i parametri di prova (i.e. durata del test e massima deformazione ammissibile rilevata dal trasduttore in corrispondenza della quale si ha l'arresto automatico della prova).

Con l'intento di effettuare prove simulative del fenomeno della fessurazione di riflessione, il macchinario Wheel Tracker è stato adattato in maniera tale che il passaggio della ruota sulla superficie del provino fosse finalizzato a causare la propagazione di una fessura, già presente, dall'apice della stessa verso la superficie. A tal fine sono state sviluppate alcune modifiche sia alla configurazione di prova che al provino utilizzato. In particolare, la prova è stata messa a punto tenendo conto dei seguenti principi:

- mantenimento, per quanto possibile, dei parametri standard che caratterizzano la prova di ormaimento;
- necessità di un tempo massimo di prova pari a 10/12 ore compatibilmente con le esigenze pratiche di laboratorio;
- garanzia di buona ripetibilità della prova.

Al fine di rispettare i punti sopra elencati, sono state apportate delle sostanziali modifiche all'assetto di prova del macchinario. Nel dettaglio, è stato sviluppato il progetto di un prototipo per l'alloggiamento di provini di forma prismatica al di sopra dei quali far transitare la ruota di carico del Wheel Tracker cercando di simulare le reali condizioni di vincolo del materiale su strada. A tale proposito, le principali modifiche apportate consistono nell'adozione degli accorgimenti illustrati nelle Figure 3.11 e 3.12 di seguito elencati:

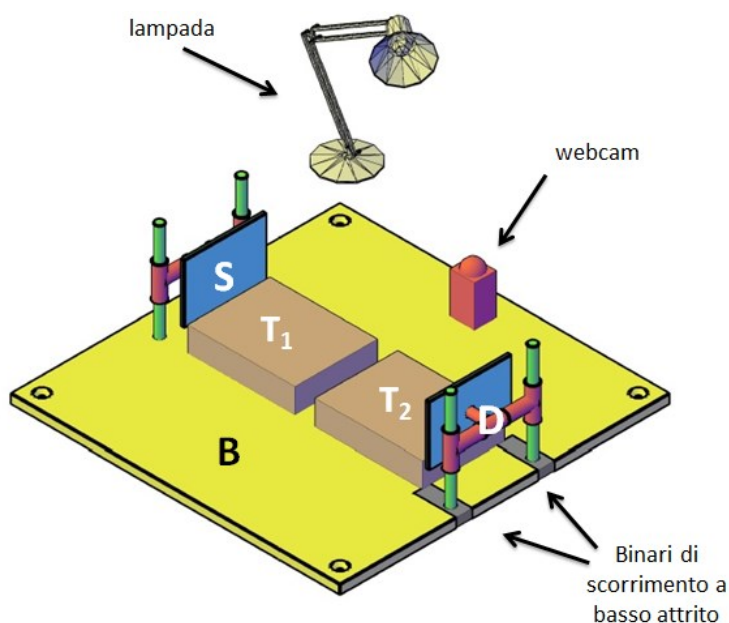


Figura 3.11 Configurazione di prova Reflective Cracking

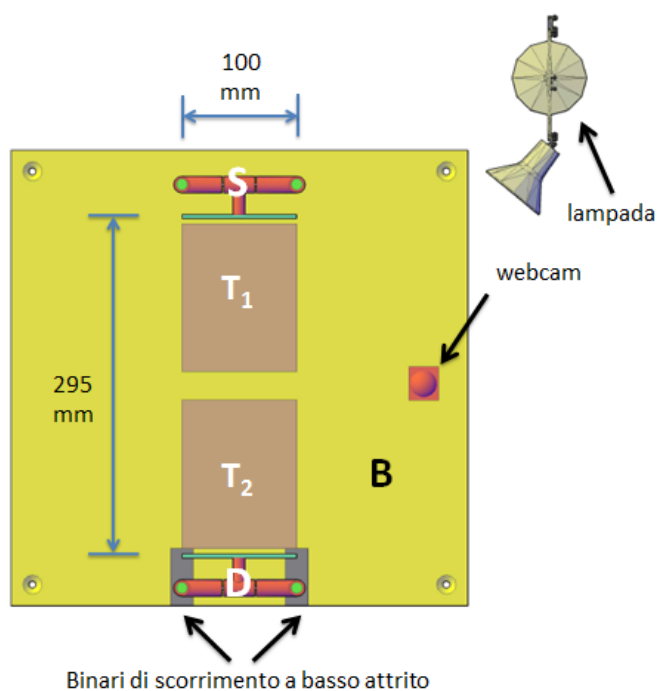


Figura 3.12 Schema in pianta della prova Reflective Cracking

- supporto costituito da due elementi snodati (S e D) separati da una distanza di 295 ± 10 mm, posizionati su una lastra metallica (B) di dimensione 400×400 mm². L'elemento S è fissato sulla lastra di base, mentre l'elemento D risulta mobile (in grado di spostarsi orizzontalmente lungo due binari di precisione a bassissimo attrito fissati anch'essi sulla base). Sia S che D, presentano due snodi a cerniera al loro interno collegati a delle piastre metalliche che fungono da supporto per l'incollaggio delle facce laterali del provino.

Al contempo, gli snodi sono fissati a degli elementi cilindrici su cui possono traslare verticalmente tramite dei cuscinetti anch'essi a basso attrito. Tali snodi, insieme al sistema mobile con binari, permettono di assecondare l'inflessione del provino durante il passaggio della ruota senza creare resistenze aggiuntive non presenti in condizioni reali.

- due blocchi (T1 e T2) distanziati tra loro di 25 mm, costituiti da 5 strati di neoprene sovrapposti e solidali, aventi spessore di 6 mm ciascuno (spessore totale 30 mm) e dimensioni in pianta pari a $10,5 \times 12$ cm². Il neoprene utilizzato è caratterizzato da un grado di durezza Shore A7, scelto in modo tale da simulare l'elasticità dello strato sottostante il pacchetto in conglomerato e, al contempo, garantire tempi di prova compatibili con le pratiche di laboratorio. Le principali proprietà fisiche e meccaniche del neoprene (classificato come W7) sono elencate in Tabella 3.2.
- una webcam collocata in posizione frontale allo scopo di monitorare l'evoluzione del quadro fessurativo durante la prova (Figure 3.11 e 3.12);
- un sistema di illuminazione capace di rendere visibile il provino all'interno della camera climatica consentendo una valutazione visiva maggiormente accurata dello stato fessurativo del campione (Figure 3.11 e 3.12).

CR Grade	W7
Color	black
Elongation Rate (%) (ASTM D412)	500↑
Tensile strength (kg/cm ²) (ASTM D412)	6.5↑
Tearing Strength (kg/cm) (ASTM D624)	2↑
Hardness (ASKER Type C) (ASTM D2240)	5-7
Density (g/cm ³) (ASTM D1817)	0.18±0.02
Modulus at 200% (kg/cm ²) (ASTM D412)	2-4
Water Absorption by Weight (%) (JIS K6767)	2↓
Shrinkage (70°C 22HRS) (%) (JIS K6767)	3↓

Tabella 3.2 Proprietà fisiche e meccaniche del neoprene da scheda tecnica.

Operativamente, prima di eseguire il test, il provino deve essere opportunamente fissato al dispositivo di prova. A tal fine, si esegue l'incollaggio delle facce laterali agli elementi S e D mediante una resina epossidica bicomponente (Figura 3.13). A presa avvenuta (dopo circa 4 ore di maturazione a temperatura ambiente), il provino viene condizionato alla temperatura di prova (nel caso specifico 30 °C) per 12 ore.

