

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Tesi di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Civile

**STUDIO SPERIMENTALE DI RIVESTIMENTI POLIMERICI  
SOTTILI PER PAVIMENTAZIONI DI IMPALCATO DA PONTE IN  
CALCESTRUZZO**

Relatore: Ch.mo Prof. Ing. MARCO PASETTO  
Correlatore: Ing. GIOVANNI GIACOMELLO

Laureando: ALBERTO MICHIELETTO

ANNO ACCADEMICO 2013/2014







# Indice

<b>CAPITOLO</b>		<b>Introduzione</b>	<i>Pag.</i>	<b>1</b>
<b>1</b>	1.1	Scopo e descrizione del lavoro di tesi	1	
	1.2	I ponti e i loro impalcati	2	
	1.3	Le pavimentazioni	4	
	1.4	Le azioni sulle pavimentazioni e sugli impalcati e il degrado dei materiali da costruzione	8	
	1.5	Tecniche di impermeabilizzazione	12	
<b>CAPITOLO</b>		<b>I rivestimenti polimerici sottili</b>		<b>17</b>
<b>2</b>	2.1	Introduzione	17	
	2.2	I rivestimenti polimerici sottili	18	
	2.3	Il supporto: preparazione del piano di posa	19	
	2.4	Il conglomerato polimerico: resine ed aggregati	21	
	2.4.1	Le resine	22	
	2.4.2	Gli aggregati	25	
	2.5	Interazioni tra conglomerato e sub-strato: compatibilità termica e ritiro dei conglomerati polimerici	27	
	2.6	La durabilità del conglomerato polimerico	36	
	2.7	Tecniche di posa in opera dei rivestimenti polimerici sottili	41	
	2.8	Le caratteristiche superficiali: confronto tra posa di tipo multiple layer e quella di tipo Premixed	44	
	2.9	Applicazioni di rivestimenti polimerici sottili	49	
	2.10	Vantaggi e svantaggi delle pavimentazioni polimeriche sottili	52	

<b>CAPITOLO</b>		<b>Caratterizzazione dei Materiali</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	3.1	Obbiettivi ed impostazione sperimentale	53
	3.1.1	Introduzione	57
	3.2	Gli Aggregati	57
	3.2.1	Prove e protocolli di prova	60
	3.2.2	Gli aggregati: risultati e analisi dei dati ottenuti	64
	3.3	Le miscele proposte in questo studio	79
	3.3.1	Curva granulometrica della miscela di tipo 1	79
	3.3.2	Curva granulometrica della miscela di tipo 2	84
	3.4	I leganti	88
	3.4.1	Soluzione A	88
	3.4.2	Soluzione B	90
	3.4.3	Soluzione C	91
<b>CAPITOLO</b>		<b>Protocolli di prova</b>	<b>93</b>
<b>4</b>	4.1	Introduzione	93
	4.1.1	I provini: le tipologie	93
	4.1.2	Le Lastre	94
	4.1.1.1	Soluzione A	96
	4.1.1.2	Soluzione B	98
	4.1.1.3	Soluzione C	101
	4.1.3	Provini Cilindrici	104
	4.2	Prove e protocolli	107
	4.2.1	Prova altezza in sabbia	108
	4.2.2	Prova mediante skid tester – il British Pendulum Number (BPN)	112
	4.2.3	Prova di misurazione della drenabilità orizzontale della superficie della pavimentazioni	114
	4.2.4	Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)	119
	4.2.5	Determinazione della resistenza a fatica –Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)	123
	4.2.6	Prova di Ormaiamento – Wheel Tracking Test	125
	4.2.7	Prove di adesione al supporto – prova di Pull Off	130

<b>CAPITOLO</b>		<b>Analisi dei dati</b>	<b>133</b>
<b>5</b>	5.1	Introduzione	133
	5.2	Caratterizzazione superficiale	136
	5.2.1	Prova di altezza in sabbia	136
	5.2.2	Prova skid tester (BPN)	142
	5.2.3	Prova di drenabilità orizzontale	145
	5.3	Caratterizzazione fisico-meccaniche	149
	5.3.1	Modulo di rigidezza (ITSM indirect tensile stiffness modulus)	149
	5.3.2	Le deformazioni permanenti: prova di ormaiamento	155
	5.3.3	Adesione tra gli strati: prova di pull off	174
	5.4	Caratterizzazione a fatica - Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)	184

<b>CAPITOLO</b>		<b>Conclusioni</b>	<b>193</b>
<b>6</b>	6.1	Introduzione	193
	6.2	I materiali impiegati	194
	6.3	I campioni di prova	195
	6.4	I risultati ottenuti	195
	6.4.1	Le caratteristiche superficiali	195
	6.4.2	Le caratteristiche fisico-meccaniche	196

<b>Bibliografia</b>			<b>199</b>
---------------------	--	--	------------





# 1 Introduzione

## 1 Introduzione

### 1.1 Scopo e descrizione del lavoro di tesi

La presente tesi intende essere un compendio delle prove e dei risultati effettuati per studiare soluzioni tecnologiche innovative per pavimentazioni da posare su impalcati di ponti in calcestruzzo.

Con questo lavoro si intende analizzare il comportamento meccanico e fisico delle pavimentazioni di natura polimerica, per confrontarlo con i risultati ottenuti su campioni di conglomerato bituminoso per definire quale sia la soluzione preferibile (in relazione agli standard che la normativa vigente impone).

Nel primo capitolo verranno identificate le principali tipologie di pavimentazioni e i fenomeni che portano al degrado delle stesse. Verranno individuate inoltre varie soluzioni di pavimentazione attualmente in uso per confezionare rivestimenti impermeabili e direttamente carrabili per impalcati da ponte.

Nel secondo capitolo verrà descritta una tipologia tecnologicamente innovativa di pavimentazione. Tale soluzione consiste in rivestimenti a base polimerica dallo spessore contenuto, che vengono attualmente impiegati quali rivestimenti per impalcati da ponte. Essi risultano particolarmente validi perché rendono la superficie stradale, con un unico strato, perfettamente impermeabile e direttamente carrabile.

Il terzo capitolo tratterà della caratterizzazione dei materiali impiegati nella ricerca svolta, mentre nel quarto capitolo saranno descritti i protocolli di prova.

Il quinto capitolo vedrà la descrizione dei risultati ottenuti e dei fenomeni osservati, anche attraverso il confronto con altre soluzioni attualmente utilizzate per scopi analoghi. Nel sesto capitolo, infine, verranno discusse le conclusioni di questo lavoro di tesi.

## 1.2 I ponti e i loro impalcati

Il ponte è un'opera d'arte realizzata per mantenere la continuità di un tracciato stradale (e ferroviario) interrotto da ostacoli naturali o artificiali. Gli ostacoli che possono presentarsi sono di diverso tipo; intersezioni con corsi d'acqua, depressioni del territorio in prossimità di vallate o gole profonde oppure intersezioni con altri sistemi di trasporto (prevalentemente strade e ferrovie).

I ponti possono essere classificati in funzione di vari elementi che li caratterizzano. Con riferimento all'ostacolo da superare e limitandosi al campo stradale, i ponti si dividono in: viadotti, se l'ostacolo da superare è una vallata o una gola profonda, in sopraelevata (sono realizzate nei centri urbani quando si necessita di intersezioni a livelli sfalsati tra strade a scorrimento veloce), cavalcavia, quando l'attraversamento avviene a livelli sfalsati ma tra strade di importanza secondaria. Con il termine ponte si identificano nello specifico quelle infrastrutture realizzate per oltrepassare corsi d'acqua più o meno importanti, che intersecano il tracciato stradale.

La classificazione dei ponti viene fatta in funzione della destinazione d'uso. Si trovano quindi: ponti adibiti al traffico veicolare, ponti per il traffico ferroviario, ponti adibiti ad un traffico promiscuo (sia ferroviario che veicolare), ponti che permettono il trasporto di liquidi e passerelle pedonali.

I materiali impiegati per la loro realizzazione permettono di classificarli in: ponti in muratura, ponti in legno, ponti in acciaio, ponti in cemento armato.

Si trova infine una classificazione dei ponti in funzione della luce che caratterizza le campate: "tombino", se ha luci che raggiungono i 2-2.5 metri, "ponticello" se le luci arrivano ai 10 metri, "ponte" (propriamente detto), se le luci superano i 10 metri.

Una ulteriore classificazione si ha in funzione dello schema strutturale che caratterizza i ponti: ad arco, strallati ecc..

In genere i ponti sono composti da una serie di elementi portanti il cui compito è quello di trasmettere le sollecitazioni che gravano sulla struttura alle fondazioni, che a loro volta le scaricano sul piano d'appoggio. Uno degli elementi portanti più interessante ai fini del lavoro esposto è l'impalcato: questo elemento è la struttura portante sulla quale, una volta stesa un'adeguata pavimentazione, avviene il transito dei veicoli. La funzione degli impalcati è quella di ricevere le sollecitazioni prodotte dai carichi mobili e di trasmetterli alle strutture portanti sottostanti. Al contempo, tali strutture non potrebbero subire danni, poiché, di riflesso, verrebbe a deteriorarsi la pavimentazione, con conseguenti riduzioni di confort e di sicurezza.

I materiali normalmente impiegati sono acciaio e calcestruzzo armato (in particolar modo precompresso). La tendenza attuale è quella di costruire impalcati a sezione mista, caratterizzati cioè dall'unione di elementi in calcestruzzo e strutture in acciaio.

Un impalcato a sezione mista acciaio – calcestruzzo è composto da tre parti fondamentali:

- la trave in acciaio (a parete piana o reticolare),
- la soletta in calcestruzzo ( di spessore costante o aumentato in corrispondenza delle travi, in calcestruzzo normale o alleggerito, gettata direttamente in opera su lamiere grecate o su lastre di tipo predalle),
- i sistemi di collegamento tra i due elementi.

Da un punto di vista dei costi, la sezione mista risulta particolarmente competitiva per luci comprese tra i 40 e i 100 metri. Altri vantaggi di queste tipologie di impalcati sono: la leggerezza, la scarsa sensibilità ai cedimenti differenziati delle fondazioni, la rapidità e la facilità di esecuzione di impalcati continui, l'adattabilità alle luci e ai tracciati stradali e la buona durabilità [27].

Generalmente gli impalcati a sezione mista più utilizzati si dividono in due tipologie:

### **Impalcati a travata**



**Figura 1.1: esempio di impalcato a travata.**

La struttura dell'impalcato è costituita da travi principali e da traversi in acciaio a forma di "I" o reticolari con interasse compreso tra i 5 e gli 8 metri. Normalmente essi non sono solidali alla soletta, ma sono saldati o imbullonati agli irrigidimenti verticali delle travi principali [27].

## Impalcati a cassone

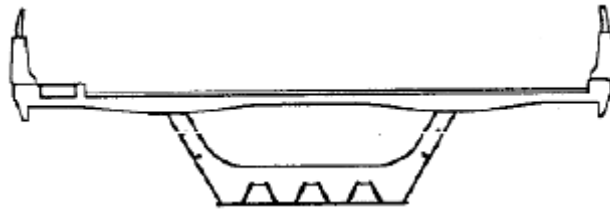


Figura 1.2: Esempio di impalcato a cassone.

Questo tipo di impalcato, che risulta più costoso del precedente, è costituito da una sezione in acciaio aperta superiormente, sulla quale viene poggiata e opportunamente collegata una soletta in calcestruzzo [27].

Esistono varie tipologie di impalcato che si differenziano per geometria e per materiale impiegato. Risulta quindi di fondamentale importanza conoscere, in fase di progettazione della pavimentazione, le caratteristiche di questo elemento. Una errata progettazione della pavimentazione può infatti produrre danni in termini di riduzione del confort e della sicurezza della marcia, portando al degrado, e quindi ad una minore efficienza, delle strutture portanti sottostanti la pavimentazione.

### 1.3 Le pavimentazioni

La pavimentazione stradale è una struttura piana, di spessore variabile a seconda dei casi e direttamente soggetta alle azioni dei veicoli.

La pavimentazione stradale deve svolgere tre funzioni fondamentali:

- garantire una superficie di rotolamento regolare e poco deformabile,
- Ripartire sul terreno (o impalcato) le azioni statiche e dinamiche dei veicoli, in modo tale da non determinare deformazioni permanenti dannose alla sicurezza e al confort di moto,
- Proteggere il corpo stradale dagli agenti atmosferici che possono provocare instabilità del piano viabile.

Queste funzioni sono generalmente soddisfatte mediante l'utilizzo di tre tipologie di pavimentazione [13].

**Pavimentazioni flessibili.** Sono costituite generalmente da quattro strati: strato d'usura, strato di collegamento (binder), strato di base ed una fondazione. Lo strato d'usura assieme al binder costituisce lo strato superficiale e generalmente ha uno spessore di

circa 7-12 cm complessivi; mentre il primo è realizzato per sopportare le azioni del traffico e del clima, resistere alle sollecitazioni verticali/tangenziali e a quelle di fatica, nonché assicurare impermeabilità e buona aderenza; il binder deve assicurare buona resistenza meccanica e a fatica. In linea generale la scelta dei materiali deve essere fatta utilizzando quelli migliori per lo strato superficiale scendendo, nei limiti dell'accettabile, di qualità per gli strati inferiori. Lo strato di base ha spessore generalmente di 15-20 cm, ha la funzione di ripartire sul terreno le azioni verticali e deve assicurare elevata resistenza meccanica e buona flessibilità. Lo strato di fondazione, avente uno spessore di 30-35 cm, ha la funzione di trasmettere i carichi e costituisce la superficie regolare di stesa dello strato di base [13].

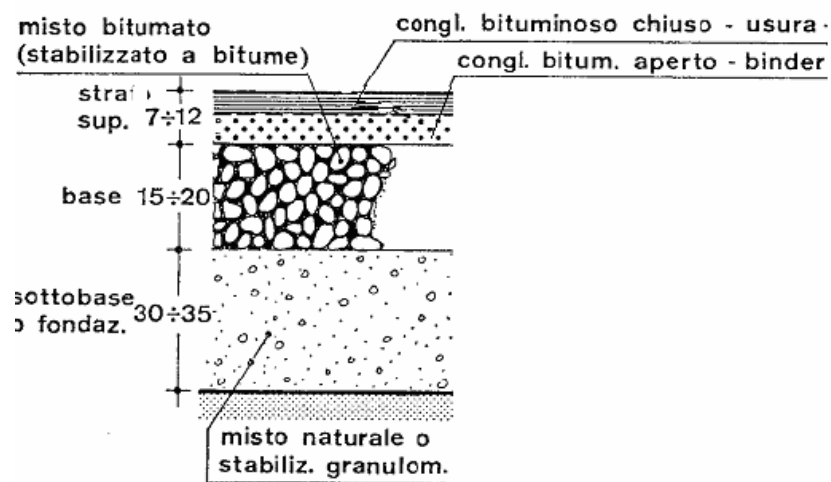


Figura 1.3: esempio di stratificazione pavimentazione flessibile.

**Pavimentazioni semirigide.** Presentano, in aggiunta agli strati della sovrastruttura flessibile, uno strato di misto cementato interposto tra la fondazione e lo strato di base; tale strato diminuisce la deformabilità, aumentando la resistenza a fatica e quindi la vita utile della pavimentazione [13].

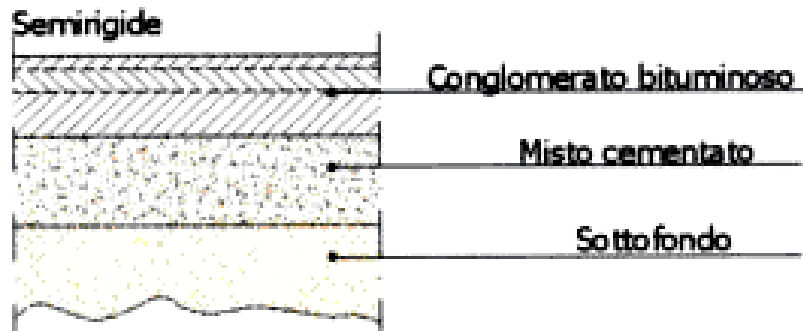


Figura 1.4: stratigrafia pavimentazione semirigida.

**Pavimentazioni rigide.** Sono realizzate da lastre in calcestruzzo, armato e non armato, dotate di forte resistenza al taglio e di discreta resistenza flessionale. Generalmente sono impiegate su strade sottoposte ad elevata intensità di traffico. Una pavimentazione di questo tipo è composta da una lastra in calcestruzzo (armato o non armato), uno strato di base in misto cementato ed uno strato di fondazione [13].



Figura 1.5: stratigrafia pavimentazione rigida.

Le pavimentazioni per ponti e viadotti, pur assicurando le funzioni viste, non sono costituite da sezioni simili a quelle esposte. Infatti gran parte delle funzioni delle pavimentazioni sono assicurate dall'impalcato sul quale poggiano, demandando al solo strato superficiale, affiancato a sistemi impermeabilizzanti, la funzione di rendere la superficie carrabile ed impermeabile.

Le pavimentazioni stese su impalcati da ponte, devono soddisfare le seguenti esigenze:

- antisdrucchiolevolezza,
- resistenza meccanica,
- resistenza agli attacchi chimici,
- resistenza ai cicli di gelo e disgelo,
- assenza di irregolarità,
- buon comfort di marcia,
- durabilità,
- adeguata capacità di smaltimento delle acque.

A queste caratteristiche primarie, vista la particolare struttura sulle quali poggiano, bisogna introdurre delle altre esigenze da soddisfare:

- impermeabilità,
- rapidità della posa in opera e la veloce transitabilità .

Mentre la prima esigenza risulta essenziale per garantire la conservazione e/o la riduzione degli attacchi chimici alle strutture sottostanti la pavimentazione da parte di agenti esterni, la seconda risulta essere importante per ridurre al minimo la necessità di interrompere il traffico veicolare.

Tradizionalmente, la risposta a queste diverse necessità si è tradotta nell'adozione di provvedimenti tra loro distinti. La protezione della struttura è da sempre avvenuta mediante l'utilizzo di membrane di diversa tipologia. La necessità di realizzare una pavimentazione ha invece trovato risposta nei tradizionali manti d'usura in conglomerato bituminoso.

Particolare attenzione, vista l'esigenza di rendere impermeabile la struttura, riveste l'adesione tra l'impalcato e la pavimentazione stessa. Decenni di sperimentazioni e conoscenze acquisite sul campo hanno evidenziato come le membrane utilizzate, a causa della loro debole adesione ai sottostrati e della loro insufficiente resistenza alle dilatazioni termiche, abbiano perso troppo spesso la loro integrità e abbiano mancato conseguente il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Con le pavimentazioni sottili a base polimerica invece vengono soddisfatte le due esigenze di protezione e percorribilità, accoppiate in un unico strato e di spessore più contenuto. Queste pavimentazioni, allo stato attuale, possono quindi essere considerate una valida alternativa alle più tradizionali pavimentazioni in conglomerato bituminoso.

Riguardo all'estradosso, assume fondamentale importanza lo smaltimento di tutti i liquidi che naturalmente o artificialmente vengono ad interessare la superficie. A questo scopo la pavimentazione svolge un ruolo fondamentale. Queste sostanze, come ad esempio acque meteoriche, combustibili, solventi ecc., raggiungono gli elementi aventi funzione portante, e ne possono causare il precoce degrado, con prevedibili conseguenze negative. Il piano carrabile deve garantire quindi assoluta impermeabilità, nonché essere dotato di pendenze adeguate a convogliare i liquidi verso i dispositivi di smaltimento.

#### 1.4 le azioni sulle pavimentazioni e sugli impalcati e il degrado dei materiali da costruzione.

Gli impalcati stradali e le pavimentazioni sono soggetti nella loro vita utile a molteplici azioni, di tipo chimico e fisico. Tra queste azioni vi possono essere: cicli di gelo e disgelo, azioni meccaniche ripetute e di notevole intensità (passaggio mezzi pesanti), attacco chimico di diversa natura.

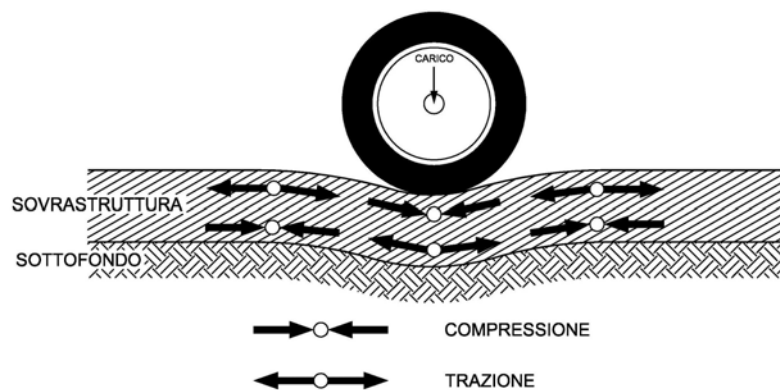


Figura 1.6: Esempio di sollecitazioni.

Tali azioni producono sulla pavimentazione diverse tipologie di danno quali deformazioni permanenti (ormaiamento), rotture a fatica (di tipo botton up o top down) rottura per fenomeni termici. I danni prodotti si palesano sulla pavimentazione attraverso la formazione di fessure, avvallamenti, rugosità superficiale inadeguata a garantire aderenza e con formazione di buche.

Causa di tali danneggiamenti sono per lo più dovute ad errori progettuali che portano ad utilizzare pavimentazioni aventi spessore e resistenze meccaniche insufficienti, o addirittura materiali non idonei per soddisfare determinate esigenze. Le principali cause di danno per le pavimentazioni sono:



### **Ormaiamento.**

Questo tipo di danno si identifica nelle deformazioni permanenti causate dall'alta temperatura e dal traffico, per lo più pesante, in transito. Si presentano sottoforma di depressioni longitudinali, in corrispondenza del passaggio dei pneumatici, accompagnate da sollevamenti laterali. L'effetto "solco" prodotto da tali deformazioni può provocare sbandamenti e perdite del controllo di guida per i mezzi in transito. Le depressioni inoltre possono diventare sede di accumulo di acque meteoriche e/o sostanze aggressive, portando ad un precoce degrado la pavimentazione. Le fasi che compongono il fenomeno dell'ormaiamento sono essenzialmente due. Una prima fase consistente nel costipamento della pavimentazione attraverso la saturazione dei vuoti, nell'immediato periodo successivo l'apertura al traffico. Una seconda fase invece è caratterizzata dallo scorrimento del materiale all'interno degli strati con la formazione di depressioni verticali accompagnate da sollevamenti laterali [12].



**Figura 1.7: Esempio di danni sulla pavimentazione prodotti dall'ormaiamento.**

### **Rotture a fatica**

La fatica si manifesta sulla pavimentazione con la formazione di fessure: il passaggio ripetuto di veicoli causa la flessione degli strati, i quali raggiunta la resistenza massima iniziano a fessurarsi. La rottura a fatica può manifestarsi attraverso due meccanismi, qui brevemente descritti.

### **Rottura a fatica tipo “bottom-up”.**

Si tratta di un tipo di rottura che nasce alla base degli strati legati e si propaga in superficie per effetto del passaggio ripetuto dei veicoli.

In seguito ai ripetuti passaggi veicolari, si generano negli strati più profondi della pavimentazioni tensioni e deformazioni che causano le prime fratture per il superamento del limite di resistenza sopportabile dal materiale. Con il proseguo delle sollecitazioni, indotte dal traffico in transito, tali fratture si propagano fino ad interessare lo strato superficiale. In seguito a tale danno, la pavimentazione si presenta in superficie caratterizzata da fessure inizialmente solo lungo la traiettoria dei pneumatici, per poi diffondersi anche nelle zone limitrofe, formando una rete a maglie strette, detta “a pelle di coccodrillo”. Le cause di tali danni sono: spessori troppo sottili degli strati, impiego di materiali poco resistenti a trazione o non idonei a sopportare i carichi veicolari che interessano la pavimentazione in fase di esercizio [12].

### **Rottura a fatica tipo “top-down”**

Rispetto al caso precedente, la rottura si innesca in superficie e si propaga successivamente verso il basso: la zona maggiormente interessata da questa rottura è la zona di contatto ruota-pavimentazione e quella subito adiacente.

La parte di pavimentazione a contatto con la ruota è soggetta a compressione, mentre i conci adiacenti, per coesione del materiale, sono soggette a trazione indiretta. Le sollecitazioni dovute ai ripetuti passaggi dei veicoli producono delle fessurazioni in prossimità delle zone soggette agli stati tensionali menzionati; l'invecchiamento della pavimentazione riduce ulteriormente la resistenza provocando un veloce sviluppo del danno [12].

### **Rottura per fenomeni termici**

La rottura per fenomeni termici si manifesta sulla pavimentazione attraverso fessure perpendicolari all'asse stradale. Le fessure così prodotte sono causate da contrazioni della pavimentazione dovuta a basse temperature di esercizio, ad irrigidimenti della superficie e/o oscillazioni termiche giornaliere.

A seconda della causa che innesca la rottura si possono definire “Low Temperature Cracking”, le fratture prodotte alle basse temperature, e “Thermal fatigue cracking”, quelle dovute a cambiamenti termici ciclici [12].

A condizionare la vita utile della pavimentazione concorrono anche le azioni

ambientali sui materiali impiegati. Queste possono infatti provocare danni alla pavimentazione e/o al supporto sulla quale poggiano attraverso azioni chimiche. al trasposto di sostanze aggressive e non attraverso la porosità del materiale, per variazioni di umidità e temperatura per formazione di azioni espansive causate dall'incompatibilità dei materiali utilizzati.

Le conseguenze dell'interazione dei materiali con l'ambiente possono indurre degradi tali da causare perdite prestazionali degli stessi, e l'impossibilità di continuare ad utilizzare la struttura per le funzioni per le quali era stata progettata.

