



**ANALISI SPERIMENTALE SU RESINE
POLIURETANICHE MONOCOMPONENTI PER
LA SIGILLATURA DELLE PAVIMENTAZIONI
A MASSELLI IN PIETRA**

Maurizio Crispino

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento
Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32, - 20133 Milano - Italia
Tel: +39 02.23996704 - Fax: +39 02.23996720
E-mail: crispino@mail.dstm.polimi.it

Loretta Venturini

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento
Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32, - 20133 Milano - Italia
Tel: +39 02.23996619 - Fax: +39 02.23996657
E-mail: venturini@mail.dstm.polimi.it

ANALISI SPERIMENTALE SU RESINE POLIURETANICHE MONOCOMPONENTI PER LA SIGILLATURA DELLE PAVIMENTAZIONI A MASSELLI IN PIETRA

MAURIZIO CRISPINO – Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e
Rilevamento - Politecnico di Milano

LORETTA VENTURINI – Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e
Rilevamento - Politecnico di Milano

Sommario

Le storiche pavimentazioni in pietra a masselli mostrano in molti casi caratteristiche funzionali non soddisfacenti, sia dal punto di vista della regolarità del piano viabile, sia dal punto di vista dell'aderenza pneumatico-pavimentazione. La regolarità, in particolare, risulta notevolmente condizionata dalla presenza dei giunti che spesso risultano troppo ampi rispetto al valore di 1 cm prescritto dai relativi capitolati e dalla normativa, dando origine ad una diminuzione sia del comfort di guida, sia della sicurezza, soprattutto per il traffico a due ruote.

L'eccessiva apertura del giunto, talvolta anche di 3-4 cm, può essere causata dallo smussamento degli spigoli dei singoli elementi, dal reciproco allontanamento dei masselli e da una non perfetta messa in opera.

Il riempimento dei giunti, generalmente realizzato con sabbia, permette la formazione della funzione meccanica di collegamento giunto-elemento (interlock), permettendo la reciproca collaborazione tra gli elementi.

La sigillatura dei giunti è realizzata tradizionalmente con mastice bituminoso steso a caldo ad una temperatura di circa 170°C. Il mastice, oltre impedire l'asportazione della sabbia e la penetrazione dell'acqua negli strati sottostanti di posa, permette il ripristino della regolarità del piano viabile.

Indagini in sito, effettuate sulle strade milanesi, hanno evidenziato alcune problematiche relative a questo tipo di sigillatura. I tipici dissesti riscontrati sono: l'asportazione di sigillante dai giunti e lo spandimento di legante sul massello. Le principali cause di dissesto sono da imputare alla non corretta posa in opera o alla scelta di materiali inadatti (fragili, troppo suscettibili alle alte temperature, soggetti a rapido invecchiamento), allo spessore del sigillante non adeguato, alla bassa adesione tra sigillante e massello o all'eccesso di sigillante.

E' stato studiato un materiale alternativo e innovativo rispetto al mastice bituminoso: un *resina poliuretanic*a. Su questo materiale sono state eseguite prove di laboratorio, atte a determinare il processo di percolazione, si è proceduto all'esecuzione di prove di laboratorio in vera grandezza, per verificare il reale comportamento della resina all'interno di un giunto, e una prova in sito, per verificare il comportamento della pavimentazione sigillata sottoposta a carichi veicolari.

Abstract

The historical stone's block pavements show in many cases unsatisfactory functional characteristics both for the road condition and for pneumatic-flooring adherence. In particular the regularity is conditioned by the presence of joints. They often result too wide in comparison to the value of 1 cm prescribed by the relative specifications and by the normative. The guide comfort and the safety decrease by the joints. The most damaged vehicles are bike and motorbike.

The excessive joint gap, sometimes also 3-4 cm, can be caused by the rounding of the single element edges, by the mutual displacement of the blocks and by not perfectly laying.

The interlock (mechanical function of connection joint-element) depends on filling the joints. The joint is generally filled with sand.

The joints' sealing is traditionally made of bituminous mastic, laid at a temperature of around 170°C. Besides preventing the removal of the sand and the penetration of the water in the underlying layers, mastic permits the restoration of the regularity of the road pavement.

Investigations in situ have underlined some problems related to this type of sealing. The typical distresses are: the removing of sealing from the joints and the sealing shedding on the blocks. The principal distress causes are due to the incorrect laying or to the unsuitable materials' choice (too brittle, too much susceptible to the high temperatures...), to the unsuitable sealing thickness, to the low adhesion between sealing and blocks or to the sealing excess.

In this study has been studied an alternative and innovative material instead of bituminous: a polyurethane resins. This material has been tested in laboratory in order to determine the infiltration process. Tests have been made also in situ to determine the real resin behavior inside a joint and the sealed pavement behaviour submitted to vehicular loads.

1. PREMESSA

Uno degli elementi fondamentali ed allo stesso tempo critici delle pavimentazioni storiche in pietra a masselli è costituito dai giunti. A differenza delle pavimentazioni a "blocchetti", i giunti delle pavimentazioni a masselli, a causa della perdita della linearità e della forma degli spigoli degli elementi prodottasi nel tempo, oppure del distanziamento tra gli elementi generatosi nel tempo o derivante da una non perfetta messa in opera, hanno una larghezza che generalmente eccede il centimetro, che è invece la misura tipicamente prescritta nei capitolati per questa tipologia di pavimentazione [2]; in alcuni punti la larghezza del giunto risulta anche intorno ai 3-4 cm, come è risultato da indagini in sito nella viabilità urbana milanese. Il giunto intermasselli diviene così, dal punto di vista della regolarità del piano viabile, una causa di discontinuità a cui si associano generazione di vibrazioni e rumore all'interno ed all'esterno del veicolo, nonché perdita di comfort nella guida. Altri aspetti da considerarsi, di non secondaria importanza, sono la crescita dei costi di manutenzione dei veicoli ma anche delle stesse pavimentazioni per effetto dei sovraccarichi dinamici. Fortemente coinvolti sono infine gli aspetti della sicurezza per ciò che attiene la possibile perdita di equilibrio dei mezzi a due ruote.

I giunti sono tradizionalmente realizzati in sabbia formando un insieme in grado di esplicitare proprietà strutturali tra gli elementi, definite in letteratura con il termine "interlock" [6], termine con il quale si intende la reciproca collaborazione strutturale tra i masselli tramite i giunti.

In tale contesto assume un ruolo fondamentale la sigillatura del giunto a cui si richiede, oltre che di ripristinare la regolarità del piano viabile, di inibire la penetrazione dell'acqua nel piano di posa e d'impedire l'asportazione della sabbia di riempimento del giunto, da parte dei veicoli o della stessa pioggia.

