



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
Dipartimento ICEA



Progetto di Ricerca 2017

Influenza delle proprietà dei conglomerati bituminosi  
impiegati per il confezionamento dei provini di  
laboratorio sulle prestazioni del geocomposito

# Rapporto Finale Integrativo

Committente: INDEX S.p.A.

Responsabile: Prof. Ing. Francesco Canestrari

Collaboratori: Dr. Ing. Arianna Stimilli  
Ing. Davide Ragni

---

Ancona, novembre 2017

1. Premessa.....	3
2. Programma sperimentale .....	5
2.1 MATERIALI IMPIEGATI.....	5
2.1.1 <i>Miscela bituminosa sperimentazione 2017 (NEW)</i> .....	5
<i>Conglomerato bituminoso tradizionale NEW</i> .....	6
<i>Conglomerato bituminoso modificato NEW</i> .....	7
2.1.2 <i>Conglomerato bituminoso sperimentazione 2012 (OLD)</i> .....	8
<i>Conglomerato bituminoso tradizionale OLD</i> .....	8
<i>Conglomerato bituminoso modificato OLD</i> .....	9
2.1.3 <i>Confronto conglomerati bituminosi NEW e OLD</i> .....	10
2.1.4 <i>Emulsione cationica per interfaccia non rinforzata</i> .....	11
2.1.5 <i>Geocomposito</i> .....	11
2.2 INDAGINE SPERIMENTALE.....	13
2.1.1 <i>Fase 1 – conglomerati bituminosi di diversa origine</i> .....	13
2.1.2 <i>Fase 2 – conglomerati con diverso grado di compattazione</i> .....	14
2.1.3 <i>Determinazione della quantità di materiale per ogni strato</i> .....	15
2.1.4 <i>Codifica dei sistemi bistrato</i> .....	15
2.1.5 <i>Riepilogo programma sperimentale</i> .....	16
3. Analisi dei risultati.....	17
3.1 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI.....	17
3.2 SISTEMI BISTRATO CON CONGLOMERATI BITUMINOSI DI DIVERSA ORIGINE.....	19
3.3 SISTEMI BISTRATO CON PERCENTUALE DI VUOTI VARIABILE.....	21
4. CONCLUSIONI.....	25

# 1. Premessa

Il presente documento descrive i risultati di un'indagine sperimentale scaturita a valle dei precedenti rapporti di ricerca. Essa costituisce uno sviluppo della convenzione stipulata tra l'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM) e la società INDEX S.p.A. nel 2017 (*“Studio delle prestazioni del geocomposito “Autotene asfaltico anti-pumping HE/TVP” per applicazioni stradali ed aeroportuali in presenza di materiali bituminosi innovativi”*). In tal senso, il presente documento rappresenta un'integrazione del corrispondente Rapporto Finale 2017.

In particolare, la sperimentazione descritta nei successivi capitoli affronta lo studio dell'influenza delle proprietà del conglomerato bituminoso sulle prestazioni del sistema di rinforzo AUTOTENE ASFALTICO ANTIPUMPING HE/TVP. Le ricerche finora effettuate si sono focalizzate sull'ottimizzazione delle caratteristiche del geocomposito ricavando utili indicazioni circa i suoi meccanismi di funzionamento e le condizioni ideali di installazione in un confronto comparativo con prodotti simili. I risultati conseguiti hanno suggerito che le prestazioni del geocomposito non possono essere considerate come assolute, ma vanno correlate al tipo di pavimentazione in cui il geocomposito viene installato. Ciò implica che uno stesso geocomposito può esprimere un diverso potenziale a seconda delle caratteristiche degli strati della pavimentazione in cui risulta applicato. A tale proposito, le sperimentazioni precedenti hanno consentito di identificare un *“coefficiente di prestazione  $k$ ”* del rinforzo (desunto da prove di flessione statica su 3 punti) quale parametro per quantificare l'efficienza del geocomposito. Tale valore risulta indicativo dell'incremento di vita utile derivante dall'interposizione del rinforzo rispetto ad un analogo sistema non rinforzato e può essere utilmente impiegato in fase di progettazione per valutare la durata del mantenimento della funzionalità in esercizio di nuove opere o interventi di manutenzione.

Sulla base di quanto premesso, nasce l'esigenza di verificare se il valore di  $k$  da adottare in fase di calcolo sia sempre costante (tale cioè da rappresentare un parametro intrinseco del rinforzo) o vari in funzione delle caratteristiche degli strati della pavimentazione in cui viene installato. Come già accennato, i risultati acquisiti nelle precedenti fasi di studio sembrano infatti indicare che la mobilitazione del rinforzo sia diversa da caso a caso e vada pertanto determinato il valore di  $k$  in relazione alle condizioni specifiche della situazione in esame. Assumere prestazioni assolute per un dato rinforzo rischia di sovra o sotto stimare la durabilità del pacchetto strutturale corrispondente con ripercussioni sia tecnico-operative che economiche.

Al fine di definire meglio tali aspetti e valutare efficacemente il comportamento del geocomposito, è stata avviata la presente fase di indagine volta a determinare le prestazioni del sistema di rinforzo (tradotta in termini di coefficiente  $k$ ) al variare delle caratteristiche del conglomerato bituminoso associato (i.e. origine e tipologia, grado di compattazione, caratteristiche meccaniche). La sperimentazione ha coinvolto due tipologie di conglomerato bituminoso, tradizionale e modificato, per la preparazione di sistemi bistrato rinforzati e non.

L'indagine si è articolata in due fasi successive:

- *Fase 1:* confezionamento di sistemi bistrato con conglomerato bituminoso tradizionale e modificato compattati con una percentuale di vuoti ottimale (i.e. 5÷6%) i cui risultati sono stati posti a diretto confronto con quelli ricavati su analoghi sistemi preparati nelle precedenti sperimentazioni con conglomerati di uguale tipologia, ma diversa origine;
- *Fase 2:* preparazione di sistemi bistrato con conglomerato tradizionale e modificato compattati con percentuale di vuoti variabile (i.e. 3÷15%, a simulare caratteristiche meccaniche differenti e/o difetti in fase di posa in opera).

Tali analisi permettono, quindi, di valutare se e quanto un'eventuale compattazione carente del conglomerato durante la stesa o l'impiego di una miscela bituminosa poco performante possa compromettere l'efficienza del geocomposito o se, al contrario, l'applicazione di un elemento di rinforzo sia in grado di compensare, almeno parzialmente, eventuali inadeguatezze del pacchetto strutturale. Al contempo, i dati raccolti forniscono utili indicazioni sul range di vuoti/rigidezza che il conglomerato dovrebbe rispettare per poter sfruttare pienamente la potenzialità del geocomposito.

Nel seguito, si presentano in maniera dettagliata le fasi dell'indagine sperimentale, fornendo una descrizione analitica di tutti i materiali coinvolti e tralasciando quella delle apparecchiature utilizzate in laboratorio, nonché dei protocolli di prova seguiti che sono dettagliatamente reperibili nei precedenti rapporti di ricerca. Si conclude l'elaborato con l'analisi e i commenti dei risultati emersi, anticipati da un breve riepilogo dei metodi di elaborazione dati.

Il responsabile scientifico del progetto di ricerca è il prof. Francesco Canestrari, Professore Ordinario nel SSD ICAR/04 (Strade, Ferrovie e Aeroporti) titolare dei corsi di "Pavimentazione e Materiali Stradali e Aeroportuali" e di "Gestione e Manutenzione delle Pavimentazioni Stradali" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche.

Alle attività sperimentali hanno collaborato l'Ing. Davide Ragni (Dottorando di Ricerca) con il contributo di un Tesista di Laurea Triennale (Ing. Davide Ippoliti).

## 2. Programma sperimentale

Nel presente capitolo si descrive il programma sperimentale sviluppato durante le fasi di laboratorio per la preparazione dei provini bistrato in conglomerato bituminoso impiegati per la successiva esecuzione delle prove meccaniche necessarie per la caratterizzazione prestazionale. Essendo le prove di laboratorio eseguite (prove flessionali statiche su tre punti) così come le procedure per la preparazione delle piastre bistrato le medesime già impiegate nelle precedenti fasi di studio, si rimanda ai precedenti rapporti di ricerca per i dettagli circa le attrezzature di laboratorio, i protocolli di confezionamento e di prova.

Nel seguito, si riportano preliminarmente solo le caratteristiche salienti relative ai materiali impiegati per i sistemi di conglomerato bituminoso bistrato oggetto di indagine e si fornisce un breve riepilogo relativo alle modalità di elaborazione dati e ai parametri caratteristici assunti per il confronto prestazionale.

Il capitolo si conclude con una sezione specifica relativa alla codifica assunta per l'identificazione di ciascuna configurazione di prova che fornisce una sintesi generale del programma sperimentale sviluppato nell'ambito della presente ricerca.

### 2.1 MATERIALI IMPIEGATI

Nel presente paragrafo sono illustrate le caratteristiche di ciascuna configurazione di prova, fornendo una descrizione accurata dei materiali impiegati. Nella prima parte dell'indagine sperimentale sono stati posti a confronto, a parità di condizioni al contorno, i risultati di prove flessionali statiche ottenuti in precedenti studi con quelli conseguiti nella presente ricerca utilizzando conglomerati tradizionali e modificati analoghi ma di diversa origine.

Al fine di fornire un quadro riepilogativo esaustivo, si riporta nel seguito la descrizione delle miscele bituminose impiegate sia nella presente sperimentazione (NEW) che nelle precedenti indagini (OLD), oltre a richiamare brevemente le proprietà del geocomposito interposto all'interfaccia degli strati nei sistemi rinforzati.