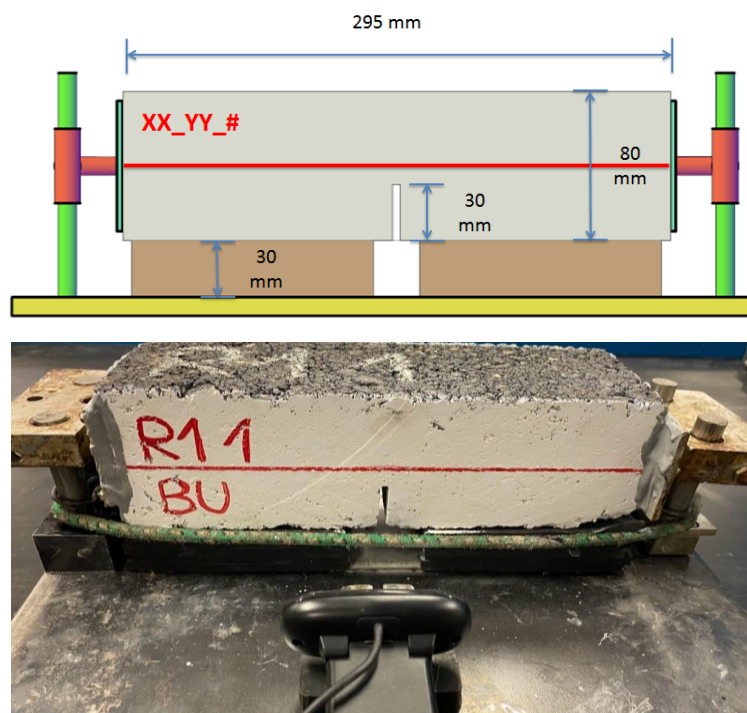


Figura 3.13 Provino assemblato da sottoporre alla prova Reflective Cracking

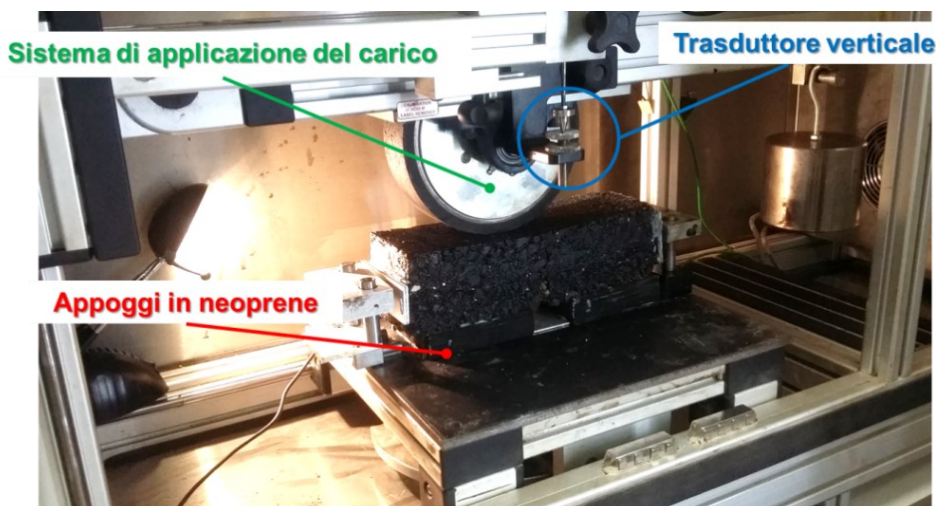


Figura 3.14 Configurazione della prova Reflective Cracking

Dopo la fase di condizionamento, si inserisce il dispositivo con il provino all'interno del macchinario Wheel Tracker, si accende la lampada e la ruota di carico viene posta a contatto col provino stesso (Figura 3.14). Successivamente, si applica il peso necessario per raggiungere il livello di carico desiderato (in questo caso **750 N** o **660 N**) e si controlla, attraverso una livella, che il braccio metallico che sostiene la ruota sia perfettamente orizzontale.

Di seguito vengono accese la lampada, per illuminare la superficie del provino verniciata di bianco, e la webcam per verificare l'andamento nel tempo del quadro fessurativo.

A questo punto è possibile avviare il programma di controllo della prova ed acquisizione dati accedendo ad una finestra in cui vengono riassunte le modalità di prova che possono essere modificate in base agli specifici parametri di prova. Nel caso in esame sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- durata massima della prova pari a 480 minuti che comporta un numero massimo di passaggi del carico applicato pari a:

$$Passaggi = \left(21 \frac{\text{cicli}}{\text{min}} \times 2 \right) \times 8h \times 60min = 20160 \quad (3.1)$$

di conseguenza, il numero di cicli (1 ciclo comprende l'andata e il ritorno) è pari alla metà dei passaggi.

- deflessione massima ammissibile pari a 50 mm;
- temperatura di prova pari a 30 °C;
- altezza complessiva del provino pari a 80 mm.

Dopo aver impostato i parametri di prova, il software mostra una schermata che guida l'utente al corretto posizionamento del trasduttore verticale. Al fine di ottenere una misurazione accurata dell'abbassamento subito dal provino e non rischiare di uscire dal range di misurazione del trasduttore, è necessario tarare il trasduttore verticale avvalendosi dell'apposita vite di contrasto entro un range indicato dal software stesso. La taratura consiste nel regolare la posizione del trasduttore LDVT in modo tale che raggiunga il valore di lettura nullo all'inizio del test. Una volta aggiustato il trasduttore verticale, compare la schermata che consente l'avvio della prova.

Contemporaneamente all'avvio del test, si inizializza il software di acquisizione video *Debut Video Capture Software* (della *NHC Software Suite*), relativo alla webcam, che consente di filmare l'evoluzione del fenomeno fessurativo del provino e di visualizzarlo in tempo reale mediante una finestra di dialogo (Figura 3.15).

La prova termina quanto il provino giunge a rottura o, in alternativa, supera il tempo massimo impostato per la prova (nel caso in esame 480 minuti).

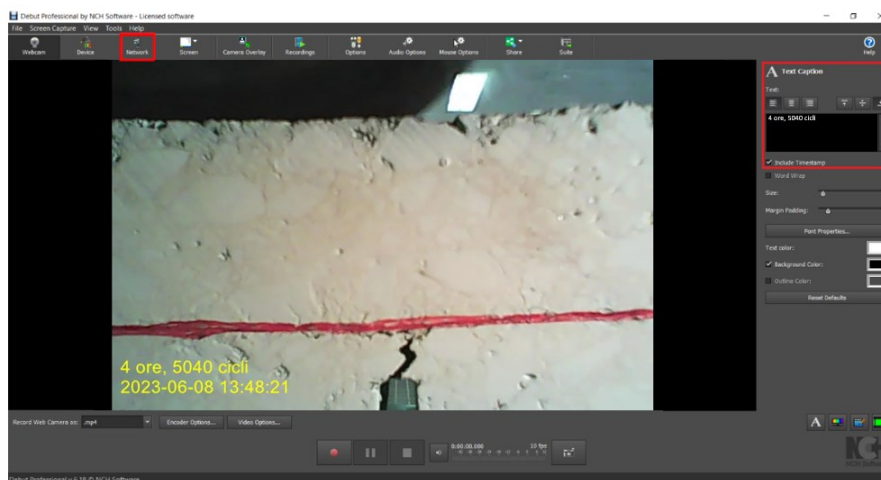


Figura 3.15 Finestra di dialogo del programma di acquisizione video

L'elaborazione dei risultati consiste nella valutazione dei dati sperimentali registrati durante la prova dal software di acquisizione e dalla contestuale analisi visiva dei filmati. In particolare, il software di gestione della prova restituisce i dati di deformazione verticale accumulata in funzione del numero di cicli di carico, dati che esprimono la curva evolutiva della deflessione (Figura 3.16), mentre l'analisi dei file video consente di ricavare l'evoluzione visiva del quadro fessurativo causato dall'applicazione ciclica del carico.

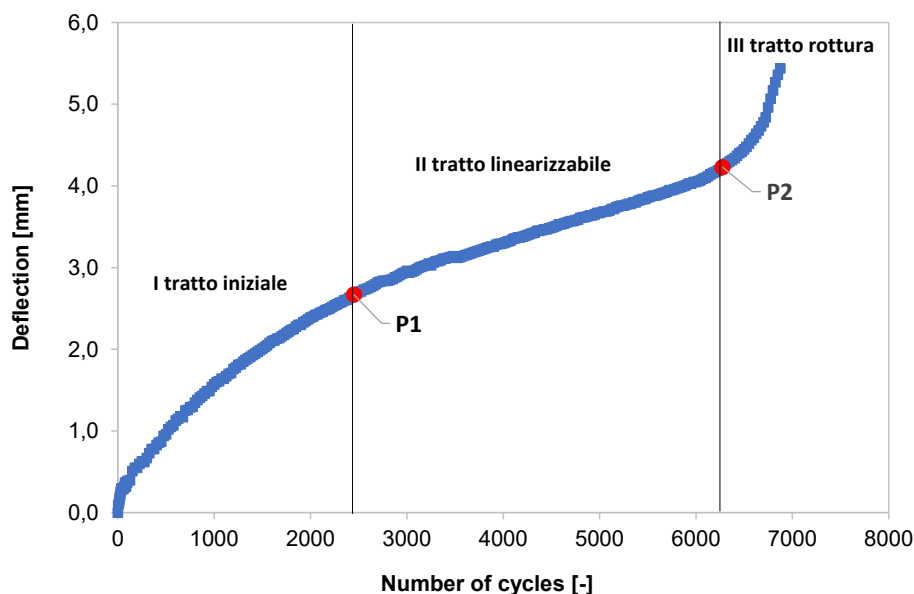


Figura 3.16 Evoluzione della deflessione e relativi tratti caratteristici

Dall'osservazione dei tipici risultati sperimentali riportati in Figura 3.16 è possibile individuare tre tratti caratteristici della curva di creep, delimitati da 2 punti, P1 e P2, in cui la retta tangente ha uno spiccato cambio di pendenza.

Il primo tratto, fino a dove si nota un sensibile cambiamento di curvatura nell'evoluzione della deformazione, è indice di una riconfigurazione interna del materiale. Il secondo, fino al successivo punto di flesso P2 che prelude alla rottura del campione, rappresenta l'evoluzione e la propagazione del quadro fessurativo. Il terzo tratto caratterizza la rottura del campione.