La sigillatura tradizionale è effettuata tipicamente con mastice bituminoso. Una sua formulazione tipica è la seguente[2]: bitume a penetrazione 80-100 (30-50 % in peso),

sabbia silicea fine passante al setaccio ASTM n°40 (25-30 % in peso), additivo (cemento o polvere minerale) passante per un minimo dell'85% al setaccio ASTM n°200 (25-35 % in peso). La miscela è costituita e posata ad una temperatura compresa tra i 150°C e i 180°C. Il bitume può essere addizionato con polimeri.

Nella pratica, questo tipo di sigillatura ha posto numerosi problemi. Tra i dissesti più diffusi vi sono l'asportazione di sigillante dai giunti e lo spandimento di legante sul massello. Le cause principali di tali dissesti sono da ascrivere alla non corretta posa in opera o alla scelta di materiali inadatti (fragili, troppo suscettibili alle alte temperature, soggetti a rapido invecchiamento), alla profondità inadeguata di penetrazione del sigillante, alla bassa adesione tra sigillatura e parete lapidea o all'eccesso di sigillante [3].

2. OBIETTIVI DEL LAVORO E METODO DI INDAGINE

Nel presente lavoro si descrive l'esperienza inerente la valutazione delle potenzialità applicative di un diverso criterio di sigillatura rispetto a quello tradizionale sopra citato, derivante dall'utilizzo di resine poliuretatiche da percolare nel giunto di sabbia allo scopo di far nascere legami di coesione interna alla sabbia stessa e di adesione con le pareti dei masselli. Precedenti esperienze eseguite su giunti di pavimentazioni a blocchetti hanno fornito positivi risultati mentre nessuna applicazione esiste nel caso delle pavimentazioni a masselli lì dove la citata elevata larghezza dei giunti pone diverse problematiche, che non consentono di estendere a priori a detti giunti, senza un'adeguata sperimentazione, l'efficacia del metodo.

La sperimentazione, svolta in collaborazione con la Newcastle University – UK, è stata eseguita presso il Laboratorio Sperimentale Stradale del Politecnico di Milano ed i Laboratori dell'Enichem Elastomeri di San Donato Milanese.

La prima fase della sperimentazione ha portato alla determinazione dei tempi e delle profondità di percolazione raggiunte dalla resina all'interno del giunto. Due differenti tipi di sabbia sono stati sperimentati al fine di poter verificare l'influenza della curva granulometrica. Si è quindi proceduto alla valutazione dei dosaggi di resina in funzione delle caratteristiche geometriche del giunto.

Successivamente sono state realizzate prove di laboratorio in vera grandezza previa costruzione di un campione di pavimentazione a masselli. Durante questa fase si è seguito il processo di percolazione e di presa della resina. Si sono altresì verificate le doti di elasticità del giunto e di adesione della sabbia al massello. Contemporaneamente si sono eseguite delle prove di controllo dell'aderenza sul massello, in quanto essa può risultare inficiata dalla inevitabile presenza di resina proveniente dalla procedura di percolazione.

La sperimentazione in sito (eseguita in una intersezione della viabilità milanese) ha permesso la verifica del comportamento della resina in esame in presenza di traffico veicolare.

3. MATERIALI DELLA SPERIMENTAZIONE

3.1 Sabbie per il riempimento dei giunti

Le curve granulometriche analizzate sono state due. La prima è quella usualmente utilizzata dal Comune di Milano (denominata di seguito sabbia "Milano"). Essa è stata scelta con lo scopo di determinare le caratteristiche della sabbia già in uso e verificarne il comportamento dopo la percolazione della resina poliuretatica. La seconda sabbia

(denominata sabbia “Poli”) è stata appositamente formulata presso il Laboratorio Sperimentale Stradale del Politecnico di Milano. Le curve granulometriche di dette sabbie sono riportate nella Tab. 1.

Setacci [mm]	Sabbia Poli [% passante]	Sabbia “Milano” [% passante]
12.70	100	100
9.52	100	100
6.35	100	99.60
4.76	100	98.32
2.00	99.92	69.27
0.42	41.54	29.33
0.18	6.73	5.82
0.075	0.71	1.31

Tabella 1 – Granulometrie delle sabbie sperimentate

La curva della sabbia tipo “Poli” è stata definita in modo da rientrare all’interno di due fusi: il primo è quello riscontrato dall’analisi dello stato dell’arte (Fuso “1”) [7], l’altro è quello suggerito dall’azienda produttrice della resina (Fuso “2”). I fusi sono i seguenti (Tab. 2):

Setacci [mm]	Fuso “1” [% passante]	Fuso “2” [% passante]
12.7	100	100
9.52	100	100
6.35	95-100	100
4.76	87-100	100
2.00	72-97	95-100
0.42	26-60	32-100
0.18	5-20	4-25
0.075	0-1.5	0-3

Tabella 2 – Fusi granulometrici di riferimento

Il confronto tra le sabbie utilizzate per la sperimentazione e i fusi granulometrici di riferimento è riportato in figura 1.

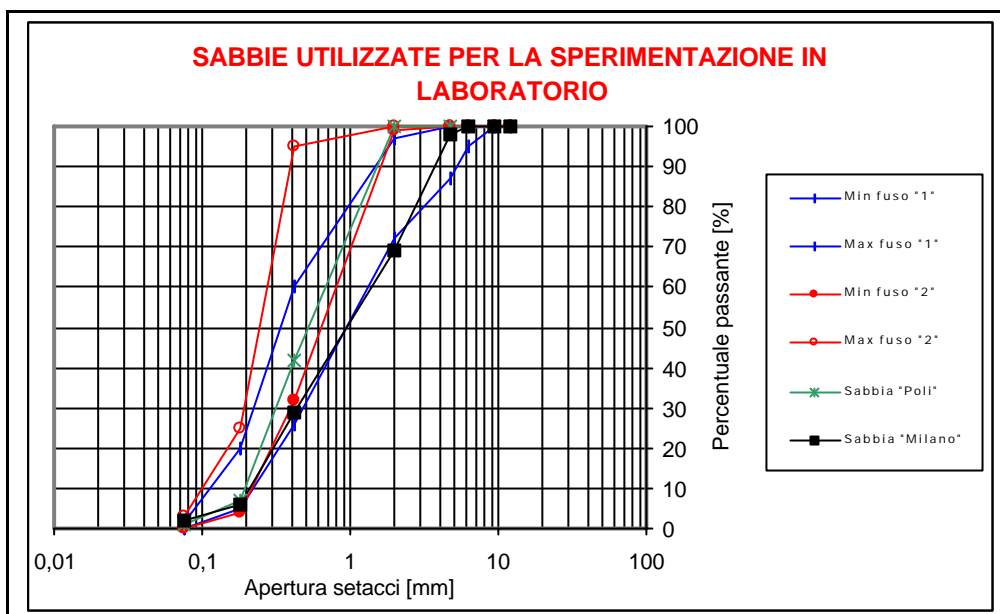


Figura 1– Confronto tra le curve granulometriche delle sabbie “Milano” e “Poli” e i fusi granulometrici di riferimento