#### 2.1.1 Miscele bituminose sperimentazione 2017 (NEW)

Il nuovo conglomerato bituminoso a caldo utilizzato nella sperimentazione è stato prodotto direttamente in impianto e trasportato presso il Laboratorio di Strade dell'UNIVPM per lo stoccaggio e la successiva preparazione delle piastre bistrato. A tal proposito, è stato necessario un secondo riscaldamento in forno per 3 ore alla temperatura di compattazione (i.e. 150 °C per il conglomerato bituminoso tradizionale e 160 °C per il conglomerato modificato) in modo tale da rendere il materiale nuovamente lavorabile e pronto per la compattazione. È necessario evidenziare che sottoporre il conglomerato bituminoso a un doppio riscaldamento determina sicuramente una alterazione delle proprietà del materiale a causa del maggior grado di invecchiamento subito, ma garantisce di standardizzare la procedura di confezionamento delle piastre, minimizzando così le variabili potenzialmente in grado di incidere sulle prestazioni del sistema bistrato.

Tale procedura è stata adottata anche per il confezionamento delle piastre “OLD”. Conseguentemente, i risultati dei test eseguiti possono essere considerati pienamente confrontabili coinvolgendo materiali preparati a parità di condizioni al contorno.

Nel seguito si forniscono le specifiche delle due tipologie di nuovo conglomerato bituminoso a caldo utilizzate nella presente indagine, preparate rispettivamente con bitume tradizionale e con bitume modificato.

#### *Conglomerato bituminoso tradizionale NEW*

Per il confezionamento delle piastre bistrato che prevedono l'impiego di una miscela tradizionale (codice BU) è stato utilizzato un conglomerato bituminoso per strati di collegamento (binder) prelevato in impianto e preparato con bitume non modificato (classe di penetrazione 70/100).

Al fine di determinare le caratteristiche effettive del conglomerato in esame (i.e. contenuto di bitume e granulometria della componente lapidea), parte del materiale prelevato è stato sottoposto ad estrazione con solvente tramite apposita procedura di laboratorio. I risultati ottenuti relativamente alla granulometria degli aggregati sono espressi in Figura 2.1 (come media di due ripetizioni). Dall'analisi svolta è emersa una dimensione massima pari a 20 mm e una percentuale media di bitume riferita al peso degli aggregati del 4.7%.

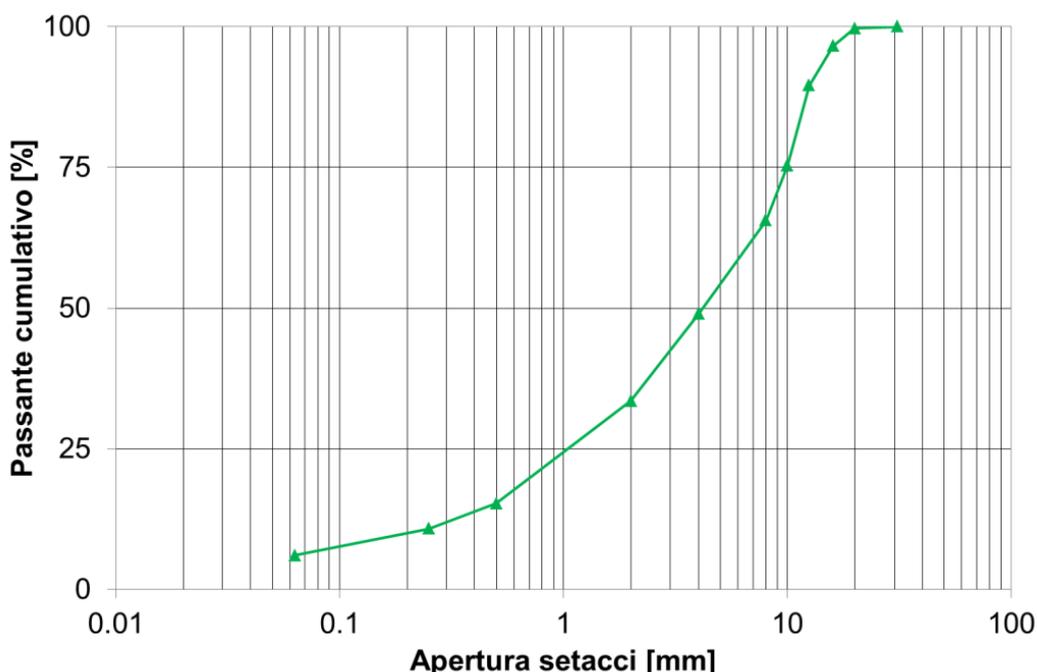


Figura 2.1. Curva granulometria del conglomerato bituminoso tradizionale (NEW)

Si riportano in Tabella 2.1 alcune caratteristiche aggiuntive relative al bitume 70/100 impiegato nel confezionamento della miscela. In particolare, seguendo le prescrizioni della normativa americana, è stato determinato il Performance Grade (PG 64-16) tramite prove eseguite con viscosimetro rotazionale, reometro flessionale e rotazionale.

Perdita in peso dopo RTFOT (< 1.00%) [%]	-0.37
Viscosità dinamica a 135°C (< 3.0 Pa·s) [Pa·s]	0.29
<b>PERFORMANCE GRADE (PG)</b>	<b>64-16</b>

Tabella 2.1. Caratteristiche del bitume tradizionale 70/100 (NEW)

### Conglomerato bituminoso modificato NEW

Per il confezionamento delle piastre bistrato nel caso in cui fosse previsto l'impiego di conglomerato modificato (codice BM) è stata utilizzata una miscela bituminosa per strati di binder prodotta in impianto per applicazioni autostradali. Tale materiale è stato ottenuto combinando varie pezzature di aggregato vergine calcareo (i.e. frazioni 0/4, 8/20, 14/32 mm e filler) e fresato indistinto (i.e. 0/16 mm) secondo le proporzioni riportate in Tabella 2.2. La componente lapidea è stata infine miscelata con bitume modificato ottenuto aggiungendo a un bitume base modifica 70/100 una quantità di polimero elastomerico SBS (Stirene-Butadiene-Stirene) pari al 3.8% rispetto al peso del bitume (tenore di modifica "hard").

In maniera analoga a quanto eseguito per il bitume tradizionale e descritto nella sezione precedente, anche per tale materiale è stato valutato il PG (PG 82-16) oltre alle caratteristiche principali riassunte in Tabella 2.3.

Pezzatura	Percentuali di utilizzo [%]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]
Sabbia 0/4	25	2.54
Calcare 8/20	31	2.62
Calcare 14/32	17	2.59
RAP 0/14	25	2.67
Filler	2	2.65

Tabella 2.2. Mix design miscela di aggregati conglomerato bituminoso modificato (NEW)

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
<b>PERFORMANCE GRADE (PG)</b>	<b>82-16</b>			

Tabella 2.3. Caratteristiche del bitume modificato "hard" (NEW)

Anche in tal caso, parte del materiale prelevato è stato sottoposto ad estrazione tramite solvente grazie alla quale è stato possibile ricavare il contenuto di bitume e l'andamento della curva granulometrica i cui risultati sono illustrati in Figura 2.2 come media di due ripetizioni. Dall'analisi svolta è emersa una dimensione massima degli aggregati pari a 25 mm ed una percentuale media di bitume riferita al peso degli inerti del 4.8%.

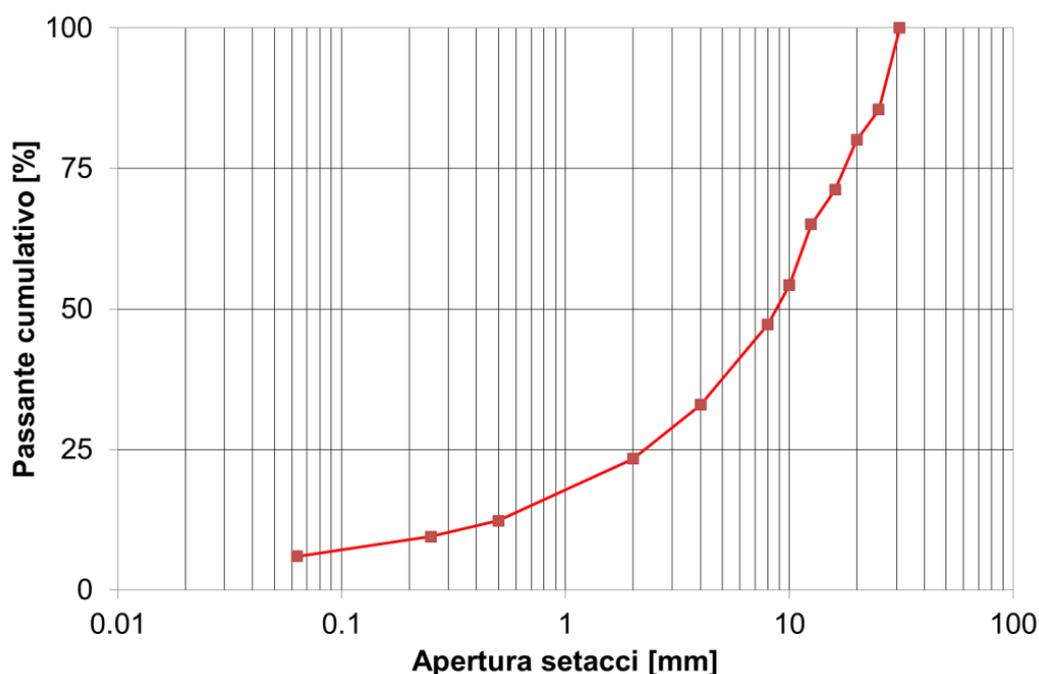


Figura 2.2. Curva granulometrica del conglomerato bituminoso modificato (NEW)

### 2.1.2 Conglomerato bituminoso sperimentazione 2012 (OLD)

Anche nelle sperimentazioni del biennio 2011/2012 sono stati utilizzati due conglomerati bituminosi, uno tradizionale e uno modificato. Se ne richiamano nel seguito le caratteristiche principali così come riportate nei precedenti rapporti di ricerca.

#### *Conglomerato bituminoso tradizionale OLD*

Anche in tal caso, per la caratterizzazione del materiale in esame, la miscela è stata sottoposta a prove standardizzate. Nello specifico, sono state eseguite due estrazioni di legante per valutarne la granulometria ed il contenuto di bitume, i cui risultati sono riportati nelle Tabelle 2.4 e 2.5. Dalle analisi svolte è emersa una dimensione massima degli aggregati pari a 10 mm ed una percentuale media di bitume riferita al peso degli aggregati pari al 5.95%.