In assenza di modelli analitici affidabili capaci di descrivere l'andamento delle curve ottenute dai test eseguiti, sulla base delle suddette considerazioni si è scelto di considerare come criterio di rottura per la prova in oggetto il completo attraversamento dello strato superiore da parte della fessura di risalita.

In fase di elaborazione, non essendo una prova normata, si sono assunti come parametri caratteristici della resistenza alla fessurazione di riflessione:

- *Velocità di crescita della deformazione accumulata*, ovvero la pendenza del secondo tratto quasi-lineare delle curve di evoluzione del cedimento, individuato tra i 2 punti P1 e P2 in cui avviene un repentino cambio di pendenza, che rappresenta una misura di quanto velocemente peggiora la fessurazione;
- *Deflessione massima* raggiunta al termine della prova, ovvero quando la fessura raggiunge la superficie, associata graficamente al secondo cambio repentino di pendenza in corrispondenza del punto di flesso, valore che rappresenta una misura della gravità della fessurazione;
- *Numero di cicli di carico*, assunto come parametro caratteristico di rottura, corrispondenti al completo attraversamento della fessura di risalita fino alla superficie superiore.

I punti P1 e P2, indispensabili per dividere la curva nei tre tratti caratteristici, sono stati determinati sulla base di una regressione lineare, a partire da quanto prescritto dalla norma UNI EN 12697-25. La parte lineare della curva di evoluzione del cedimento è stata quindi determinata considerando quell'intervallo di punti consecutivi caratterizzati da una deviazione massima del 2% rispetto alla regressione lineare proposta. I punti P1 e P2 sono dunque stati determinati come punto iniziale e finale di questo intervallo (Figura 3.17).

N. cicli	Deflessione [mm]	Lin.regr	Difference regr.lin-model	N. cicli	Deflessione [mm]	Lin.regr	Difference regr.lin-model
2375	2,61	2,69	3,19	6000	4,05	4,06	0,17
2400	2,63	2,70	2,77	6025	4,06	4,07	0,16
2425	2,64	2,71	2,73	6050	4,07	4,08	0,14
2450	2,67	2,72	1,93	6075	4,09	4,09	0,12
2475	2,68	2,73	1,90	6100	4,1	4,09	0,13
2500	2,7	2,74	1,50	6125	4,12	4,10	0,39
2525	2,71	2,75	1,47	6150	4,14	4,11	0,64
2550	2,73	2,76	1,07	6175	4,16	4,12	0,89
2575	2,74	2,77	1,04	6200	4,17	4,13	0,91
2600	2,75	2,78	1,02	6225	4,19	4,14	1,16
2625	2,77	2,79	0,63	6250	4,2	4,15	1,17
2650	2,78	2,80	0,60	6275	4,23	4,16	1,65
2675	2,8	2,81	0,22	6300	4,26	4,17	2,12
2700	2,82	2,82	0,16	6325	4,28	4,18	2,36

Figura 3.17 Estratto di una serie di dati dove sono indicati in rosso i punti P1 (sx) e P2 (dx) e in giallo l'intervallo di valori con una deviazione massima del 2%.

Una volta individuati i punti P1 e P2, si determinano i valori dei tre parametri di confronto tra le prove (Figura 3.18) nel modo seguente:

- *velocità di crescita della deformazione accumulata* corrisponde al coefficiente angolare della retta del tratto linearizzato tra P1 e P2;
- *numero di cicli a rottura e deformazione massima* ottenuti in corrispondenza del punto P2, coincidente con la rottura del sistema bistrato per il raggiungimento della superficie da parte della fessura.

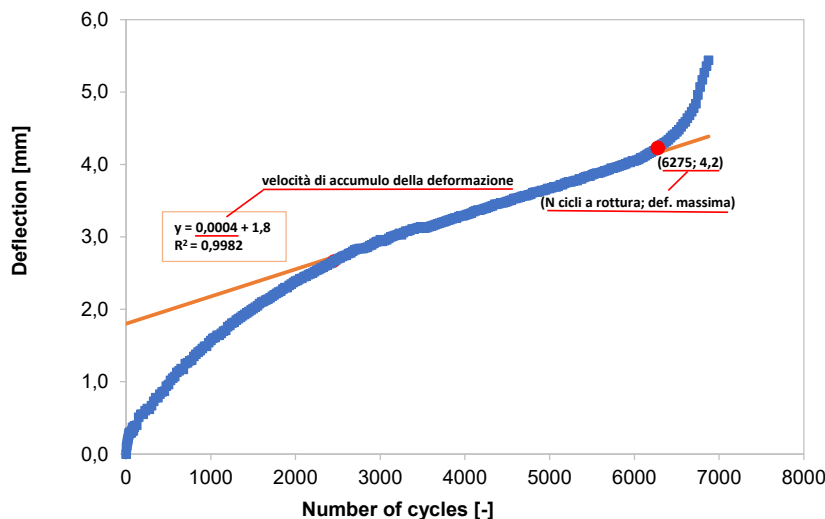


Figura 3.18 Parametri di prova Reflective Cracking

3.3. PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale ha previsto l'esecuzione di prove Reflective Cracking sui provini confezionati in laboratorio secondo la procedura descritta al §3.1.

In particolare, da ciascuna piastra bistrato confezionata sono stati ricavati due provini con i quali sono state eseguite due ripetizioni per ciascuna configurazione di prova (Tabella 3.3).

Tutti e tre i conglomerati bituminosi investigati (BU, BM.A, BM.B) sono stati testati con un carico di 750 N, sia in configurazione non rinforzata (NR) che rinforzata (R1). Inoltre, a titolo di confronto, i provini bistrato confezionati con conglomerato bituminoso modificato comunemente impiegato in ambito autostradale (BM.A), sono stati testati anche con un carico di 660 N.

Si evidenzia come, a causa di inconvenienti legati alle procedure di laboratorio, per la condizione non rinforzata relativa alla miscela BM.B con carico da 750 N è stato possibile testare un solo provino.

Materiale	Carico applicato [N]	Interfaccia	Ripetizioni
BU	750	non rinforzata (NR)	2
		rinforzata (R1)	2
BM.A	750	non rinforzata (NR)	2
		rinforzata (R1)	2
	660	rinforzata (R1)	2
BM.B	750	non rinforzata (NR)	1
		rinforzata (R1)	2

Tabella 3.3 Programma sperimentale

I provini sono quindi stati codificati considerando i parametri descritti in Tabella 3.3.
In particolare, nel codice del singolo provino sono stati inseriti, in successione:

- tipologia del materiale: BU, BM.A, BM.B
- carico applicato: 750, 660
- tipologia di interfaccia: NR, R1
- numero della ripetizione: 1, 2

4. Analisi dei risultati

I risultati relativi alle caratteristiche di resistenza alla fessurazione di riflessione da parte di provini bistrato non rinforzati e rinforzati con geocomposito Autotene Asfaltico Antipumping HE/TVP, ottenuti tramite apparecchiatura Wheel Tracker seguendo un innovativo protocollo di prova messo a punto dal gruppo di ricerca dell'UNIVPM nel 2017, sono stati analizzati in termini di:

- risposta globale del materiale mediante la velocità di crescita della deformazione accumulata (i.e. pendenza della parte quasi-lineare delle curve evolutive della deflessione);
- deflessione massima raggiunta al termine della prova;
- numero di cicli di carico corrispondenti al completo attraversamento dello strato superiore da parte della fessura di risalita.

I primi due parametri permettono di comprendere quanto velocemente e gravemente evolve il quadro fessurativo del sistema mentre il terzo può essere assunto come parametro caratteristico di rottura (simbolo del collasso del sistema).

Nel presente capitolo, in ciascun paragrafo (relativo alla singola tipologia di conglomerato bituminoso investigato) viene mostrato dapprima il quadro fessurativo e successivamente i risultati sperimentali in termini di curve evolutive della deflessione (deflessioni-cicli di carico), sia della condizione non rinforzata che di quella rinforzata, a parità di carico applicato (750 N).

Per il conglomerato BM.A vengono inoltre confrontati i risultati relativi all'applicazione di un carico pari a 750 N con quelli del carico a 660 N.

Infine, tutte le condizioni analizzate vengono paragonate tra loro per trarre le opportune conclusioni in relazione ai tre parametri investigati.

4.1. RISULTATI CONGLOMERATO BITUMINOSO NON MODIFICATO PER STRATI DI BINDER (BU)

In Figura 4.1 è riportata, a titolo di esempio, l'evoluzione del quadro fessurativo di un provino non rinforzato, considerando che la seconda ripetizione fornisce un comportamento analogo.

Il comportamento osservato durante la prova è sicuramente dovuto alla sola resistenza del conglomerato bituminoso che si comporta come un sistema monolitico grazie alla sufficiente adesione all'interfaccia garantita dal fatto che i due strati di conglomerato bituminoso sono stati confezionati a poche ore di distanza l'uno dall'altro.