Risulta evidente la necessità di considerare con attenzione le problematiche prodotte dall'ambiente sui materiali utilizzati. Ponendo particolare attenzione all'acciaio e al calcestruzzo, si possono tenere in considerazione i seguenti problemi: l'acciaio, esposto all'ossigeno e all'umidità dell'aria, tende a formare ruggine che con il tempo può compromettere le capacità strutturali. L'acciaio deve per questo essere sottoposto a trattamenti particolari come la verniciatura e la zincatura.

Il calcestruzzo armato, invece, può essere soggetto ad una serie di fenomeni degradanti come ad esempio la disgregazione causata da cicli di gelo e disgelo e il fenomeno della carbonatazione. Quest'ultima, come noto, consiste nel fatto che l'anidride carbonica presente nell'aria può penetrare nella massa cementizia attraverso i pori e le fessure diminuendone il pH fino ad intaccare il film di ossido che protegge le armature. Quando questo avviene, ha inizio la formazione della ruggine che può portare con il tempo alla rottura del copriferro e alla conseguente esposizione dell'armatura.

L'impalcato può infine essere soggetto ad una azione chimica molto aggressiva cui le altre componenti del ponte non sono necessariamente sottoposte: i sali disgelanti. Questi, veicolati dall'acqua, possono penetrare nel calcestruzzo con diversi effetti negativi, tra i quali la passivazione dei ferri d'armatura e la formazione di prodotti di reazione espansiva.

È importante quindi la difesa dei materiali dalle azioni elencate, mediante impermeabilizzazione della struttura, essendo l'acqua e/o il diretto contatto con sostanze esterne il principale veicolo di deterioramento. In questo senso, la pavimentazione riveste un ruolo cruciale: deve esserci una simbiosi tra pavimentazione e struttura, in modo tale da assicurare in ogni punto perfetta adesione e impermeabilità, oltre alle principali funzioni proprie del struttura e della pavimentazione.

In sede di progetto infatti i materiali da costruzione vengono scelti in funzione delle prestazioni loro richieste nella struttura. Si stabiliscono successivamente le proprietà

meccaniche, in quanto il loro comportamento assume un ruolo primario nella progettazione. Vengono poi formulate le prescrizioni per garantire il raggiungimento delle caratteristiche richieste nel progetto. Durante la costruzione sono previsti dei controlli di qualità sia per i materiali che per la loro messa in opera (viene programmata la manutenzione con tecniche di ispezione e monitoraggio).

### **1.5 Tecniche di impermeabilizzazione**

L'impalcato, viste le numerose interazioni negative che può avere con l'ambiente esterno, deve essere protetto e la pavimentazione assolve a questa funzione. Esistono attualmente diverse tipologie di soluzioni che garantiscono la protezione dell'impalcato, di cui alcune sono brevemente illustrate di seguito.

1) La tecnica, inizialmente adottata, fu quella dell'utilizzo di un quantitativo di bitume elevato all'interno di conglomerati bituminosi che venivano poi stesi; i vantaggi ottenuti con questo accorgimento sono:

- buona resistenza all'acqua,
- buona resistenza alla fatica,
- buona resistenza all'ossidazione.

Gli svantaggi invece riscontrati sono:

- suscettività termica,
- fenomeni di deformazione permanente.

2) Il progresso tecnologico ha portato a considerare anche l'accoppiamento tra strati in conglomerato bituminoso accoppiati con guaine di varia natura (alle quali vengono affidate le funzioni di impermeabilizzazione della sottostruttura).

Tali elementi consistono essenzialmente in membrane di matrice bituminosa (guaine), o da impermeabilizzazioni polimeriche spruzzate in opera. Queste due soluzioni hanno in comune il fatto di dover essere posate direttamente sull'estradosso dell'impalcato, per poi essere ricoperte dal manto d'usura.

Dovendo essere così impiegate, devono soddisfare le seguenti esigenze:

- omogeneità e continuità della funzione protettiva in ogni singolo punto,
- adesione al supporto ed alla sovrastante pavimentazione,
- sufficiente elasticità,

resistenza alle aggressioni tipiche dell'ambiente,  
resistenza agli stress di natura termica, soprattutto indotti dalla successiva stesura del conglomerato bituminoso,  
tempo di stesa breve.

3) I rivestimenti in calcestruzzo armato. Essi sono usati sia come manto di protezione che come rinforzo strutturale: consistono in una lastra in calcestruzzo (confezionato con basso rapporto acqua/cemento) di spessore pari a circa 10 cm, con armatura longitudinale e trasversale.

Questa lastra permette di proteggere l'impalcato grazie al suo spessore e alla bassa permeabilità. Risulta del tutto evidente come però il peso che grava sulla struttura non sia affatto contenuto. Ulteriore svantaggio per tale soluzione è il tempo di realizzazione.

4) Un altro tipo di soluzione utilizzata consiste in rivestimenti, dello spessore di 3/4 cm, in calcestruzzo non armato modificato da polimeri. Tale modifica può avvenire in due modi: sostituendo una parte d'acqua d'impasto con del lattice, impregnando i pori di un calcestruzzo indurito con un monomero.

Con questo trattamento si ottengono diversi risultati:

- maggiore resistenza a trazione,
- maggiore resistenza a flessione,
- maggiore resistenza a cicli gelo e disgelo,
- maggiore resistenza alle sostanze aggressive,
- riduzione della permeabilità.

5) Tra le tipologie di pavimentazioni per impalcati di ponte si possono annoverare anche le impermeabilizzazioni polimeriche, che assolvono problematiche non risolte con l'utilizzo di membrane, quali:

- adesione ai supporti contenenti umidità,
- assicurare continuità/omogeneità all'azione impermeabilizzante.

Queste tecniche di impermeabilizzazione dell'impalcato sono sostanzialmente costituite da un materiale resinoso bi-componente, il quale permette di assicurare elevata protezione all'azione delle acque meteoriche e agli agenti aggressivi che possono interessare l'impalcato.

Il materiale viene steso con idonee attrezzature che permettono la posa del materiale partendo dalla miscelazione automatica dei componenti separati e il trattamento continuo di superfici verticali e angoli.

Per quanto riguarda l'adesione e/o altri problemi connessi, la preparazione delle superfici riveste un ruolo essenziale nell'interazione, a lavorazione conclusa, tra impalcato e struttura coprente.

Le superfici devono essere prive di materiali incoerenti, di ferri d'armatura emergenti, di residui di impermeabilizzazioni preesistenti.

A differenza delle soluzioni con membrana classica, non è necessario che la superficie risulti essere completamente asciutta: il sistema può essere infatti utilizzato anche su supporti umidi. La pulizia della superficie può avvenire tramite idrolavaggio e all'occorrenza essere trattata con idroscaffitura. Generalmente l'adesione, in presenza di umidità, è garantita dall'utilizzo di un primer.

Le tecniche 3 e 4 hanno come obiettivo quello di aumentare la densità del calcestruzzo diminuendone la porosità, in modo da ridurre il più possibile la permeabilità del materiale. Entrambi i metodi soffrono del difetto di gravare notevolmente sulla struttura a causa dell'aumento del peso proprio della stessa, nonché di richiedere tempi di realizzazione spesso non compatibili con le esigenze del traffico.

La tecnica 2 prevede una soluzione composta da uno strato di usura in conglomerato bituminoso poggiato su una membrana impermeabilizzante, che, a sua volta, è ancorata all'impalcato. L'azione impermeabilizzante è affidata alla membrana stesa sull'impalcato, mentre la funzione carrabile è assicurata da uno strato d'usura dello spessore di circa 5-6 cm (steso al di sopra della membrana).

Le membrane utilizzate sono costituite da bitume modificato, per lo più, con elastomeri termoplastici SBS presenti in differenti quantità a seconda dell'applicazione. E' poi presente un'armatura costituita tipicamente da un geotessile "non tessuto" o da polietilene (l'armatura a seconda delle specifiche esigenze, può variare in quantità e tipologia).

Le superfici devono essere stagionate e presentarsi sane, asciutte, esenti da oli, grassi, polvere. Prima della posa in opera della membrana, le superfici devono essere pulite mediante spazzolatura e successiva soffiatura con aria compressa. I punti singolari dell'impalcato devono essere sigillati con malte e stucchi epossidici. A tutto questo deve seguire la stesa di un adeguato strato di primer.

Esistono “guaine solide”, che vengono posate in opera tramite operazioni di incollaggio (fusione superficiale con fiamma all'intradosso), e “guaine liquide”, che vengono stese sull'impalcato mediante spruzzatura (dopo la miscelazione con un adeguato catalizzatore). Lo spessore in entrambi i casi si aggira sui 4-5 mm.

Sebbene la tecnologia si sia evoluta nel tempo, questo metodo di impermeabilizzazione soffre di alcuni problemi, che verranno brevemente descritti di seguito:

- La scarsa capacità di garantire la continuità e l'omogeneità della protezione del bordo (cordolo dell'impalcato),
- il fatto che le membrane devono essere protette dai carichi concentrati soprattutto nelle zone a traffico intenso (a questo scopo dovrebbe essere previsto uno strato di collegamento tra membrana e manto d'usura, che non sempre viene realizzato per ragioni economiche e di velocità del cantiere),
- la vita utile che non dovrebbe superare quella del manto superficiale (durante la sua sostituzione mediante fresatura viene inevitabilmente danneggiata l'impermeabilizzazione),
- la posa della membrana in momenti non adatti (ad esempio, un supporto contenente umidità), creando una cattiva adesione,
- la scarsa resistenza alla perforazione, che può portare a danneggiamenti permanenti della membrana nella fase di posa in opera degli strati superiori.

Le impermeabilizzazioni polimeriche sono nate per colmare alcune delle lacune appena esposte, quali l'adesione ai supporti contenenti umidità (condizione da tenere in considerazione presentandosi spesso in cantiere) e la continuità dell'azione impermeabilizzante.

Questo metodo di impermeabilizzazione è molto valido dal punto di vista della continuità ed omogeneità della protezione che garantisce. Lo svantaggio che reca con sé è di essere un sistema tipicamente rigido e quindi non adatto a sopportare le sollecitazioni indotte dagli spostamenti e dalle variazioni dimensionali tipiche di queste strutture.

E' evidente quindi come sia preferibile vedere con interesse le nuove tecnologie che lo sviluppo mette a disposizione, senza staccarsi totalmente dalle soluzioni classiche, e puntando a soluzioni innovative che risolvano, o per lo meno riducano, i problemi che le soluzioni finora impiegate non hanno saputo eliminare e/o ridurre in maniera apprezzabile.

Il mondo dell'ingegneria richiede, e continuerà a richiedere, soluzioni che risultino

essere il perfetto connubio tra soluzioni classiche ed innovazione tecnologica. Tale richiesta è volta al raggiungimento dell'efficienza, intesa come perfetto bilanciamento tra massima sicurezza dell'opera e riduzione dei costi per raggiungerla (garantendo sempre gli standard prestazionali che le normative vigenti richiedono).

L'evoluzione scientifica e tecnologica non ha mancato d'investire anche il mondo dell'Ingegneria Civile con l'introduzione di materiali (finora non studiati) dotati di caratteristiche innovative. Questo ha sicuramente influito nella scelte delle tecniche e dei materiali da impiegare in funzione delle esigenze a cui far fronte.



# 2 I Rivestimenti Polimerici Sottili

## 2.1 Introduzione

Le pavimentazioni per impalcato da ponte devono essere progettate per rispondere a diverse necessità, tra le quali si annoverano: un'adeguata tessitura superficiale (per aumentare l'aderenza e limitare fenomeni di acquaplaning), un'idonea resistenza meccanica (atta a sopportare stress termici e dovuti ai carichi del traffico), e una buona protezione dell'impalcato.

Numerose soluzioni, per rispondere a queste esigenze, sono state proposte negli anni. Dalle soluzioni più datate, ma non meno efficaci, di lastre in calcestruzzo posate sopra l'impalcato, a soluzioni più attuali di manti d'usura in conglomerato bituminoso accoppiato a membrane per assicurare l'impermeabilità. Un sempre più diffuso impiego trovano oggi i rivestimenti polimerici sottili, largamente impiegati specialmente in America, per le buone caratteristiche di qualità e sicurezza, che assicurano una buona marcia e una adeguata protezione all'impalcato.

Tale soluzione è composta da un unico strato, di spessore ridotto, il quale steso sull'impalcato, assicura impermeabilità e allo stesso tempo risulta essere direttamente carrabile. La natura polimerica del legante utilizzato in queste applicazioni, comporta però notevoli differenze di comportamento del sistema rispetto alle più tradizionali soluzioni in conglomerato bituminoso.

Lo strato sottile steso sull'impalcato è un conglomerato ottenuto dalla miscelazione di un legante polimerico e di un aggregato; il legante, ottenuto a sua volta dalla polimerizzazione di monomeri o dalla miscelazione di una resina con un catalizzatore, vincola l'aggregato conferendo al conglomerato polimerico risultante ottime caratteristiche di impermeabilità e resistenza meccanica.

Il conglomerato così prodotto, viene poi steso sull'impalcato e, una volta maturato, risulta direttamente carrabile ed impermeabile.

Rendere impermeabile una pavimentazione serve a proteggere dagli attacchi esterni l'impalcato sottostante con conseguenti vantaggi in termini di durabilità dello stesso.

L'impermeabilità deve essere assicurata in modo uniforme e continuo su tutta la superficie; non devono esserci punti critici dovuti a fessure o perforazioni, le quali altrimenti diventerebbero subito strada preferenziale da parte di sostanze aggressive, provocando il degrado delle strutture sottostanti e della pavimentazione stessa.

L'impermeabilità non si assicura quindi stendendo una pavimentazione che non faccia passare l'acqua, ma utilizzando pavimentazioni, che per le loro caratteristiche, risultano impermeabili e soprattutto compatibili con la struttura sulla quale poggiano; tali pavimentazioni devono inoltre essere idonee a sopportare gli attacchi derivanti dalle sostanze aggressive e resistere agli stress termici e di carico in fase di esercizio.

## **2.2 I rivestimenti polimerici sottili**

I rivestimenti polimerici sottili sono pavimentazioni utilizzate generalmente sugli impalcati per ponti e viadotti, in quanto assicurano impermeabilità alle strutture sottostanti e risultano direttamente carrabili.

Tali rivestimenti trovano attualmente varie applicazioni:

- Su calcestruzzi per impalcati caratterizzati da alta permeabilità che necessitano di impermeabilizzazione e pavimentazione.
- Impalcati da ponte che necessitano di un miglioramento delle caratteristiche superficiali.
- Protezione di nuovi impalcati.
- Impermeabilizzazione e pavimentazione di impalcati che non possono subire significativi incrementi di peso proprio.
- Manutenzioni di ponti nei quali sia necessario diminuire il più possibile la durata del cantiere e la conseguente interruzione del traffico.
- Calcestruzzi di impalcato, più o meno fessurati, che necessitano di impermeabilizzazione e pavimentazione.
- Ambienti particolarmente aggressivi o nei quali sia comune l'uso di sali disgelanti.
- Impalcati che non presentino numerose od estese zone fortemente degradate.

Le tipologie di applicazione dei rivestimenti polimerici sottili trova spazio quindi sia nelle situazioni di ripristino e manutenzione, sia come pavimentazioni su nuovi impalcati.

### 2.3 Il supporto: preparazione del piano di posa.

L'impermeabilità del supporto può essere assicurata solo prevedendo una perfetta adesione tra pavimentazione ed impalcato. Se tale situazione non si verifica, il possibile ristagno d'acqua che ne consegue nelle zone mal collegate, porta inevitabilmente ad una inefficienza del sistema impermeabilizzante. La non perfetta adesione nel tempo può essere dovuta a diversi fattori come ad esempio:

- variazioni dimensionali diverse tra impalcato e rivestimento indotte da variazioni termiche. Tali variazioni producono degli stati tensionali, che, concentrandosi negli strati più deboli, portando alla formazione di fessure e/o distacchi.
- Presenza di umidità nel supporto. Questa deve essere ridotta specialmente quanto si usano membrane bituminose direttamente stese sull'impalcato. L'umidità presente nel supporto, in seguito a variazioni di temperatura, trasuda portando a distacchi localizzati della membrana stessa con conseguente formazione di punti critici suscettibili all'attacco delle sostanze aggressive.
- Carichi da traffico e sforzi di taglio indotti da veicoli in frenata/accelerazione/sterzata.
- Stato superficie di posa non idonea alla stesura del rivestimento.

L'adesione tra il rivestimento e l'impalcato dipende da vari fattori. Un importante ruolo, per un'ottima adesione, è dovuto allo stato del piano di posa prima della stesura del rivestimento. Particolare cura dovrà essere infatti posta nella preparazione delle superfici da impermeabilizzare; eventuali punti singolari dovranno essere stuccati e sigillati con idonee malte o stucchi epossidici. Dovranno avere adeguate pendenze per un regolare smaltimento delle acque e dovranno presentarsi: sane, regolari, perfettamente pulite, assenti da oli/grassi/polveri, prive di baciocca o di malta cementizia, di prodotti disarmanti e di preesistenti impermeabilizzazioni.

Vengono riportate di seguito le più comuni tecniche di pulizia e preparazione del piano di posa sono.

- *Shotblasting* ("pallinatura"): ovvero una procedura di irruvidimento e di rimozione di tutti i contaminanti presenti su una superficie, realizzata con l'ausilio di un macchinario che getta ad alta velocità particelle metalliche abrasive sulla superficie stessa.
- *Gritblasting* ("Sabbatura"): è un procedimento analogo che utilizza sabbia al posto delle particelle metalliche e che però ha il difetto di non riuscire a

rimuovere precedenti strati di impermeabilizzante; ha il vantaggio però di arrivare in punti dove la “pallinatura” non riesce ad arrivare.

- *Idroscarifica*: utilizza getti d’acqua ad altissima pressione; l’uso di questa metodologia implica che la successiva stesa del conglomerato debba avvenire dopo un tempo sufficiente a permettere alla superficie di asciugarsi
- *Scarifica*: consiste nella fresatura delle superfici.

L’applicazione dei rivestimenti polimerici viene fatta generalmente su supporti in acciaio o in calcestruzzo; in questo secondo caso, nella preparazione della superficie di posa, bisogna distinguere se il supporto sia stato appena gettato o se invece sia un supporto esistente (messo a nudo ad esempio a seguito di demolizioni di pavimentazioni precedenti).

I supporti così distinti si differenziano sia per la quantità di umidità contenuta, sia per la diversa apparenza superficiale. Nel primo caso la superficie si presenta liscia ed omogenea, priva di residui di precedenti impermeabilizzazioni. Nel caso di un supporto esistente la superficie si presenta invece scalinata, con porzioni di calcestruzzo distaccate o frantumate (a causa di ristagni di acque inquinate), porzioni di alcuni ferri in vista, avvallamenti riempiti delle precedenti impermeabilizzazioni.

Una adeguata preparazione di un supporto dopo un getto (sia esso il getto della soletta o un ripristino con betoncino a ritiro compensato) può essere ottenuto come segue:

- Sabbatura con il solo fine di eliminare il lattice di cemento; si può provvedere anche con il solo idrolavaggio.
- Ripristino planarità o rugosità.
- Soffiatura dell’intera superficie.

La preparazione invece di un supporto in seguito alla fresatura e/o demolizione della pavimentazione precedente può essere fatto come segue:

- “Pallinatura” del supporto.
- Ripristino planarità o rugosità mediante opportune resine/malte epossidiche o malte cementizie.
- Soffiatura dell’intera superficie.

Devono inoltre essere stuccati ed opportunamente impermeabilizzati i punti interessati da discontinuità quali cordoli, giunti di dilatazione, attacchi alle caditoie ecc..

Un’ottima impermeabilizzazione prevede un ripristino della pavimentazione, eliminando tutte le fessure, le quali possono essere causa di infiltrazione da parte degli

agenti aggressivi esterni. Le indicazioni dell'America Concrete Institute consigliano di riparare tutte le fessure con ampiezza superiore a 1mm.

E' opportuno verificare sia la resistenza del calcestruzzo sia l'umidità in esso contenuta. Relativamente alla resistenza del calcestruzzo la prova che si svolge sull'impalcato è una prova di resistenza a trazione. Un disco di acciaio viene incollato alla superficie da testare con un adesivo a presa rapida e successivamente messo in trazione verso l'alto con una opportuna apparecchiatura. Se la rottura avviene per una tensione inferiore a 1 MPa e a profondità inferiore a 6.4 mm, il calcestruzzo va sostituito con uno che garantisca maggiore resistenza; se la rottura avviene per una tensione compresa tra 1 e 1.7 MPa, spetta ai tecnici decidere se la preparazione della superficie possa procedere con le fasi successive ed il rivestimento possa essere posato, o se sono necessarie riparazioni. Se invece la rottura avviene per tensioni superiori a 1.7 MPa la superficie è idonea.

Generalmente l'umidità ammessa nel supporto, per poter procedere alla posa dell'impermeabilizzante, deve essere inferiore al 4%; un metodo di prova utile per valutare l'umidità del supporto è il metodo del carburo di calcio. Tale prova può essere eseguita direttamente sul campo prelevando della polvere di cemento mediante trapanatura del supporto (profondità circa 20 mm) la quale viene poi pesata con una bilancia di precisione e inserita in un apposito contenitore; l'umidità libera presente nel campione reagisce con il carburo di calcio contenuto nel reagente inserito, producendo un gas di acetilene: L'aumento di pressione all'interno del contenitore è direttamente proporzionale alla quantità d'acqua contenuta e viene misurata da un manometro pre-calibrato in scala. Viene quindi così valutata la percentuale di umidità del campione.

Le superfici di posa, in seguito alle procedure sopra esposte, risultano idonee ad ospitare il rivestimento che verrà su di esse posato.

#### **2.4 il conglomerato polimerico: resine ed aggregati.**

Il conglomerato che costituisce le pavimentazioni polimeriche sottili è ottenuto dalla miscelazione di un legante polimerico con un aggregato o miscela di aggregati. Il binder usato è generalmente una resina, scelta in funzione delle necessità alle quali deve soddisfare il conglomerato polimerico risultante.

### 2.4.1 Le resine.

Le resine impiegate per la definizione del conglomerato sono di diverso tipo; quelle più utilizzate sono:

- resine epossidiche
- resine poliesteri.
- resine metacriliche.
- resine poliuretaniche.

#### Resine Epossidiche [1]

Un legante costituito da resine epossidiche è caratterizzato da:

- elevate proprietà di adesione.
- bassa viscosità
- basso modulo elastico.
- alta resistenza meccanica.
- ridotto ritiro in fase di indurimento.

Di seguito una tabella riassuntiva delle più comuni proprietà di tali resine:

<b>Legante Epossidico</b>		
<b>Fase lavorabile</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Viscosità	200-2000*106 Pa*s	ASTM D2393
Gel-time <sup>1</sup>	10-60 min	AASHTO T237
Pericolosità	Medio/Bassa	-
Flash-point <sup>2</sup>	Oltre 200° C	-
<b>Indurimento avvenuto</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Legame con l'impalcato	Min. 7 MPa	ASTM C882
Coefficiente di dilatazione termica	5-9*10 <sup>-5</sup> ° C <sup>-1</sup>	ASTM D696
Resistenza a trazione	Min. 14 MPa	ASTM D638
Allungamento	Min. 30 %	ASTM D638
Modulo di elasticità	4-8,3*10 <sup>2</sup> MPa	ASTM D638 ASTM D695
Ritiro da indurimento	0,02-0,08 %	DuPont

**Figura 2.1: Proprietà legante epossidico.**

<sup>1</sup> Intervallo di tempo di lavorabilità del composto.

<sup>2</sup> Temperatura alla quale il materiale incomincia a vaporizzare.

I sistemi epossidici riescono a sviluppare delle elevate forze di adesione con diverse tipologie di supporti, anche senza utilizzo di primer. Il modulo elastico contenuto si traduce in un'ottima attitudine ad assecondare i movimenti e le variazioni dimensionali delle strutture.

Resistono agli agenti aggressivi e possono essere applicati anche su supporti umidi. Presentano inoltre, miscelate con l'aggregato, un'ottima resistenza al fuoco.

### Resine Poliestere [1]

Sono leganti polimerici bi-componenti ottenuti dalla miscelazione di resina con un catalizzatore (questa componente influenza molto le proprietà del composto finale); tra le principali caratteristiche troviamo:

- buona resistenza all'acqua
- resistenza alle più comuni sostanze aggressive
- presentano criticità se utilizzate su supporti con elevata presenza di alcalinità.
- È necessario sempre l'utilizzo del primer per una migliore adesione.

<b>Legante poliestere</b>		
<b>Fase lavorabile</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Viscosità	100-400*10 <sup>6</sup> Pa*s	ASTM D2393
Gel-time	10-60 min	AASHTO T237
Pericolosità	Elevata	-
Flash-point	Sotto 38° C	-
<b>Indurimento avvenuto</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Legame con l'impalcato	Min. 7 MPa	ASTM C882
Coefficiente di dilatazione termica	36-90*10 <sup>-5</sup> ° C <sup>-1</sup>	ASTM D696
Resistenza a trazione	14 MPa	ASTM D638
Allungamento	Min. 30 %	ASTM D638
Modulo di elasticità	2,4-6,2*10 <sup>2</sup> MPa	ASTM D638 ASTM D695
Ritiro da indurimento	1-3 %	DuPont

Figura 2.2: proprietà legante poliestere.

## Resine Metacriliche [1]

I leganti metacrilici sono sistemi bi-componenti costituiti dalla miscelazione di resine con un catalizzatore; il catalizzatore come per le resine poliesteri appartiene alla famiglia dei perossidi organici (sostanze molto pericolose per il rischio di esplosione e per le quali è consigliata la conservazione in ambienti protetti e freschi).