Estrazione 1				
Setacci ISO	Trattenuto in Peso	Trattenuto Parziale	Trattenuto	Passante
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
14	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
9.51	24	2.4	2.4	97.6
8	83.4	8.3	10.7	89.3
4	331.3	33.1	43.9	56.1
2	194.5	19.5	63.3	36.7
0.5	186	18.6	81.9	18.1
0.25	42.9	4.3	86.2	13.8
0.063	47.5	4.8	91.0	9.0
fondo	33.5	3.4	94.3	5.7
Peso totale inerte				943.1
Peso iniziale conglomerato				1000.0
Percentuale di bitume riferita all'inerte				6.03
Percentuale di bitume riferita al conglomerato				5.69

Tabella 2.4. Tabella riassuntiva estrazione 1 (Rapporto Finale 2011)

Estrazione 2				
Setacci ISO	Trattenuto in Peso	Trattenuto Parziale	Trattenuto	Passante
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
14	0	0.0	0.0	100.0
12.5	3.1	0.3	0.3	99.7
9.51	25.9	2.6	2.9	97.1
8	76.7	7.7	10.6	89.4
4	329	32.9	43.5	56.5
2	198.2	19.8	63.3	36.7
0.5	190.7	19.1	82.4	17.6
0.25	44.6	4.5	86.8	13.2
0.063	47.1	4.7	91.5	8.5
fondo	29	2.9	94.4	5.6
Peso totale inerte				944.3
Peso iniziale conglomerato				1000.0
Percentuale di bitume riferita all'inerte				5.90
Percentuale di bitume riferita al conglomerato				5.57

Tabella 2.5. Tabella riassuntiva estrazione 2 (Rapporto Finale 2011)

### *Conglomerato bituminoso modificato OLD*

Si tratta anche in tal caso di conglomerato bituminoso utilizzato per strati di binder prodotto direttamente in impianto. Sul materiale prelevato sono state eseguite due estrazioni di legante per valutarne le caratteristiche granulometriche e il contenuto di bitume. I risultati medi ottenuti sono riportati in Tabella 2.6 e Figura 2.3. Dall'analisi svolta è emersa una dimensione massima degli aggregati pari a 16 mm e una percentuale media di bitume modificato con polimeri SBS pari al 6,05% rispetto al peso degli aggregati.

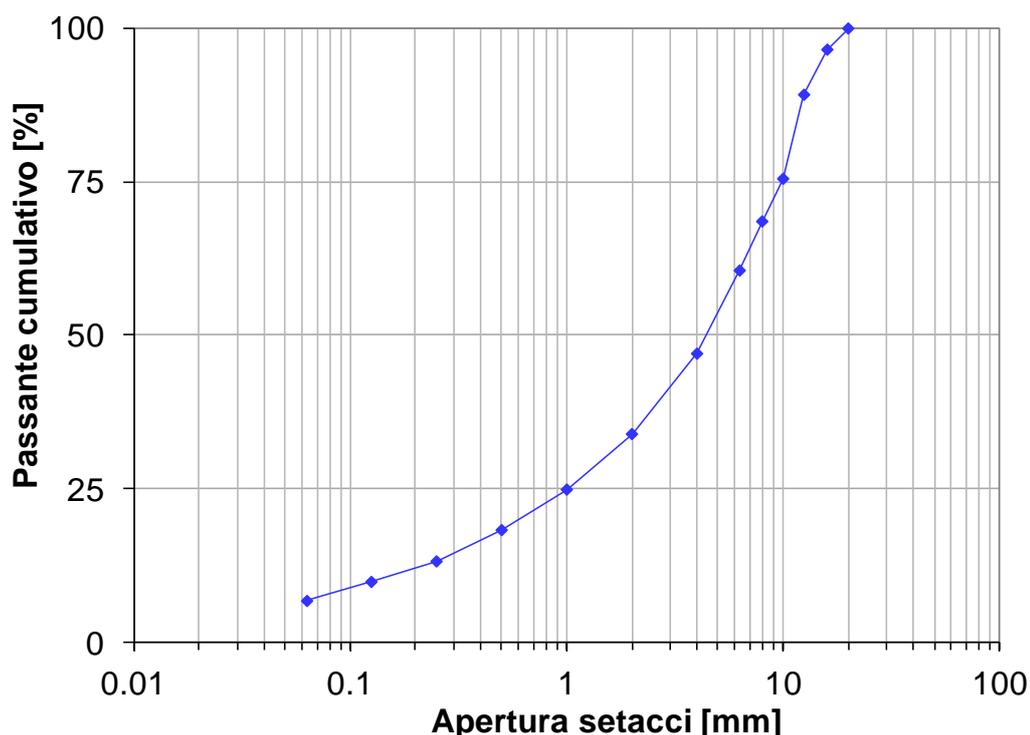


Figura 2.3. Curva granulometrica del conglomerato bituminoso modificato (OLD)

### 2.1.3 Confronto conglomerati bituminosi NEW e OLD

Dai dati riportati nei precedenti paragrafi emerge chiaramente come entrambe le miscele impiegate nella presente sperimentazione, confezionate con bitume tradizionale e modificato, siano nettamente differenti rispetto a quelle impiegate negli studi precedenti.

In particolare emerge che pur trattandosi in tutti e 4 i casi di miscele a granulometria continua per conglomerati bituminosi chiusi con percentuale dei vuoti orientativa pari al 5,0-6,0 %, i materiali impiegati nelle precedenti sperimentazioni (OLD) siano destinati a manti di usura (essendo caratterizzati da valori di  $D_{max}$  minori e percentuali di bitume maggiori) per entrambe le tipologie di legante tradizionale e modificato. Di contro le miscele impiegate nella presente sperimentazione (NEW) presentano valori di  $D_{max}$  e percentuali di bitume tipicamente impiegati per strati di collegamento.

Proprietà	Conglomerato Tradizionale BU		Conglomerato Modificato BM	
	NEW	OLD	NEW	OLD
Diametro max	20 mm	10 mm	25 mm	16 mm
% bitume	4,70%	5,95%	4,80%	6,05%

Tabella 2.6. Confronto proprietà conglomerati bituminosi NEW-OLD

#### 2.1.4 Emulsione cationica per interfaccia non rinforzata

Per la realizzazione dei sistemi bistrato non rinforzati all'interfaccia, è stata prevista sia nelle nuove che nelle vecchie configurazioni la stesa di una mano di attacco. Per la preparazione delle nuove piastre è stata impiegata una emulsione bituminosa cationica codificata C55B4 (UNI EN 13808 "Bitumen and bituminous binders. Framework for specifying cationic bituminous emulsions", 2013), contenente il 55% di bitume residuo non modificato, caratterizzata da una classe di rottura medio-veloce (classe 4).

Il dosaggio dell'emulsione bituminosa per la preparazione della piastre è pari a 1 kg/m<sup>2</sup>; conseguentemente, essendo la superficie di stesa delle piastre pari a 0.093 m<sup>2</sup> (0.305x0.305 m<sup>2</sup>) la quantità di emulsione distribuita uniformemente su tutta la superficie risulta pari a 93 g.

Per le configurazioni delle sperimentazioni 2011-2012, l'emulsione applicata è stata del tipo C65BP4, con un dosaggio di 0,15 kg/m<sup>2</sup> di bitume residuo. È composta dal 65% di bitume residuo modificato con polimeri SBS e caratterizzata da una classe di rottura medio-veloce (classe 4).

Poiché la rottura dell'emulsione non avviene immediatamente, dopo l'applicazione della stessa sulla superficie superiore dello strato di base delle piastre, già compattato e raffreddato, è stato necessario attendere un tempo sufficiente affinché avvenisse la presa del bitume residuo e la superficie di posa risultasse pronta per l'applicazione del geocomposito (tempo di attesa pari a 1 ora per tutte le piastre non rinforzate in modo da standardizzare le procedure).

#### 2.1.5 Geocomposito

La ricerca descritta nel presente documento ha previsto l'indagine del geocomposito "Autotene Asfaltico Antipumping HE/TV", oggetto dei precedenti studi di laboratorio che ne hanno consentito l'ottimizzazione per applicazioni in pavimentazioni flessibili rinforzate in presenza di conglomerati bituminosi a caldo. Pertanto, si richiama nel seguito soltanto una breve descrizione del prodotto, mentre si rimanda ai precedenti rapporti di ricerca per tutti i dettagli specifici (v. Rapporti Finali 2010-2011 e 2011-2012 "Valutazione delle Prestazioni e Sviluppo di Geomembrane Bituminose Rinforzate con Fibra di Vetro per Applicazioni Stradali" - Rapporto Finale 2017 "Studio delle prestazioni del geocomposito Autotene Asfaltico Antipumping HE/TVP per applicazioni stradali ed aeroportuali in presenza di materiali bituminosi innovativi").

Il predetto geocomposito (Figura 2.4), ottenuto dall'accoppiamento di due elementi di diversa natura ciascuno dei quali apporta caratteristiche differenti, risulta costituito da una membrana SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), di natura termoadesiva costituita prevalentemente da polimeri elastomerici SBS, e da una geogriglia in fibra di vetro con maglia 12,5x12,5 mm<sup>2</sup>.