Per quanto concerne la percentuale di materiale passante al setaccio ASTM 200 è sempre consigliabile che essa sia inferiore al 3%, meglio se all’1.5%. Si ritiene che percentuali maggiore di elementi fini siano una delle cause principali dei dissesti delle pavimentazioni ad elementi lapidei: ciò per effetto di una consistente riduzione della capacità di drenaggio dell’acqua da parte della sabbia che comporta una sensibile riduzione della resistenza a taglio della stessa [7].

Come si può evincere dalla figura 1, la sabbia “Milano” ha una granulometria che rientra, seppur di poco, all’interno del fuso “1”, ma è completamente esterna al fuso “2”. La sabbia “Poli”, invece, ha una curva granulometrica di poco discosta dalla curva minima “2”, ma rientra per la quasi totalità all’interno del fuso “1”: ha solo una quantità di elementi di maggior diametro leggermente eccedente.

Tramite prove di laboratorio si sono determinate le seguenti caratteristiche delle sabbie:

Sabbia “Milano”

- Massa volumica apparente dei granuli: $\gamma_g = 2.68 \text{ g/cm}^3$;
- Massa volumica apparente dell’aggregato non addensato: $\gamma = 1.58 \text{ g/cm}^3$;
- Percentuale dei vuoti: $v\% = 34.7\%$.

Sabbia “Poli”

- Massa volumica apparente dei granuli: $\gamma_g = 2.68 \text{ g/cm}^3$;
- Massa volumica apparente dell’aggregato non addensato: $\gamma = 1.49 \text{ g/cm}^3$;
- Percentuale dei vuoti: $v\% = 38.1\%$.

3.2 La resina poliuretanicata utilizzata

La resina poliuretanicata utilizzata (di seguito denominata semplicemente resina oppure sigillante) è un prepoliuretano a bassa viscosità mono-componente a base uretanica, disperso in un solvente (aromatico o alifatico, normalmente idrocarburo). È un poliuretano con struttura molecolare reticolata; il suo processo di reticolazione durante la fase di presa risulta condizionato dalla presenza dell'umidità, contenuta sia nel sottosuolo che nell'aria.

La resina, stoccata in taniche, è utilizzata direttamente senza ulteriore diluizione e senza l'aggiunta di eventuali reagenti. Durante le fasi di messa in opera la temperatura atmosferica deve essere possibilmente compresa tra i 3°C e i 30°C.

L'utilizzo di tale resina fu sperimentato per la prima volta nel 1970 in Inghilterra per esigenze estetiche connesse alla rimozione delle efflorescenze, dovute alla risalita di umidità, affioranti sulla superficie della pavimentazione ad elementi in argilla.

La resina evidenzia resistenze chimiche elevate rispetto a molti solventi e a sostanze chimiche (come ad esempio cloruro di calcio, etere, glicerina), carburanti, sostanze antigelo, oli per motori. Da un punto di vista ecologico non è inquinante perché, non essendo solubile in acqua, non si disperde nel sottosuolo [8]. Le caratteristiche di base della resina sono riportate in tab. 3.

Viscosità a 25°C	< 0.05 [Pa s]
Peso specifico a 25°C	0.80 ÷ 0.93 [kg/dm ³]
Contenuto solido	18 ÷ 22 %
Aspetto	liquido
Colore	chiaro (o pallido), dal trasparente all'ambra
Stabilità al buio	18 mesi
Monomeri isocianati liberi	< 0.4 %
Massima temperatura di esposizione	200°C

Tabella 3 – Caratteristiche principali della resina poliuretanicata utilizzata [8]

Il tipico sviluppo del processo di reticolazione per un film dello spessore di 0.1 mm, alla temperatura di 20 °C con umidità dell'aria del 60 %, è riportato in figura 2:

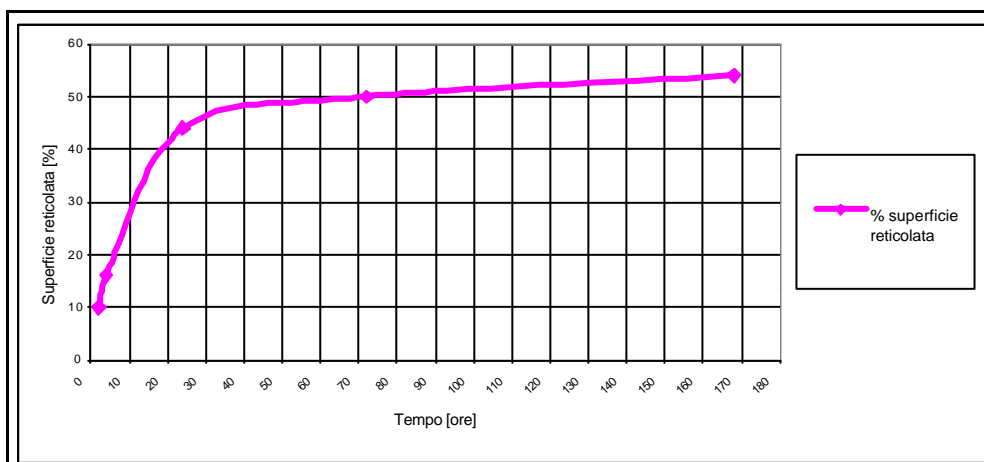


Figura 2 – Processo di reticolazione di un film di resina (T = 20°C, w_{aria} = 60%) [8]

Durante la sperimentazione si è resa necessaria la formulazione e la produzione di una seconda resina che avesse, una volta terminata la presa, una maggiore elasticità rispetto alla prima esaminata. Le resine si sono denominate rispettivamente “RP1” e “RP2”.

4. PROVE DI LABORATORIO

4.1 Attrezzatura e procedimento

Le prove di laboratorio sono consistite nell’effettuazione di percolazioni di resina in campioni di sabbia. L’obiettivo è stato quello di determinare la cinematica del liquido all’interno delle due differenti curve granulometriche della sabbia, prima descritte.