Le principali caratteristiche sono:

- basso modulo elastico
- buona resistenza all'acqua
- resistenza agli agenti aggressivi con eccezione dei solventi.
- È necessario l'utilizzo del primer e la posa su supporti asciutti per garantire una buona adesione.

<b>Binder Metacrilato</b>		
<b>Fase lavorabile - monomeri</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Viscosità	1-50*10 <sup>6</sup> Pa*s	ASTM D2393
Gel-time	20-40 min	AASHTO T237
Pericolosità	Elevata	-
Flash-point	Sotto 38° C	-
<b>Fase lavorabile – soluzione di polimeri in monomeri</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Viscosità	250-1700*10 <sup>6</sup> Pa*s	ASTM D2393
Gel-time	20-40 min	AASHTO T237
Pericolosità	Elevata	-
Flash-point	Sotto 38° C	-
<b>Indurimento avvenuto</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Legame con l'impalcato	7-14 MPa	ASTM C882
Coefficiente di dilatazione termica	22-54*10 <sup>-5</sup> ° C <sup>-1</sup>	ASTM D696
Resistenza a trazione	3-8 MPa	ASTM D638
Allungamento	100-200 %	ASTM D638
Modulo di elasticità	Max. 7*10 <sup>2</sup> GPa	ASTM D638 ASTM D695
Ritiro da indurimento	1-2 %	DuPont

**Figura 2.3: Proprietà legante metacrilico.**



## Resine poliuretatiche [1]

Sono resine poco utilizzate per confezionare pavimentazioni sottili direttamente carrabili. Resistono bene ai più comuni agenti aggressivi quali solventi e combustibili.

<b>Binder Poliuretatico</b>		
<b>Fase lavorabile</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Viscosità	1000-8000*10 <sup>6</sup> Pa*s	ASTM D2393
Gel-time	15-60 min	AASHTO T237
Pericolosità	Medio/Bassa	-
Flash-point	Oltre 200° C	-
<b>Indurimento avvenuto</b>		
<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Metodo di test</b>
Legame con l'impalcato	-	ASTM C882
Coefficiente di dilatazione termica	-	ASTM D696
Resistenza a trazione	6-10 MPa	ASTM D638
Allungamento	150-600 %	ASTM D638
Modulo di elasticità	-	ASTM D638 ASTM D695
Ritiro da indurimento	0,02-0,08 %	DuPont

Figura 2.4: Proprietà legante poliuretatico.

### 2.4.2 Gli aggregati

L'aggregato impiegato per il confezionamento del conglomerato polimerico, conferisce alla pavimentazione un miglioramento della resistenza al fuoco e delle caratteristiche di micro/macro tessitura superficiale, limitando anche il ritiro in fase di indurimento.

La scelta dell'aggregato non è, per i conglomerati polimerici, influenzata da incompatibilità chimiche con il legante; per questo motivo risultano numerose le tipologie di aggregato che si possono utilizzare.

La scelta dell'aggregato è condizionata dalle caratteristiche che si vogliono ottenere con il conglomerato finito; sono sovente impiegate sabbie silicee, basalti e quarzi.

L'aggregato deve presentarsi pulito, privo di umidità (inferiore allo 0.2%), con buona resistenza alla frantumazione e resistenza all'attrito.

Normalmente le pavimentazioni polimeriche sottili sono sistemi brevettati da aziende produttrici, le quali, per garantire la qualità della pavimentazione finita, confezionano e vendono i vari materiali già suddivisi nei vari dosaggi e ne certificano la qualità.

La scelta dell'aggregato dipende dalla tecnica di posa che viene utilizzata per la realizzazione della pavimentazione. Allo stato attuale le due tecniche più utilizzate sono: "*premixed*" e "*multiple layer*".

La tecnica *multiple layer* consiste nell'eseguire la stesa secondo un ben preciso ordine, previo interposizione di uno strato di primer all'interfaccia supporto-rivestimento: uno strato di legante su cui viene successivamente spolverato uno strato di aggregato; dopo l'indurimento, viene steso un secondo strato di legante su cui viene successivamente spolverato un altro strato di aggregato. La pavimentazione, a maturazione avvenuta, ha uno spessore di circa 5-10 mm. Per tale tecnica si richiedono aggregati duri, non fragili e possibilmente di frantumazione in quanto la loro funzione è quella di fornire una buona micro/ macro tessitura superficiale.

La tecnica *premixed* invece prevede la miscelazione dell'aggregato con il binder polimerico e la successiva stesura dello stesso sul supporto con uno spessore di 10-20 mm; prima della stesura del conglomerato, è richiesta la posa di uno strato di primer. Questa seconda tecnica necessita di aggregati aventi una curva granulometrica continua (contrariamente alla tecnica *multiple layer* che richiede curva granulometrica discontinua) costituita dalla pezzatura piccola con funzione di bloccaggio e sostegno degli aggregati con dimensioni più grandi aventi invece il compito di conferire una rugosità idonea alla pavimentazione risultante.

Esiste anche una terza tecnica di posa chiamata "*slurry*", simile alla tecnica *premixed*, ma caratterizzata da aggregati con dimensioni più piccole.

Di seguito un prospetto delle possibili curve granulometriche generalmente impiegate, diversificate per le varie tipologie di posa.

Setaccio [mm]	Multiple layer	Slurry		Premixed
		aggregati	filler	
13.5				100
9.51				83-100
4.76	100			62-82
2.38	30-75			45-64
1.19	0-5	100		27-50
0.841		90-100		
0.525	0-1	60-80		12-35
0.420		5-15		
0.297		0-5		6-20
0.149				0-7
0.105			100	
0.075			98-100	0-3
0.053			96-100	
0.044			93-99	

**Figura 2.5: Distribuzioni granulometriche.**

## **2.5 Interazioni tra conglomerato e sub-strato: compatibilità termica e ritiro dei conglomerati polimerici.**

La compatibilità tra sub-strato e rivestimento diventa essenziale per ridurre al minimo la manutenzione delle pavimentazioni ed assicurare un elevato grado di efficienza prestazionale alla struttura per tutta la sua vita utile.

L'interazione tra sub-strato e rivestimento deve essere studiata tenendo conto della compatibilità termica e del ritiro dei due elementi: risulta evidente l'importanza di dover assicurare l'adesione tra gli strati della pavimentazione (fondamentale per una buona impermeabilizzazione) e la compatibilità tra i comportamenti dei diversi strati sovrapposti, scongiurando così la nascita di tensioni e successivi distaccamenti e/o formazioni di fessure (le quali porterebbero a perdite di efficienza prestazionale e al degrado dell'intero sistema).

Per indagare sull'interazione tra substrato e rivestimento, risultano di particolare interesse due sperimentazioni di seguito proposte.

È stata già eseguita la valutazione della compatibilità termica tra rivestimento e substrato nello studio dal titolo "*thermal stresses in polymer concrete overlays*" pubblicato nel 1996 [3]. L'obiettivo di tale studio era quello di determinare e quantificare gli sforzi che si sviluppano in un sistema rivestimento - substrato in conseguenza a variazioni di temperatura.

La diversa natura del rivestimento polimerico, caratterizzato da coefficienti di dilatazione termica superiori a quello dei conglomerati cementizi, porta alla formazione di sollecitazioni, le quali si traducono con il tempo in distacchi del rivestimento dal supporto e ad altre problematiche ed esse correlate.

La sperimentazione ha permesso di mettere in evidenza come fattori quali moduli di elasticità, spessore del sub-strato e rivestimento, modifichino la risposta del sistema alle variazioni di temperatura (che lo stesso subisce durante il normale esercizio).

Lo studio si avvale di una teoria matematica, sviluppata nel 1992 da Chen D., Chen S. e Gerhardt T.D., con la quale sono state determinate delle equazioni differenziali di stato piano di tensione, utili a determinare gli sforzi interni ai quali è soggetta una trave composita libera da vincoli e sottoposta a variazione di temperatura. Grazie a questa teoria è stato possibile modellare il comportamento di una trave in calcestruzzo rivestita da uno strato superficiale di conglomerato polimerico, andando a determinare le sollecitazioni interne, dovute a variazioni di temperatura, e i fattori che le influenzano. Le ipotesi considerate per lo studio di tale sistema sono:

- elasticità lineare sforzi-deformazioni
- trascurabile effetto dell'eventuale primer
- variazione uniforme di temperatura e costanza dei coefficienti di dilatazione termica durante la variazione.

Per una più agevole comprensione dei risultati ottenuti nella sperimentazione si riportano di seguito i parametri considerati:

- E1 modulo di elasticità del rivestimento (variabile)
- E2 modulo elasticità sottostrato (costante)
- Spessore rivestimento h1 (variabile)
- Spessore sottostrato h2 (costante)
- Rapporto tra i moduli  $n=E1/E2$
- Rapporto tra spessori  $m=h1/h2$ .

Il sistema di riferimento adottato risulta nella direzione X parallelo alle superfici sovrapposte e la direzione Y perpendicolare a queste.

Lo studio è stato sviluppato per vari valori di n ed m partendo dalla temperatura di circa 100°F (55.6 °C) e scendendo successivamente.

I risultati di tensioni calcolati risultano talvolta differenziati in funzione della fibra della trave considerata.

La variazione di temperatura comporta nel sistema una uguale risposta in termini generali (al diminuire della temperatura l'intero sistema si contrae), ma diversificata in termini di intensità in funzione dello strato considerato. La diversa natura dei materiali e il conseguente diverso coefficiente di dilatazione termica che li caratterizza, rende infatti i diversi strati suscettibili in maniera differente alle variazioni di temperatura. Avendo il conglomerato polimerico un coefficiente di dilatazione maggiore di quello del calcestruzzo, il sistema sarà sottoposto, in seguito alla diminuzione di temperatura, ad un ritiro più accentuato nello strato polimerico rispetto a quello cementizio.

Di seguito si riportano i dati sperimentali ottenuti.

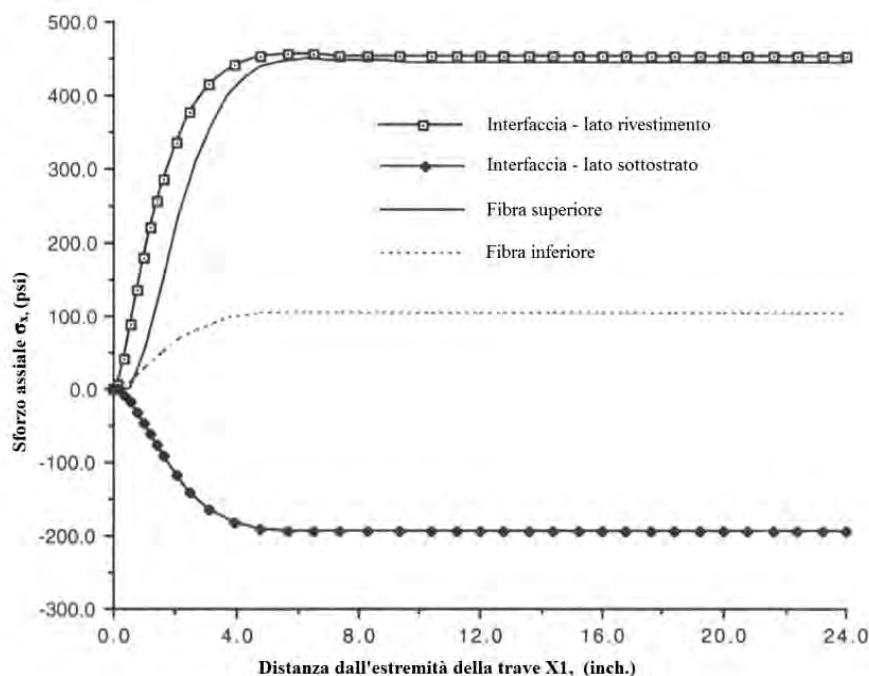


Figura 2.6: andamento tensioni xx.

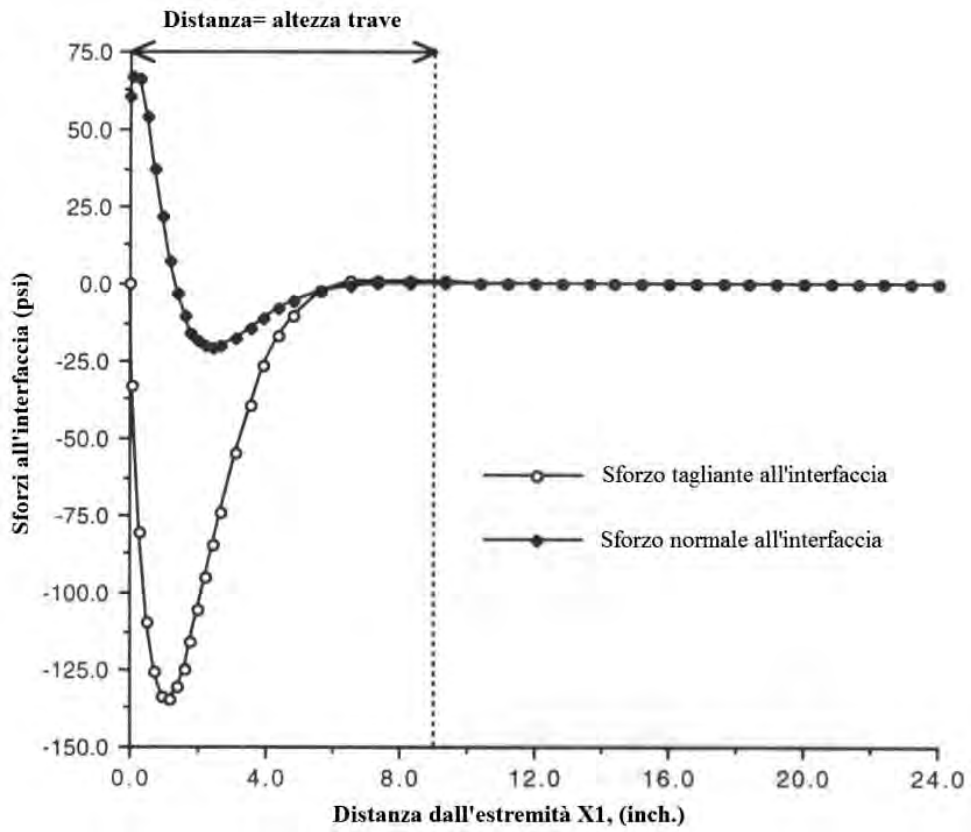


Figura 2.7: Andamento tensioni yy ed xy.

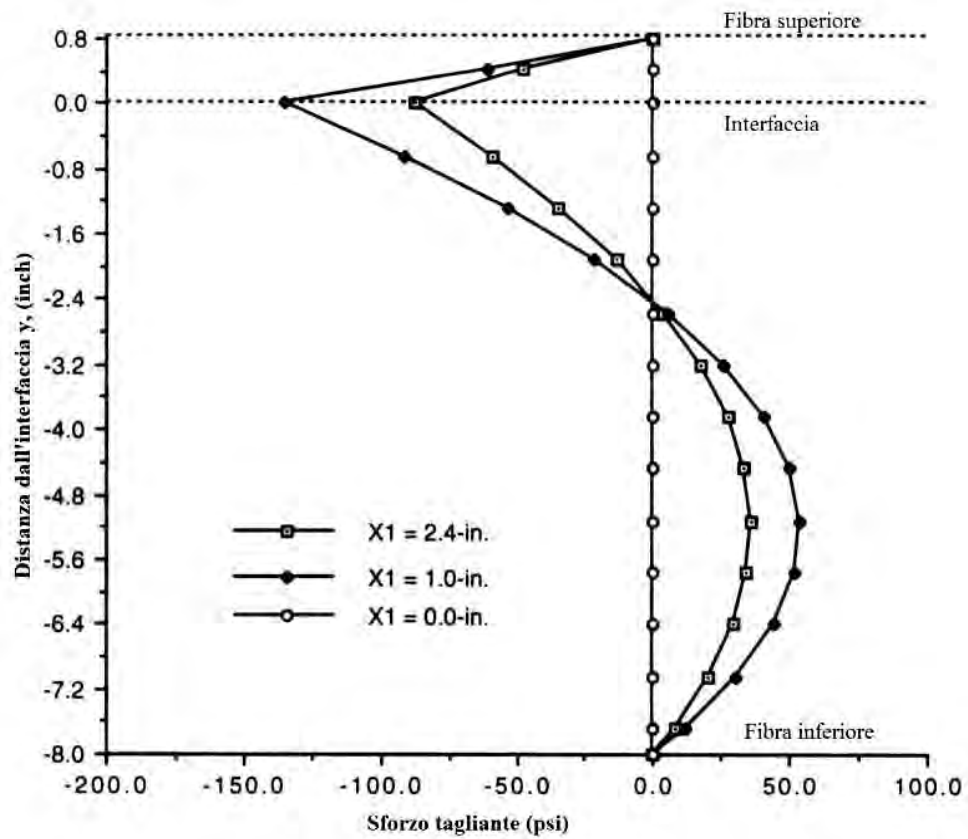


Figura 2.8: Andamento sforzo tagliante sullo spessore.

Gli andamenti delle tensioni rappresentati nelle fig. 6, 7 e 8 permettono di fare le seguenti osservazioni:

- le tensioni  $xx$  risultano costanti su tutta la lunghezza della trave. Nel tratto iniziale, per una lunghezza pari a circa l'altezza complessiva  $h$  della trave composta ( $h = h_1 + h_2$ ), si ha una variazione della tensione  $xx$ ; tale tensione ha valore nullo per  $x=0$  assumendo valore massimo, e costante per il resto di lunghezza della trave, per  $x=h$ .
- In fig.7 possiamo vedere l'andamento delle tensioni  $yy$  e  $xy$  che si producono lungo la trave. Il valore di queste risulta costante e pari a 0 su tutta la trave ad eccezione del tratto iniziale, per una distanza circa pari ad  $h$ , dove tali tensioni raggiungono il massimo valore per poi decadere velocemente fino al valore 0. I distaccamenti tra gli strati, che nelle applicazioni reali si manifestano in prossimità dei bordi delle travi, sono dovuti a tali tensioni che si sviluppano; tali zone devono essere trattate in modo particolare cercando di ridurre tali sollecitazioni e/o aumentando il potere adesivo tra sottostrato e rivestimento.
- L'andamento delle tensioni lungo lo spessore della lastra mostra come l'interfaccia tra i due strati sia soggetta alla maggiore sollecitazione di taglio.

La trave composita, è stata studiata attribuendo di volta in volta differenti valori di modulo e spessore dello strato di rivestimento. Dai risultati ottenuti è stato possibile concludere che la tensione  $xy$  e  $xx$  si riduce, a parità di modulo del rivestimento, riducendo  $m$ , ovvero riducendo il rapporto tra lo spessore del rivestimento e quello del sub-strato.

Analogamente a parità di spessore del rivestimento le tensioni  $xy$  e  $yy$  si riducono al diminuire di  $n$ , ovvero al diminuire del rapporto tra il modulo del rivestimento e quello del sub-strato.

Lo studio così proposto si basava sull'ipotesi di stato piano di tensione per descrivere il modello di trave composita. Il passaggio successivo è stato quello di rappresentare quanto visto nell'ipotesi di stato piano di deformazione il quale risulta più rappresentativo delle reali condizioni di un rivestimento.

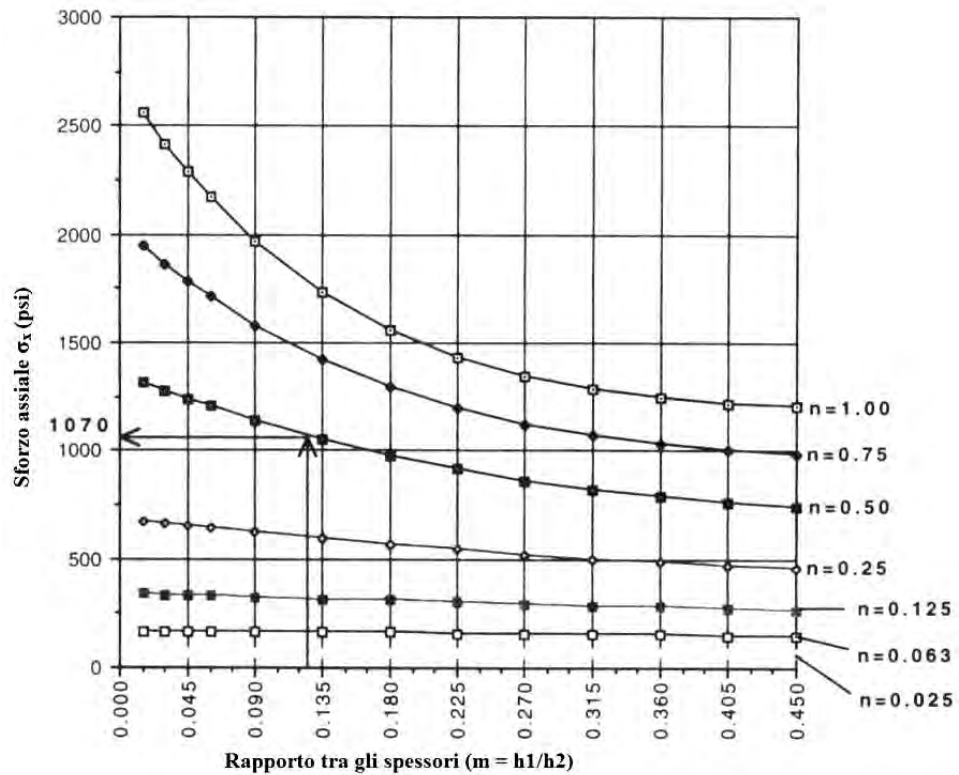


Figura 2.9: Andamento tensioni xx al variare del modulo elastico e dello spessore del rivestimento.

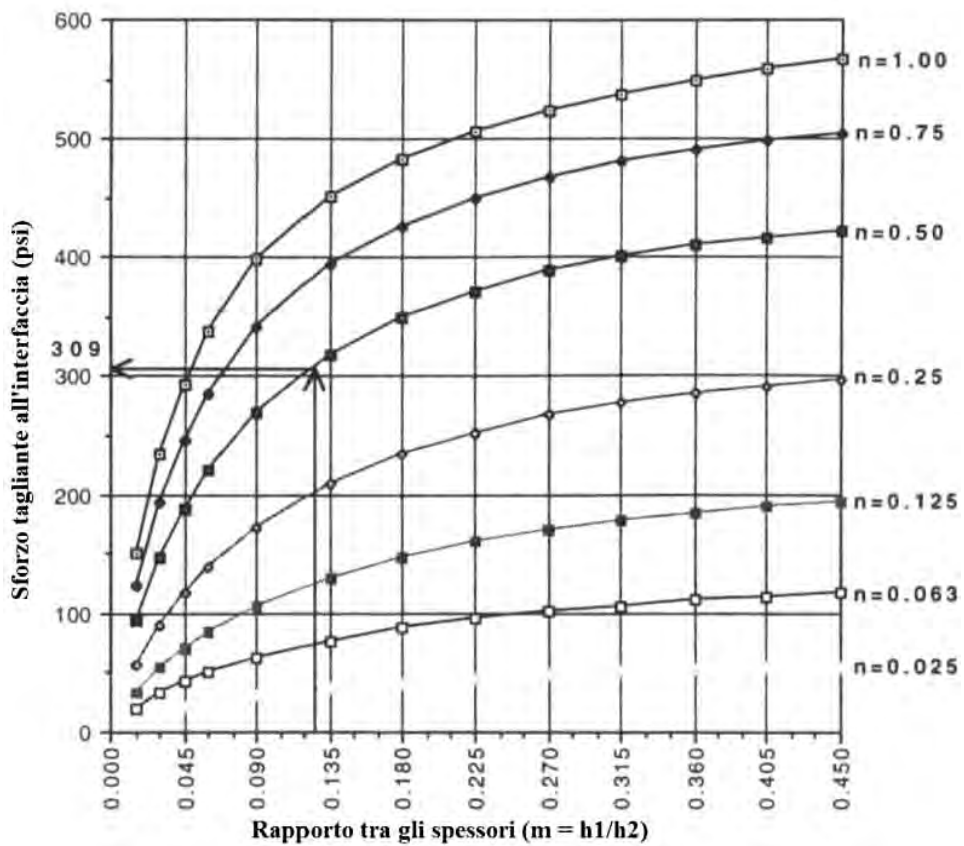
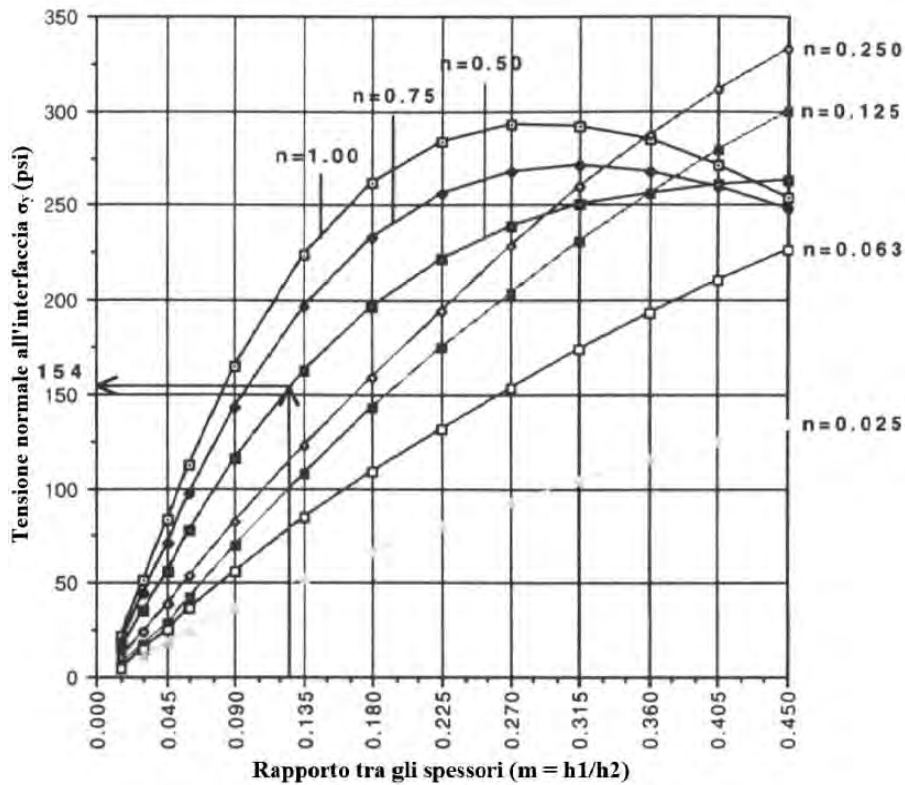


Figura 2.10: andamento della tensione xy al variare del modulo elastico e dello spessore del rivestimento.