Per entrambe le ripetizioni, l'innesco della cricca dall'intaglio si è registrato dopo circa 175 cicli ed ha rapidamente raggiunto l'interfaccia continuando a propagarsi ad elevata velocità.

Viceversa, in Figura 4.2 è riportato l'andamento del quadro fessurativo di un provino rinforzato. È possibile osservare che l'innesco della fessura è avvenuto dopo circa 210 cicli e la fase di propagazione, protrattasi per oltre 2000 cicli, è stata caratterizzata dalla presenza di microfessure diffuse che si sono sviluppate in mezzeria.

Tale riscontro indica che le fibre del geocomposito sono in grado di mobilitarsi sin da subito, mostrando comportamento duttile e ridistribuendo le tensioni di trazione su un'area maggiore di materiale.

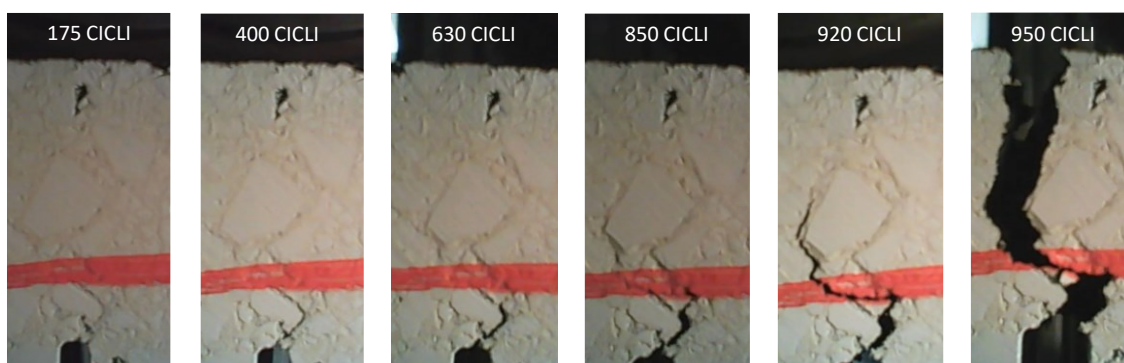


Figura 4.1 Sequenza evoluzione quadro fessurativo provino BU.750.NR2

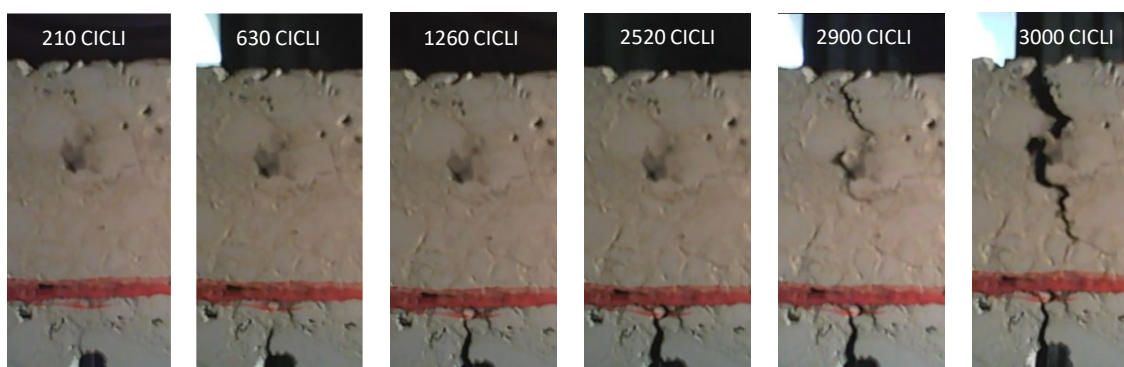


Figura 4.2 Sequenza evoluzione quadro fessurativo provino BU.750.R1.1

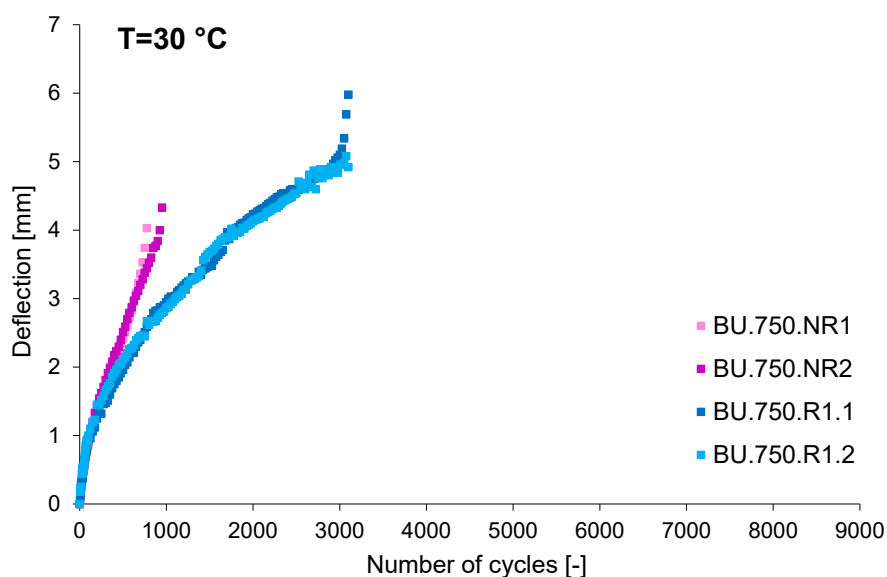


Figura 4.3 Curve creep del conglomerato bituminoso non modificato BU a 750 N

In Figura 4.3 sono rappresentate le curve evolutive della deformazione riferite sia ai provini non rinforzati che ai provini rinforzati, mentre in Tabella 4.1 sono riportati i parametri corrispondenti. In particolare, è stata individuata la velocità di deformazione come pendenza del secondo tratto quasi-lineare della curva cicli-deflessione, i punti P1 e P2 (all'interno dei quali tale pendenza è costante), il numero di cicli a rottura (rappresentato da P2) e la deflessione massima.

I risultati mostrano come i provini rinforzati forniscano un numero di cicli a rottura che è pari a circa 3 volte quello dei provini non rinforzati e abbiano una velocità di deformazione pari a circa 1/4 di quella osservata per i provini non rinforzati. Anche in termini di deflessione massima, la presenza del rinforzo garantisce migliori prestazioni rispetto all'interfaccia non rinforzata.

Si può pertanto concludere che l'innescò della fessura è avvenuto all'incirca dopo lo stesso numero di cicli sia nell'interfaccia non rinforzata che in quella rinforzata (Figura 4.1 e 4.2), ma la propagazione della fessura è avvenuta molto più lentamente nel provino rinforzato, come dimostrato dalla sensibilmente più bassa velocità di deformazione (Tabella 4.1).

Provino	P1 [n° cicli]	P2 [n° cicli a rottura]	Deflessione massima	Velocità di deformazione [mm/1000 cicli]
BU.750.NR1	150	600	2.83	3.58
BU.750.NR2	225	900	3.84	3.45
BU.750.NR_medio	-	750	3.34	3.51
BU.750.R1.1	1700	3000	5.1	0.81
BU.750.R1.2	1425	2850	4.84	0.87
BU.750.R1_medio	-	2925	4.97	0.84

Tabella 4.1 Parametri per analisi risultati prove RC per materiale BU a 750 N

4.2. RISULTATI CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATI DI BASE (BM.A)

Come descritto nel programma sperimentale (§3.3), l'indagine relativa al conglomerato bituminoso modificato per strati di base, comunemente impiegato in ambito autostradale (BM.A) ha previsto l'applicazione di due diversi livelli di carico, 750 N (analogo a quello applicato nel caso degli altri due conglomerati bituminosi investigati) e 660 N.

4.2.1. Carico applicato pari a 750 N

In Figura 4.4 e Figura 4.5 sono riportati gli andamenti dei quadri fessurativi di un provino non rinforzato e di uno rinforzato, rispettivamente.

Analogamente a quanto visto nel caso del conglomerato bituminoso non modificato BU, il comportamento dell'interfaccia non rinforzata (Figura 4.4) è dovuto alla sola resistenza del conglomerato bituminoso. In questo caso, l'innescò della cricca dall'intaglio è stato registrato dopo circa 315 cicli ed ha rapidamente raggiunto l'interfaccia continuando a propagarsi nello strato superiore fino a giungere a rottura.

Nel caso di interfaccia rinforzata (Figura 4.5), l'innescò della fessura è avvenuto dopo circa 400 cicli e la fase di propagazione, che ha ovviamente riguardato anche lo strato superiore, si è protratta per oltre 5000 cicli, fino alla rottura completa del provino.