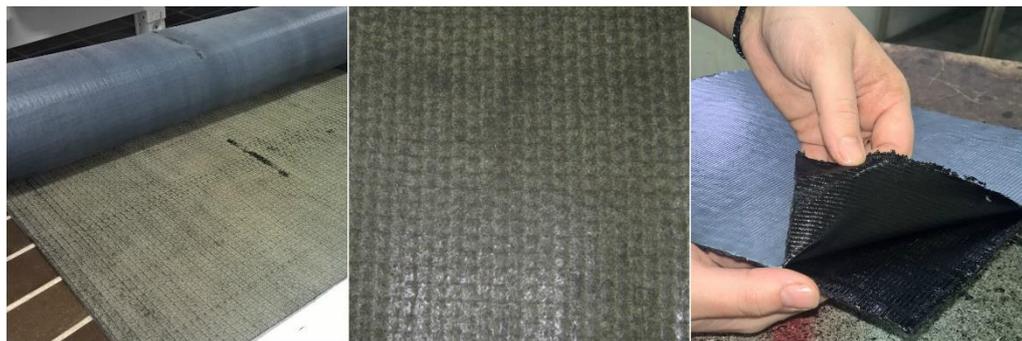


Figura 2.4. Geocomposito Autotene Asfaltico Antipumping HE/TV

In virtù di tale accoppiamento, la geomembrana risulta contemporaneamente in grado di impermeabilizzare (i.e. proteggere gli strati sottostanti dall'infiltrazione dell'acqua e quelli sovrastanti dal fenomeno del pumping, risalita di acqua e di materiale fine causato dall'azione di "pompaggio" generata dal traffico veicolare) e di inibire la fessurazione termica, a fatica e di riflessione assorbendo parte delle tensioni di trazione e limitando le conseguenti deformazioni generate all'interno della sovrastruttura a seguito dei carichi veicolari ed ambientali.

Come già dimostrato dai risultati acquisiti nelle precedenti sperimentazioni di laboratorio, tale sistema di rinforzo è da considerarsi una valida tecnica per il risanamento delle pavimentazioni stradali realizzate con conglomerato a caldo. L'ampio programma di prove meccaniche e prestazionali, che ha guidato lo sviluppo e l'ottimizzazione sperimentale di tale prodotto dal punto di vista dei materiali e della geometria, ha infatti documentato che i materiali costituenti il rinforzo in oggetto riescono a coniugare efficacemente i vantaggi sopra richiamati derivanti dall'applicazione di membrane con quelli riconducibili all'utilizzo di geogriglie.

Sulla superficie inferiore del geocomposito è presente una pellicola termo-adesiva ottenuta mediante una miscela hot melt a base di elastomeri e resine adesive (i.e. agenti "tackificanti") in grado di sviluppare una forza di adesione che si attiva grazie al calore del conglomerato dello strato superiore nel momento in cui esso viene steso e compattato. La sua presenza è volta a garantire una migliore adesione tra il geocomposito e il piano di posa e una sua più duratura efficacia anche a seguito dell'azione del traffico veicolare e della radiazione solare. Sulla superficie superiore del geocomposito è applicato un trattamento in sabbia che in fase di posa in opera consente il passaggio ottimale dei mezzi di cantiere. Durante la stesa del conglomerato a caldo sovrastante, la sabbia viene incorporata nella membrana garantendo una completa adesione fra gli strati.

Operativamente, in laboratorio si è proceduto a ritagliare porzioni di geocomposito di dimensioni tali da poter ricoprire tutta la superficie della piastra. Il rinforzo così preparato è stato, quindi, posto sulla superficie superiore dello strato di base (strato inferiore del provino bistrato) dopo l'asportazione del foglio siliconato che ne protegge la superficie inferiore termo-adesiva. L'incollaggio definitivo è stato ottenuto grazie alla successiva stesa e compattazione dello strato superiore in conglomerato bituminoso a caldo.

## 2.2 INDAGINE SPERIMENTALE

In questo paragrafo è riassunto il programma sperimentale volto a valutare l'influenza della tipologia di conglomerato bituminoso e delle sue caratteristiche meccaniche sulle prestazioni offerte dal sistema di rinforzo valutate tramite prove flessionali statiche su tre punti. Nello specifico, si è adottato il "coefficiente di prestazione" del rinforzo  $k$  quale parametro caratteristico per il confronto prestazionale delle diverse configurazioni. L'indagine sperimentale è stata articolata nelle seguenti fasi:

- Fase 1: confronto prestazionale del geocomposito al variare dell'origine del conglomerato bituminoso;
- Fase 2: confronto prestazionale del geocomposito al variare del grado di compattazione/caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso.

Il confronto delle varie configurazioni in esame è stato basato su prove di flessione statica su tre punti (3PB - Three Point Bending) che permettono l'analisi della resistenza a flessione di provini prismatici bistrato di dimensioni standardizzate ( $30.5 \times 8.5 \times 8 \text{ cm}^3$ ) testati a velocità e temperatura di prova costanti (i.e. 50.8 mm/min; 20 °C). Questa tipologia di prova risulta utile per la valutazione della resistenza del sistema alla fessurazione provocata dai carichi flessionali indotti dal peso dei veicoli transitanti sulla pavimentazione. In particolare, per raggiungere gli obiettivi previsti, si è analizzata l'influenza sui parametri caratteristici della prova di diverse variabili (i.e. tipo di conglomerato, grado di compattazione del sistema bistrato, presenza del rinforzo).

Per la preparazione dei provini è stato necessario realizzare in laboratorio, tramite compattatore a rullo (Roller Compactor), piastre bistrato di dimensioni in pianta di  $30.5 \times 30.5 \text{ cm}^2$  e altezza totale pari a 8 cm, composte da due strati di pari altezza in conglomerato bituminoso a caldo. Per ogni tipologia di conglomerato impiegato, l'interfaccia tra i due strati è stata realizzata con e senza interposizione del geocomposito. In assenza del sistema di rinforzo si è applicata una mano di attacco in emulsione bituminosa secondo le procedure usualmente adottate nella pratica comune. In caso di interfaccia rinforzata, il geocomposito è stato installato escludendo l'applicazione preliminare di una mano d'attacco. Successivamente, le piastre sono state opportunamente tagliate per ricavare da ciascuna 3 provini prismatici.

Come già accennato, per tutti i dettagli relativi alle apparecchiature, alla preparazione dei provini, ai protocolli di prova e alle metodologie di elaborazione dei dati sperimentali già utilizzati nelle precedenti fasi di studio si rimanda ai precedenti Rapporti di ricerca (v. Rapporti Finali 2010-2011 e 2011-2012 *"Valutazione delle Prestazioni e Sviluppo di Geomembrane Bituminose Rinforzate con Fibra di Vetro per Applicazioni Stradali"* - Rapporto Finale 2017 *"Studio delle prestazioni del geocomposito Autotene Asfaltico Antipumping HE/TVP per applicazioni stradali ed aeroportuali in presenza di materiali bituminosi innovativi"*)

### 2.1.1 Fase 1 – conglomerati bituminosi di diversa origine

Il programma sperimentale della Fase 1 ha previsto l'esecuzione di prove di flessione statica su 3 punti (3PB) realizzate su provini prismatici bistrato in conglomerato bituminoso a caldo di diversa origine, considerando sia un conglomerato bituminoso tra-

dizionale (codifica BU) che un conglomerato bituminoso modificato (codifica BM). Tutte le piastre sono state compattate con una percentuale di vuoti ottimale pari a circa il 5÷6%. Tale fase della ricerca ha previsto la predisposizione di 4 configurazioni di sistemi bistrato (BU rinforzato e non, BM rinforzato e non) l'esecuzione di 12 prove 3PB. Le configurazioni dei sistemi bistrato analizzati sono rappresentate in Figura 2.5.



Figura 2.5. Configurazione sistema bistrato Fase 1

### 2.1.2 Fase 2 – conglomerati con diverso grado di compattazione

La Fase 2 della sperimentazione è stata articolata in modo da valutare l'influenza delle caratteristiche meccaniche e/o di un diverso grado di compattazione in sito del conglomerato sulla resistenza a flessione di provini bistrato rinforzati con geocomposito. In questa fase, le prove di flessione statica su tre punti sono state effettuate su piastre caratterizzate da diverso tenore di vuoti per ciascuna tipologia di conglomerato bituminoso BU e BM (3, 6, 9, 12, 15% di vuoti) mantenendo invariate le condizioni di prova. In definitiva, nella Fase 2 sono state prodotte 20 lastre bistrato ed eseguite 60 prove 3PB. Le diverse configurazioni investigate sono mostrate in Figura 2.6.

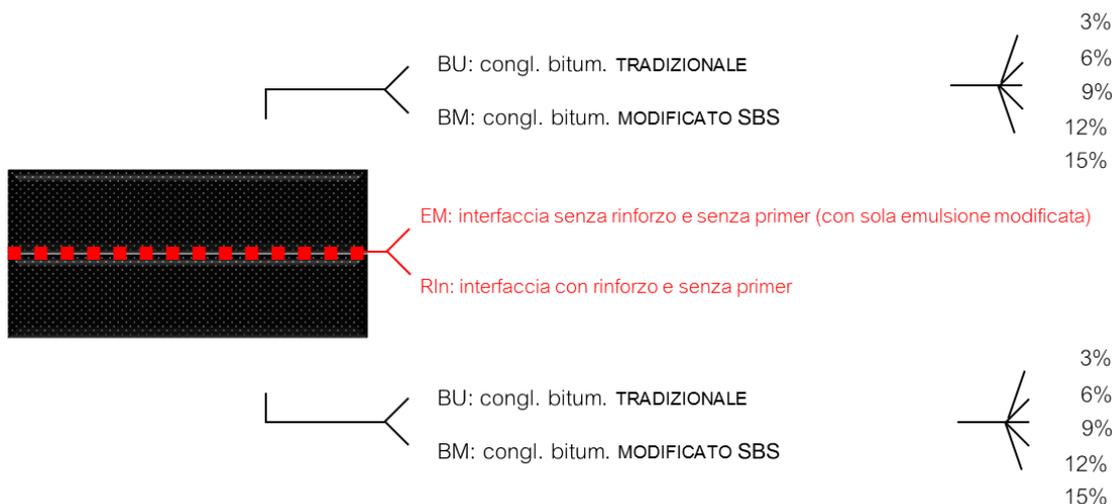


Figura 2.6. Configurazione sistema bistrato Fase 2

### 2.1.3 Determinazione della quantità di materiale per ogni strato

Per confezionare i sistemi bistrato, preliminarmente è stato necessario determinare l'esatto quantitativo di materiale da utilizzare per realizzare ciascuno strato della piastra. Essendo fisse le dimensioni in pianta del cassero delle piastre (30.5×30.5 cm<sup>2</sup>), tale conteggio deve essere predisposto in funzione dello spessore e del tenore di vuoti con cui si vuole realizzare ogni strato. Il caso in esame ha previsto la preparazione di piastre con strati di medesimo spessore pari a 4 cm e un tenore di vuoti variabile a seconda della configurazione di prova considerata.