**Figura 2.11: Andamento tensione al variare del modulo elastico e spessore del rivestimento.**

Con riferimento alla fig. 9 possiamo notare come la tensione  $\sigma_x$  aumenti al diminuire dello spessore del rivestimento a parità di modulo elastico. Diminuendo il modulo elastico del rivestimento a parità di spessore la tensione  $\sigma_x$  diminuisce.

La formazione delle tensioni è dovuta all'interazione che si instaura tra rivestimento e sub-strato. L'adesione che si ha tra i due strati, in seguito a variazioni della temperatura, genera un vincolo al libero movimento; tale vincolo, il quale si traduce in sviluppo di tensioni  $\sigma_x$ , risulta più accentuato se lo spessore del rivestimento è piccolo rispetto a spessori più elevati.

L'andamento delle tensioni  $\sigma_{xy}$  al variare di  $m$  ed  $n$  mostrano la tendenza a ridursi, considerando moduli e spessori del rivestimento sempre più piccoli.

Le tensioni  $\sigma_{yy}$ , variando  $m$  ed  $n$ , hanno un andamento diverso a seconda che il rapporto tra lo spessore del rivestimento e del sub-strato sia inferiore o superiore a 0.3. Quando è inferiore, la sollecitazione diminuisce al diminuire del rapporto stesso e del modulo di elasticità; quando è superiore tutto dipende invece dal modulo.

I risultati teorici ottenuti sono stati poi supportati da sperimentazioni di laboratorio che hanno confermato quanto visto in linea teorica.

Dai risultati ottenuti è quindi lecito ed auspicabile utilizzare pavimentazioni di piccolo spessore e a basso modulo elastico; si tenga presente la necessità di valutare le tensioni che si generano una volta assegnato spessore e modulo della pavimentazione per verificare, specialmente nelle zone più critiche, la perfetta adesione tra gli strati.

L'adesione tra sub-strato e rivestimento, il quale definisce un "vincolo" al libero movimento dei due strati, produce tensioni che si generano a causa del ritiro dei materiali per lo più nella fase di indurimento.

Le tensioni dovute al ritiro sono assimilabili per certi aspetti a quelle prodotte da variazioni di temperatura, con l'eccezione che quest'ultime risultano costanti nella vita utile del sistema.

Molto spesso il ritiro non viene tenuto in considerazione quando si trattano i rivestimenti polimerici sottili, perché uno dei principali vantaggi, che queste soluzioni presentano, risiede proprio nel fatto che questa problematica non si presenta.

Tale considerazione risulta essere corretta se come legante polimerico vengono utilizzate resine di tipo epossidico; semplificazione non certo accettabile se la resina impiegata è di tipo poliestere.

Il fenomeno del ritiro per le pavimentazioni sottili risulta influenzato da vari fattori quali il tipo di legante polimerico utilizzato, la forza di adesione tra il supporto e il rivestimento stesso il quale produce un vincolo al libero movimento di quest'ultimo, dal tipo di aggregato utilizzato, dal tipo di catalizzatore inserito nella produzione della resina, dalla presenza di vincoli esterni e altri fattori più o meno fondamentali che caratterizzano tale fenomeno.

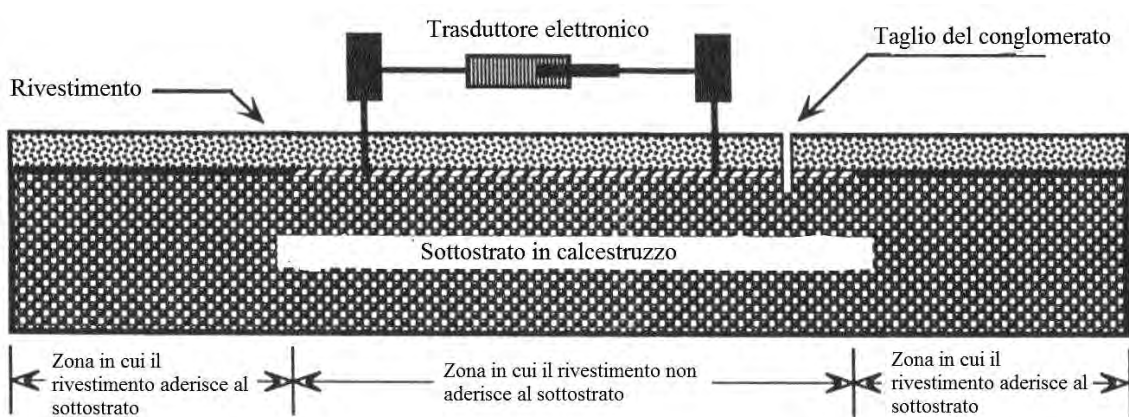
Per valutare il ritiro in fase di indurimento, è possibile fare riferimento ad una metodologia di valutazione dell'entità di tale fenomeno impiegata in una sperimentazione svolta nel 1996 dal titolo "*Measurement of shrinkage-induced stress in polymer concrete overlays*"[26].

In tale sperimentazione l'obiettivo era determinare le tensioni prodotte dal ritiro; l'adesione tra i vari strati, ed in particolare tra lo strato di rivestimento ed il supporto in calcestruzzo, produce un vincolo interno alle normali deformazioni prodotte dal ritiro del conglomerato polimerico in fase di indurimento. Tale vincolo impedisce la deformazione naturale del conglomerato sviluppando, all'interno dello stesso, delle tensioni.

L'idea alla base di questa sperimentazione è stata quella di ricreare l'accumulo di tensione, impedendo la normale deformazione per ritiro, tramite vincoli interni derivanti

dall'adesione sottostrato - rivestimento, per poi valutare l'intensità delle tensioni prodotte una volta rimosso tali vincoli.

Confezionata una trave in calcestruzzo e lasciata maturare, si è provveduto, nella parte centrale della stessa, a stendere sulla faccia superiore dei nylon e sostanze oleose, in modo da impedire, nel solo tratto centrale, l'adesione tra supporto e rivestimento. Le zone terminali della trave sono state invece opportunamente trattate e ricoperte con il primer; successivamente si è provveduto la posa del rivestimento polimerico sottile su tutta la trave in modo uniforme, introducendo nel tratto centrale un dispositivo Dupont, ad ottenere come risultato quanto rappresentato di seguito.



**Figura 2.12: Schematizzazione prova.**

Il vincolo interno, nato dall'adesione tra gli strati nei tratti terminali della trave, ha prodotto, durante la fase di maturazione, un ritiro impedito il quale ha prodotto delle tensioni all'interno del conglomerato polimerico. In seguito al taglio, rappresentato in figura, in corrispondenza del tratto di trave non soggetta ad adesione e quindi ad impedimento nella deformazione, la tensione accumulata dal ritiro impedito è stata libera di scaricarsi. Registrando tramite dispositivo la deformazione prodotta in seguito al taglio sul conglomerato polimerico, è stato possibile, mediante semplici relazioni tra deformazioni e tensioni, quantificare le tensioni da ritiro.

Il metodo proposto da questo studio, si è rivelato essere uno strumento estremamente utile per la determinazione degli effetti del ritiro ed è pertanto auspicabile un suo utilizzo nel momento in cui si debbano adoperare materiali diversi da quelli di cui siano già note le proprietà.

## **2.6 La durabilità del conglomerato polimerico.**

Le pavimentazioni per impalcati da ponte devono assecondare i movimenti dell'impalcato sul quale poggiano e allo stesso tempo resistere agli stress derivanti dai cicli di carico, ai quali sono sottoposti in fase di esercizio.

Le caratteristiche di assoluta impermeabilità, di adesione al sottostrato, di rugosità superficiale idonea per conferire l'aderenza necessaria, sono qualità della pavimentazione che devono mantenersi durante la vita utile. Sono stati formulati diversi studi sulla compatibilità tra supporto e rivestimento al fine di valutare la durabilità del sistema composito. Uno studio svolto dall'Università di Padova [7] è risultato di particolare interesse per valutare la durabilità delle pavimentazioni polimeriche sottili stese su impalcati da ponte in calcestruzzo. Tale studio è composto da due fasi. La prima fase, vista la vasta gamma di aggregati e resine a disposizione, è stata quella di individuare la composizione del conglomerato polimerico da sottoporre alle varie prove, mentre la seconda fase ha interessato la definizione del provino e delle relative prove, a cui sottoporlo, per valutare la durabilità delle pavimentazioni polimeriche.

Da uno studio primario dei vari materiali a disposizione e delle varie tecniche di posa, si è optato per un conglomerato polimerico ottenuto dalla miscelazione di un aggregato quarzifero unito ad una resina di tipo epossidico. Il conglomerato così definito, steso a temperatura ambiente sull'impalcato in calcestruzzo previa interposizione di uno strato di primer, raggiunge le caratteristiche per un regolare utilizzo a 10 ore dalla messa in opera.

La fase successiva alla scelta del materiale è stata la verifica della sua idoneità a rimanere integro ed inalterato nel lungo periodo quando, applicato su supporti di vario tipo (in acciaio o calcestruzzo) ed in varie condizioni (fessurato e non), venga sottoposto a ripetuti cicli di carico. Si tenga presente, a questo proposito, che questi rivestimenti polimerici vengono stesi sia su impalcati di nuova costruzione sia su impalcati più datati. Questi ultimi sono quindi caratterizzati da possibili fessurazioni e/o danneggiamenti che, seppur di bassa entità (in caso contrario non sarebbe ammesso l'impiego di rivestimenti senza prima aver eseguito una idonea riabilitazione) possono produrre delle premature decadenze di prestazione del rivestimento, nonostante questo sia di ottima qualità.

Per indagare il comportamento del rivestimento polimerico nel lungo periodo e in differenti condizioni di supporto (fessurato o meno), sono stati definiti una serie di provini costituiti da una trave in calcestruzzo di dimensioni 150x200x800 mm. Sulla faccia fessurata e/o fessurabile di questi provini è stato applicato il conglomerato polimerico

sopra citato, in spessore idoneo (circa 20 mm), previo sabbiatura della superficie cementizia e stesura di uno strato di primer.

Dovendo i provini simulare varie condizioni del sistema in fase di esercizio, prima di sviluppare le prove di carico, questi sono stati opportunamente condizionati e differenziati.

- No. 1: travetto portato ad incipiente fessurazione al quale viene applicato il sistema e successivamente sottoposto a prova a fatica.
- No. 2: travetto portato ad incipiente fessurazione, sottoposto a prova a fatica, quindi trattato con il sistema e infine sottoposto ad ulteriore prova a fatica.
- No. 3: travetto integro al quale viene applicato il sistema, successivamente sottoposto a prova a fatica.
- No. 4: travetto fortemente fessurato al quale viene applicato il sistema, successivamente sottoposto a prova di fatica.
- No. 5: travetto preventivamente fessurato con carico statico e successivamente sottoposto a prova di fatica, al quale viene applicato il sistema con successiva ulteriore prova a fatica.
- No. 6: travetto profondamente fessurato con carico statico cui viene applicato il sistema.

Le prove di carico che si sono svolte sono state prove di carico monotonicamente crescente fino al raggiungimento di prefissate ampiezze di fessurazione, nonché prove di fatica. Per caratterizzare il prodotto prima e dopo i test è stato fatto uso della tecnica microsismica non distruttiva e della tecnica di analisi dinamica di oscillazione libera, oltre ad un controllo visivo del provino. Infine, dopo le prove di carico, è stata svolta una prova di adesione.

Dalle prove eseguite si sono ottenuti i seguenti risultati:

Campione	1	2	3	4	5	6
Analisi su trave integra (*)		MS	MS			
Prefessurazione		26 KN	26 KN	70 KN	30 KN	70 KN
Analisi durante fine prefessur.		MS - V	MS - V		D	D
Cicli a fatica			$10^6$ 26 KN f = 10 Hz		$10^6$ 26 KN f = 5 Hz	
Analisi a fine fatica			MS - D - V			
Applicazione trattamento	sì	sì	sì	sì	sì	sì
Analisi dopo applicazione trattamento (*)	MS - D	D	D	MS - D - V	D	D
Cicli a fatica	$10^6$ 26 KN f = 10 Hz	$10^6$ 26 KN f = 10 Hz	$10^6$ 26 KN f = 10 Hz	$10^6$ 20 KN f = 5 Hz	$10^6$ 26 KN f = 5 Hz	
Analisi finale sulla trave (*)	MS D V	MS D V	MS D V	MS D V	D	
Analisi finale sul trattamento	MS	MS	MS	MS		
Analisi finale	Adesione	Adesione	Adesione	Adesione	Adesione	

(\*) MS, D, V: analisi microsismica, dinamica, visiva.

**Figura 2.13. prospetto risultati prove.**

La sperimentazione svolta ha permesso, visti i risultati ottenuti, di giungere alle seguenti conclusioni:

- I sistemi, in seguito alle prove a fatica, sono risultati integri e quindi idonei ad essere impiegati anche su supporti caratterizzati da fessure. L'integrità del sistema è stata valutata come specificato in precedenza, sia con prove visive sia con prove più specifiche e precise quali analisi microsismica e dinamica.
- La prova di adesione, alla quale sono stati sottoposti i provini, ha dato risultati buoni con valori di tensione di trazione del rivestimento compresi tra 2 e 3 MPa.

Dall'analisi svolta si può quindi affermare l'idoneità di tale pavimentazioni ad essere impiegati come rivestimento di impalcati da ponte fessurati o meno.

I risultati ottenuti, non devono però illudere i progettisti che questi rivestimenti siano esenti dai tradizionali problemi di deterioramento che normalmente si verificano nelle pavimentazioni durante la loro vita utile. Tra le varie problematiche possiamo riscontrare, relativamente alle pavimentazioni polimeriche, quelle di seguito esposte.

### **Decadimento delle caratteristiche superficiali**

Il decadimento delle caratteristiche superficiali è dovuto al normale traffico che interessa l'impalcato. I passaggi ripetuti, le manovre, le forze di accelerazione, di decelerazione e di sterzata producono degli attriti con l'aggregato che compone la micro/macro tessitura riducendola nel tempo in modo sensibile. La problematica esposta può essere poi accentuata qualora gli aggregati risultano poco idonei a resistere all'attrito o addirittura presentino delle caratteristiche meccaniche inadeguate. Per tal motivo, in perfetta analogia con quanto viene fatto per i manti d'usura in conglomerato bituminoso, è opportuno utilizzare aggregati di pregio aventi caratteristiche idonee al traffico veicolare al quale saranno sottoposti.

Nel periodo invernale l'utilizzo di catene da parte dei veicoli, di sali disgelanti e dei mezzi spazza neve, produce ulteriori decadimenti delle caratteristiche superficiali riducendo ulteriormente la vita utile della struttura.

Qualora si verificasse tale problematica, a seconda dell'entità del danno e dello stato della pavimentazione, le soluzioni proposte consistono nella rimozione totale della pavimentazione e successiva stesura della stessa, previo preparazione del piano di posa. Qualora invece l'entità del danno non sia rilevante ma comunque tale da non garantire prestazioni e sicurezza adeguata alla pavimentazione, si può procedere alla scarifica di uno strato superficiale e alla successiva messa in opera di uno strato nuovo a colmare lo spessore scarificato.

### **Distacco del rivestimento**

Il distaccamento del rivestimento può essere prodotto da vari fattori. Una inadeguata preparazione del piano di posa o un lasso di tempo estremamente lungo tra la preparazione del supporto e la stesura del rivestimento possono essere causa di formazione e deposito di agenti estranei, talvolta aggressivi. Questi producono una inadeguata adesione tra supporto e rivestimento e quindi a precoci distacchi di quest'ultimo in fase di esercizio.

Altro fattore da considerare per evitare distaccamenti del rivestimento è la compatibilità, specialmente quella termica, tra i materiali che caratterizzano gli strati sovrapposti. I differenti coefficienti termici che caratterizzano il supporto e il rivestimento, producono, assieme ai cicli di carico dovuto al traffico in transito, delle tensioni le quali risultano di elevata entità all'interfaccia [1][5].

Per scongiurare il distacco del rivestimento bisogna quindi valutare le proprietà di ogni strato impiegato e verificare l'idoneità di questo ad essere impiegato con gli altri ad esso collegato.

Questi problemi se causati da una errata preparazione del piano di posa, possono essere risolti rimuovendo la pavimentazione, preparando in modo idoneo il supporto e successivamente posando un nuovo rivestimento. Se il distacco è dovuto ad una carenza di forza di adesione del rivestimento si può procedere in due diversi modi: come al punto precedente con la rimozione e stesura di un nuovo rivestimento, oppure, qualora sia possibile ed efficace, prevedendo un intervento meno invasivo costituito da iniezioni di legante a bassa pressione direttamente nel rivestimento già in opera.

### **Fessurazioni**

Le fessure che si possono produrre sono dovute all'eccessiva flessibilità del supporto il quale sollecitato può produrre movimenti tali da fessurare il rivestimento polimerico.

Le fessure presenti sull'impalcato, prima della stesura del rivestimento, se non vengono opportunamente trattate e ridotte a livelli accettabili, si riflettono, in seguito ai cicli di carico scarico, sulla pavimentazione portando in modo rapido a fessurazione anche quest'ultima.

Le fessure possono essere eliminate, mediante l'iniezione di siliconi, che, opportunamente studiati, conferiscono impermeabilità al rivestimenti, colmando i vuoti prodotti dalle fessure. Per evitare che si ripresenti il problema bisogna però studiare le cause che hanno portato alla formazione delle fessure. [1], [5].

### **Incrementi di porosità**

Gli incrementi di porosità possono essere originati dalla presenza di umidità nell'aggregato al momento della posa, o dalla presenza di sostanze volatili nella miscela. Queste ultime, scomparendo, nel tempo possono portare all'incremento della porosità e al ritiro del conglomerato, che tenderà per questo a fessurarsi [1],[5].



## **2.7 Tecniche di posa in opera dei rivestimenti polimerici sottili.**

Le tecniche attualmente impiegate per la stesa dei rivestimenti polimerici sottili sono essenzialmente di tre tipi: essi verranno illustrati di seguito.

### **Multiple Layer**

Questa tecnica di posa, consiste nella stesura di una serie di strati intervallati (da tre a cinque) da legante polimerico e di aggregato. Dopo aver opportunamente trattato il supporto sul quale viene applicato il rivestimento, si procede alla produzione del legante polimerico il quale viene steso, in spessori costanti, attraverso l'utilizzo di rulli, oppure con un getto omogeneo a coprire l'intera superficie. Si tenga presente che ogni strato sovrapposto deve contenere lo stesso quantitativo di materiale, in modo che il rivestimento finale ottenuto risulti uniforme, sia geometricamente che meccanicamente, su tutta la superficie. Successivamente al binder polimerico, e prima che esso si asciughi, viene versato mediante un apposito macchinario, l'aggregato scelto. L'aggregato viene fatto cadere verticalmente dalla minima altezza possibile, per cercare di ridurre l'eventuale inclusione di aria, ed in quantitativo superiore rispetto a quello strettamente necessario. In seguito all'asciugatura del binder l'aggregato in eccesso (quello che non risulta inglobato nel legante), viene, per via meccanica o tramite aspiratori, rimosso. Il procedimento viene quindi ripetuto, con le modalità sopra esposte, fino ad ottenere il rivestimento definitivo.

Per avere un risultato finale omogeneo del rivestimento ogni strato viene posato definendo determinate quantità di resina e di aggregato per ogni mq di superficie coperta. Per il primo strato generalmente si impiegano circa 1.1 Kg/mq di resina e 5.4 Kg/mq di aggregato per poi salire, negli strati successivi, a 2.2 Kg/mq di resina e 7.6 Kg/mq di aggregato.

Gli spessori complessivi che si ottengono con questo metodo variano dai 5 ai 10 mm.

Questa tecnica di posa non richiede l'utilizzo di operai specializzati ed è quindi tecnicamente vantaggiosa; la tempistica per realizzare queste pavimentazioni sono però molto lunghe rispetto alle altre tecniche. Questo può portare ad incompatibilità di carattere organizzativo come la necessità di riaprire la viabilità al traffico nel minor tempo possibile.

## **Slurry**

Il metodo slurry consiste nell'applicazione, sul supporto adeguatamente preparato, di uno strato di resina, sul quale viene poi steso uno strato di malta sintetica (ottenuta dalla miscelazione di resina e aggregato fine). Successivamente sul rivestimento così composto, viene steso, prima dell'altro aggregato (per conferire una migliore micro/macro tessitura alla pavimentazione) e poi un ulteriore strato di resina isolante.

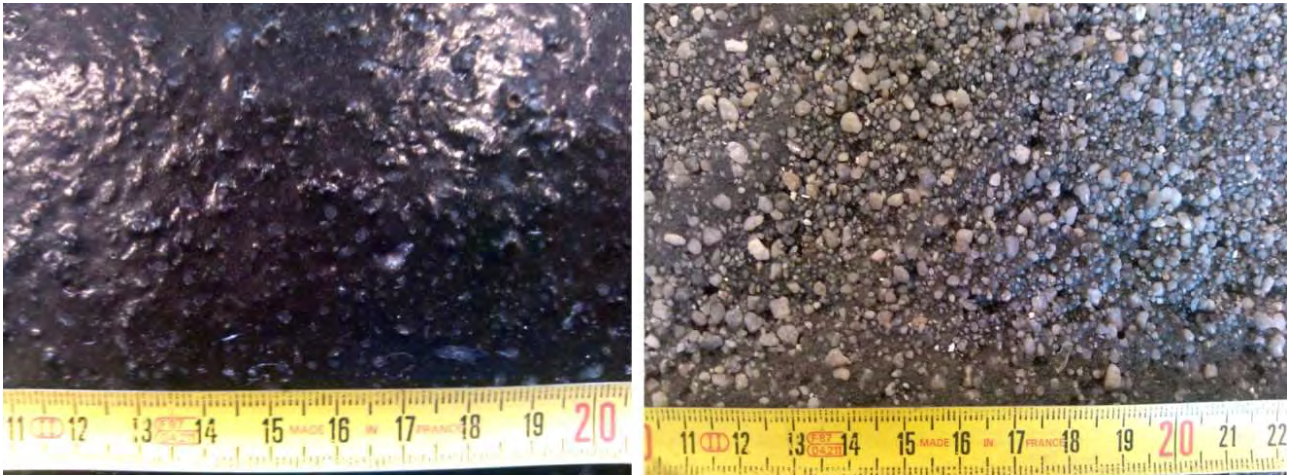
Rispetto alla tecnica multiple layer, la tecnica slurry è più veloce; il contenuto di resina impiegato risulta praticamente identico: circa 25% del peso complessivo del rivestimento.

Lo spessore dei rivestimenti ottenuti con questa metodologia è circa 5-10 mm e le resine normalmente utilizzate sono quelle metacriliche (preferite in questo caso alle epossidiche).

## **Premixed**

Questa tecnica di posa si differenzia dalle precedenti per la rapidità con la quale è possibile realizzare il rivestimento ultimato. La posa in opera consiste nel realizzare un conglomerato polimerico miscelando, in opportune quantità, il legante polimerico e l'aggregato, o la miscela di aggregati più idonea (a tal proposito si veda paragrafo 2.4.2.), il tutto a temperatura ambiente. Tale miscelazione può essere fatta a mano o con macchinari appositi: generalmente la prima soluzione è preferibile per applicazioni ridotte mentre la seconda per quelle più impegnative.

Prima di stendere il conglomerato è opportuno preparare la superficie di posa, e stenderci sopra un primer idoneo sull'intera superficie da rivestire, in quantità circa 0.4 Kg/mq. La successiva posa, ad opera di operai specializzati, viene fatta avendo cura di assegnare spessore costante di circa 15-20 mm su tutta la superficie. Questa tecnica, rispetto alle precedenti, è più veloce da realizzare e risulta quindi idonea qualora il fattore tempo sia determinante (necessità di riaprire al traffico in tempi brevi). Rispetto alle altre tecniche sono necessari operai specializzati e macchinari idonei con conseguenti aumenti di costo di realizzazione.



**Figura 2.14: esempi di pavimentazione stesi rispettivamente con tecnico Premixed e Multiple Layer.**



**Figura 2.15: esempio pavimentazione realizzata con tecnica slurry.**

Di seguito viene proposta una tabella riassuntiva dei quantitativi di materiali normalmente utilizzati per realizzare un mq di rivestimento, diversificati in funzione del metodo di posa scelto.

Rivestimento	Multiple Layer Epossidico	Slurry Epossidico	Slurry Metacrilico	Premixed
Spessore [mm]	5-10	7.5	7.6	19
Primer Resina [Kg/mq]	-	1.1-1.2	0.3-0.5	0.3-0.5
Strato 1 – Resina [Kg/mq]	1-1.1	5.5-6.5	2.5-2.9	5-5.5
Strato 1 – Aggr. [Kg/mq]	5-6	6-7	6-7	38-39
Strato 2 – Resina [Kg/mq]	2.1-2.3	-	-	-

Strato 2 – Aggr. [Kg/mq]	7-8	-	7.3-7.8	-
Strato isolante resina [Kg/mq]	-	-	0.5-0.8	-
Contenuto resina sul peso [%]	25	25	24	13

**Tabella 2.1: quantitativi materiale per mq di pavimentazione.**

## **2.8 Le caratteristiche superficiali: confronto tra posa di tipo multiple layer e quella di tipo Premixed**

A parità di aggregati e di resine impiegate, la scelta della tecnica di posa del rivestimento ha un ruolo fondamentale sul risultato finale.