L’attrezzatura utilizzata per le prove comprende (Figura 3):

- tubi in vetro di vari diametri (permettono di simulare il giunto);
- becker in vetro (permette di simulare lo strato d’allettamento);
- pipette e burette per il dosaggio della resina.

Con l’intento di simulare le reali condizioni in cui avviene la sigillatura, la percolazione è stata eseguita con il metodo a “battenti”. Il battente utilizzato corrisponde ad 1 cm (dislivello medio riscontrato in sito tra la sommità del giunto e la superficie del massello) (Figura 4).

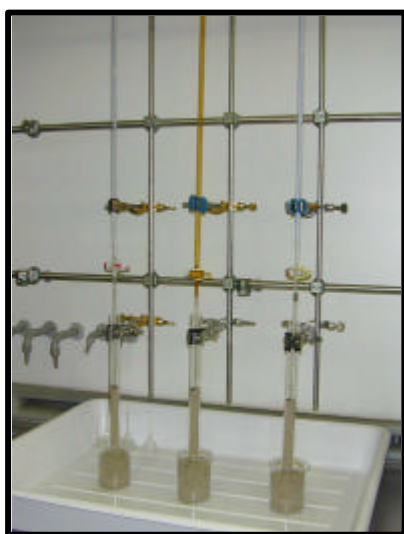


Figura 3 – Attrezzatura per percolazione

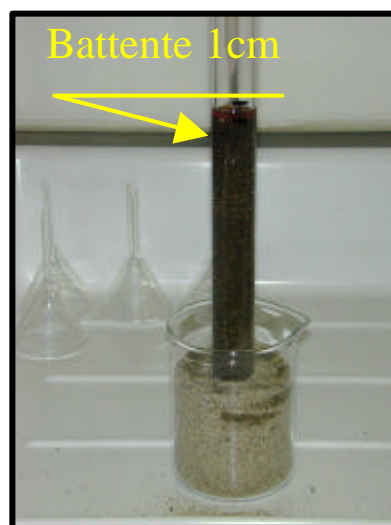


Figura 4 – Resina percolata nel becker

Il procedimento adottato consiste nel versare la quantità di resina relativa ad un battente ed attendere la sua completa percolazione; solo successivamente si procede alla percolazione del successivo battente. Con l’impostazione dell’altezza del battente, la quantità di resina versata risulta direttamente proporzionale al diametro del tubo utilizzato.

Il numero di battenti percolati per ogni prova è 11. Questo valore è stato determinato sulla base dei risultati di prove preliminari: la quantità di materiale dopo 11 battenti è tale da bagnare quasi totalmente anche lo strato d’allettamento sottostante (Figura 4).

I tubi impiegati sono di diametro 0.94 cm e 2.98 cm (valori rappresentativi della larghezza minima e massima dei giunti riscontrati in sito); l’altezza del giunto

considerata (secondo normativa UNI 2718) è di 15 cm. La sabbia adoperata è stata preventivamente asciugata in forno.

Le prove di percolazione sono state eseguite con la sola resina “RP1” essendo la viscosità delle due resine praticamente uguale.

Oltre alle più importanti prove di percolazione, in laboratorio è stata verificata la percentuale di materiale solido (contenuto solido = poliuretano) contenuto nel sigillante tramite l’essiccazione in stufa. La percentuale ottenuta, come atteso in base alla relativa scheda tecnica, è pari a 22 %, il che significa che l’78 % del sigillante è composto da solvente (Figura 5).



Figura 5 – Poliuretano residuo RP1 da essiccazione in stufa

4.2 Risultati

I risultati delle prove (tabella 4 e figure 6 e 7) evidenziano come, a parità di tipo di sabbia, le percolazioni siano più lente in tubi di diametro inferiore. A parità di diametro invece, le percolazioni si dimostrano più lente nella sabbia tipo “Milano”, la quale ha una percentuale di vuoti minore rispetto alla sabbia tipo “Poli”.

A parità di diametro e di resina complessivamente percolata, la percentuale della stessa trattenuta nei 15 cm del giunto risulta maggiore all’interno della sabbia tipo “Poli” (sabbia con la maggior percentuale di vuoti). Comunque mediamente si ha un riempimento del 80-87 % dei vuoti. In generale si può asserire che la quantità di contenuto solido trattenuto per unità di volume è compresa tra 53-64 mg/cm³.

Tipo di sabbia	Ampiezza del giunto [cm]	Quantità totale di resina percolata [gr]	Resina poliuretanicamente trattenuta nei 15 cm [gr]	Contenuto solido trattenuto nei 15cm [gr]	Resina poliuretanicamente per unità di volume [mg/cm ³]	Contenuto solido per unità di volume [mg/cm ³]	% dei vuoti riempiti dal sigillante	T medio per la percolazione dei 15cm [sec]
Poli	0.94	7,7	3,0	0,7	288,5	63,5	87,0	923
	2.98	77,0	29,0	6,4	277,2	61,0	83,6	437
Milano	0.94	7,7	2,5	0,6	240,4	52,9	79,6	1348
	2.98	77,0	26,9	5,9	257,2	56,6	85,2	741