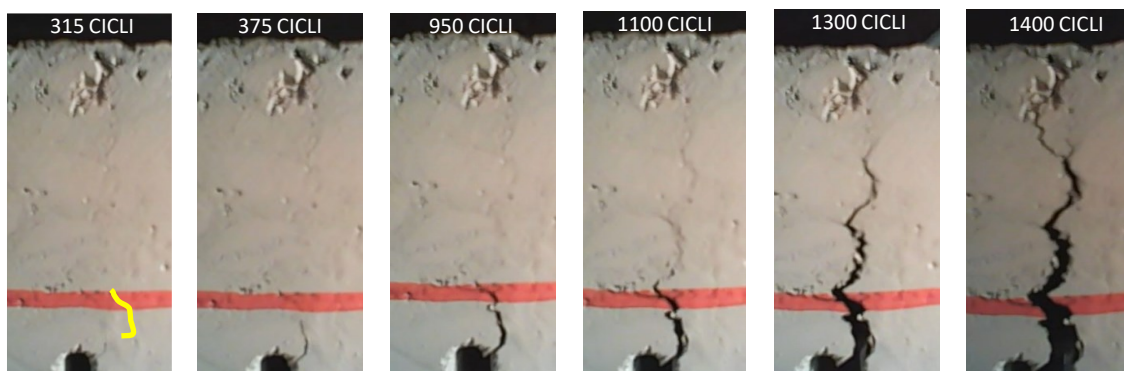


Figura 4.4 Sequenza evoluzione quadro fessurativo provino BM.A.750.NR4

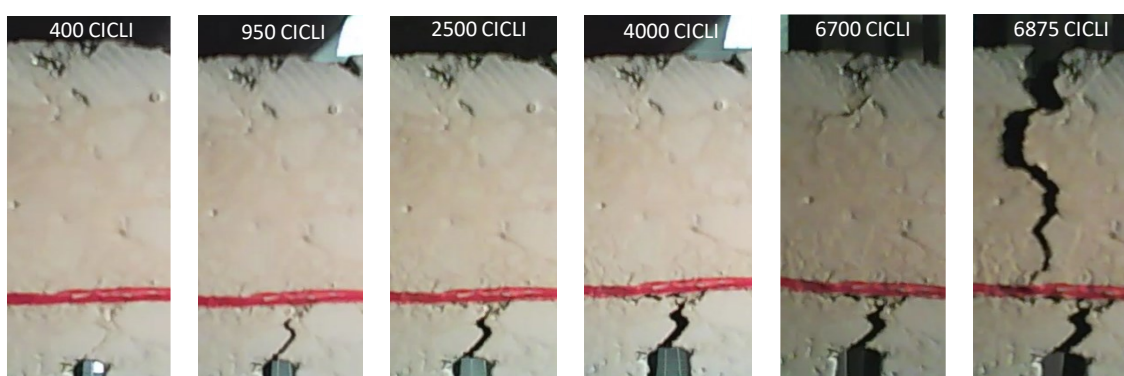


Figura 4.5 Sequenza evoluzione quadro fessurativo provino BM.A.750.R1.2

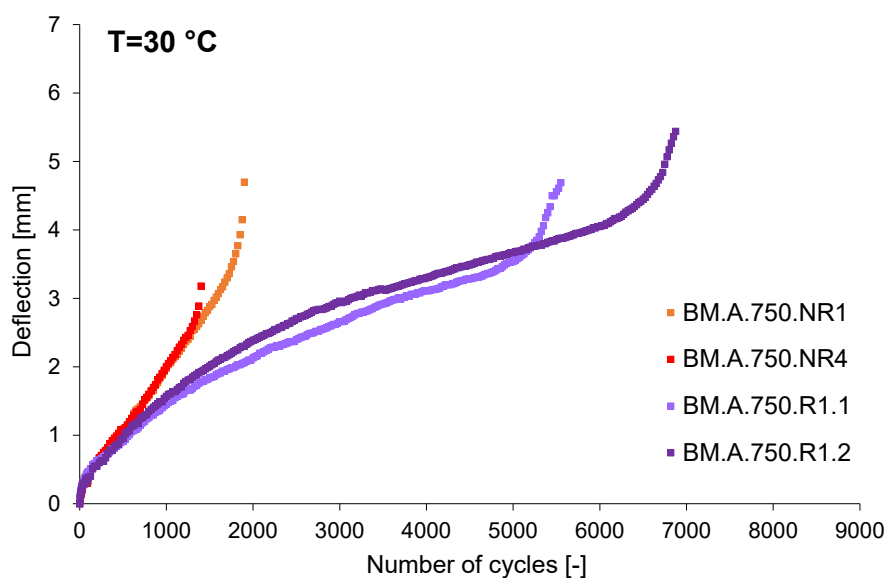


Figura 4.6 Curve creep del conglomerato bituminoso modificato BM.A a 750 N

In Figura 4.6 sono rappresentate le curve evolutive della deflessione relativa sia ai provini non rinforzati che ai provini rinforzati, mentre in Tabella 4.2 sono riportati i parametri corrispondenti.

Anche in questo caso, analogamente a quanto visto nel caso del conglomerato bituminoso non modificato (§4.1), i provini rinforzati forniscono un numero di cicli a rottura che è pari a circa 3-4 volte quello dei provini non rinforzati, con velocità di deformazione che è inferiore a quella osservata per i provini non rinforzati di 4-5 volte. Anche in termini di deflessione massima, la presenza del rinforzo garantisce migliori prestazioni rispetto all'interfaccia non rinforzata.

In definitiva, le prove eseguite sul conglomerato bituminoso modificato, comunemente impiegato in ambito autostradale, permettono di concludere che l'innescò della fessura è avvenuto all'incirca dopo lo stesso numero di cicli sia nell'interfaccia non rinforzata che in quella rinforzata (Figura 4.4 e 4.5), ma la propagazione della fessura è avvenuta molto più lentamente nel provino rinforzato, come dimostrato dalla sensibilmente più bassa velocità di deformazione (Tabella 4.2).

Provino	P1 [n° cicli]	P2 [n° cicli a rottura]	Deflessione massima	Velocità di deformazione [mm/1000 cicli]
BM.A.750.NR1	425	1725	3.36	1.83
BM.A.750.NR4	550	1325	2.67	1.93
BM.A.750.NR_medio	-	1525	3.02	1.88
BM.A.750.R1.1	2075	5125	3.65	0.45
BM.A.750.R1.2	2450	6275	4.23	0.38
BM.A.750.R1_medio	-	5700	3.94	0.41

Tabella 4.2 Parametri per analisi risultati prove RC per materiale BM.A a 750 N

4.2.2. Carico applicato pari a 660 N

In Figura 4.7 è riportato l'andamento del quadro fessurativo di un provino rinforzato, testato con un carico pari a 660 N. È possibile osservare come l'innescò della fessura sia avvenuto dopo circa 630 cicli e la fase di propagazione, che ha ovviamente riguardato anche lo strato superiore, si è protratta fino alla rottura completa del provino per oltre 4000 cicli, analogamente a quanto osservato con il carico dal 750 N.

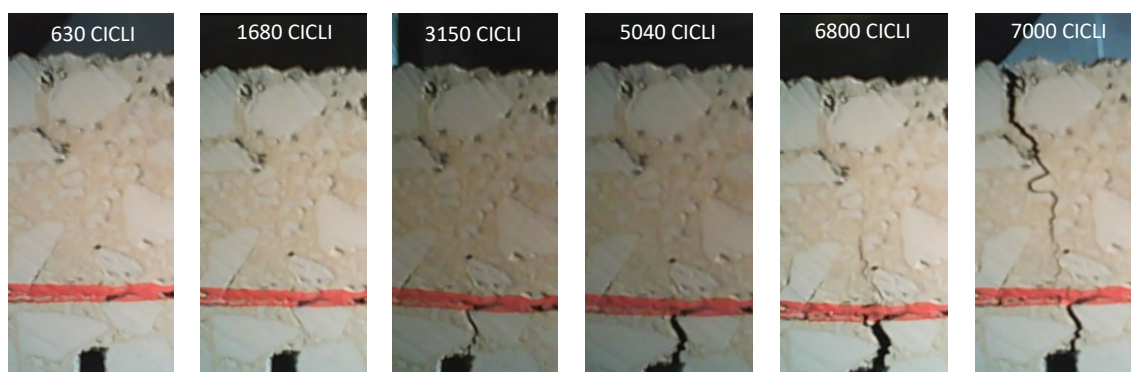


Figura 4.7 Sequenza evoluzione quadro fessurativo provino BM.A.600.R1.1

In Figura 4.8 sono messe a confronto le curve evolutive delle deflessioni relative ai provini rinforzati testati a 750 N con quelli testati a 660 N, mentre in Tabella 4.3 sono riportati i parametri ricavati per le prove a 660 N.

I risultati mostrano come non sia possibile apprezzare differenze significative tra le prove eseguite con il carico superiore e quelle eseguite con il carico inferiore, permettendo di ammettere un comportamento sostanzialmente analogo del rinforzo nelle due condizioni.