Il quantitativo di materiale necessario per confezionare gli strati dello spessore richiesto è stato determinato valutando la massa volumica massima e apparente dei due conglomerati in esame, secondo le procedure spiegate nel §3.2.1 del Rapporto 2017. A tal proposito, per ciascuna miscela sono stati preparati provini tramite pressa giratoria a taglio con diametro da 100 mm e compattazione a numero di giri imposto (i.e. 100 giri). Una volta determinati il volume di ogni strato della piastra, il contenuto di vuoti e le masse volumiche, si è proceduto al calcolo del quantitativo di materiale da compattare tramite Roller Compactor così come riassunto in Tabella 2.7.

Conglomerato	Massa volumica massima [kg/m <sup>3</sup> ]	Vuoti [%]	Massa volumica apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Quantità materiale per strato [kg]
Tradizionale NEW	2.47	3	2.40	0.37	8.93
		5	2.36	0.37	8.78
		6	2.32	0.37	8.65
		9	2.25	0.37	8.37
		12	2.18	0.37	8.10
		15	2.10	0.37	7.82
Modificato NEW	2.47	3	2.39	0.37	8.91
		5	2.35	0.37	8.74
		6	2.32	0.37	8.63
		9	2.25	0.37	8.36
		12	2.17	0.37	8.08
		15	2.10	0.37	7.81

Tabella 2.7. Massa volumica e quantità di conglomerato bituminoso per ogni strato delle piastre al variare della % di vuoti

### 2.1.4 Codifica dei sistemi bistrato

A titolo esplicativo, si riassumono i codici utilizzati per identificare ciascun materiale e la sigla delle lastre e dei corrispondenti provini:

#### CODICE MATERIALI:

- Conglomerato bituminoso tradizionale: BU
- Conglomerato bituminoso modificato: BM
- Interfaccia rinforzata: RIn
- Interfaccia con mano d'attacco: EM

#### CODICE PIASTRE BISTRATO – codice alfa numerico del tipo “XX\_YY\_ZZ”

- XX: codice materiale conglomerato bituminoso
- YY: codice materiale interfaccia (rinforzata o non rinforzata)
- ZZ: percentuale di vuoti del conglomerato

**CODICE PROVINI** – codice alfa numerico del tipo “XX\_YY\_ZZ\_#”

- XX: codice materiale conglomerato bituminoso
- YY: codice materiale interfaccia (rinforzata o non rinforzata)
- ZZ: percentuale di vuoti del conglomerato
- #: numero della ripetizione

*Esempio nomenclatura:*

BU\_EM\_3%\_2: provino numero 2 di una piastra realizzata con conglomerato bituminoso tradizionale compattato con il 3% dei vuoti e interfaccia non rinforzata (con sola mano d’attacco in emulsione bituminosa);

BM\_RIn\_15%\_1: provino numero 1 di una piastra realizzata con conglomerato bituminoso modificato compattato con il 15% dei vuoti e interfaccia rinforzata.

### 2.1.5 Riepilogo programma sperimentale

Il programma delle prove sperimentali ha riguardato la caratterizzazione della resistenza a flessione di provini bistrato rinforzati con geocomposito. Complessivamente ha previsto la realizzazione di 24 piastre bistrato con diverse configurazioni (4 nella Fase 1 e 20 nella Fase 2) e l’esecuzione di 72 prove 3PB (12 nella Fase 1 e 60 nella Fase 2). Il programma generale di prove eseguite nella Fase 1 e nella Fase 2 dell’indagine sperimentale è illustrato in Tabella 2.8.

Bistrato	Numero di ripetizioni testate					
	<b>3PB</b>					
	Velocità = 50.8 mm/min; temperatura = 20°C					
	Fase 1	Fase 2				
5÷6% vuoti	3% vuoti	6% vuoti	9% vuoti	12% vuoti	15% vuoti	
<b>BU_EM</b>	3	3	3	3	3	3
<b>BU_RIn</b>	3	3	3	3	3	3
<b>BM_EM</b>	3	3	3	3	3	3
<b>BM_RIn</b>	3	3	3	3	3	3
<b>TOT</b>	<b>12</b>	<b>60</b>				

Tabella 2.8. Riassunto programma sperimentale

## 3. Analisi dei risultati

In questo capitolo viene riportata l'elaborazione e l'interpretazione dei risultati ottenuti dalle prove di flessione statica su 3 punti (3PB) eseguite con una velocità di avanzamento pari a 50.8 mm/min e una temperatura di prova di 20°C. Prima dell'esecuzione della prova, tutti i provini sono stati condizionati per almeno 4 ore in camera climatica alla temperatura stabilita.

Come già descritto nel programma sperimentale, le prove sono state eseguite in due fasi distinte: la prima ha riguardato sistemi bistrato con conglomerato compattato secondo una percentuale di vuoti ottimale (i.e.  $\approx 5\div 6\%$ ), mentre la seconda fase ha coinvolto piastre bistrato caratterizzate da percentuali di vuoti variabili (i.e.  $3\div 15\%$ ), utili per verificare l'incidenza delle caratteristiche del conglomerato e/o di una cattiva messa in opera sulle prestazioni del rinforzo.

Nei successivi paragrafi, i risultati sono riportati separatamente per ciascuna delle due fasi. Inoltre, al fine di fornire un quadro esaustivo dei risultati, si fornisce dapprima un richiamo alla metodologia assunta per l'elaborazione dei dati sperimentali.

### 3.1 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Per l'elaborazione e l'interpretazione dei risultati sono state applicate le teorie e le metodologie descritte nel §3.3 del Rapporto Finale 2017. Nel seguito viene richiamato il significato del "coefficiente di prestazione  $k$ " assunto come parametro caratteristico per il confronto prestazionale.

A partire dall'andamento del grafico che riporta i valori del carico verticale applicato  $P$  e della corrispondente deflessione  $\delta$  nella mezzeria del provino durante le prove 3PB, è possibile ricavare alcune considerazioni di carattere energetico che permettono di valutare le prestazioni flessionali del sistema bistrato. In particolare, vengono individuati alcuni parametri caratteristici:

- energia totale di rottura  $E_{TOT}$ : area sottesa alla curva carico-spostamento  $P-\delta$  fino alla rottura completa del provino;
- energia dissipata di prima fessurazione  $E_i$ : area sottesa alla curva carico-spostamento fino al raggiungimento del carico massimo ( $P_{max}$ ) a cui corrisponde lo spostamento  $\delta_f$  rappresentativo del momento in cui si innesca la fessurazione alla base del provino. Tale parametro quantifica la resistenza del materiale all'inesco della fessurazione;
- energia di propagazione  $E_P$ : area sottesa alla curva carico-spostamento dopo il superamento della forza massima. È ottenuta come differenza tra l'energia complessiva di rottura e quella di prima fessurazione ( $E_P = E_{TOT} - E_i$ ). Tale parametro fornisce un'indicazione della resistenza alla propagazione della fessura all'interno del sistema bistrato e rappresenta, quindi, una misura indiretta della duttilità del sistema.

Per la corretta interpretazione dei parametri descritti e per svolgere un'efficace analisi comparativa tra le diverse configurazioni di materiali e interfacce, sulla base dei risultati emersi da precedenti sperimentazioni, si è introdotta un'ipotesi relativa ai meccanismi di funzionamento dei sistemi bistrato sottoposti a carico flessionale. Questa ipotesi assume che il sistema di rinforzo all'interfaccia, ove applicato, non influisce significativamente sulla rigidezza complessiva del sistema bistrato. Pertanto, il rinforzo non incide, se non in misura lieve, sulla resistenza all'innescio della fessurazione alla base dello strato inferiore ( $E_i$ ). Quindi, a parità di spessore degli strati e materiali considerati, il contributo  $E_i$  risulta equivalente tra sistemi rinforzati e non, così come risulta comparabile tra le due configurazioni la propagazione della fessura nello strato inferiore.

La presenza del geocomposito diventa progressivamente più evidente quando la fessura raggiunge l'interfaccia. In questa circostanza il rinforzo mette in atto la sua azione resistente andando ad assorbire gli sforzi di trazione e quindi inibendo e/o ritardando la propagazione della fessura nello strato superiore. Ciò si manifesta con un aumento di energia di propagazione ( $E_p$ ), a parità di condizioni, nel sistema rinforzato rispetto a quello non rinforzato. Sulla base di queste considerazioni l'energia di propagazione  $E_p$  è suddivisa in due contributi distinti (Figura 3.1):

- energia necessaria per propagare la fessura nello strato inferiore,  $E_1$ ;
- energia necessaria per propagare la fessura nello strato superiore,  $E_2$ .

Quindi, l'energia di propagazione è ricavabile come segue:

$$E_p = E_{TOT} - E_i \quad (3.1)$$

e che:

$$E_p = E_1 + E_2 \quad (3.2)$$

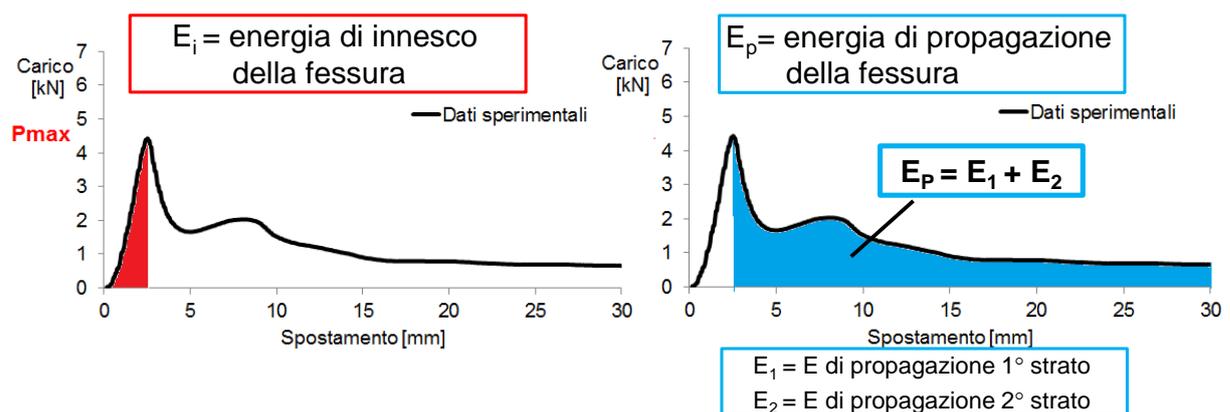


Figura 3.1. Energia di innesco (a sx) e di propagazione (a dx) della fessura

Nel caso in cui il sistema bistrato non rinforzato sia composto da due strati dello stesso materiale si può supporre che la fessura si propaghi in modo lineare all'interno dell'intero sistema e conseguentemente l'energia necessaria per propagarla risulta proporzionale allo spessore degli strati che compongono la struttura.