Tabella 4 – Dati medi ottenuti dalle percolazioni

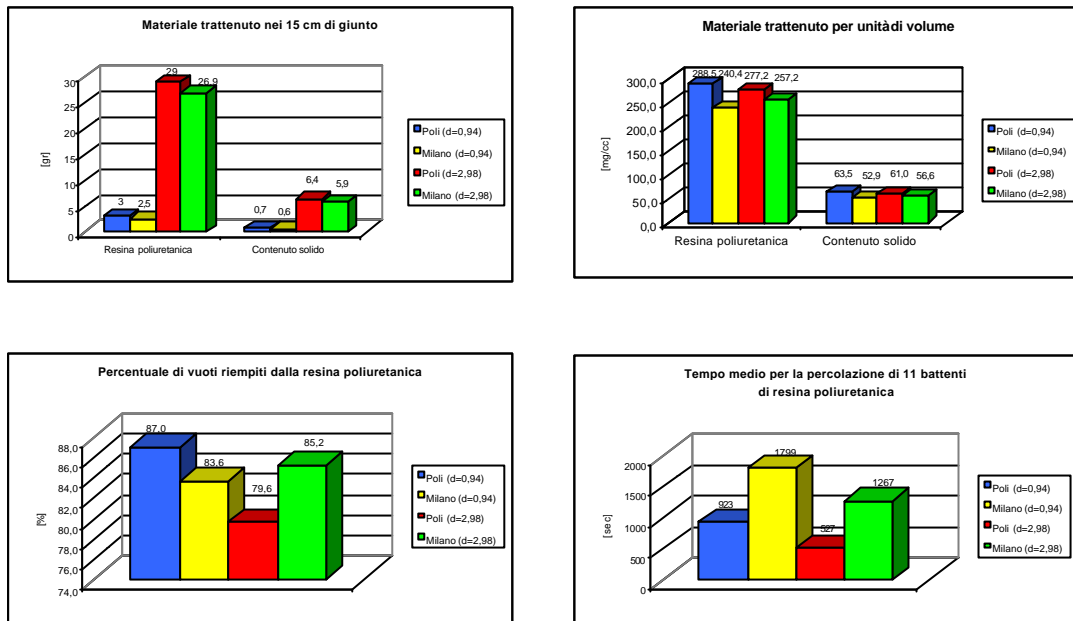


Figura 6 – Dati medi ottenuti dalle percolazioni (rappresentazione grafica)

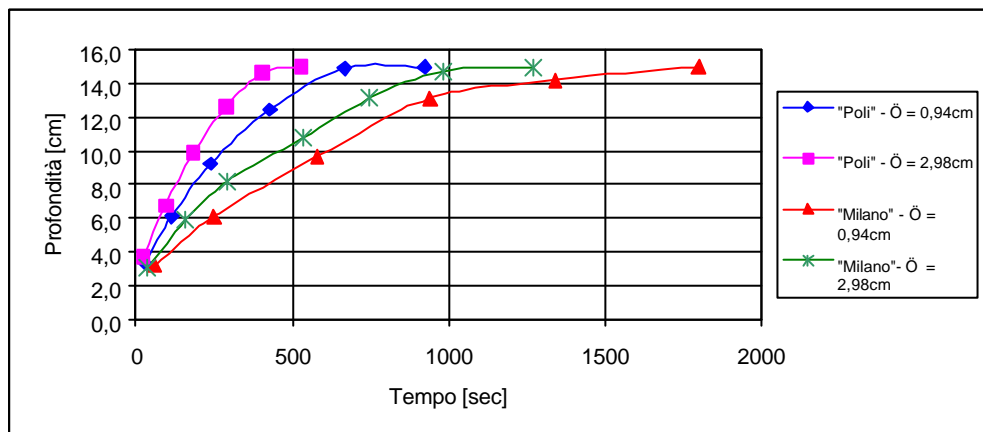


Figura 7 – Valori medi della cinematica di percolazione della resina poliuretantica

5. PROVE DI LABORATORIO IN VERA GRANDEZZA

5.1 Procedimento

Per valutare l'efficacia di un giunto reale ottenuto percolando la resina poliuretantica all'interno della sabbia di riempimento, sono state effettuate delle prove di laboratorio in vera grandezza. Particolare attenzione è stata dedicata alla verifica:

- della capacità adesiva del giunto alle pareti dei masselli;
- della capacità deformativa del giunto in seguito a movimenti mutui tra masselli contigui.

Sono stati posizionati cinque masselli su uno strato d'allettamento in sabbia tipo "Milano". Quindi, dei quattro giunti realizzati (divisi in due parti in modo d'avere operativamente 8 giunti analizzabili) due sono stati riempiti con sabbia tipo "Milano" e i restanti due con sabbia tipo "Poli". I giunti avevano tutti ampiezza pari a 2 cm. Per tutti i giunti la sabbia è stata preventivamente essiccata in forno. La quantità di resina percolata è stata determinata in funzione del volume dei giunti e dei dati ricavati dalle percolazioni di laboratorio, in modo da riempire circa l' 85 % vuoti presenti.

In funzione dei risultati ottenuti dal primo gruppo di prove con resina "RP1" si è costruito un altro stralcio di pavimentazione, identico a quello precedente, e si è realizzato un secondo gruppo di prove utilizzando questa volta la "RP2".

Il quadro delle prove è riportato in tabella 5.

	RP1		RP2	
	Sabbia Milano	Sabbia Poli	Sabbia Milano	Sabbia Poli
Apertur a giunti	1 gg	1 gg	1 gg	1 gg
	7 gg	7 gg	7 gg	7 gg
	15 gg	15 gg	15 gg	15 gg
	28 gg	28 gg	28 gg	28 gg

Tabella 5 – Quadro prove

Il metodo di posa della resina (vedi § 6.1) oltre a comportare un effetto bagnato della superficie del massello, dà luogo ad una riduzione della rugosità della pietra, e conseguentemente dell'aderenza pneumatico-massello. Per verificare tale condizione sono state eseguite delle prove di controllo dell'aderenza tramite "Skid tester" [4].

Il test è stato eseguito prima e dopo la sigillatura dei giunti (Figura 8).



Figura 8 – Skid test su pavimentazioni in pietra.

5.2 Risultati

L'apertura dei primi due giunti sigillati con la resina poliuretanic "RP1" è avvenuta 24 ore dopo la posa in opera. In entrambe le sabbie la resina ha raggiunto lo strato d'allettamento ed il primo centimetro del giunto risulta completamente reticolato (Figura 9 e 10).



**Figura 9 – Giunto con sabbia “Milano”
dopo 1 giorno**



**Figura 10 – Giunto con sabbia “Poli”
dopo 1 giorno**

Dopo 7 giorni, la reticolazione della resina percolata nella sabbia “Milano” si è estesa ai primi 6 cm di giunto. I successivi 4-5 cm di giunto presentavano, invece, un parziale indurimento. Il giunto incominciava ad evidenziare un comportamento rigido ed una non adeguata adesione al massello. La stessa situazione si presentava anche per il giunto riempito con sabbia tipo “Poli”, solo che l’indurimento si è sviluppato per i primi 5 cm e quello parziale per i successivi 3-4 cm.

Entrambi i giunti, dopo 15 giorni, sono induriti per ben 13 cm ma risultano ancor più fragili e friabili, in modo particolare quelli realizzati con sabbia tipo “Milano” (Figure 11 e 12).



**Figura 11 – Giunto con sabbia “Milano”
dopo 15 giorni**



**Figura 12 – Giunto con sabbia “Poli”
dopo 15 giorni**

Dopo 28 giorni i giunti apparivano completamente asciutti, essendo il solvente completamente evaporato; sono molto fragili e presentano una non adeguata adesione al massello (Figure 13 e 14).