Una sperimentazione interessante è quella effettuata, presso il laboratorio di strade dell'Università di Padova nel 2013 dal titolo *“rivestimenti polimerici sottili per pavimentazioni degli impalcati da ponte. Caratterizzazione prestazionale e confronto con le soluzioni tradizionali”*[11]. L'obiettivo di questo studio, più ampio di quello che sarà di seguito riportato, era quello di caratterizzare e successivamente confrontare rivestimenti polimerici sottili per impalcati da ponte (differenti per tecnica di posa e per tipologia di aggregato utilizzato) con le soluzioni più classiche (impiegate per gli stessi scopi) in conglomerato bituminoso.

Lo studio consisteva quindi nel caratterizzare, mediante prove di macrotessitura, di skid superficiale, di ormaiamento e di adesione tra gli strati, alcune tipologie di rivestimenti polimerici sottili, diversificati in funzione della tecnica di posa (multiple layer e premixed) e per tipologia di aggregato impiegato. La fase successiva consisteva poi nel confronto dei dati trovati con quelli a sua volta osservati dalle medesime prove sviluppate però su pavimentazioni in conglomerato bituminoso utilizzate su impalcato da ponte.

Sebbene il lavoro svolto risulti estremamente interessante, si riporta in seguito solamente i dati ottenuti dalle prove di macrotessitura (altezza in sabbia) e di skid (BPN), relative a rivestimenti polimerici sottili.

Le prove sono state svolte confezionando opportuni provini, costituiti da un supporto in calcestruzzo, il quale è stato opportunamente preparato ad ospitare il successivo rivestimento. I provini realizzati erano sei, ciascuno caratterizzato da una particolare tecnica di posa e da una particolare miscela di aggregato.

Sono stati considerati due tipologie di fusi di riferimento nella scelta degli aggregati da impiegare, poiché la tecnica premixed ha richiesto differenti caratteristiche di curva

granulometrica rispetto alla tecnica multiple layer. La tecnica multiple layer necessita di una curva discontinua e di aggregati di dimensione massime pari a circa 5mm. La curva granulometrica idonea per la stesura di rivestimenti con tecnica premixed deve risultare invece continua e con aggregati con pezzatura massima intorno ai 10mm circa.

Per ogni tipologia di tecnica adottata, sono stati impiegate tre differenti miscele; in particolare una costituita da sabbia di quarzo, una da scoria d'acciaieria e una da "minerale".

Le curve granulometriche delle varie miscele utilizzate sono riportate nelle figure seguenti (Figure n X, Y, Z, ecc.).

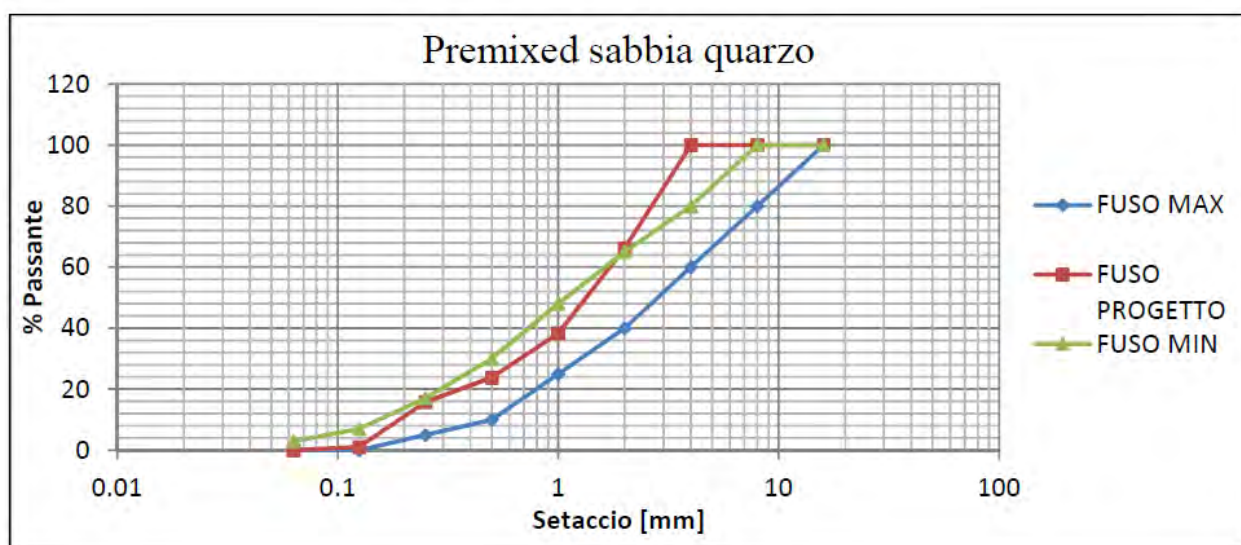


Figura 2.16.

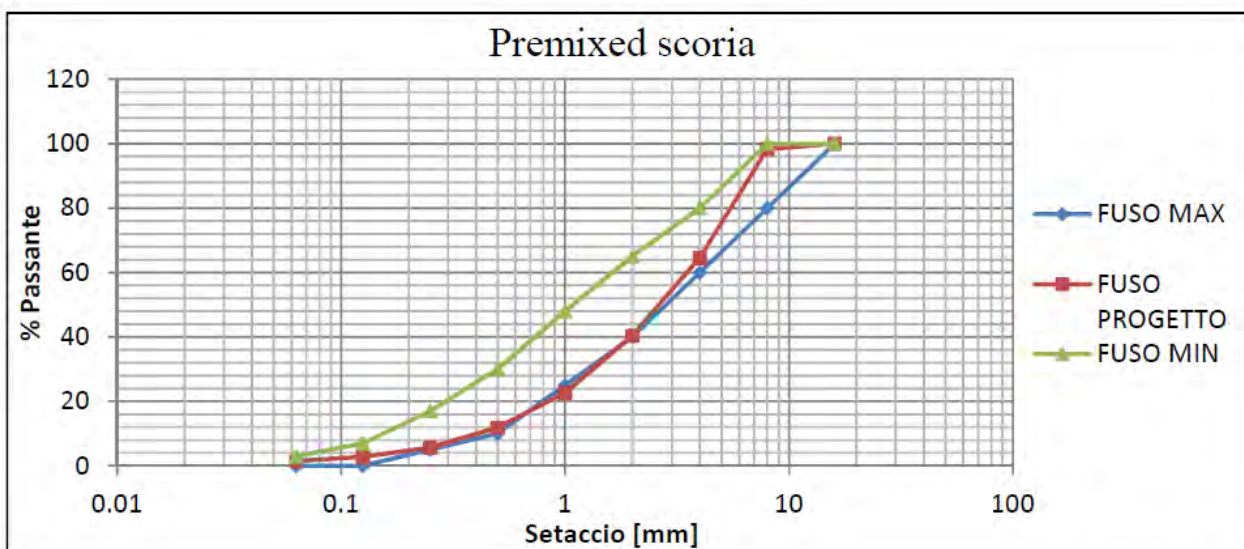


Figura 2.17.



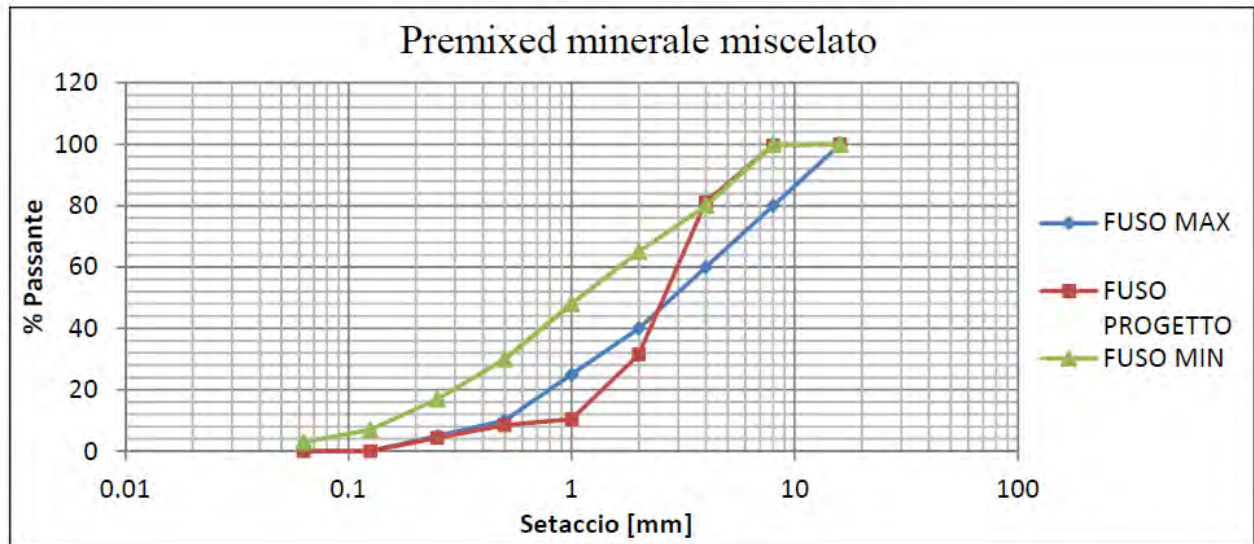


Figura 2.18.

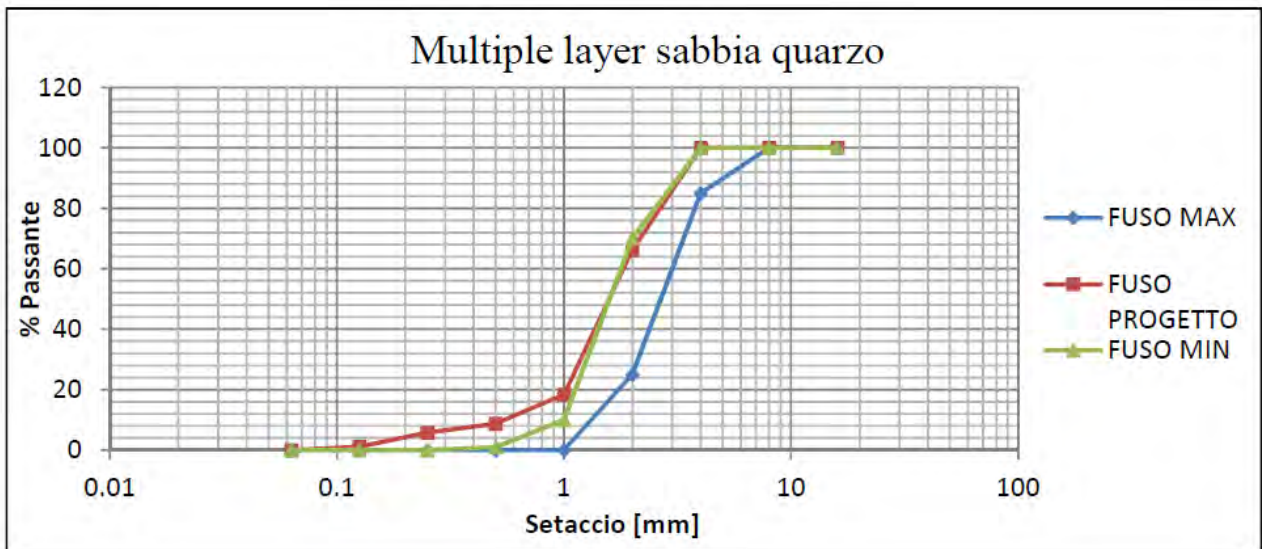


Figura 2.19.

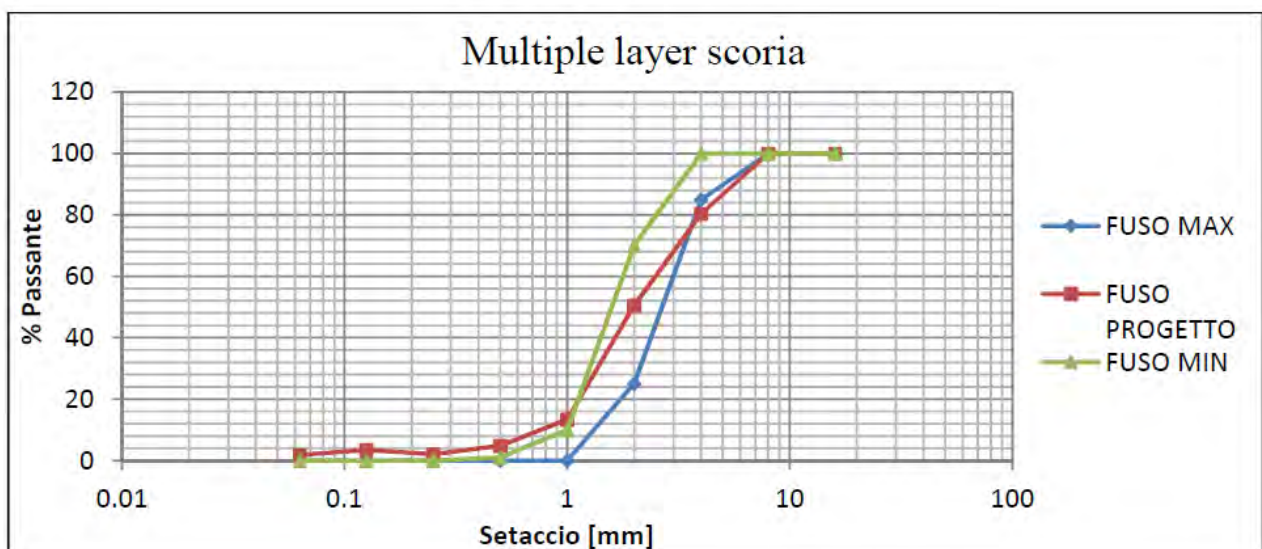


Figura 2.20.

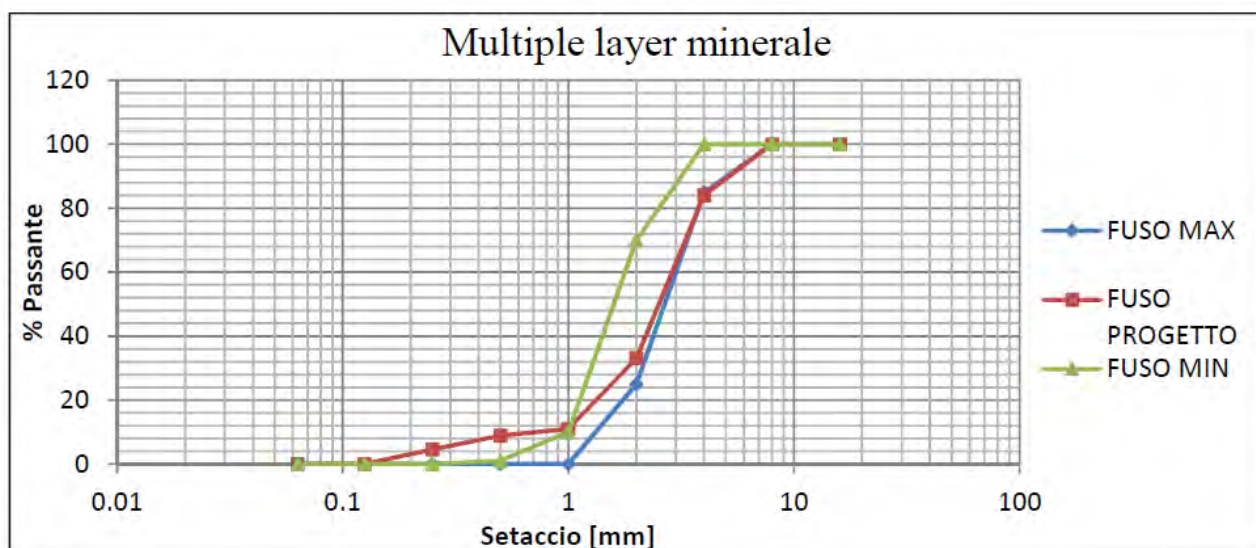
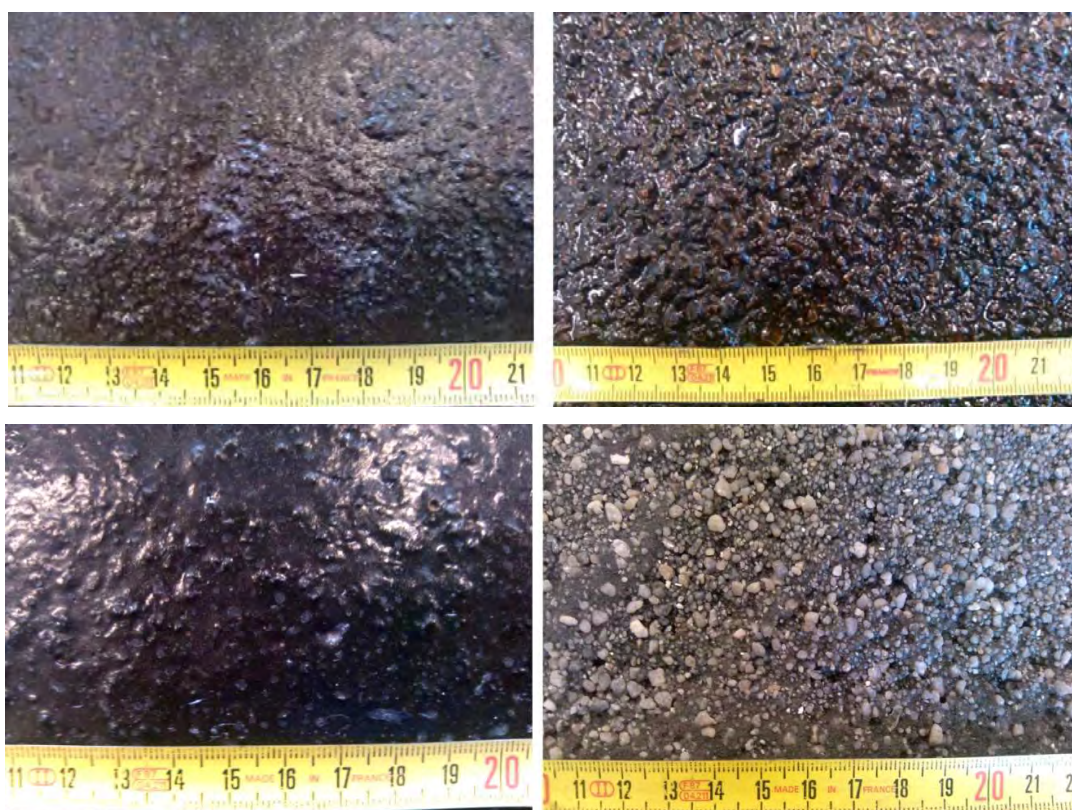


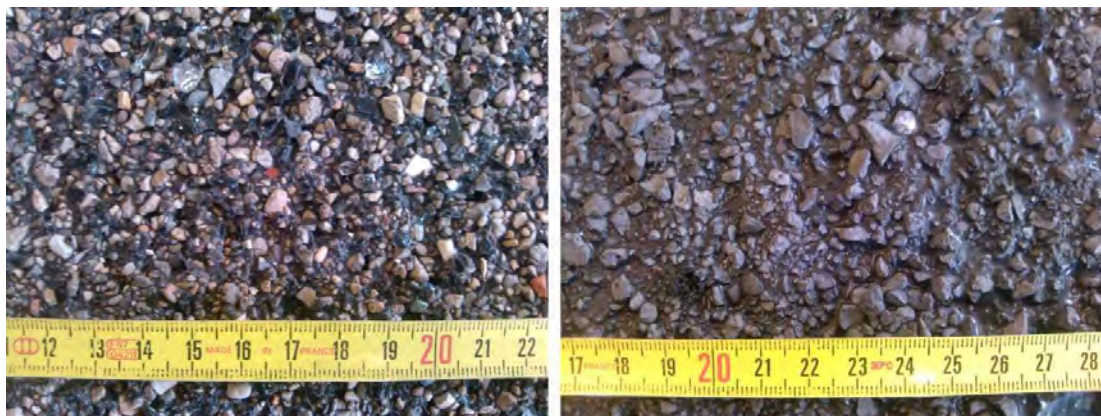
Figura 2.21.

Le miscele di aggregato riportate sono state miscelate o stese (a seconda del metodo di posa) con un legante di tipo epossidico, ottenuto dalla miscelazione di una resina con un catalizzatore in proporzione 1.5 a 1. Il quantitativo di aggregato impiegato per confezionare i provini con tecnica premixed è in linea con quelli proposti nel paragrafo 2.7. La stesura del rivestimento con tecnica multiple layer è stata fatta con quantitativi di materiale in linea con quelli proposti al paragrafo 2.7.

Le pavimentazioni risultanti sono riportate nelle seguenti figure (Figure X, Y, ecc.).

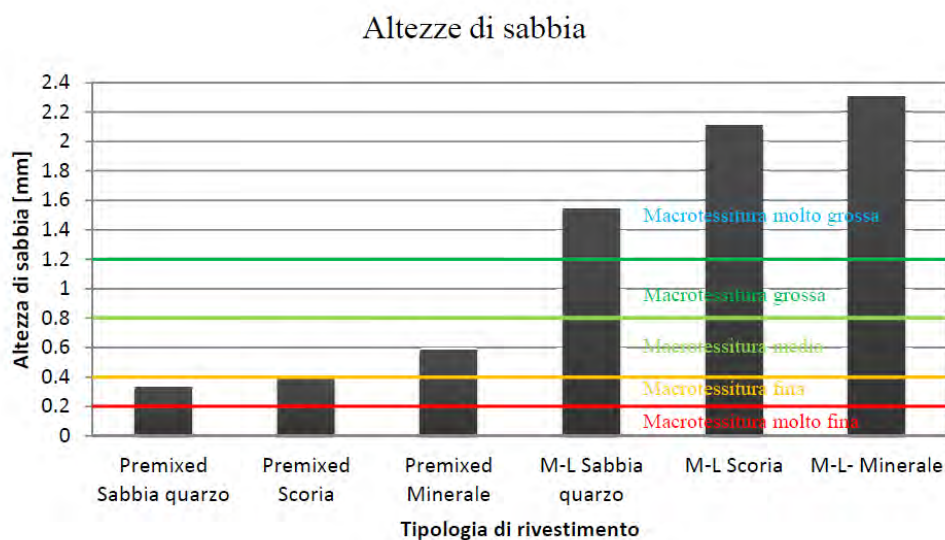






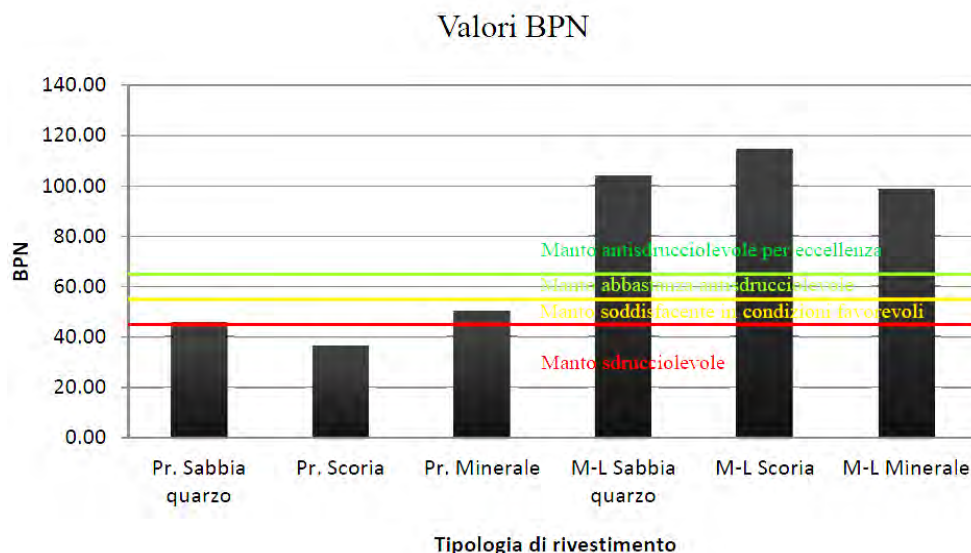
**Figura 2.22: in ordine orario partendo da in alto a sx:  
P. sabbia di quarzo, P. scoria, P. calcare, ML. sabbia di quarzo, ML Scoria, ML minerale.**

Le prove di altezza in sabbia e BPN sviluppate su queste superfici e la successiva rielaborazione dei risultati ottenuti ha permesso di classificare le pavimentazioni come segue:



**Grafico 2.1: Prove altezza in sabbia.**





**Grafico 2.2: Prove Skid tester (BPN).**

Da questo studio, e dai risultati ottenuti, è possibile vedere come, a parità di tipologia di materiale e resina impiegata, la tecnica di posa influenzi la tessitura superficiale del rivestimento. In particolare con la tecnica multiple layer è possibile ottenere una macro-tessitura più marcata, indipendentemente dall'aggregato impiegato, rispetto ad una posa con tecnica premixed. Discorso analogo può essere fatto considerando l'anti skid delle pavimentazioni studiate.

## 2.9 Applicazioni di rivestimenti polimerici sottili.

Vengono di seguito proposte alcune esperienze e campagne di studio, effettuate su pavimentazioni polimeriche sottili, utili ad evidenziare come le caratteristiche di tali rivestimenti si modificano nel tempo.

Uno studio interessante è quello svolto in Virginia (USA) nel 1987 [6]. Tale studio è stato effettuato su 19 pavimentazioni polimeriche sottili di cui 18 stese con tecnica multiple layer ed una monostrato. Le resine impiegate per tali pavimentazioni erano di tipo epossidico, metacrilico e poliestere.