Nel caso in cui i due strati abbiano lo stesso spessore, l'energia di propagazione del sistema non rinforzato dello strato superiore  $E_2$  è allora equivalente all'energia di propagazione dello strato inferiore  $E_1$ . Nei sistemi non rinforzati, quindi, a parità di materiale e spessore degli strati si ha:

$$E_1 = E_2 \quad (3.3)$$

Avendo ipotizzato che il rinforzo non influenza l'innescò e la propagazione della fessurazione nello strato inferiore, si può assumere che l'energia di propagazione nello strato di base sia uguale sia nei sistemi rinforzati ( $E_1^{NR}$ ) che in quelli non rinforzati ( $E_2^{NR}$ ) a parità di materiali e spessore degli strati:

$$E_1^R = E_1^{NR} \quad (3.4)$$

Nota così l'energia di propagazione nello strato inferiore del sistema rinforzato si può ricavare, per differenza tra  $E_p^R$  ed  $E_1^R$ , il valore dell'energia di propagazione della fessura nello strato superiore  $E_2^R$ .

La conoscenza di tutti questi parametri caratteristici per entrambi i sistemi permette di realizzare un confronto comparativo e valutare l'efficacia prestazionale dello strato di rinforzo. A tal fine, da ultimo si è calcolato il "coefficiente di prestazione k" del rinforzo come rapporto tra le energie di propagazione degli strati superiori dei due sistemi presi in esame durante la sperimentazione:

$$k = \frac{E_2^R}{E_2^{NR}} \quad (3.5)$$

Tale coefficiente è stato impiegato per un immediato confronto dei materiali in esame, ma risulta fondamentale anche per tenere in considerazione il contributo del rinforzo in termini di vita utile della pavimentazione in fase di progettazione di nuove infrastrutture stradali e/o di interventi di risanamento di pacchetti strutturali esistenti.

Si precisa infine che, in fase di calcolo, l'energia totale è stata determinata per tutte le configurazioni fino ad uno cedimento verticale massimo  $\delta_{max} = 30$  mm in modo tale da standardizzare le procedure di elaborazione.

### 3.2 SISTEMI BISTRATO CON CONGLOMERATI BITUMINOSI DI DIVERSA ORIGINE

Analogamente a quanto emerso nelle precedenti sperimentazioni, dai grafici rappresentati in Figura 3.2 (curve carico-spostamento di una ripetizione per ciascuna configurazione di prova), si osserva come i sistemi non rinforzati (linea blu) presentino generalmente una forza di picco  $P_{max}$  maggiore rispetto ai valori dei sistemi rinforzati (linea rossa). Tale differenza può essere ricondotta al fatto che l'interposizione di un sistema di rinforzo determina un effetto de-bonding all'interno del sistema bistrato, con conseguente diminuzione della rigidità complessiva del sistema. Ciò potrebbe significare che i sistemi rinforzati siano soggetti a un prematuro innescò della fessura rispetto ai sistemi non rinforzati (necessità di fornire una forza minore per provocare la prima fessurazione dello strato inferiore).

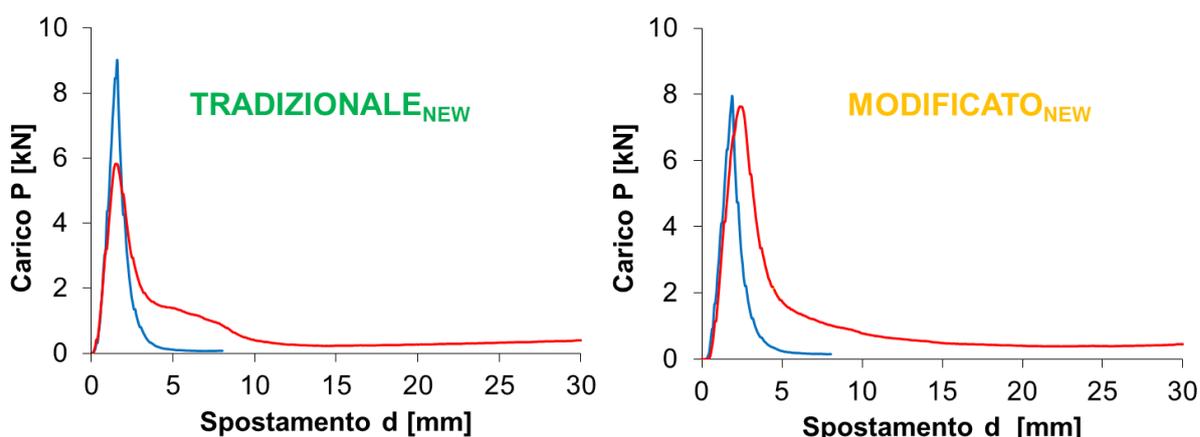


Figura 3.2. Confronto carico-spostamento tra sistemi rinforzati e non rinforzati a parità di conglomerato (tradizionale a sx, modificato a dx)

Tuttavia, ciò che si differenzia maggiormente nel confronto è il comportamento post-picco: i sistemi rinforzati, dopo il raggiungimento del carico di picco (che determina l'innesco della fessurazione) sono caratterizzati da una certa aliquota di resistenza esibendo un comportamento più duttile. La presenza del rinforzo non influenza, se non lievemente, il fenomeno di avvio della fessura e la sua propagazione nello strato sottostante il rinforzo stesso. L'azione del geocomposito si manifesta principalmente nel momento in cui la fessura giunge all'interfaccia, inibendone e/o ritardandone la propagazione nello strato superiore.

Una maggiore resistenza alla fessurazione traduce, a sua volta, una durabilità più elevata degli strati in conglomerato che mantengono più a lungo la propria integrità riducendo al contempo il rischio di sviluppo di altri fenomeni di degrado legati all'azione degli agenti atmosferici (e.g. penetrazione dell'acqua, invecchiamento per irraggiamento solare) o all'indebolimento del pacchetto strutturale (e.g. sgranamento, ormaiamento).

Le considerazioni appena esposte risultano verificate soprattutto per i sistemi in conglomerato tradizionale, mentre il trend risulta meno evidente per il conglomerato modificato probabilmente in virtù della migliore interazione tra geocomposito e bitume modificato che conferisce adesione superiore tra le superfici a contatto facendo venir meno l'effetto de-bonding).

I dati mostrati in Figura 3.2 sono stati successivamente elaborati secondo il metodo illustrato nel precedente §3.1 in modo da proporre una valutazione attraverso l'introduzione del "coefficiente di prestazione  $k$ ". I valori del parametro  $k$  desunti per ciascuna configurazione di prova testata nella nuova sperimentazione (NEW) sono stati messi a confronto con quelli calcolati a partire dai risultati della sperimentazione 2011/2012 (OLD), relativi a conglomerati anch'essi tradizionali e modificati ma di diversa origine, come mostrato in Figura 3.3.

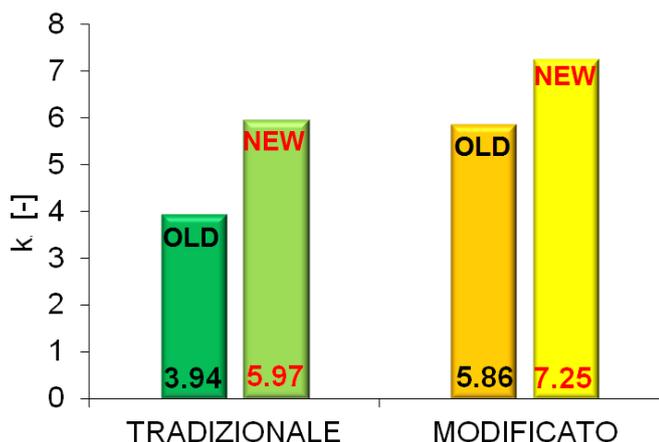


Figura 3.3. Confronto valori di  $k$  tra conglomerati di diversa origine

Dai valori di  $k$  calcolati in questa fase (NEW) si nota come l'utilizzo di uno strato di rinforzo comporti un miglioramento sensibile del coefficiente di prestazione  $k$ . Tale risultato evidenzia come le proprietà delle miscele incida significativamente sulle prestazioni del geocomposito. In particolare, emerge una riduzione dell'efficacia del rinforzo quando, a parità di tipologia di bitume, questo viene posto a contatto con miscele caratterizzate da diametro massimo minore e % di bitume maggiore, come verificabile osservando il confronto delle proprietà delle miscele NEW ed OLD riportato in Tabella 2.6. Ciò dimostra che il valore del coefficiente di prestazione  $k$  non è un parametro intrinseco che caratterizza il rinforzo, ma è dipendente dal sistema bistrato e deve essere pertanto correlato a tutte le componenti del sistema.

Altrettanto evidente risulta la maggiore efficienza del rinforzo in un sistema bistrato con conglomerato bituminoso modificato, sia nel caso di dati ottenuti nelle sperimentazioni precedenti (OLD) sia con riferimento ai risultati della presente indagine (NEW).