**Figura 13 – Giunto con sabbia “Milano”
dopo 28 giorni**



**Figura 14 – Giunto con sabbia “Poli”
dopo 28 giorni**

La relazione che è intercorsa tra la profondità di giunto completamente reticolato e il tempo d'indurimento è rappresentato nella figura 15.

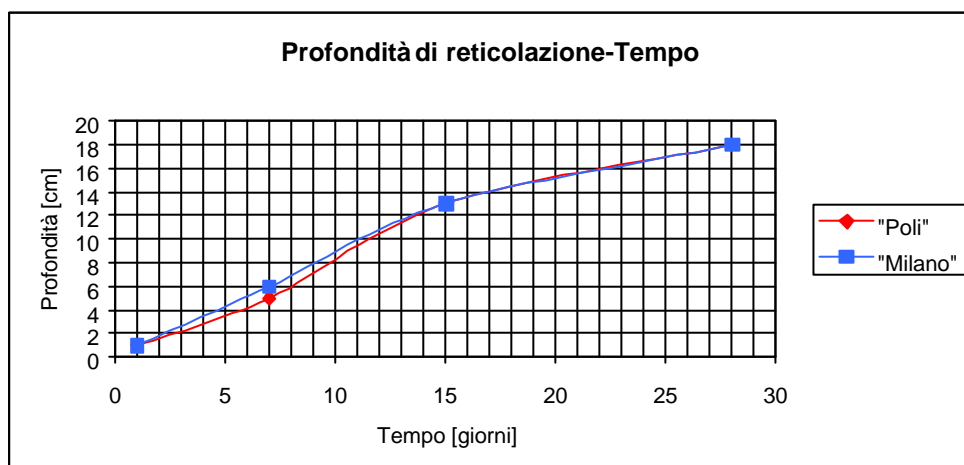


Figura 15 – Profondità di giunto completamente reticolato in funzione del tempo

Risultati migliori, dal punto di vista prestazionale, si sono ottenuti con la resina poliuretanic a formulazione più elastica “RP2”. I tempi di percolazione e reticolazione sono praticamente identici a quelli precedenti ma si riscontra migliore aderenza al massello, maggiore adesione intergranulare, minore friabilità ed una certa elasticità del giunto.

Le caratteristiche della sigillatura risultano suscettibili, in parte, al metodo di posa non essendo tecnicamente possibile effettuare la saturazione del giunto ed in parte alla granulometria della sabbia. Il liquido, infatti, non sempre si interpone tra le superfici di contatto dei granuli, ma va a riempire parte dei vuoti esistenti e a ricoprire solamente in parte la superficie del granulo; quindi nelle aree in cui non c'è adesione tra due granuli contigui si ha il possibile reciproco distacco. Per quanto riguarda la granulometria, invece, elasticità e compattezza maggiore si hanno con l'utilizzo di sabbia fine (nel caso

in esame si deve fare riferimento alla sabbia tipo “Poli” perché presenta particelle granulometriche più piccole ed uniformi).

Per quanto concerne lo Skid Test si è constatata una drastica riduzione dell’attrito radente: prima della posa della resina i valori determinati corrispondevano a 42-45 BPN (British Portable Tester Number), dopo la sigillatura i valori sono scesi a 20-27 BPN.

6. PROVE ESEGUITE IN SITO

6.1 Procedura

La prova in sito, atta a verificare il comportamento di giunti sigillati con resina poliuretanic “RP1” in presenza di traffico veicolare, è stata eseguita in un incrocio semaforizzato con traffico sostenuto, in prevalenza autoveicoli (Piazza L. Da Vinci, Milano). L’area sottoposta a sigillatura è parte centrale di un incrocio semaforizzato.

La prima operazione eseguita è stata quella di ripulire il giunto dalla sigillatura in mastice bituminoso in modo manuale (Figura 16); e i giunti sono stati poi svuotati per almeno 4 cm dalla sabbia presente con l’utilizzo d’aria compressa.



Figura 16 – Giunto ripulito dalla sigillatura bituminosa



Figura 17 – Aspetto del lastricato sigillato con resina poliuretanic

Quindi, i giunti sono stati di nuovo colmati con sabbia “Milano” tramite l’utilizzo di scope con setole, dopo aver cosparso la superficie con la stessa. La sabbia è stata successivamente costipata.

Il giunto così preparato è stato quindi sigillato facendo penetrare la resina poliuretanic con l’ausilio di annaffiatoio e scope. La quantità di sigillante versato corrispondeva alla colmataura del battente (il processo si è ripetuto per tre volte).

Successivamente, il liquido rimasto sul massello è stato distribuito sull’intera superficie con lo scopo di ridurre lo spreco di materiale, di limitare lo spessore della pellicola di poliuretano che rimane sulla pietra e di rendere la superficie uniforme (Figura 17).

La pellicola di poliuretano che si forma è asportata nel tempo dall’azione dei pneumatici, eliminando l’effetto bagnato e riportano la pavimentazione al colore naturale.

6.2 Risultati

Per quanto concerne il processo di reticolazione del sigillante si può asserire che è incominciato due ore dopo la posa in opera.

Dopo 24 ore il giunto si presentava completamente asciutto e reticolato solamente per i primi 3 mm di profondità, mantenendo comunque le caratteristiche elastiche desiderate.

Le prime fessure, tra giunto e massello, sono apparse dopo circa 15 giorni.

Dopo 28 giorni il solvente risultava completamente volatilizzato, il giunto però sembrava molto più fragile con più evidenti fessure tra giunto e massello.

7. QUANTITÀ DI RESINA POLIURETANICA OCCORRENTE PER UNA CORRETTA SIGILLATURA

Le peculiarità della resina poliuretanicca fanno sì che, se percolata in quantità elevate, penetra anche nello strato d'allettamento generando sprechi di materiale. A fronte di ciò, si è determinata la quantità di materiale da versare (quantità uguali per entrambi le resine avendo circa uguale viscosità e tempi di reticolazione), in funzione dei metri quadrati di pavimentazione e all'ampiezza media dei giunti.

Le dimensioni, almeno teoriche, dei masselli sono fornite dalla norma UNI 2718 (Tabella 6).

B [cm]	A_{min} [cm]	A_{max} [cm]	H [cm]
32	48	65	15 o 18
35	52	70	15 o 18
38	57	75	15 o 18
40	60	80	15 o 18
45	67	90	15 o 18
50	75	100	15 o 18

Tabella 6– Dimensione dei masselli secondo norma UNI 2718

Dove (Figura 18):

A = lunghezza del massello;

B = larghezza del massello;

H = le due altezze previste.