Con tale esperienza si è voluto mettere in evidenza come, nel lungo periodo, si modifichi l'adesione dei rivestimenti superficiali, la permeabilità ai cloruri e il degrado superficiale.

Le prove di trazione, effettuate sui rivestimenti appena posati e negli anni successivi, hanno evidenziato una riduzione del potere adesivo. In particolare nei primi periodi le prove di adesione hanno portato a rottura lo strato di conglomerato cementizio di supporto. Le prove effettuate negli anni successivi, hanno poi dimostrato che l'adesione è

andata via via riducendosi negli anni spostando la superficie di rottura sempre più in alto, arrivando ad interessare anche lo strato di interfaccia tra impalcato e rivestimento.

Alcuni rivestimenti sono stati stesi su impalcato già preparati ma subito riaperti al traffico ancora prima di stendere il rivestimento finito: per queste pavimentazioni si sono evidenziati nel tempo valori di adesione più bassi.

La permeabilità ai cloruri, in queste applicazioni, è risultata tendenzialmente bassa. Tra le resine impiegate, quelle epossidiche sono risultate le migliori, in quanto la bassa permeabilità riscontrata subito dopo la posa si è mantenuta costante nel lungo periodo. Sebbene si siano riscontrati buoni risultati anche per le resine poliestere e metacriliche, la permeabilità ai cloruri è risultata bassa subito dopo la posa in opera, andando poi ad incrementarsi negli anni successivi (rimanendo però sempre all'interno di valori accettabili).

Infine, i rivestimenti superficiali hanno mostrato nel tempo un'ottima resistenza al consumo superficiale, indipendentemente dalla resina alla base del conglomerato.

I rivestimenti polimerici possono essere impiegati su varie tipologie di impalcato, sia esso in calcestruzzo oppure in acciaio. In letteratura sono stati svolti numerosi studi su questo argomento, per vagliare le caratteristiche su ciascuna tipologia di impalcato. Lo studio più importante è quello svolto sul Poplar Street bridge di St. Louis in Missouri [10]. Il ponte preso in esame è costituito da 5 campate per una lunghezza complessiva di 660 m, suddiviso in 4 corsie ed interessato da un traffico giornaliero medio di circa 12000 veicoli. Il ponte costruito nel 1967 è a lastra ortotropa, costituito quindi da un impalcato in acciaio. Il rivestimento, di tipo bituminoso, in seguito ai danni che subiva ripetutamente, veniva ricostruito mediamente ogni 6 anni.

Nel 1992 si è provveduto alla stesura di un rivestimento polimerico sottile di natura epossidica su una superficie del ponte pari a circa 21018 mq con metodo slurry. In seguito alla stesura sono state monitorate le condizioni di degrado della pavimentazione, in particolare valutando l'adesione del rivestimento e le possibili fessurazioni prodotte.

Le rilevazioni effettuate a 8 anni dalla messa in opera del rivestimento polimerico, hanno evidenziato un buono stato generale della pavimentazione osservando che solo lo 0.5% dell'area interessata da tale rivestimento (circa 93 m) era caratterizzata da fessurazioni, comunque di bassa entità. Dai rilevamenti fatti le fessurazioni riscontrate sono risultate localizzate in prossimità delle giunzioni saldate della lastra in acciaio di supporto. Da questa esperienza è possibile constatare come i rivestimenti polimerici

risultino buoni in termini di durabilità nel tempo mantenendo negli anni l'integrità. Essi però necessitano, come per qualsiasi tipo di pavimentazione, dei particolari accorgimenti in prossimità di punti critici come quelli di giunzione del supporto su cui poggiano.

Nel Missouri dal 1989 ad oggi si contano più di 300 applicazioni di rivestimenti polimerici sottili; vista la molteplicità di applicazioni è stato possibile eseguire una campagna di acquisizione dati per valutare l'evoluzione del degrado nel tempo di tali pavimentazioni.

Molte di queste applicazioni hanno mantenuto un grado di efficienza accettabile anche per un periodo superiore alla vita utile per le quali erano state progettate, altre invece hanno perso la loro efficienza (sono state sostituite solo dopo qualche anno dalla posa in opera).

Uno studio pubblicato nel 2007 [4] dal Missouri Department of Transportation ha riassunto i fenomeni di degrado dei rivestimenti polimerici e le cause.

I maggiori fenomeni di degrado osservati sono: fessure, degrado superficiale, distacchi di porzioni di impalcato. Questi fenomeni possono presentarsi in qualsiasi momento della vita utile del rivestimento ed essere causati da molteplici fattori.

La ricerca ha messo in evidenza come l'inclusione di aria durante la miscelazione dei componenti della resina, o durante la miscelazione della resina con l'aggregato, produca riduzioni, nel tempo, di efficienza prestazionale dei rivestimenti. Lo stesso problema si ha quando le superfici d'appoggio non risultano preparate in modo idoneo per ospitare il rivestimento.

È stato messo in evidenza inoltre come pavimentazioni polimeriche stese su ponti con luci elevate subissero, a causa delle flessioni conseguenti in fase di esercizio, maggiori fessurazioni, specialmente utilizzando resine rigide. I ricercatori hanno concluso che un rivestimento polimerico sottile può avere successo solo se l'impalcato, prima della posa, richiede riparazioni per non oltre il 5% della sua superficie. Particolare attenzione deve poi essere posta nella scelta dei materiali: devono infatti essere compatibili con il supporto e con l'ambiente in cui vengono inseriti.

## **2.10 Vantaggi e svantaggi delle pavimentazioni polimeriche sottili**

A conclusione del percorso bibliografico è possibile evidenziare i pregi e i difetti che caratterizzano le pavimentazioni polimeriche sottili. Tra i vantaggi troviamo:

- tempo di posa molto limitato che permette di ridurre al minimo le interferenze con il traffico e quindi le sue interruzioni o deviazioni.
- alta impermeabilità, a tal punto da eliminare definitivamente il problema dell'infiltrazione dell'acqua e di altre sostanze verso l'impalcato.
- resistenza ai più comuni agenti aggressivi e quindi maggiore durabilità.
- elevato rapporto tra resistenza meccanica e peso proprio (infatti, grazie allo spessore contenuto di tali pavimentazioni, il peso gravante sulla struttura risulta ridotto).
- forte legame con l'impalcato, sia esso in acciaio o in calcestruzzo (per le proprietà del polimero che forma la matrice del legante).
- ritiro limitato in fase di indurimento.
- eccellenti tessiture superficiali in grado di fornire confort e sicurezza alla marcia (con l'impiego di adeguati aggregati).
- elevata compatibilità con il supporto (almeno per le resine attualmente impiegate).

Gli svantaggi risultano essere molto ridotti:

- necessità di manodopera specializzata per ottenere rivestimenti a regola d'arte.
- aumento dei costi (soprattutto nella fase realizzazione del rivestimento per la manodopera).

# 3 Caratterizzazione dei Materiali

## 3.1 Obiettivi ed impostazione sperimentale

In questo capitolo verranno esposti ed analizzati i dati ottenuti nelle varie prove effettuate per la caratterizzazione dei materiali e le soluzioni proposte. Lo scopo della sperimentazione è di mettere in relazione diverse soluzioni per pavimentazioni sottili direttamente carrabili: si vuole pertanto effettuare un confronto prestazionale per individuare pregi e difetti di tali soluzioni, con la speranza di aprire nuove strade di ricerca e di sviluppo in questo settore.

Tale confronto ha richiesto molte semplificazioni nella definizione dei provini, resi necessarie a causa della diversa natura dei materiali componenti. Il numero elevato di prove ha inoltre comportato l'esecuzione di diversi protocolli di prova per la loro caratterizzazione prestazionale .

Inizialmente si è cercato di capire quali soluzioni mettere a confronto, quali materiali usare e quali prove svolgere durante la sperimentazione. Per la comprensione dei passaggi effettuati le tre soluzioni proposte verranno indicate con le lettere A, B e C. Da qui in avanti verrà tracciata una semplice ed intuitiva nomenclatura in modo da poter poi individuare i provini analizzati in modo chiaro, semplice e completo.

La Soluzione A è un composto, classificabile come malta sintetica, ottenuto dalla miscelazione di aggregato e di resina a temperatura ambiente. La soluzione B è invece una soluzione tradizionale (conglomerato bituminoso) ottenuta dalla miscelazione di aggregato e di legante bituminoso (a circa 160°C circa). La soluzione C invece è diversa dalle precedenti, sia per i materiali utilizzati, sia per la tecnica di posa. Si tratta infatti di un'insieme di strati di primer, resine ed aggregati, stesi a temperatura ambiente, i quali, una volta induriti, formano uno strato impermeabile e direttamente carrabile.

Tutte le soluzioni hanno una caratteristica in comune: sono delle pavimentazioni sottili, direttamente carrabili ed impermeabili, da impiegare come pavimentazioni per impalcati da ponte. La soluzione C è già stata testata in alcune applicazioni reali, la soluzione A invece è una malta sintetica impiegata per i giunti stradali, ottenuta dalla miscelazione di sabbia di quarzo e di resina epossidica. La soluzione B infine è una

soluzione classica, costituita da una guaina bituminosa e da un tappeto d'usura in conglomerato bituminoso, steso con uno spessore di circa 2 cm.

Le soluzioni in esame verranno testate considerando diverse percentuali di legante e diverse tipologie di aggregato. Le prove effettuate infatti sono volte anche a determinare se il tipo di aggregato utilizzato costituisca un fattore influente sulle prestazioni di questi sistemi, e in caso di risultato positivo, in quale modo e in quale misura questo valga. Tutto ciò vale analogamente per le differenti percentuali di legante impiegate.

Durante la sperimentazione si è notato che la soluzione C, essendo una soluzione appositamente studiata, e la soluzione B, essendo una soluzione di riferimento, erano difficilmente modificabili. Per questo motivo abbiamo studiato la variazione solo di determinati aggregati e di alcune percentuali di legante per la soluzione A.

La soluzione A sarà presa in esame andando a considerare due tipologie di miscele di aggregato:

<p><b>Curva granulometrica miscela di tipo 1</b> (1)</p>	<p><i>definite considerando come riferimento la curva granulometrica della sabbia di quarzo</i></p>
<p><b>Curva granulometrica miscela di tipo 2</b> (2)</p>	<p><i>definite considerando il fuso di riferimento per manti d'usura del SITEB<sup>1</sup></i></p>

Per quanto riguarda la curva granulometrica miscela di tipo 1 sono state considerate le seguenti tipologie:

<p><b>Curva granulometrica miscela di tipo 1</b> (1)</p>	<p><i>Sabbia di Quarzo (SQ)</i></p>
	<p><i>Scoria Fina (SF)</i></p>

<sup>1</sup> SITEB: Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade.

Per quanto riguarda la curva granulometrica miscela di tipo 2 sono state considerate le seguenti tipologie:

<b>Curva granulometrica miscela di tipo 2 (2)</b>	<i>Calcare (C)</i>
	<i>Scoria Grossa (SG)</i>

Le miscele e gli aggregati saranno descritti nei paragrafi successivi.

Il quantitativo di legante inserito nella soluzione A è una variabile nella sperimentazione proposta. Definito il quantitativo base (100% di legante, "100"), verrà studiata l'influenza sulle prestazioni della pavimentazione della variazione della quantità di resina. Saranno studiate anche soluzioni con quantitativo pari al 75% e al 50% di legante rispetto a quello base.

Il quantitativo base di legante preso in riferimento è quello proposto in bibliografia per confezionare la malta sintetica impiegata per i giunti di dilatazione.

Il quantitativo di bitume usato per confezionare la soluzione B sarà invece costante nei diversi provini e pari al 5% (soluzione generalmente utilizzata nelle reali applicazioni). Per la soluzione C il quantitativo di legante sarà pari a quello proposto dall'azienda produttrice e non verrà fatto variare da prova a prova.

Risulta evidente come il vero oggetto di studio sia la soluzione A nelle sue varianti di aggregato e quantitativo di legante. Le soluzioni B e C sono infatti solo mezzi di comparazione, scelti come rappresentativi di soluzioni attualmente utilizzate, appartenenti alle categorie di pavimentazione a base bituminosa e alla categoria delle pavimentazioni polimeriche sottili.

Si riporta di seguito uno schema riassuntivo di un prospetto completo dei campioni utilizzati:

TIPO SOLUZIONE	CURVA GRANULOMETRICA	TIPO AGGREGATO	PERCENTUALE LEGANTE	IDENTIFICATIVO
SOLUZIONE A  (A)	MISCELA 1  (1)	SABBIA AL QUARZO (SQ)	50	A-1-SQ-50
			100	A-1-SQ-100
	SCORIA FINA (SF)	100	A-1-SF-100	
RESINA	MISCELA 2  (2)	CALCARE ( C )	50	A-2-C-50
			75	A-2-C-75
			100	A-2-C-100
	SCORIA GROSSO (SG)	100	A-2-SG-100	
SOLUZIONE (B) BITUME	MISCELA 2 (2)	CALCARE ( C )	100	B-2-C-100
SOLUZIONE (C) RESINA	SPECIFICA	BAUXITE	100	C - B - 100

**Tabella 3.1: prospetto provini con quantità legante 100%.**

TIPO SOLUZIONE	CURVA GRANULOMETRICA	TIPO AGGREGATO	PERCENTUALE LEGANTE	IDENTIFICATIVO
SOLUZIONE A	MISCELA 1	SABBIA AL QUARZO (SQ)	50	A-1-SQ-50
RESINA	MISCELA 2	CALCARE (C)	50	A-2-C-50
			75	A-2-C-75

**Tabella 3.2: prospetto provini con variazione percentuale legante.**



Le tre soluzioni nelle varianti proposte sono state analizzate mediante prove di laboratorio per definire sia le caratteristiche del materiale impiegato (oggetto del presente capitolo) sia le prestazioni fornite dalle varie soluzioni (oggetto dei capitoli successivi).

Le prove svolte quindi servono sia a caratterizzare i materiali impiegati sia a valutare la risposta della soluzione come pavimentazione direttamente carrabile per impalcati da ponte .

### **3.1.1 Introduzione**

Nel paragrafo precedente è stato individuato l'oggetto della sperimentazione effettuata e, contemporaneamente, sono state tracciate le variabili che la caratterizzano. Nei paragrafi successivi saranno definiti e studiati i materiali impiegati attraverso una serie di prove di laboratorio. Tali prove sono necessarie per fare delle considerazioni sulla compatibilità e sulle prestazioni, in riferimento alle esigenze richieste dalle pavimentazioni di questo tipo.

Verranno trattati quindi separatamente, e con diversi livelli di specificità, gli aggregati e i leganti impiegati cercando di delineare per ciascuno di essi le caratteristiche più rappresentative.

### **3.2 Gli Aggregati.**





La sperimentazione prevede un confronto, oltre che delle diverse soluzioni, anche, a parità di soluzione, tra i diversi tipi di aggregato che possono essere impiegati e le diverse percentuali di resina utilizzabili.

In relazione agli aggregati per rivestimenti polimerici sottili, le informazioni e le prescrizioni reperibili in bibliografia non fanno quasi mai riferimento a precise tipologie di aggregato o a specifici materiali. Sono però più frequenti i riferimenti in termini di caratteristiche generali e prestazioni attese. Allo stesso tempo va ricordato che, mentre nel caso dei materiali tradizionali possono talvolta essere presenti incompatibilità di carattere chimico con alcuni tipi di aggregati, nel caso delle resine queste incompatibilità sono praticamente inesistenti. Questi fattori portano alla conclusione che la scelta dell'inerte si presta a diverse interpretazioni riguardo alla tipologia e alla granulometria.

Tra le funzioni principali dell'inerte possiamo citare l'aumento della resistenza al fuoco, la limitazione del ritiro in fase di indurimento e la micro e macro tessitura della pavimentazione. Queste funzioni unite alla non reattività chimica della resina con l'aggregato apre molte strade sulla scelta dello stesso. Bisogna comunque ricordare che per gli strati d'usura generalmente l'inerte deve essere di qualità superiore e le miscele

impiegate devono avere una distribuzione continua se posate con modalità premixed, o discontinua se si utilizza posa multiple layer.

In riferimento a quanto esposto e tenendo conto che per la soluzione A è stata considerata una posa con tecnica premixed, sono state studiate due tipologie di miscele (fina e grossa) date dalla combinazione degli inerti di seguito descritti.

<b>Materiale</b>	<b>Foto</b>	<b>Ambito impiego (soluzione)</b>
Sabbia al quarzo		A
Scoria acciaieria 0/4		A
Scoria acciaieria 4/8		A
Sabbia 0/5		A, B

Pietrisco 5/10



A, B

Filler



A, B

Bauxite



C

**Tabella 3.3: prospetto materiali analizzati.**

Prima di parlare delle miscele realmente impiegate, ottenute da una definita e studiata combinazione dei materiali sopra citati, risulta conveniente analizzare singolarmente i vari materiali attraverso le più comuni prove normalmente utilizzate per tale scopo. Solo in seguito verranno analizzate anche le miscele realmente impiegate nelle tre soluzioni.

### 3.2.1 Prove e protocolli di prova

Questo paragrafo introduce le prove svolte sui materiali, facendo riferimento alla normativa corrispondente; risulta pertanto utile riassumere le prove eseguite sugli aggregati presi singolarmente con lo schema di seguito esposto:

<b>Nome Prova</b>	<b>Normativa riferimento</b>
<i>Forma aggregato</i>	<i>ENI EN 933-4</i>
<i>Appiattimento aggregato</i>	<i>UNI EN 933-3</i>
<i>Los angeles</i>	<i>UNI EN 1097-2</i>
<i>equivalente in sabbia</i>	<i>UNI EN 933-8</i>
<i>Granulometria</i>	<i>UNI EN 933-1,2</i>
<i>Massa volumica apparente aggregati non addensati</i>	<i>CNR 62</i>
<i>Massa volumica apparente dei granuli di un aggregato</i>	<i>CNR 63</i>
<i>Massa volumica reale dei granuli</i>	<i>CNR 64</i>

**Tabella 3.4: prove e relative norme UNI e CNR utilizzate.**

Di seguito vengono esposti gli obiettivi (che con ciascuna prova ci si propone di raggiungere), i relativi protocolli e la normativa alla quale fare riferimento. Per maggiori specifiche sul protocollo di prova si rimanda alla normativa corrispondente.

#### **Forma aggregato (UNI EN 933 – 4)<sup>2</sup>**

**Oggetto:** La norma stabilisce un metodo per la determinazione dell'indice di forma degli aggregati grossi di origine naturale o artificiale, compresi gli aggregati leggeri.

Il metodo di prova specificato è applicabile alla frazione granulometrica  $d_i/D_i$  dove  $D_i < 63$  mm e  $d_i > 4$  mm.

**Protocollo/Principio:** I singoli granuli contenuti in un campione di aggregato grosso sono classificati in base al rapporto esistente tra la loro lunghezza  $L$  e spessore  $E$  mediante l'impiego di un calibro a cursore, se necessario.

L'indice di forma è calcolato come massa dei granuli aventi rapporto dimensionale  $L/E$  maggiori di 3, espressa come percentuale della massa totale a secco dei granuli sottoposti a prova.

<sup>2</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma UNI EN 933-4:2008.

### **Appiattimento aggregato (UNI EN 933 – 3)<sup>3</sup>**

**Oggetto:** La norma descrive il procedimento per la determinazione dell'indice di appiattimento degli aggregati e si applica ad aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri. Il procedimento descritto non è applicabile a granulometrie minori di 4 mm o maggiori di 80 mm.

**Protocollo/Principio:** La prova consiste in due operazioni di staccatura. Dapprima, usando stacci di prova, il campione viene separato in varie classi granulometriche secondo un prospetto specifico riportato nella normativa. Ogni classe granulometrica<sup>4</sup> viene quindi stacciata usando stacci che hanno aperture parallele di larghezza pari a  $D_i/2$ . Il coefficiente di appiattimento globale viene calcolato considerando la massa totale dei granuli che passano attraverso le aperture delle barre, espressa come percentuale della massa totale secca dei granuli esaminati.

Se necessario, l'indice di appiattimento di ogni classe granulometrica  $d_i/D_i$ , si calcola considerando la massa dei granuli passanti attraverso il setaccio corrispondente, espressa come percentuale della massa di quella classe granulometrica.

### **Los Angeles (UNI EN 1097 – 2)<sup>5</sup>**

**Oggetto:** la norma descrive il metodo di riferimento, la prova Los Angeles, utilizzato per le prove di tipo e in caso di controversia per la determinazione della resistenza alla frammentazione degli aggregati grossi.

La norma si applica agli aggregati naturali, artificiali o riciclati impiegati per l'ingegneria edile e civile.

**Protocollo/Principio:** Un campione di aggregato è fatto rotolare insieme alle sfere di acciaio all'interno di un cilindro rotante. Al completamento della rotazione, è calcolata la quantità di materiale trattenuta su un setaccio di 1.6 mm.

In questo paragrafo si vuole solo inquadrare lo scopo e i caratteri generali delle prove; si rimanda quindi il lettore, vista la non completa e specifica descrizione fornita per questa prova, a consultare il testo della normativa di riferimento per eventuali approfondimenti

---

<sup>3</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma UNI EN 933-3:2004.

<sup>4</sup> Classe granulometrica: Frazione di un aggregato che passa attraverso il più largo di due stacci e viene trattenuto dal più stretto.

<sup>5</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma UNI EN 1097-2:2010.

### **Equivalente in sabbia (UNI EN 933-8)<sup>6</sup>**

**Oggetto:** La norma specifica un metodo per la determinazione del valore di equivalenza in sabbia della classe granulometrica 0/2 mm negli aggregati fini e negli aggregati misti.

Essa è applicabile agli aggregati naturali.

**Protocollo/Principio:** Una porzione di prova di sabbia e una piccola quantità di soluzione flocculante vengono versati in un cilindro graduato e quindi agitati per rimuovere il rivestimento argilloso dalle particelle di sabbia nella porzione di prova. La sabbia viene quindi "irrigata" utilizzando ulteriore soluzione flocculante che forzi le particelle fini in sospensione sulla sabbia.

Dopo 20 min, il valore equivalente in sabbia (SE) viene calcolato come l'altezza del sedimento espressa come percentuale dell'altezza complessiva del materiale flocculato nel cilindro.

### **Granulometria (UNI EN 933-1,2)<sup>7</sup>**

**Oggetto:** La norma stabilisce un metodo per la determinazione della distribuzione granulometrica degli aggregati mediante setacciatura.

Si applica agli aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri, fino ad una dimensione nominale di 90mm, esclusi i fillers.

**Protocollo/Principio:** La prova consiste nel dividere, per mezzo di una serie di setacci, un materiale in numerose classi granulometriche di dimensioni decrescenti. Le dimensioni delle maglie e il numero di setacci sono scelti in base alla natura del campione e alla precisione richiesta.

Il procedimento adottato è il lavaggio seguito da setacciatura a secco. Quando il lavaggio può alterare le proprietà fisiche di un aggregato leggero, deve essere utilizzata la setacciatura per via secca.

La massa delle particelle trattenute sui cari setacci viene rapportata alla massa iniziale del materiale. Le percentuali cumulative del passante attraverso ciascun setaccio sono registrate sotto forma numerica e, se richiesto, rappresentate sotto forma grafica.

---

<sup>6</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma UNI EN 933-8:2000.

<sup>7</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma UNI EN 933-1:2009.

### **Massa volumica apparente aggregati non addensati (CNR 62)<sup>8</sup>**

#### **Definizione:**

*Massa volumica apparente di un aggregato non addensato è la massa di un volume unitario del materiale, inclusi i vuoti intergranulari e i pori.*

### **Massa volumica apparente dei granuli di un aggregato (CNR 63)<sup>9</sup>**

#### **Definizione:**

*La massa volumica apparente dei granuli di un aggregato è la massa di un volume unitario del materiale solido, inclusi i pori interni ai granuli non saturabili con acqua.*

### **Massa volumica reale dei granuli (CNR 64)<sup>10</sup>**

#### **Definizione:**

*La massa volumica reale dei granuli di un aggregato è la massa di un volume unitario del materiale solido, esclusi i pori esistenti all'interno dei granuli.*

Come già specificato, il presente paragrafo vuole essere solo un prospetto riassuntivo delle prove eseguite, definendo in modo sintetico gli obiettivi e le procedure impiegate. Per tal motivo si rimanda ai testi di normativa richiamati per maggiori dettagli sui protocolli adottati per l'esecuzione delle varie prove.

---

<sup>8</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma CNR62.

<sup>9</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma CNR63.

<sup>10</sup> Argomentazioni tratte dal testo della norma CNR64.

### **3.2.2 Gli aggregati: risultati e analisi dei dati ottenuti.**

Di seguito vengono esposti i risultati ottenuti attraverso le prove sopra elencate, al variare dell'aggregato considerato.

Le prove considerate sono solo quelle che usualmente vengono eseguite per analizzare il materiale; si tenga presente però che, data la diversa natura degli aggregati considerati e i limiti di applicazione delle prove stesse, tali protocolli non possono essere sempre applicati.

#### **Sabbia al Quarzo – Descrizione, prove e risultati ottenuti.**

La sabbia di quarzo è un aggregato fine, avente caratteristiche di pregio, che risulta idoneo ad essere utilizzato per un manto d'usura. Tale aggregato viene attualmente impiegato insieme con un legante di natura epossidica, andando a costituire una malta sintetica utilizzata come riempimento dei giunti di dilatazione.

Questo aggregato risulta inoltre essere tra quelli maggiormente impiegati in America per il confezionamento di pavimentazioni sottili a base polimerica.



**Figura 3.1: Sabbia al Quarzo.**

Da un'analisi visiva la sabbia di quarzo si presenta come un aggregato fine, relativamente pulito e di colore chiaro.