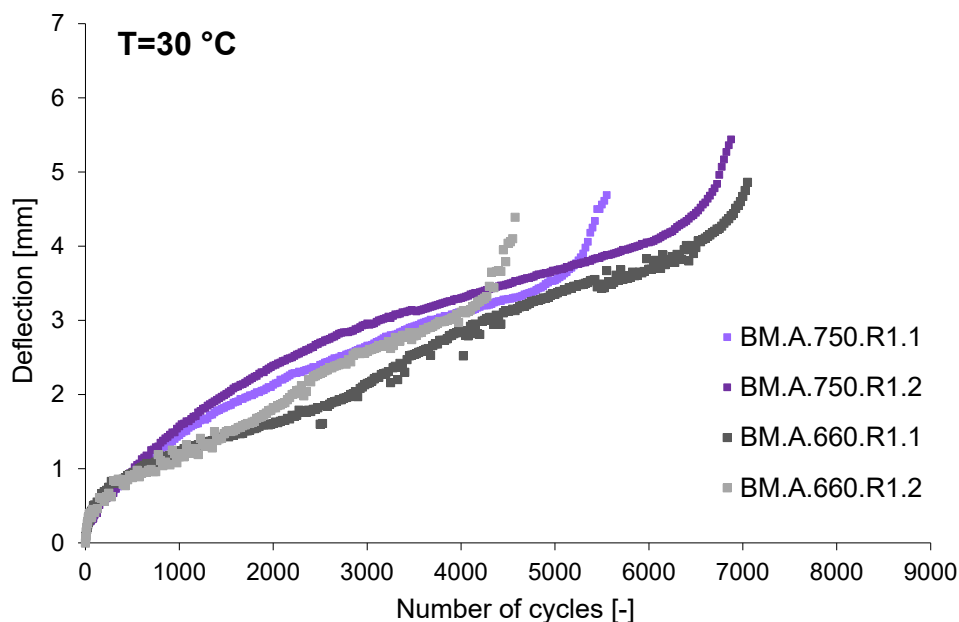


Figura 4.8 Confronto curve creep conglomerato bituminoso modificato BM.A a 750 e 660 N

Provino	P1 [n° cicli]	P2 [n° cicli a rottura]	Deflessione massima	Velocità di deformazione [mm/1000 cicli]
BM.A.660.R1.1	675	6500	3.98	0.53
BM.A.660.R1.2	575	4275	3.32	0.66
BM.A.660.NR_medio	-	5387.5	3.65	0.59

Tabella 4.3 Parametri per analisi risultati prove RC per materiale BM.A a 660 N

4.3 RISULTATI CONGLOMERATO BITUMINOSO MODIFICATO PER STRATO DI BINDER (BM.B)

In Figura 4.9 e Figura 4.10 sono riportati gli andamenti dei quadri fessurativi di un provino non rinforzato e di uno rinforzato, rispettivamente.

Analogamente a quanto visto nei casi precedenti, il comportamento dell'interfaccia non rinforzata (Figura 4.9) è dovuto alla sola resistenza del conglomerato bituminoso, con innesco della cricca dall'intaglio dopo circa 300 cicli e successiva propagazione nello strato superiore fino al raggiungimento della completa rottura del provino.

Nel caso di interfaccia rinforzata (Figura 4.10), l'innesco della fessura è avvenuto dopo circa 315 cicli e la fase di propagazione, che ha ovviamente riguardato anche lo strato superiore, si è protratta per oltre 3000 cicli, fino alla rottura completa del provino.

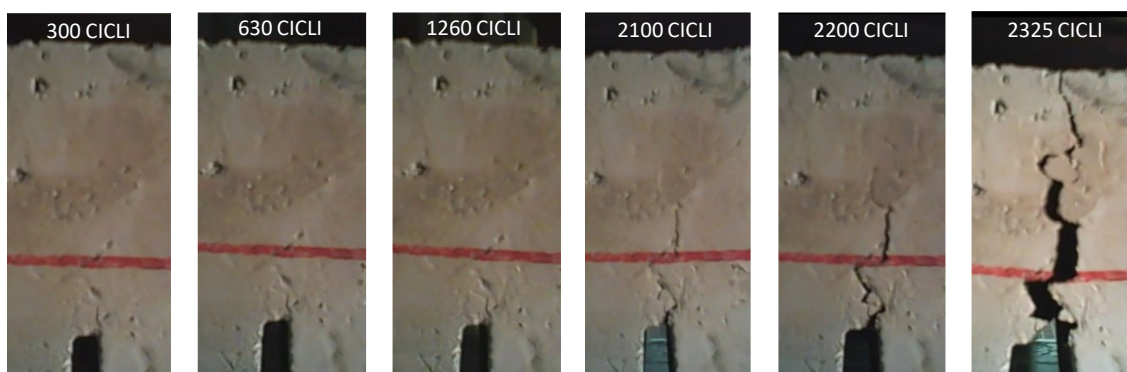


Figura 4.9 Sequenza evoluzione quadro fessurativo provino BM.B.NR3

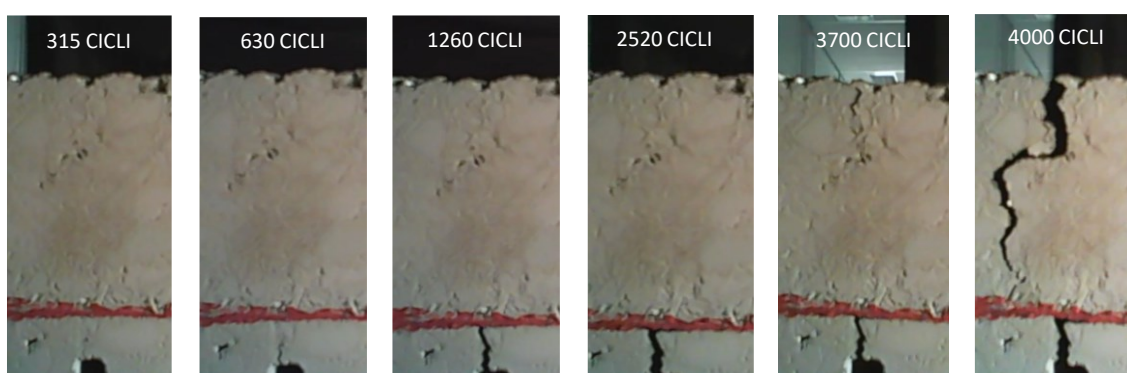


Figura 4.10 Sequenza evoluzione quadro fessurativo provino BM.B.R1.1

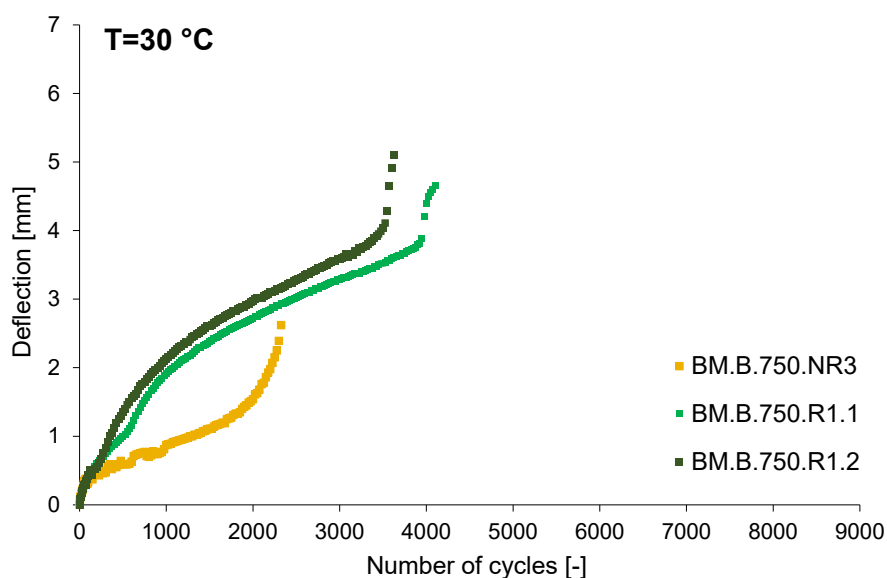


Figura 4.11 Curve creep del conglomerato bituminoso modificato BM.B a 750 N

In Figura 4.11 sono rappresentate le curve evolutive delle deflessioni relative sia ai provini non rinforzati che ai provini rinforzati, mentre in Tabella 4.4 sono riportati i parametri corrispondenti.

In questo caso, i provini rinforzati forniscono un numero di cicli a rottura che è pari a circa 2 volte quello del provino non rinforzato, con velocità di deformazione sostanzialmente analoga e deflessione massima circa tripla, permettendo di ammettere che la presenza del rinforzo garantisce migliori prestazioni rispetto all'interfaccia non rinforzata.

Analogamente ai casi precedenti, l'innescò della fessura è avvenuto all'incirca dopo lo stesso numero di cicli sia nell'interfaccia non rinforzata che in quella rinforzata (Figura 4.9 e 4.10), ma in questo caso, la propagazione della fessura è avvenuta con la stessa velocità in entrambe le condizioni anche se il provino rinforzato ha comunque manifestato una maggiore durata prima della rottura (Tabella 4.4).