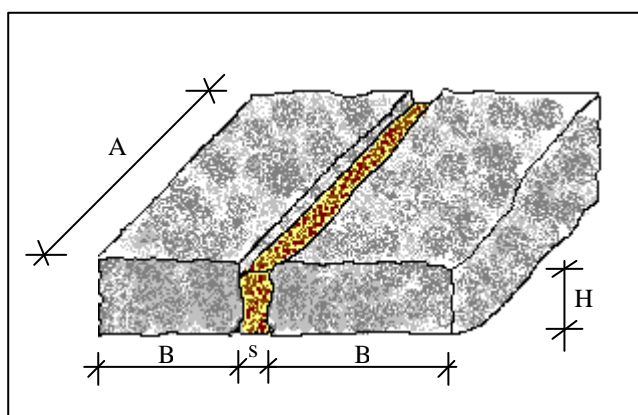


Figura 18 – Dimensione dei masselli e del giunto

Si prenda in considerazione il seguente parametro R, il quale indica la superficie di giunto per superficie di pavimentazione :

$$R = (A+B) * s / [(A*B) + (A+B)*s] \quad [\text{cm}^2 \text{ di giunto/cm}^2 \text{ di pavim.}]$$

Dove, oltre ai simboli già noti:

s = ampiezza del giunto.

Essendo il parametro R funzione di tre variabili (A, B, s), è interessante verificare come il parametro varia al crescere dell'ampiezza del giunto. Ad ogni larghezza della base corrisponde una lunghezza minima ed una massima del massello, quindi si ottiene che per ogni ampiezza di giunto è stato calcolato R minimo ed R massimo (Figura 19).

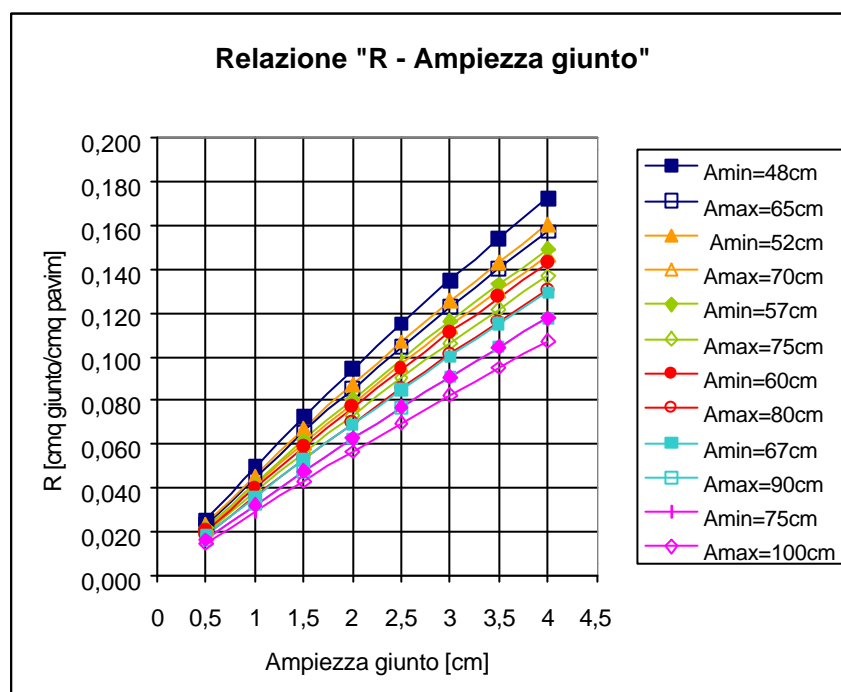


Figura 19 – Relazione tra il parametro R e l'ampiezza dei giunti in funzione della dimensione del massello.

Per determinare la quantità di resina necessaria a sigillare un giunto di una certa ampiezza, si sono sfruttati i risultati delle prove di percolazione eseguite in laboratorio.

Si ricorda che le percolazioni sono state effettuate su due differenti tipi di sabbia, con differenti risultati.

La quantità di resina necessaria per sigillare un centimetro quadrato di pavimentazione, al variare dell'ampiezza del giunto, si ottiene moltiplicando il valore della quantità di resina occorrente, per centimetro quadrato di giunto, per il valore del parametro R (Figura 28).

$$Q_{ij(\text{riferimento})} = R_i \times q_s \times H_{\text{rif.}}$$

Dove:

$Q_{ij(\text{riferimento})}$ = quantità di resina occorrente in funzione del tipo di sabbia, dell'ampiezza e dell'altezza del giunto per cmq di pavimentazione [gr / cm² di pavim.]

R_i = valore del parametro R in funzione dell'ampiezza del giunto "i"
[cm² di giunto/cm² di pavim.];

q_s = peso della resina poliuretanicca per unità di volume in funzione del tipo sabbia "s"
[gr / cm³ di giunto];

$H_{\text{rif.}}$ = altezza del giunto in funzione della relativa normativa [cm di giunto];