## Prove e risultati ottenuti

E' stata svolta anzitutto l'analisi granulometrica, che ha portato ai seguenti risultati:

Setaccio [mm]	Trattenuto [Kg]	Trattenuto [%]	Passante [Kg]	Passante [%]	Totale Setacciato [Kg]
16,000	0,000	0,000	0,749	100,000	0,749
8,000	0,000	0,000	0,749	100,000	
4,000	0,000	0,000	0,749	100,000	
2,000	0,253	33,778	0,496	66,222	
1,000	0,209	27,904	0,287	38,318	
0,500	0,109	14,553	0,178	23,765	
0,250	0,060	8,011	0,118	15,754	
0,125	0,110	14,686	0,008	1,068	
0,063	0,000	0,000	0,000	0,000	

Tabella 3.5: distribuzione granulometrica sabbia al quarzo.

### Curva granulometrica UNI

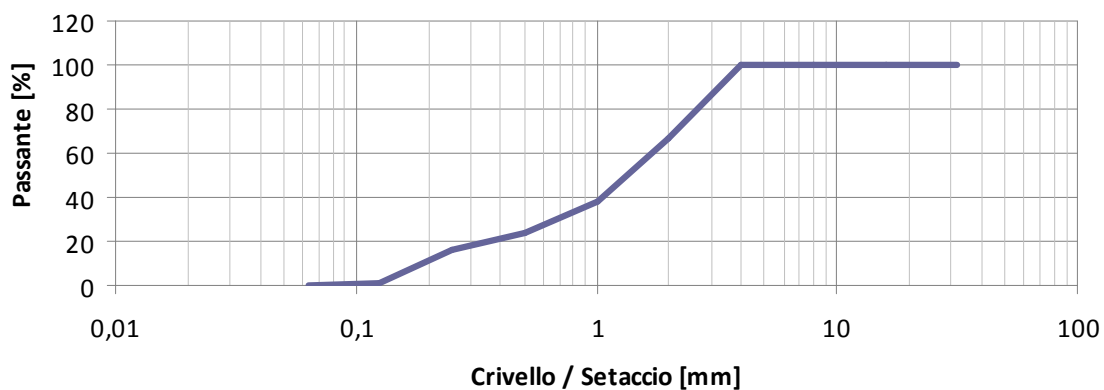


Grafico 3.1: distribuzione granulometrica sabbia al quarzo.

Di seguito i risultati delle altre prove eseguite sul materiale:

<b>Prova</b>	<b>Valore ottenuto</b>
<i>Forma aggregato</i>	-
<i>Appiattimento aggregato</i>	-
<i>Los angeles</i>	-
<i>equivalente in sabbia</i>	95 <sup>11</sup>
<i>Massa volumica apparente aggregati non addensati</i>	1.48 g/cm <sup>3</sup>
<i>Massa volumica apparente dei granuli di un aggregato</i>	2.568 g/cm <sup>3</sup>
<i>Massa volumica reale dei granuli</i>	2.775g/cm <sup>3</sup>
<i>Indice dei vuoti</i>	0.735
Percentuale dei vuoti	42.37%
porosità	0.075%

**Tabella 3.6: risultati prove eseguite.**

Risulta evidente dalla curva granulometrica proposta che il materiale in esame presenta grani di dimensioni sempre inferiori a 4 mm. Le dimensioni dei grani di aggregato non consentono di effettuare alcune prove: indice di forma, indice di appiattimento, perdita in peso per abrasione ed attrito (Los Angeles). Tutte queste prove richiedono infatti campioni di aggregato di dimensioni superiori.

Per quanto riguarda le altre prove, è stato possibile determinare la massa volumica apparente, la massa volumica apparente non addensata, la massa volumica reale, l'indice dei vuoti, la percentuale dei vuoti e la porosità.

Da questi ultimi valori notiamo che il materiale presenta pochissimi pori interni ai grani e con caratteristiche nel complesso in linea con le tipiche sabbie tradizionali. Il materiale possiede un elevato valore di equivalente in sabbia.

La sabbia di quarzo presenta quindi:

- distribuzione granulometrica continua,
- elevata pulizia dei grani,
- grani di dimensione sempre inferiore ai 4 mm,

<sup>11</sup> Dato ottenuto dalla media di tre prove sul materiale.

- scarsa porosità.

Il materiale, viste le caratteristiche, soddisfa le necessità richieste e quindi può essere impiegato.

### **Scoria di acciaieria**

La richiesta di pavimentazioni stradali sempre più sicure e performanti, e l'attenzione crescente verso le tematiche ambientali, implica una ricerca continua di nuovi materiali e nuove tecnologie per il miglioramento dei manufatti e la salvaguardia delle risorse naturali. In quest'ottica si inquadra anche la realizzazione di un nuovo prodotto ad elevate prestazioni, derivante dalla lavorazione e dalla trasformazione di un residuo della produzione dell'acciaio: la scoria d'acciaieria.

La scoria d'acciaieria è un sottoprodotto della lavorazione dell'acciaio. Ne esistono almeno due tipologie, in relazione al tipo di lavorazione subita dall'acciaio da cui queste scorie derivano: BOF (basic oxygen furnace) e EAF (electric arc furnace). Entrambe sono costituite dagli scarti del materiale fuso, ottenuto dal materiale ferroso utilizzato nel processo di produzione dell'acciaio. Tale materiale, ricco di additivi, viene raffreddato molto rapidamente in aria e successivamente frantumato.

A differenziare le due scorie è il livello di stabilità volumetrica, superiore per le EAF rispetto alle BOF, motivo per cui queste ultime sono meno utilizzate.

La granella derivante è un materiale avente caratteristiche fisiche e meccaniche migliori rispetto agli inerti pregiati di origine effusiva, quali ad esempio basalto e porfido, normalmente impiegati per il confezionamento di conglomerati bituminosi speciali ad alte prestazioni.

Attualmente in Europa, vengono prodotte ogni anno circa 12 milioni di tonnellate di scorie d'acciaieria e, grazie alle buone caratteristiche del materiale, circa il 65% è utilizzato come aggregato per la costruzione delle strade.

Di seguito vengono riproposti i risultati ottenuti sottoponendo il materiale alle varie prove. Si precisa che la scoria utilizzata è di tipo EAF nelle pezzature 0/4 mm e 4/8 mm.



**Figura 3.2: Scoria acciaieria pezzatura 0/4 mm.**



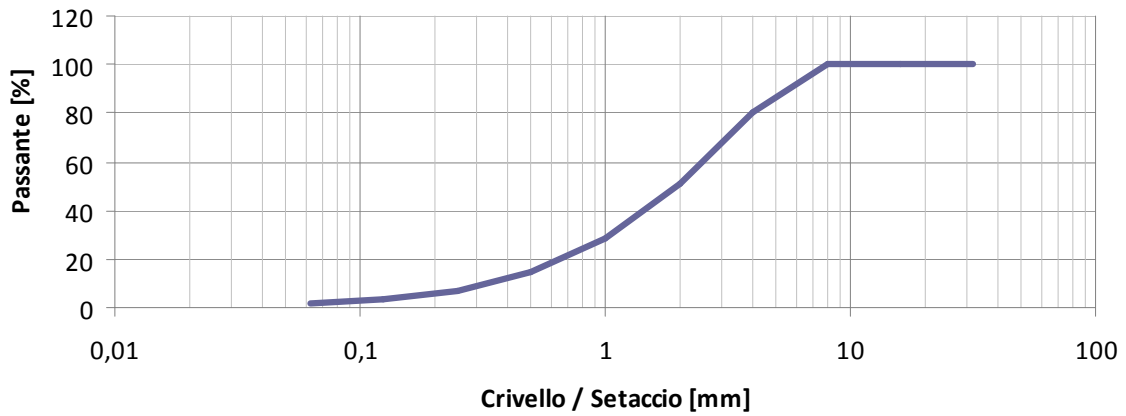
**Figura 3.3: Scoria acciaieria pezzatura 4/8 mm.**

Dall'analisi granulometrica effettuata su entrambe le pezzature otteniamo i seguenti dati:

Setaccio [mm]	Trattenuto [Kg]	Trattenuto [%]	Passante [Kg]	Passante [%]	Totale setacciato [Kg]
16,000	0,000	0,000	0,780	100,000	0,780
8,000	0,000	0,000	0,780	100,000	
4,000	0,153	19,615	0,627	80,385	
2,000	0,233	29,872	0,394	50,513	
1,000	0,173	22,179	0,221	28,333	
0,500	0,105	13,462	0,116	14,872	
0,250	0,061	7,821	0,055	7,051	
0,125	0,028	3,590	0,027	3,462	
0,063	0,013	1,667	0,014	1,795	

**Tabella 3.7: Analisi granulometrica scoria pezzatura 0/4 mm.**

**Curva granulometrica UNI**

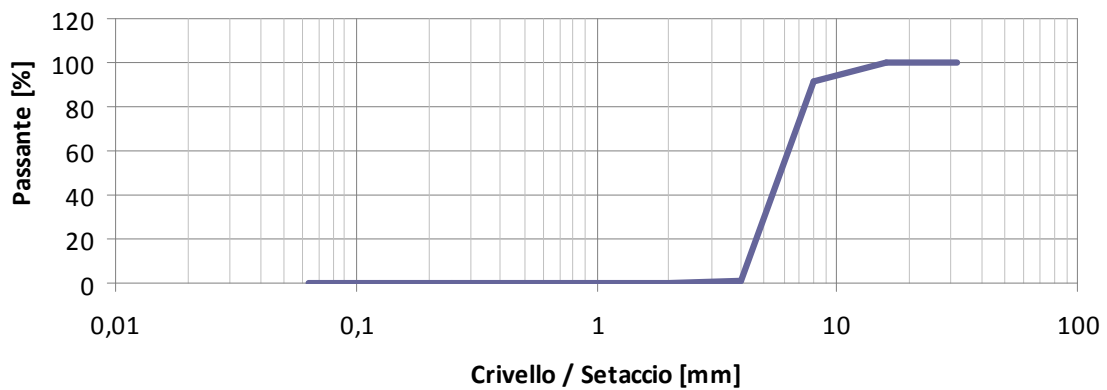


**Grafico 3.2: Analisi granulometrica scoria 0/4 mm.**

Setaccio [mm]	Trattenuto [Kg]	Trattenuto [%]	Passante [Kg]	Passante [%]	Totale setacciato [Kg]
16,000	0,000	0,000	0,648	100,000	0,648
8,000	0,016	2,469	0,632	91,727	
4,000	0,623	96,142	0,009	1,306	
2,000	0,008	1,235	0,001	0,145	
1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,125	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,063	0,000	0,000	0,000	0,000	

**Tabella 3.8: Analisi granulometrica scoria pezzatura 4/8 mm.**

**Curva granulometrica UNI**



**Grafico 3.3: Analisi granulometrica scoria 4/8 mm.**

<b>Prova</b>	<b>Scoria 0/4</b>	<b>Scoria 4/8</b>
<i>Forma aggregato</i>	19%	15%
<i>Appiattimento aggregato</i>	29%	8%
<i>Los angeles</i>	-	11.5%
<i>equivalente in sabbia</i>	87%	-
<i>Massa volumica apparente aggregati non addensati</i>	2,125 g/cm <sup>3</sup>	-
<i>Massa volumica apparente dei granuli di un aggregato</i>	3,87 g/cm <sup>3</sup>	-
<i>Massa volumica reale dei granuli</i>	3,92 g/cm <sup>3</sup>	-
<i>Indice dei vuoti</i>	0,820	-
Percentuale dei vuoti	45,06%	-
porosità	1,35%	-

**Tabella 3.9: prospetto risultati prove.**

Avendo preso due pezzature differenti per lo stesso materiale, è stato possibile ottenere un prospetto completo dei risultati delle varie prove.

Il materiale, a seguito dei risultati ottenuti, si dimostra essere relativamente pulito (meno della sabbia di quarzo), sufficientemente poliedrico e, da un'analisi di tipo visivo, molto spigoloso.

Dalla prova Los Angeles, la quale a causa delle restrizioni imposte dal protocollo di prova è stata effettuata solo per la pezzatura 4/8, si è ottenuto un valore pari a 11.5%: tale valore risulta decisamente basso e quindi indice di una elevata resistenza del materiale al consumo per attrito.

Dall'analisi granulometrica è possibile riscontrare per la pezzatura 0/4 un andamento della curva di tipo continuo: caratteristica essenziale, se il materiale viene utilizzato per manti d'usura stesi con tecnica premixed. Al contrario la pezzatura 4/8 presenta un andamento fortemente discontinuo nella rappresentazione granulometrica del materiale.

È stato scelto di utilizzare la pezzatura 4/8 in combinazione con la 0/4 (miscela grossa), mentre si è deciso di utilizzare la pezzatura 0/4 singolarmente (tale scelta progettuale risulta necessaria a causa della tecnica di posa adottata). La tecnica premixed infatti richiede inerti e/o miscele con curva continua e tale esigenza risulta soddisfatta dalla

pezzatura 0/4, ma non dalla 4/8, se non impiegata in combinazione con altre pezzature.

Dai valori ottenuti dalle altre prove è possibile concludere che la scoria risulta essere un materiale molto pesante e con porosità limitata: si può quindi ritenere idoneo per l'utilizzo in questa attività di tesi.

È possibile riassumere alcune delle caratteristiche del materiale come segue,

- il peso specifico è molto elevato e raramente inferiore a 3800 Kg/mc,
- alta resistenza alla perdita in peso per abrasione ed attrito,
- è un materiale pulito, spigoloso, poliedrico e scabro.

### **Sabbia 0/5 e Pietrisco 5/10**

Questi due materiali vengono di seguito analizzati assieme in quanto risulteranno essere impiegati in modo congiunto a costituire, con l'aggiunta di una percentuale contenuta di filler, una miscela che verrà indicata come miscela 2.



**Figura 3.4: Sabbia 0/5.**



**Figura 3.5: Pietrisco 5/10.**



## Prove e risultati ottenuti

E' stata svolta anzitutto l'analisi granulometrica, che ha portato ai seguenti risultati:

### Sabbia 0/5

Setaccio [mm]	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Passante [g]	Passante [%]	Totale Setacciato [g]
16	0	0,000	943	100,000	943
8	13	1,380	930	98,621	
4	339	35,950	591	62,672	
2	250	26,510	341	36,161	
1	144	15,270	197	20,891	
0,5	71	7,530	126	13,362	
0,25	55	5,830	71	7,529	
0,125	50	5,300	21	2,227	
0,063	17	1,800	4	0,424	

Tabella 3.10: Analisi granulometrica Sabbia 0/5 mm.

### Curva granulometrica UNI

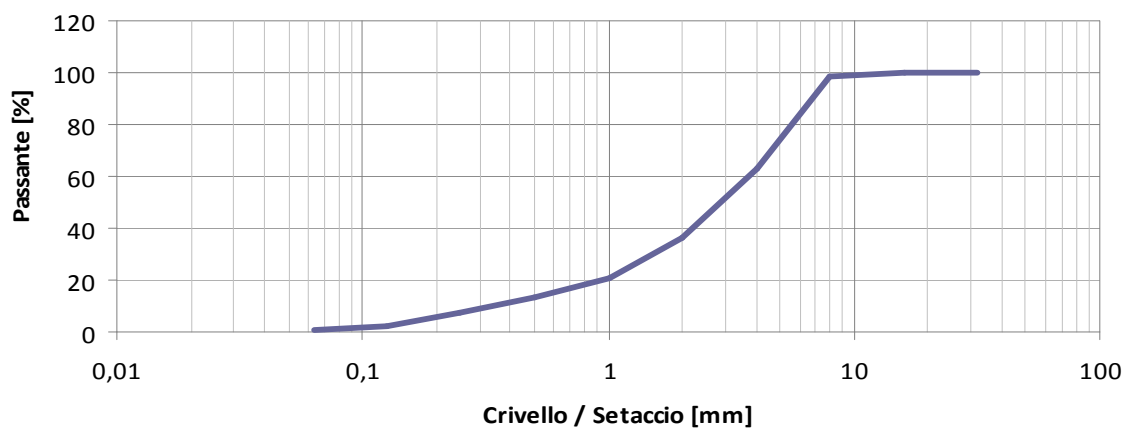


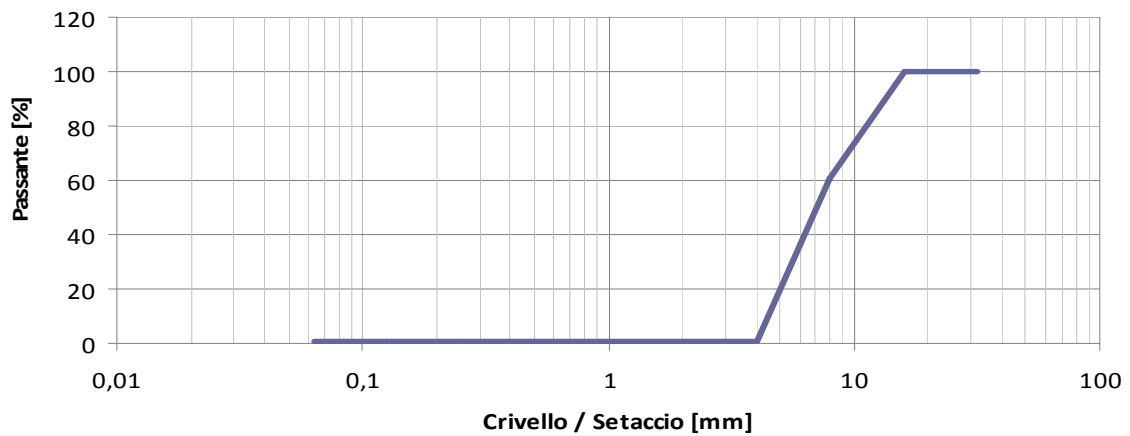
Grafico 3.4: Analisi granulometrica Sabbia 0/5 mm.

### Pietrisco 5/10

Setaccio [mm]	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Passante [g]	Passante [%]	Totale Setacciato [g]
16	0,0	0,000	1088	100,000	1088
8	431,0	39,614	657	60,386	
4	648,0	59,559	9	0,827	
2	0,0	0,000	9	0,827	
1	0,0	0,000	9	0,827	
0,5	0,0	0,000	9	0,827	
0,25	0,0	0,000	9	0,827	
0,125	0,0	0,000	9	0,827	
0,063	4,0	0,368	5	0,460	

**Tabella 3.11: Analisi granulometrica Pietrisco 5/10 mm.**

### Curva granulometrica UNI



**Grafico 3.5: Analisi granulometrica Pietrisco 5/10 mm.**

Di seguito sono riportati i risultati delle altre prove effettuate sul materiale, sempre nel rispetto delle condizioni imposte da ciascun protocollo di prova.

<b>Prova</b>	<b>Sabbia 0/5</b>	<b>Pietrisco 5/10</b>
<i>Forma aggregato</i>	-	5.23%
<i>Appiattimento aggregato</i>	6.21 %	8.12 %
<i>Los angeles</i>	-	-
<i>equivalente in sabbia</i>	-	-
<i>Massa volumica apparente aggregati non addensati</i>	1.48 g/cmc	1.36 g/cmc
<i>Massa volumica apparente dei granuli di un aggregato</i>	3.13 g/cmc	2.64 g/cmc
<i>Massa volumica reale dei granuli</i>	1.28 g/cmc	2.78 g/cmc
<i>Indice dei vuoti</i>	-	-
Percentuale dei vuoti	-	-
porosità	-	-

**Tabella 3.12: Prospetto risultati prove**

Visivamente la sabbia 0/5 si presenta con pezzatura tendenzialmente più grossa rispetto alla sabbia di quarzo. Questa considerazione è confermata dalla distribuzione granulometrica ottenuta, nella quale al setaccio con maglia da 4 mm si può notare già una massa del campione trattenuta pari a circa 1/3 di quella totale (identificabile più come graniglia che come sabbia). Per il medesimo setaccio la percentuale trattenuta di sabbia di quarzo è invece pari a 0. Considerazione analoga può essere fatta per il pietrisco 5/10 se paragonato con la scoria di pezzatura 4/8. Tenuto conto che il range di pezzature dei materiali a confronto (scoria e pietrisco) risulta essere differente (5/10 contro 4/8), si può notare per il pietrisco la tendenza ad avere una pezzatura più grossa rispetto alla scoria 4/8. Confrontando la sabbia 0/5, il pietrisco 5/10 e gli altri aggregati proposti, si possono fare le seguenti osservazioni.

- Le pezzature fini considerate (sabbia di quarzo, scoria 0/4 e sabbia 0/5) hanno una distribuzione continua delle curve granulometriche.
- Le curve granulometriche delle pezzature grosse (scoria 4/8 e pietrisco 5/10) si presentano discontinue (non possono essere quindi utilizzate come aggregati

singoli in un metodo di posa premixed, ma risultano invece idonee se utilizzate per manti d'usura posati con tecnica multiple layer).

- La scoria presenta un peso specifico elevato, se confrontato con gli altri aggregati (fattore non trascurabile se si considera l'esigenza di avere un minor peso sull'impalcato).

- La sabbia 0/5 e il pietrisco 5/10, a seguito dei risultati ottenuti, si presentano in linea con gli altri materiali analizzati e per tal motivo possono essere considerati idonei per la sperimentazione proposta. Vista la tendenza alla pezzatura grossa, saranno impiegati per definire miscele di tipo 2.

## Bauxite

In questa sperimentazione la bauxite riveste un ruolo marginale rispetto agli altri aggregati analizzati. Mentre la scoria, la sabbia e il pietrisco sono impiegati per generare diverse miscele da testare, la bauxite viene qui impiegata solo per la soluzione C.



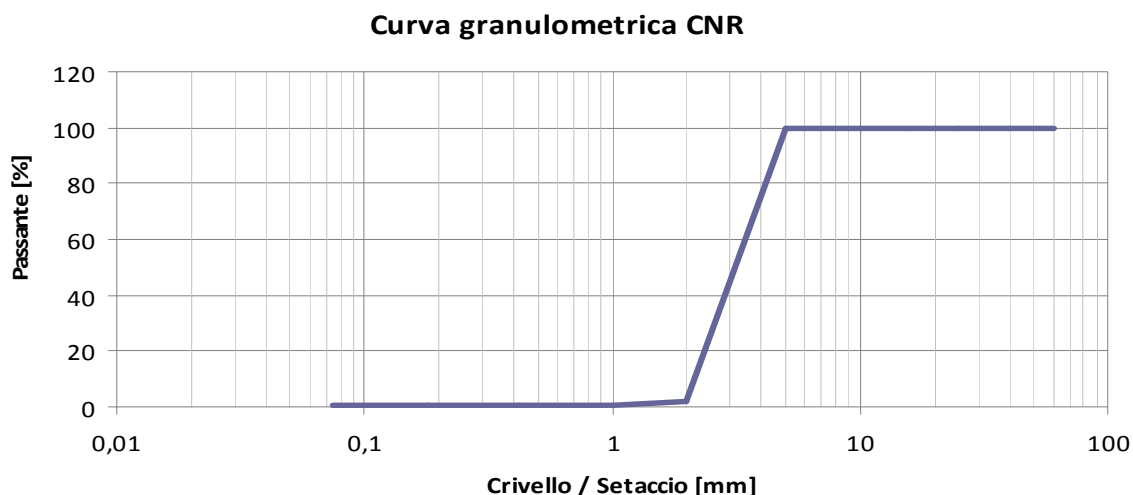
Figura 3.6: Bauxite

## Prove e risultati ottenuti

E' stata svolta l'analisi granulometrica, che ha portato ai seguenti risultati:

Setaccio [mm]	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Passante [g]	Passante [%]	Totale Setacciato [g]
25	0	0,000	1000	100,000	1000
20	0	0,000	1000	100,000	
15	0	0,000	1000	100,000	
10	0	0,000	1000	100,000	
5	0	0,000	1000	100,000	
2	978,9	97,890	21	2,110	
1	17,3	1,730	4	0,380	
0,4	0	0,000	4	0,380	
0,18	0	0,000	4	0,380	
0,08	0	0,000	4	0,380	
Fondo	3,8	0,380	0	0,000	

Tabella 3.13: Analisi granulometrica Bauxite.



**Grafico 3.6: Curva granulometrica Bauxite.**

Di seguito i risultati delle altre prove eseguite sul materiale:

Prova	Valore ottenuto
<i>Forma aggregato</i>	-
<i>Appiattimento aggregato</i>	-
<i>Los angeles</i>	-
<i>equivalente in sabbia</i>	98%
<i>Massa volumica apparente aggregati non addensati</i>	1.52 g/cm <sup>3</sup>
<i>Massa volumica apparente dei granuli di un aggregato</i>	2.55 g/cm <sup>3</sup>
<i>Massa volumica reale dei granuli</i>	2.81 g/cm <sup>3</sup>
<i>Indice dei vuoti</i>	-
Percentuale dei vuoti	-

**Tabella 3.14: Prospetto risultati prove.**

La curva granulometrica del materiale si presenta discontinua e con una pezzatura prevalentemente compresa tra 0 mm e 2 mm di diametro.

La discontinuità della curva risulta idonea per una tecnica di stesa di tipo multiple-layer, e non per quella premixed: infatti tale materiale viene utilizzato solo nella soluzione C, con lo scopo di fornire una micro/macro tessitura alla pavimentazione finita.

### **3.3 Le miscele proposte in questo studio**

Nel paragrafo precedente, sono stati analizzati i vari aggregati presi singolarmente. La sperimentazione proposta ha come variabile anche il tipo di aggregato, ma solo per la soluzione A. Dall'analisi singola di ciascun aggregato preso in considerazione è stato possibile notare l'incompatibilità di alcuni di essi ad essere impiegati singolarmente a causa delle loro caratteristiche (principalmente a causa della discontinuità della curva granulometrica).