### 3.3 SISTEMI BISTRATO CON PERCENTUALE DI VUOTI VARIABILE

La seconda fase dello studio ha avuto il fine di indagare come le caratteristiche meccaniche del conglomerato o un diverso grado di compattazione durante la posa in opera del materiale possano incidere sulle prestazioni fornite dal geocomposito.

A tale scopo, le prove flessionali statiche sono state eseguite anche su sistemi bistrato in conglomerato bituminoso (sia tradizionale che modificato) confezionato con percentuale di vuoti variabile (i.e. 3÷15%). Tale analisi permette di quantificare eventuali conseguenze di una cattiva compattazione del conglomerato durante la stesa in termini di efficacia del geocomposito o, viceversa, se l'interposizione di un elemento di rinforzo possa parzialmente compensare le cattive proprietà della miscela bituminosa. Al tempo stesso, i dati raccolti forniscono utili indicazioni sull'intervallo di vuoti/rigidezza che il conglomerato dovrebbe rispettare al fine di sfruttare appieno la capacità del geocomposito.

Nelle Figure 3.4 e 3.5 e in Tabella 3.1 sono riportati i risultati delle prove per tutte le ripetizioni eseguite (tre repliche per ciascuna configurazione di prova) relative a ciascun sistema bistrato. In particolare, le curve sono state suddivise per tipologia di conglomerato e tipologia di interfaccia.

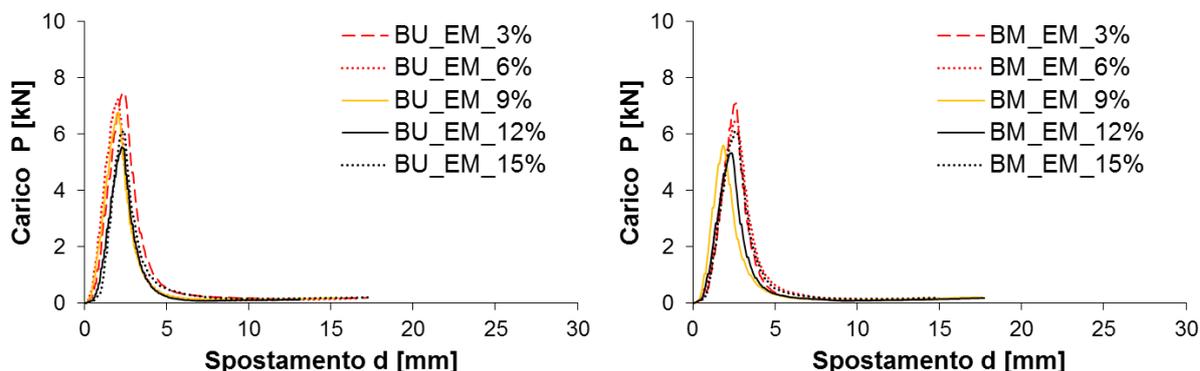


Figura 3.4. Prove 3PB: bistrato non rinforzati, c.b. tradizionale (sx) e modificato (dx)

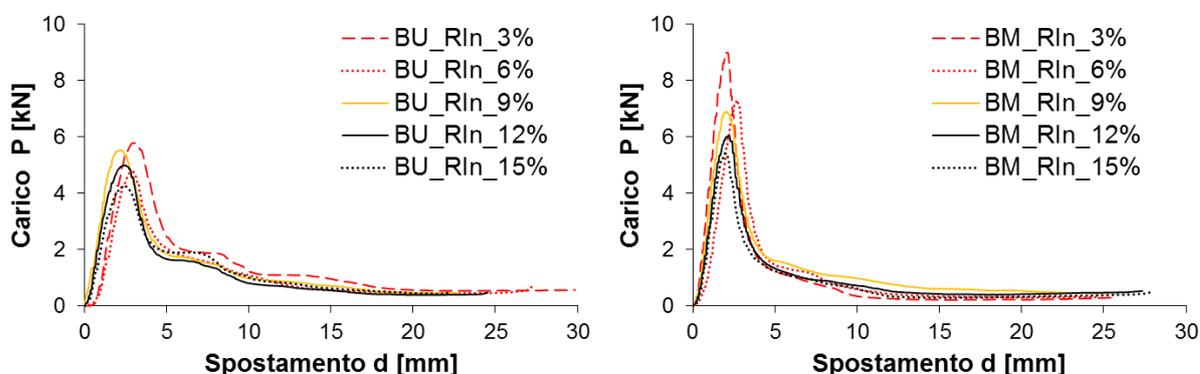


Figura 3.5. Prove 3PB: bistrato rinforzati, c.b. tradizionale (a) e modificato (b)

BISTRATO	$P_{max}$ [kN]	$d_f$ [mm]	$E_i$ [kNmm]	$E_{TOT}$ [kNmm]	$E_p$ [kNmm]	$E_1$ [kNmm]	$E_2$ [kNmm]	$k_{norm}$ [-]
BU_EM_3%	6.95	2.09	5.90	13.97	8.07	4.29	4.29	-
BU_EM_6%	7.15	2.15	5.71	13.69	7.98	4.06	4.06	-
BU_EM_9%	6.26	1.91	4.89	12.52	7.63	3.07	3.07	-
BU_EM_12%	5.61	2.42	5.37	10.45	5.08	2.54	2.54	-
BU_EM_15%	5.78	2.06	4.39	10.81	6.42	3.21	3.21	-
BU_RIn_3%	5.34	2.73	6.86	33.34	26.48	4.29	22.19	<b>1.15</b>
BU_RIn_6%	4.62	2.60	6.33	29.05	22.72	4.06	18.65	<b>1.00</b>
BU_RIn_9%	5.38	2.18	6.47	28.86	22.39	3.07	19.32	<b>1.52</b>
BU_RIn_12%	4.93	2.62	7.26	29.58	22.33	2.54	19.79	<b>1.73</b>
BU_RIn_15%	4.20	2.57	6.34	31.23	24.89	3.21	21.68	<b>1.51</b>
BM_EM_3%	6.95	2.63	7.33	13.93	6.59	3.30	3.30	-
BM_EM_6%	6.48	2.65	7.21	14.64	7.43	3.71	3.71	-
BM_EM_9%	5.15	1.93	3.38	9.18	5.80	2.90	2.90	-
BM_EM_12%	5.25	2.36	5.30	10.05	4.75	2.38	2.38	-
BM_EM_15%	5.62	2.56	6.15	11.71	5.56	2.78	2.78	-
BM_RIn_3%	8.22	2.05	7.71	29.12	21.41	3.30	18.11	<b>1.12</b>
BM_RIn_6%	7.68	2.44	7.77	27.89	20.11	3.30	16.82	<b>1.00</b>
BM_RIn_9%	6.01	1.90	5.35	30.49	25.14	2.84	22.31	<b>1.48</b>
BM_RIn_12%	5.90	2.07	5.74	27.77	22.03	2.38	19.66	<b>1.59</b>
BM_RIn_15%	4.86	1.84	3.82	23.04	19.22	2.84	16.38	<b>1.16</b>

Tabella 3.1. Parametri caratteristici delle prove 3PB al variare della % di vuoti

Allo scopo di fornire una rappresentazione più immediata dell'effettiva variazione prestazionale causata dal diverso grado di compattazione del conglomerato, i valori del coefficiente di prestazione  $k$  sono stati normalizzati ( $k_{norm}$ ), per ciascuna serie di dati, rispetto al valore di riferimento posto pari a quello corrispondente alla percentuale di vuoti del 6% (grado di compattazione prossimo a quello ottimale e comunemente adottato in sito).

Occorre innanzitutto sottolineare che i dati raccolti tramite le prove flessionali rappresentati nelle Figure 3.4 e 3.5 confermano le considerazioni già commentate nel paragrafo precedente circa il meccanismo di funzionamento dei rinforzi. Il comportamento in termini di deflessione e carico applicato per i sistemi rinforzati e non rinforzati presenta lo stesso andamento a prescindere dalla percentuale di vuoti considerata. Parallelamente, permane la netta superiorità dei sistemi rinforzati rispetto a quelli non rinforzati in termini di prestazioni flessionali sia che si considerino conglomerati tradizionali che modificati.

Innanzitutto, ciò che emerge andando ad analizzare il trend assunto dal coefficiente di prestazione  $k_{norm}$  al variare della percentuale di vuoti (Figura 3.6), a prescindere dalla tipologia di conglomerato, è che tale parametro presenta un andamento univoco al variare del grado di compattazione.

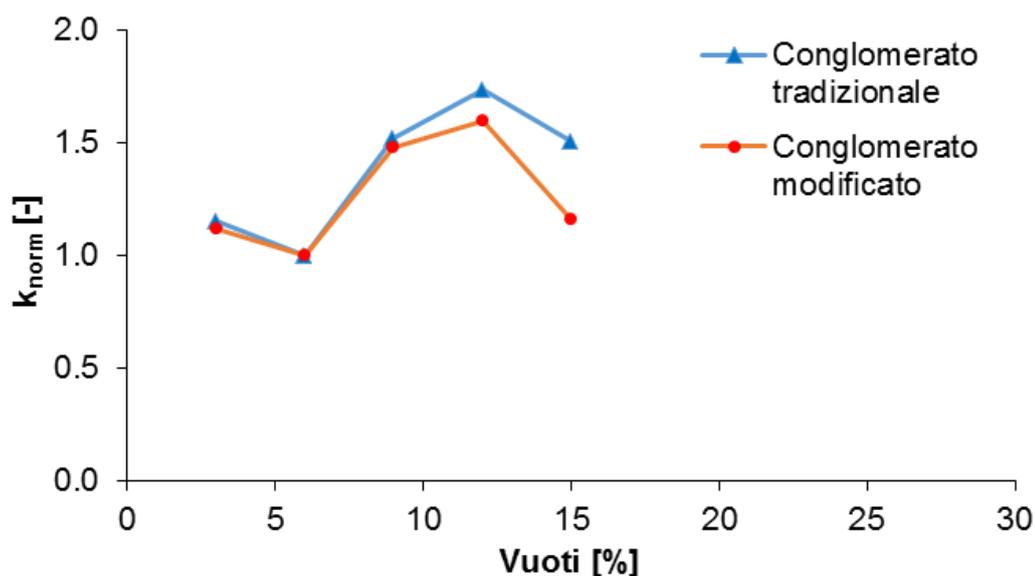


Figura 3.6. Coefficiente di prestazione  $k$  vs % di vuoti del conglomerato bituminoso

In particolare, si può osservare che il coefficiente tende a crescere per percentuali di vuoti intermedie (comprese tra il 6% e il 12%). Ciò implica che il rinforzo esprime maggiormente il proprio contributo in presenza di pavimentazioni più deboli che necessitano di un sostegno alle prestazioni. Al contempo, superata una certa soglia di vuoti il coefficiente torna a decrescere: tale comportamento è sinonimo del fatto che il rinforzo non riesce a colmare completamente il gap prestazionale causato da pavimentazioni troppo deboli in termini di caratteristiche dei materiali e/o soggette a cattiva posa in opera (i.e. vuoti > 15%).