Provino	P1 [n° cicli]	P2 [n° cicli a rottura]	Deflessione massima	Velocità di deformazione [mm/1000 cicli]
BM.B.750.NR3	1000	1750	1.27	0.52
BM.B.750.NR_medio	-	1750	1.27	0.52
BM.B.750.R1.1	1600	3925	3.81	0.55
BM.B.750.R1.2	1350	3450	3.95	0.65
BM.B.750.R1_medio	-	3687.5	3.88	0.60

Tabella 4.4 Parametri per analisi risultati prove RC per materiale BM.B a 750 N

4.4. CONFRONTO TRA LE DIVERSE TIPOLOGIE DI CONGLOMERATO BITUMINOSO

In Figura 4.12 e Figura 4.13 è riportato il confronto tra le tre diverse tipologie di conglomerato bituminoso per la condizione non rinforzata e per quella rinforzata, rispettivamente. Nelle Figure 4.14, 4.15 e 4.16 sono inoltre riassunti e confrontati i valori medi (ottenuti come media delle due ripetizioni per ciascuna configurazione) dei parametri ottenuti nella sperimentazione e già riportati nelle Tabelle 4.1, 4.2 e 4.4.

Le curve evolutive della deflessione e gli istogrammi mostrano in maniera evidente come le diverse tipologie di conglomerato bituminoso impiegato influenzino sensibilmente le caratteristiche di resistenza alla fessurazione di riflessione delle interfacce, sia non rinforzate che rinforzate, con una resistenza superiore nel caso dei conglomerati modificati con SBS rispetto a quello non modificato.

Si deve inoltre evidenziare che conglomerati bituminosi modificati diversi si comportano in maniera differente nei confronti della fessurazione di riflessione, permettendo di affermare che ciascun materiale ha delle caratteristiche intrinseche che gli permettono di resistere in maggiore o minore misura alla fessurazione di riflessione, anche in presenza di geocomposito di rinforzo all'interfaccia.

Tale resistenza è perciò anche frutto di una interazione tra il materiale costituente il conglomerato bituminoso e quello costituente il geocomposito.