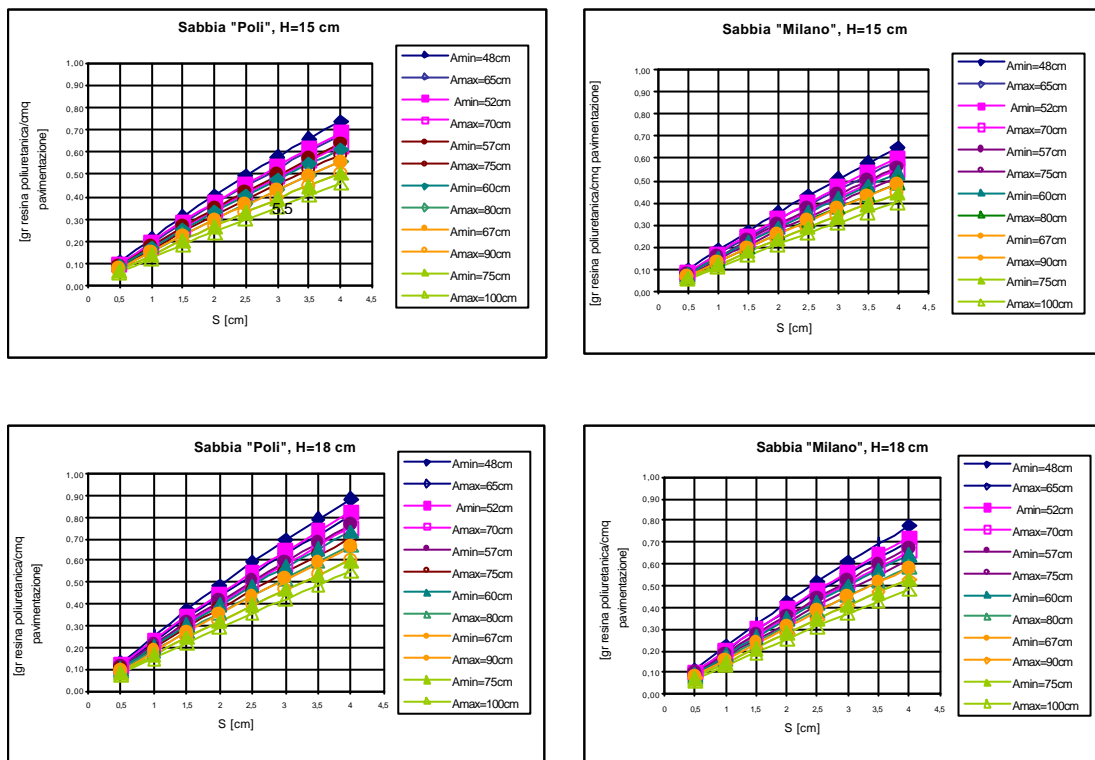


Figura 20: Resina poliuretanicca occorrente per unità di superficie in funzione del tipo di sabbia e della profondità del giunto

Come si può vedere dai precedenti grafici (figura 20) la quantità di resina occorrente, a parità di larghezza del giunto, è maggiore nella sabbia tipo "Poli", la quale effettivamente ha una maggiore percentuale di vuoti.

8. CONCLUSIONI

Uno degli elementi fondamentali ed allo stesso tempo critici delle pavimentazioni storiche in pietra a masselli è costituito dai giunti. Per tali pavimentazioni, il giunto intermasselli rappresenta dal punto di vista della regolarità del piano viabile una causa di discontinuità a cui si associano generazione di vibrazioni e rumore all'interno ed all'esterno del veicolo, nonché perdita di comfort nella guida, in misura significativamente maggiore di quanto accade per le pavimentazioni autobloccanti. Altri aspetti da considerarsi, di non secondaria importanza, sono la crescita dei costi di

manutenzione dei veicoli ma anche delle stesse pavimentazioni per effetto dei sovraccarichi dinamici. Fortemente coinvolti sono infine gli aspetti della sicurezza per ciò che attiene la possibile perdita di equilibrio dei mezzi a due ruote.

In tale contesto assume un ruolo fondamentale la sigillatura del giunto a cui si richiede, oltre che di ripristinare la regolarità del piano viabile, di inibire la penetrazione dell'acqua e d'impedire l'asportazione della sabbia di riempimento del giunto (da parte dei veicoli o della stessa pioggia).

Atteso che, nella pratica, la sigillatura tradizionale ha posto numerosi problemi (materiali fragili, troppo suscettibili alle alte temperature, soggetti a rapido invecchiamento), nel presente lavoro si sono volute investigare le potenzialità applicative di un diverso criterio di sigillatura, derivante dall'utilizzo di resine poliuretatiche monocomponenti da percolare nel giunto di sabbia allo scopo di far nascere legami di coesione interna alla sabbia stessa e di adesione con le pareti dei masselli.

Le numerose prove di laboratorio eseguite insieme ai riscontri derivanti dalle applicazioni sperimentali effettuate anch'esse nell'ambito della presente ricerca, hanno dimostrato una certa difficoltà nel contemplare le contestuali esigenze di avere un prodotto dalle elevate caratteristiche elastiche e dalla veloce presa (necessaria per riaprire rapidamente la strada al traffico). Ciononostante si è riusciti a mettere a punto una specifica formulazione che massimizza i risultati attesi; nel contempo è risultato necessario utilizzare sabbia di granulometria piuttosto fine ed uniforme, che dà luogo ad una buona adesione intergranulare e ad un insieme complessivamente poco friabile. Le prove di percolazione hanno però evidenziato che la resina, avendo una velocità di percolazione elevata ed iniziando a reticolare circa due ore dopo la messa in opera, raggiunge anche lo strato d'allettamento. Per evitare uno spreco di materiale, la quantità di liquido da versare deve essere preventivamente calcolata in base alle dimensioni dei masselli ed all'ampiezza dei giunti, secondo i riferimenti forniti nel presente lavoro. Un fattore a sfavore di questo metodo di sigillatura è rappresentato dalla necessità di disporre, affinché avvenga il processo di presa, di sabbia completamente priva d'umidità e ciò può rappresentare una limitazione in fase di posa in opera.

La ricerca è attualmente orientata alla verifica comportamentale di una resina poliuretanica bi-componente la quale, attraverso le prove in sito ed in laboratorio già eseguite (alcune di esse specificamente messe a punto), ha mostrato particolare attitudine a soddisfare, con elevate prestazioni, i requisiti necessari per l'applicazione nei giunti di pavimentazioni a masselli, anche per fini strutturali e non solo funzionali. I risultati di questa seconda sperimentazione saranno presto resi disponibili.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] **F. Canestrari**, *Fondamenti della teoria della percolazione per l'impregnazione dei misti granulari*, Convegno SIIV, Milano, 1998
- [2] Capitolati Tecnici Speciali per la costruzione di pavimentazioni stradali in uso nella città di Milano, Comune di Milano, Ufficio tecnico, Divisione V – Strade, 1961.
- [3] **M. Crispino**, *Analisi di caratteristiche funzionali e strutturali di pavimentazioni in pietra a masselli*, X Convegno nazionale SIIV, 2000.
- [4] Norma C.N.R. Bollettino Ufficiale n° 105, *Norme per la misura delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni – Metodo di prova per la misura della resistenza di attrito radente con l'apparecchio portatile a pendolo*.
- [5] **J. Knapton, S. D. Barber**, *UK research into concrete block pavement design*

- [6] **J. Knapton, H. M. Algin**, *Research into the structural performance of interlocking block pavements*, Third International Workshop on Concrete Block Paving, Colombia, 1998.
- [7] **J. Knapton, F. Bullen**, *The role of bedding sands in segmental pavement instability*, Third International Workshop on Concrete Block Paving, Colombia, 1998.
- [8] *Technical Data*, Resiblock, UK, 1999
- [9] Norma UNI 2718, *Manufatti lapidei stradali – masselli di pietra per pavimentazioni*.
- [10] **L. Venturini**, *Dimensionamento e tecniche manutentive per le pavimentazioni in masselli: studio teorico sperimentale per la viabilità di Milano*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2000
- [11] **G. Woods**, *The ICI polyurethanes book*, ICI Polyurethanes and J. Wiley & Sons, 1990.