Tuttavia l'applicazione del rinforzo fornisce comunque un beneficio in termini di prestazioni complessive del pacchetto strutturale in confronto a soluzioni analoghe non rinforzate, sebbene non riesca ad esplicitare tutto il proprio potenziale.

Al contrario, per percentuali di vuoti molto basse (i.e. 3%) il coefficiente di prestazione torna a crescere, seppur lievemente, rispetto a quello misurato per percentuali poco più alte di vuoti (i.e. 6%). Tale andamento può essere attribuito all'elevata pressione applicata sul geocomposito durante la compattazione dello strato superiore necessaria per raggiungere un così basso grado di compattazione (i.e. percentuali di vuoti = 3%). Una pressione elevata comporta, conseguentemente, che il rinforzo si trova ad essere maggiormente inglobato tra gli strati della pavimentazione, il che implica una mobilitazione superiore dello stesso durante le sollecitazioni flessionali indotte dal traffico. Un ulteriore aspetto da tenere in conto è che la migliore interazione con il conglomerato potrebbe anche beneficiare, seppur marginalmente, della superiore adesione dovuta al possibile trasudamento del bitume all'interfaccia che la miscela subisce quando viene sovra-compattata rispetto alla densità ottimale.

In definitiva, le precedenti considerazioni indicano che, fino ad una certa soglia in termini di percentuale di vuoti, l'installazione di sistemi di rinforzo può efficacemente compensare l'impiego di conglomerati scadenti e/o pose in opera eseguite non adeguatamente, in quanto l'accoppiamento del geocomposito con miscele più deboli comporta una maggiore mobilitazione del rinforzo stesso e uno sfruttamento superiore delle sue caratteristiche.

Al contrario, per percentuali di vuoti "ottimali" il potenziale del geocomposito, pur essendo associato a valori inferiori del coefficiente di prestazione  $k$ , viene impegnato in presenza di proprietà meccaniche delle miscele che sono poi quelle alle quali si fa riferimento nel calcolo razionale delle pavimentazioni.

Alla luce di tutto quanto sopra illustrato, assumere in fase di calcolo della vita utile (per la progettazione del pacchetto strutturale di pavimentazioni flessibili rinforzate) il valore minimo del coefficiente di prestazione  $k$  ricavato su provini compattati ottimalmente, appare corretto oltre che ragionevole. Infatti, qualora in opera si verificassero variazioni delle proprietà della miscela, il geocomposito permetterebbe di colmare il corrispondente gap prestazionale avendo dimostrato sperimentalmente come al crescere dei vuoti anche il coefficiente di prestazione tenda ad aumentare. A ciò si aggiunge anche il contributo impermeabilizzante fornito dal geocomposito (non contabilizzato in fase di valutazione delle prove flessionali) che, contribuendo a ridurre drasticamente l'effetto "pumping", determina un ulteriore incremento delle prestazioni dei sistemi rinforzati.

## 4. CONCLUSIONI

Il presente rapporto di ricerca descrive l'indagine sperimentale svolta dall'UNIVPM a integrazione della convenzione stipulata con la INDEX S.p.A. nel 2017 (v. Rapporto Finale 2017) condotta per ricavare una panoramica completa dei meccanismi di funzionamento e dell'efficacia di sistemi di rinforzo per pavimentazioni flessibili.

La ricerca descritta nel presente documento ha avuto l'obiettivo principale di valutare l'influenza delle caratteristiche della miscela bituminosa impiegata per realizzare il sistema bistrato sulle prestazioni del rinforzo Autotene Asfaltico Anti-Pumping HE/TVP. Oltre a verificare il funzionamento dei geocompositi abbinati a conglomerato bituminoso a caldo tradizionale o modificato, sono state eseguite prove flessionali statiche su 3 punti per quantificare l'influenza di una cattiva posa in opera della miscela o dell'impiego di un conglomerato con caratteristiche meccaniche scadenti. L'obiettivo è stato quello di ottenere un quadro completo del reale contributo fornito dai geocompositi al fine di comprendere le ripercussioni sul comportamento complessivo del sistema bistrato.

Sulla base dei risultati emersi dall'indagine sperimentale, dettagliatamente discussi nei capitoli precedenti, è possibile ricavare alcune utili indicazioni circa l'efficienza del geocomposito in esame. Innanzitutto, le analisi condotte hanno confermato quanto già noto circa i meccanismi di innesco e propagazione della fessura in sistemi bistrato rinforzati. Il geocomposito non influenza l'avvio della fessura e la successiva propagazione nello strato sottostante il rinforzo stesso, ma manifesta la propria presenza essenzialmente nel momento in cui la fessura raggiunge l'interfaccia, inibendone e/o ritardandone la propagazione nello strato superiore grazie all'assorbimento degli sforzi di trazione indotti dai carichi flessionali. Al contempo, si può notare che l'interposizione del rinforzo può generare una riduzione della rigidità iniziale del sistema a causa del fenomeno di "de-bonding" (i.e. separazione tra gli strati).

Ciò nonostante, in presenza di rinforzi l'innesco delle fessure è da ritenere in linea con quello di analoghi sistemi non rinforzati, mentre la propagazione successiva attraverso il sovrastante strato in conglomerato bituminoso risulta significativamente rallentata in presenza di rinforzo, ottenendo prestazioni complessive a fessurazione notevolmente superiori.

Tali meccanismi di funzionamento trovano conferma nei dati delle prove flessionali statiche ricavati sia su sistemi bistrato preparati con conglomerati compattati ottimamente che su sistemi bistrato confezionati con percentuali di vuoti variabile (a simulare una cattiva compattazione e/o miscele con caratteristiche meccaniche scadenti). I risultati mostrano un andamento simile delle curve carico-spostamento a prescindere dalla percentuale di vuoti considerata (sia nel caso di conglomerato bituminoso tradizionale che modificato).

Tuttavia, ciò che emerge con più forza dai risultati registrati è la possibilità di individuare un intervallo della percentuale di vuoti/rigidità del conglomerato che garantisca un ottimale sfruttamento delle potenzialità del geocomposito. I risultati suggeriscono, infatti, che il geocomposito esplica il proprio contributo principalmente quando installato tra conglomerati aventi caratteristiche non ottimali (entro una certa soglia).

Al contrario, quando si impiegano miscele più performanti, il geocomposito manifesta in maniera meno evidente il proprio potenziale. Parallelamente, in presenza di miscele molto scadenti il rinforzo non può colmare il conseguente gap prestazionale e torna a fornire un contributo limitato, migliorando tuttavia le prestazioni rispetto ad analoghi sistemi non rinforzati.

Le considerazioni appena esposte sono tradotte numericamente tramite la quantificazione del “coefficiente di prestazione  $k$ ”. Tale parametro, derivante da considerazioni di natura energetica confrontando sistemi rinforzati e non, permette di determinare quanto il rinforzo aiuti l'intero sistema in termini di vita utile. Esso può essere efficacemente impiegato in fase di progettazione del pacchetto strutturale per tenere debitamente in conto la presenza del rinforzo e determinare con più esattezza la corrispondente durabilità della pavimentazione.

L'analisi di tale parametro evidenzia una chiara variabilità in funzione delle caratteristiche delle miscele impiegate sia con riferimento alla differente origine e composizione di una medesima miscela, sia al variare della % di vuoti/rigidezza a parità di miscela impiegata. Relativamente all'influenza della % di vuoti, l'andamento dei valori assunti dal coefficiente  $k$  in funzione della percentuale di vuoti suggerisce che l'adozione di un coefficiente di prestazione pari a quello determinabile su provini compattati con vuoti ottimali sia ragionevolmente prudente e permetta di contare su una riserva di resistenza del geocomposito attivabile in caso di variazione delle caratteristiche meccaniche e/o di pose in opera non adeguate.

Per tenere conto, inoltre, della variabilità del parametro  $k$  al variare dell'origine e composizione di una medesima miscela, dal confronto con i precedenti studi emerge un comportamento più performante del geocomposito in presenza di miscele per strati di collegamento rispetto ad analoghe miscele per strati di usura (caratterizzate da maggiore percentuale di bitume e minore diametro massimo degli aggregati), indipendentemente dalla tipologia di legante tradizionale o modificato.

Inoltre, a parità di tipologia di miscela, sarebbe opportuno fare riferimento a delle “fasce prestazionali” per il parametro  $k$  determinato sperimentalmente in laboratorio su provini con vuoti ottimali. Una volta individuata la fascia in cui ricade il valore  $k$  determinato in laboratorio con la tipologia di miscela prescelta, si potrà adottare per il calcolo della pavimentazione il valore minimo che caratterizza la fascia prestazionale di appartenenza.

Infine, si deve considerare anche il contributo impermeabilizzante fornito dal geocomposito (non considerato in fase di valutazione delle prove flessionali in laboratorio) che determina un minor effetto “pumping” con ulteriori ripercussioni positive in termini di prestazioni dei sistemi rinforzati determinando una riserva di durata aggiuntiva rispetto a quella determinata sulla base del coefficiente di prestazione  $k$ .

Ancona, novembre 2017.

Prof. Ing. Francesco Canestrari