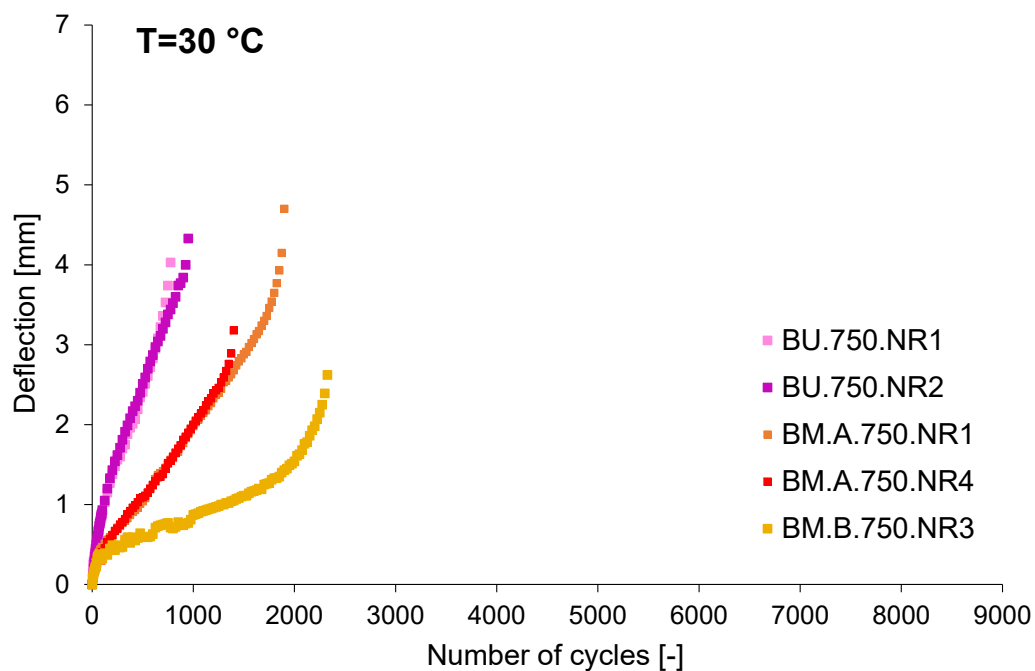


Figura 4.12 Curve di creep dei provini non rinforzati, testati a 750 N

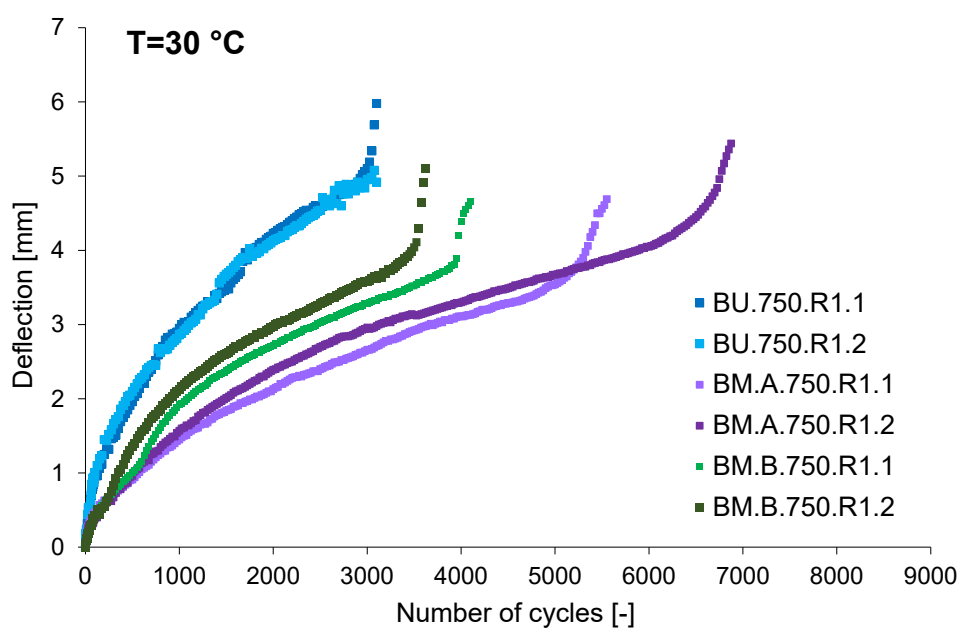


Figura 4.13 Curve di creep dei provini rinforzati, testati a 750 N

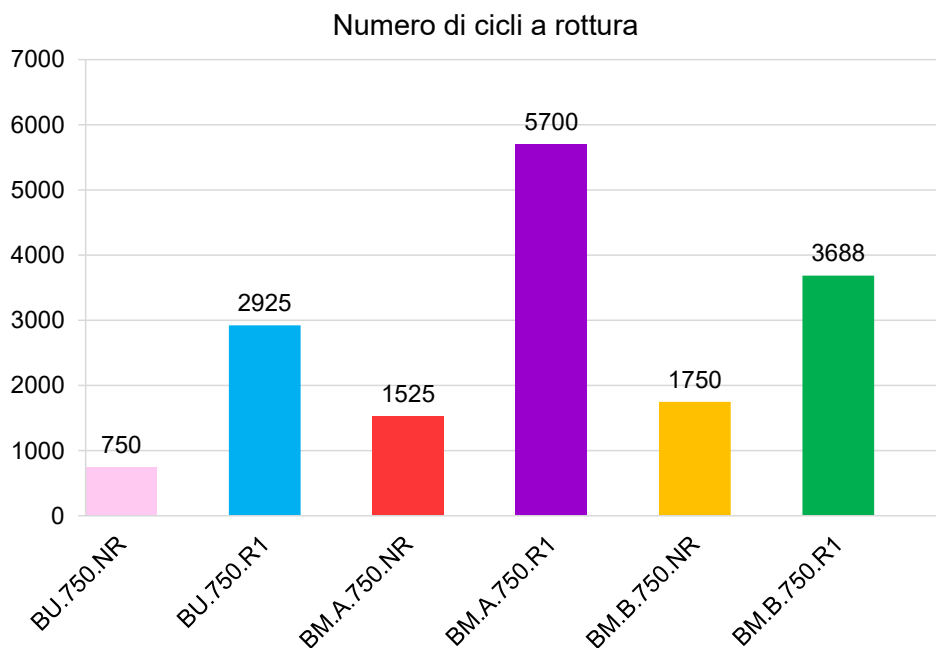


Figura 4.14 Numero medio di cicli a rottura

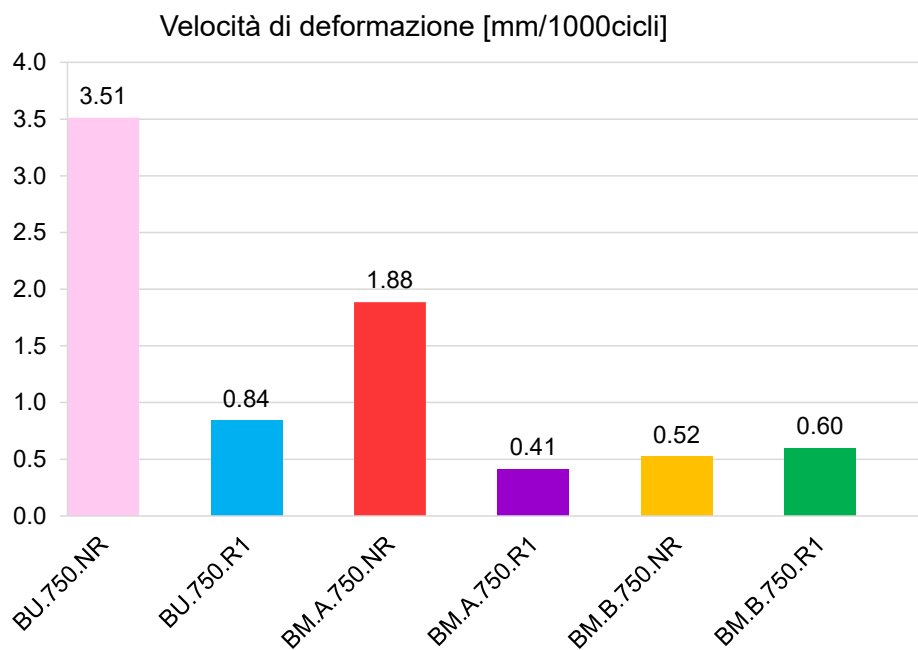


Figura 4.15 Velocità medie di deformazione

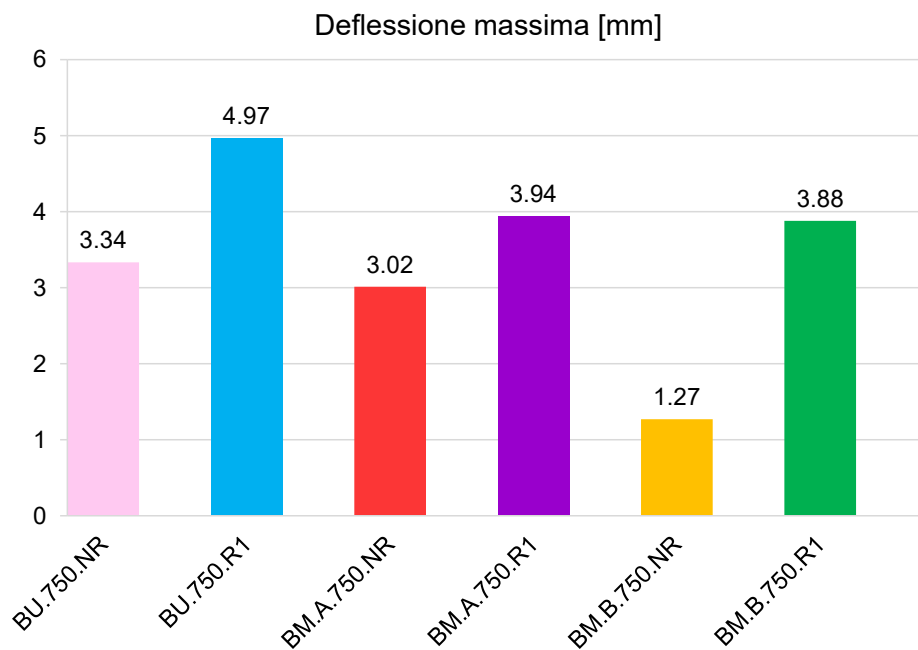


Figura 4.16 Deflessione massima media

5. Conclusioni

Nella presente sperimentazione sono state confrontate le prestazioni offerte da sistemi bistrato caratterizzati dalla presenza di un geocomposito all'interfaccia, allo scopo di evidenziare i benefici apportati in termini di resistenza alla fessurazione di riflessione. I geocompositi di rinforzo possono infatti essere utilizzati in ambito stradale in fase di manutenzione, con l'obiettivo di ripristinare la capacità portante di pavimentazioni anche fortemente dissestate.

Nel caso in esame, è stata indagata la capacità del geocomposito Autotene Asfaltico Antipumping HE/TVP di resistere alla fessurazione di riflessione simulata tramite una prova di laboratorio, denominata Reflective Cracking e messa a punto presso l'Università Politecnica delle Marche, consistente nel passaggio ripetuto di una ruota al di sopra di un sistema bistrato fessurato, per valutare le caratteristiche di resistenza alla risalita di una fessura preesistente.

Le prestazioni del geocomposito sono state indagate considerando tre differenti conglomerati bituminosi, uno non modificato (BU, per strati di binder) e due modificati con polimeri SBS (BM.A, per strati di base e comunemente impiegato in ambito autostradale e BM.B, per strati di binder e per usi non autostradali). Inoltre, le prestazioni fornite dai sistemi bistrato rinforzati con Autotene Asfaltico Antipumping HE/TVP sono state confrontate con quelle di sistemi di riferimento non rinforzati, confezionati con gli stessi conglomerati bituminosi.

Le prove sono state eseguite presso il Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche, su provini ricavati da piastre bistrato confezionate nello stesso laboratorio.

I sistemi non rinforzati e rinforzati sono stati confrontati in termini di:

- numero di cicli di carico corrispondenti al completo attraversamento dello strato superiore da parte della fessura di risalita;
- velocità di crescita della deformazione accumulata durante la prova Reflective Cracking;
- deformazione massima raggiunta al termine della prova.

A seguito delle osservazioni e considerazioni riportate nei capitoli precedenti, si possono formulare le seguenti conclusioni:

- a parità di conglomerato bituminoso, l'innescò della fessura è avvenuto all'incirca dopo lo stesso numero di cicli sia nell'interfaccia non rinforzata che in quella rinforzata perché è una caratteristica intrinseca del conglomerato, ma la propagazione della fessura è avvenuta molto più lentamente nel provino rinforzato;
- in funzione della diversa tipologia di conglomerato bituminoso impiegato, i provini rinforzati forniscono un numero di cicli a rottura che è dalle 2 alle 4 volte superiore a quello dei provini non rinforzati, con velocità di deformazione inferiori e deflessioni massime superiori a quelle osservate per i provini non rinforzati;
- la diversa tipologia di conglomerato bituminoso impiegato influenza significativamente le caratteristiche di resistenza alla fessurazione di riflessione delle interfacce, sia non rinforzate che rinforzate, con una resistenza superiore nel caso dei conglomerati modificati con SBS rispetto a quello non modificato;

- conglomerati bituminosi modificati diversi si comportano in maniera differente nei confronti della fessurazione di riflessione, permettendo di ammettere che tale resistenza è anche frutto di una interazione tra il materiale costituente il conglomerato bituminoso e quello costituente il geocomposito;
- prove eseguite con carichi differenti (750 N e 660 N) sul sistema bistrato rinforzato confezionato con conglomerato bituminoso modificato comunemente impiegato in ambito autostradale (BM.A), mostrano differenze non significative nelle prestazioni, permettendo di ammettere un comportamento sostanzialmente analogo del rinforzo quando sollecitato con i due carichi analizzati.

Bibliografia

- [1] F. Canestrari, E. Pasquini, L. Belogi, "*Optimization of Geocomposites for Double-Layered Bituminous Systems*", RILEM Bookseries 4, pp. 1229-1239, 2012.
- [2] E. Pasquini, M. Bocci, F. Canestrari, "*Laboratory characterization of optimized geocomposites for asphalt pavement reinforcement*", Geosynthetics International, Vol. 21, No. 1, 24-36, 2014.
- [3] E. Pasquini, M. Pasetto, F. Canestrari, "*Geocomposites against Reflective Cracking in Asphalt Pavements: Laboratory Simulation and Field Application*", Road Materials and Pavement Design, pp. 815-835, 2015.
- [4] F. Canestrari, G. Ferrotti, M. Abuaddous, E. Pasquini, "*Geocomposite-reinforcement of polymer-modified asphalt systems*", 8th International RILEM Symposium on Testing and Characterization of Sustainable & Innovative Bituminous Materials, RILEM Bookseries, pp. 383-395, Ancona, 2016.
- [5] D. Ragni, A. Marradi, T. Montillo, F. Canestrari, "*Accelerated Pavement Testing (APT) and laboratory analysis of asphalt pavements reinforced with geocomposites*", 5th International Symposium on Asphalt Pavements and Environment, Padova, 2019.
- [6] F. Canestrari, E. Pasquini, L. Belogi, "*Optimization of Geocomposites for Double-Layered Bituminous Systems*", RILEM Bookseries 4, pp. 1229-1239, 2012.
- [7] E. Pasquini, M. Bocci, F. Canestrari, "*Laboratory characterization of optimized geocomposites for asphalt pavement reinforcement*", Geosynthetics International, Vol. 21, No. 1, 24-36, 2014.
- [8] E. Pasquini, M. Pasetto, F. Canestrari, "*Geocomposites against Reflective Cracking in Asphalt Pavements: Laboratory Simulation and Field Application*", Road Materials and Pavement Design, pp. 815-835, 2015.