Per tal motivo sono state definite due categorie di curve granulometriche:

miscela di tipo 1,

miscela di tipo 2.

La distinzione tra miscela di tipo 1 e quella di tipo 2 è stata fatta considerando i fusi e le curve granulometriche delle miscele e degli aggregati considerati.

#### **3.3.1 Curva granulometrica della miscela di tipo 1**

Tale miscela ha come curva granulometrica di riferimento quella della sabbia di quarzo.

La sabbia al quarzo è stata scelta per vari motivi:

è l'aggregato indicato dalla ditta produttrice per la realizzazione della malta sintetica (soluzione A) per il riempimento dei giunti di dilatazione;

- la curva granulometrica si presenta continua e quindi si presta ad essere predisposta senza essere combinata con altri aggregati per realizzare manti d'usura stesi con tecnica premixed,
- è già stata impiegata in altre sperimentazioni come rivestimento polimerico sottile ottenendo buoni risultati (è stato largamente impiegato in America),
- la sostanziale assenza di questo tipo di applicazioni sul territorio nazionale, implica l'impossibilità di reperire capitoli o altre tipologie di informazioni sui fusi di riferimento da prendere in considerazione,
- ha, rispetto agli altri aggregati, granuli di dimensioni più fini.

Nella definizione delle miscele di tipo 1 non si fa riferimento ad un fuso granulometrico, ma alla singola curva granulometrica della sabbia di quarzo. L'obiettivo non è quindi far rientrare all'interno di un determinato fuso granulometrico la curva della miscela progettata, ma quello di farlo aderire, per quanto possibile, alla curva granulometrica della sabbia di quarzo.

Le curve granulometriche delle miscele di tipo 1 proposte sono:

- “sabbia di quarzo”;
- “scoria fine”.

La prima miscela è costituita dalla sola sabbia di quarzo, presa come viene fornita e senza variazione di nessun tipo nella granulometria. Si è provveduto ad un’asciugatura, mediante l’utilizzo di idonei forni, qualora l’aggregato risultasse umido o addirittura bagnato.

Discorso diverso è da fare per la seconda miscela definita “scoria fina”. Il materiale impiegato è la scoria analizzata in precedenza ed in particolare quella con pezzatura 0/4 mm. Grazie alla distribuzione granulometrica continua della pezzatura 0/4 mm, non è necessaria l’introduzione di ulteriori pezzature o di diversi tipi di aggregato. Risulta pertanto non efficiente parlare di miscela, non essendo stato introdotto di fatto altro materiale e/o altra pezzatura.

Definita la curva di riferimento e i materiali impiegati, sono state confrontate le curve granulometriche delle due miscele di tipo 1 considerate con un fuso di riferimento per pavimentazioni con posa premixed.

Il fuso di riferimento indicato risulta derivare da informazioni bibliografiche ed è da considerarsi come linea guida. Non esistono in Italia infatti molte applicazioni di queste tipologie di pavimentazioni e non esistono capitolati di riferimento o fusi granulometrici italiani.

Sarà quindi effettuato, oltre ad una rappresentazione singola delle varie curve delle miscele, anche una rappresentazione delle stesse in riferimento al fuso menzionato.



### Miscela di tipo 1 “sabbia al quarzo”

La curva granulometrica di tale miscela è quella già vista nei capitoli precedenti ed è di seguito riportata:

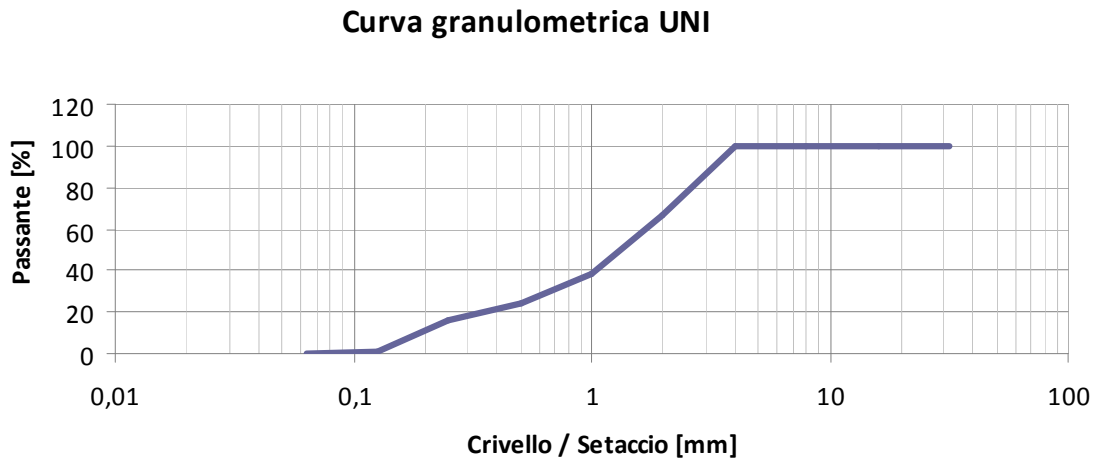


Grafico 3.7: Curva granulometrica Miscela fine Sabbia al Quarzo.

Confrontando tale curva con il fuso granulometrico di riferimento otteniamo.

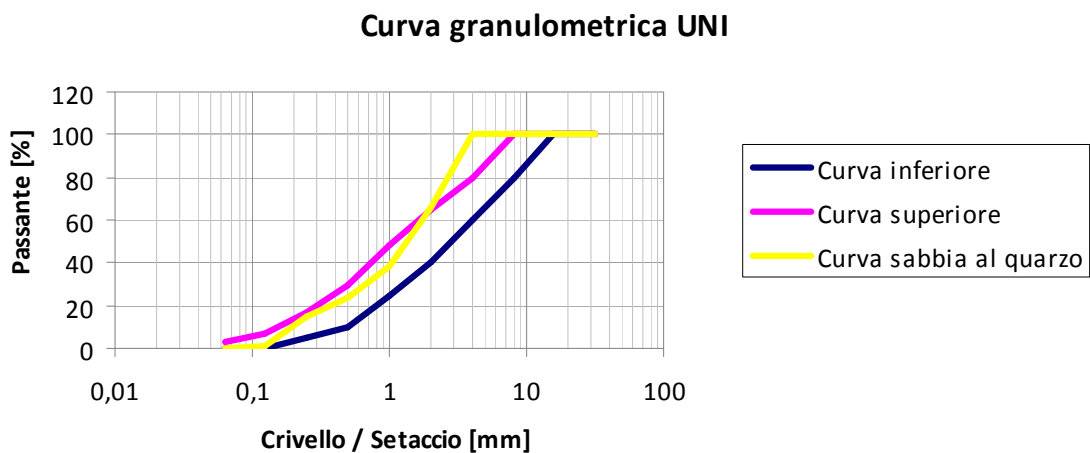


Grafico 3.8: Miscela 1 - sabbia di quarzo.

E' possibile riscontrare come la curva granulometrica della sabbia di quarzo sia per la maggior parte contenuta all'interno del fuso di riferimento (puramente indicativo e non

vincolante).

Si ritiene pertanto soddisfacente la scelta della sabbia di quarzo come miscela, poichè assicura le caratteristiche richieste per un manto d'usura con posa premixed e allo stesso tempo non richiede ulteriori lavorazioni di vagliatura e/o miscelazione con altri aggregati in quanto viene fornito già con tale distribuzione.

### Miscela di tipo 1 “scoria fine”

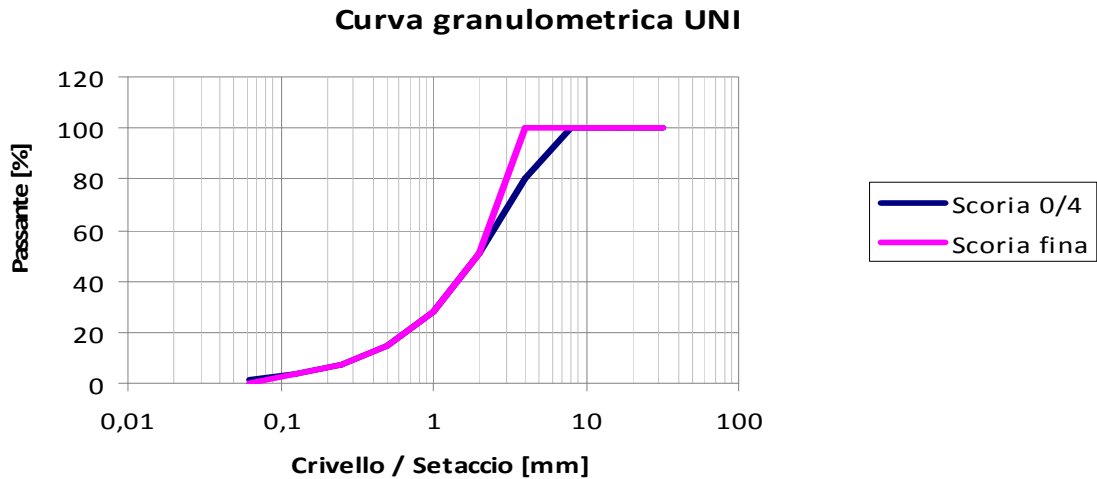
La scoria fina è stata definita a partire dalla scoria con pezzatura 0/4 alla quale sono state tolte, tramite vagliatura, due classi granulometriche con lo scopo di ricreare un andamento granulometrico simile a quello della sabbia di quarzo.

Di seguito sono riportate le distribuzioni granulometriche della scoria 0/4 e della conseguente scoria fina, evidenziando le modifiche attuate.

Setaccio [mm]	Passante [%] Scoria 0/4	Passante [%] Scoria fina
31,5	100,000	100,000
16	100,000	100,000
8	100,000	100,000
4	80,385	100,000
2	50,513	50,513
1	28,333	28,333
0,5	14,872	14,872
0,25	7,051	7,051
0,125	3,462	3,462
0,063	1,795	0,000

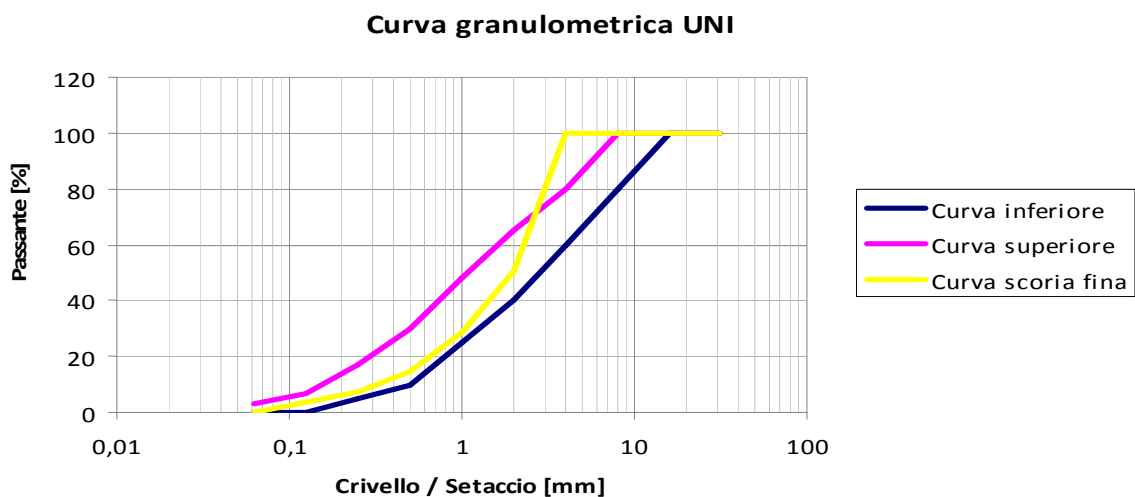
**Tabella 3.15: differenza tra scoria 0/4 e scoria fina.**

Come possiamo notare la variazione che è stata introdotta tra scoria 0/4 e fina si ha per il vaglio 4 mm e per quello 0.063 mm. Le curve granulometriche conseguenti risultano essere:



**Tabella 3.16: scoria Fina e scoria 0/4**

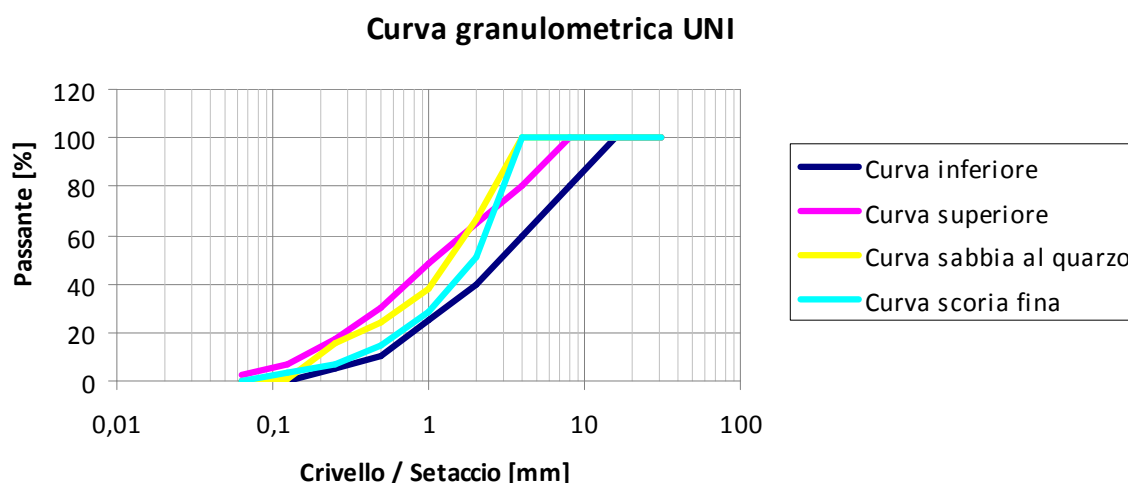
Confrontando infine la curva della scoria fina con il fuso di riferimento otteniamo:



**Grafico 3.9: scoria Fina.**

Come per la sabbia di quarzo, anche per la scoria fina, si riscontra che solo una piccola parte della curva esce dal fuso ed in particolare la parte volutamente modificata. Questa scelta progettuale, a primo impatto contro tendenza e sbagliata risulta essere giustificata dalla volontà di fondo di considerare la sabbia di quarzo come riferimento, essendo questo aggregato già impiegato in applicazioni reali. Inoltre si è scelto di non tenere in considerazione in modo vincolante, ma solo indicativo, il fuso di riferimento, essendo esso frutto di ricerca bibliografica (e quindi soggetto ad approssimazioni) e non derivante da capitoli.

Confrontiamo infine per via grafica le curve delle due miscele:



**Grafico 3.10: curva granulometrica sabbia al quarzo e scoria fina.**

L'andamento assai simile delle due curve, e la tendenza di queste ad essere in gran parte rientranti nel fuso di riferimento, ne conferiscono l'idoneità d'impiego. Non è da escludere comunque l'impiego della scoria 0/4 senza modifiche di granulometria, in quanto anch'essa rientra nel fuso teorico proposto, ma non soddisfa l'esigenza di tendere alla distribuzione della sabbia di quarzo.

### 3.3.2 Curva granulometrica della miscela di tipo 2

Le miscele di tipo 2 differiscono da quelle di tipo 1 per il fatto che sono l'unione di più aggregati con lo scopo di rientrare all'interno di un fuso di riferimento. Il fuso, fornito dal capitolato speciale SITEB, viene utilizzato per manti d'usura in conglomerato bituminoso.

Sono state proposte due miscele di tipo 2:

- "calcare",
- "scoria grossa".

La miscela "calcare" deriva dall'unione, con percentuali precise, di sabbia 0/5, pietrisco 5/10 e filler, mentre la miscela "scoria grossa" è data dall'unione di scoria 0/4, scoria 4/8 e filler.

## Miscela di tipo 2 “calcare”

Tale miscela è data dall'unione di sabbia 0/5, pietrisco 5/10 e di filler. Le curve granulometriche dei vari aggregati sono state definite nei paragrafi precedenti.

Per creare la miscela “calcare” è stato introdotto un 48 % di sabbia 0/5 mm, un 45% di pietrisco 5/10 mm e un 7% di filler.

Di seguito il prospetto dell'analisi granulometrica riassuntiva dei tre elementi, la curva granulometrica della miscela di tipo 1 “calcare” e il fuso di riferimento del SITEB.

Setaccio [mm]	Curva inferiore	Curva superiore	Sabbia 0/5 (48%)	Pietrisco 5/10 (45%)	fillers (7%)	Calcare
30	100	100	100,000	100,000	100,000	100,000
25	100	100	100,000	100,000	100,000	100,000
15	100	100	100,000	100,000	100,000	100,000
10	70	100	99,470	84,070	100,000	92,577
5	43	67	77,420	0,920	100,000	44,576
2	25	45	38,400	0,820	100,000	25,801
0,4	12	24	10,270	0,820	100,000	12,299
0,18	7	15	4,390	0,460	96,000	9,034
0,075	6	11	1,070	0,270	67,010	5,326

Tabella 3.17: prospetto riassuntivo analisi granulometrica calcare e suoi componenti.

### Curva granulometrica CNR

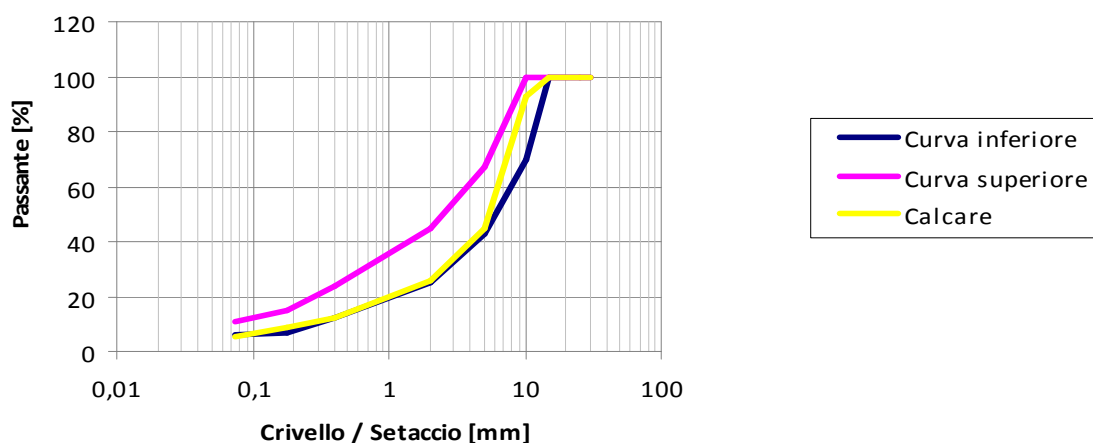


Grafico 3.11: Curva granulometrica calcare.

Si può notare come la curva rientri perfettamente nel fuso di riferimento.

## Miscela di tipo 2 “scoria grossa”

La scoria grossa è stata ottenuta dalla miscelazione, in varie percentuali, di scoria con pezzatura 0/4, scoria con pezzatura 4/8 e da Fillers. Le percentuali sono 70% scoria 0/4, 22% scoria 4/8 ed 8 % fillers.

Il prospetto sotto riportato definisce i vari aggregati impiegati, la miscela scoria grossa derivante e le curve superiori e inferiori del fuso SITEB di riferimento.

Setaccio [mm]	Curva min	Curva Max	Scoria 0/4 (70%)	Scoria 4/8 (22%)	fillers (8%)	Scoria Grossa
30	100	100	100,000	100,000	100,000	100,000
25	100	100	100,000	100,000	100,000	100,000
15	100	100	100,000	100,000	100,000	100,000
10	70	100	100,000	100,000	100,000	100,000
5	43	67	71,000	3,500	100,000	58,470
2	25	45	29,800	0,500	100,000	28,970
0,4	12	24	9,200	0,500	100,000	14,550
0,18	7	15	4,400	0,500	96,000	10,870
0,075	6	11	2,100	0,400	67,100	6,926

Tabella 3.18: prospetto granulometria scoria grossa.

La curva granulometrica corrispondente risulta essere:

Curva granulometrica CNR

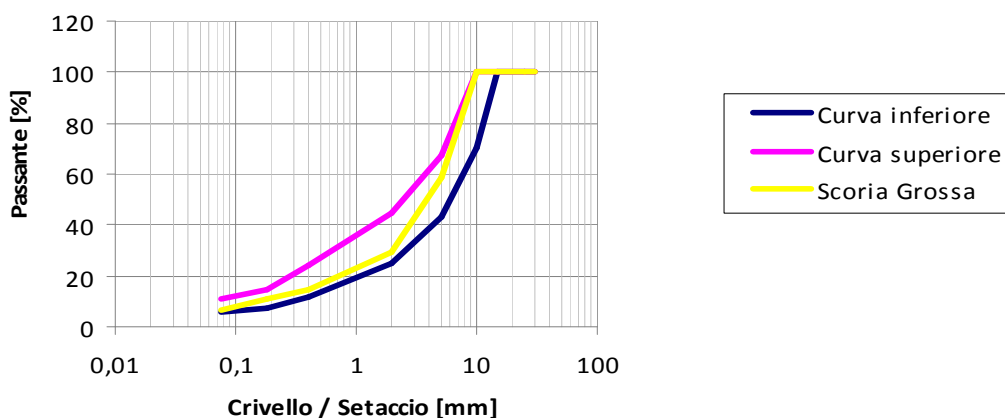
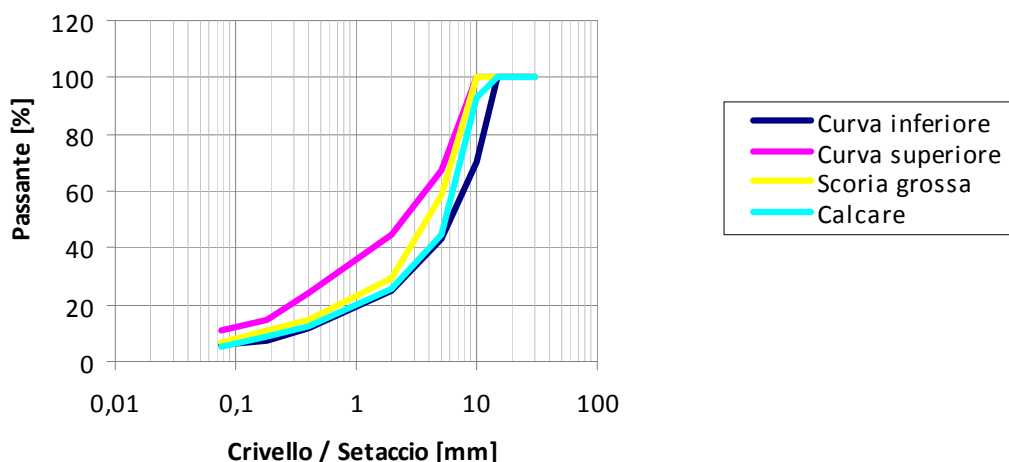


Grafico 3.12: Curva granulometrica scoria grossa.

Confrontando infine le due miscele grosse otteniamo:

**Curva granulometrica CNR**



**Grafico 3.13: confronto tra scoria grossa e calcare.**

Dal confronto tra le due miscele di tipo 2 emerge come entrambe le curve, contenute interamente nel fuso granulometrico, si sovrappongono per buona parte.

Riassumendo, dopo aver analizzato i singoli aggregati, in questo paragrafo sono state definite le due miscele. Tra le miscele di tipo 1 rientrano la “sabbia di quarzo” e la “scoria fina”, mentre tra quelle di tipo 2 rientrano il “calcare” e la “scoria grossa”. Di seguito sono indicate in quali soluzioni tali miscele saranno impiegate.

Soluzione	Miscela utilizzata
A	Sabbia al quarzo Scoria fina Scoria grossa Calcare
B	Calcare
C	Bauxite

**Tabella 3.19: Prospetto Soluzione/miscela testata.**

### **3.4 I leganti**

Ogni soluzione è caratterizzata da un proprio legante ed in particolare è stata usata: una resina epossidica per la soluzione A, un bitume per la soluzione B, un insieme di resine metacriliche per la soluzione C.

#### **3.4.1 Soluzione A**

A partire dalle esperienze e dagli studi riportati in bibliografia emerge che le resine epossidiche bicomponenti permettono, rispetto alle altre tipologie, di esprimere superiori capacità fisico meccaniche. Di seguito vengono descritte alcune caratteristiche di tali resine:

- migliore capacità di adesione al supporto, sia esso cementizio o ferroso, anche se umido,
- valori di resistenza alle sollecitazioni più elevati,
- insensibilità ai fenomeni gelivi,
- insensibilità dal punto di vista chimico di fronte alle più svariate tipologie di agenti aggressivi.

Il legante utilizzato per la soluzione A è costituito da un polimero “epossi-poliuretano”, al quale vengono uniti per inerzia chimica un polimero elastomerico definito “polibutadiene liquido” e, con il solo scopo di contenere i costi, un additivo a base di catrame.

Le caratteristiche del legante così definito sono:

- aderenza e resistenza chimica elevata,
- tenacità, resistenza a trazione ed elasticità.

Questa resina viene fornita suddivisa in due componenti separati in modo da tener staccati, fino al reale utilizzo, il catalizzatore e il polimero. Il catalizzatore viene fornito in contenitori di 2 Kg e la sostanza contenuta risulta essere liquida e trasparente (fig.3.7); il polimero invece è contenuta in un contenitore di 3 Kg anch'esso in forma liquida e di colore nero (fig.3.8). Entrambe le sostanze devono essere maneggiate con opportuni DPI a causa anche del forte odore che le caratterizza.





**Figura 3.7: catalizzatore.**



**Figura 3.8: Polimero.**

In seguito alla miscelazione delle due componenti si ottiene un impasto di colore nero il quale alla temperatura di 20°C risulta lavorabile per circa 20 minuti. Tale intervallo di lavorabilità aumenta al diminuire della temperatura. Le complete proprietà fisico-meccaniche del legante si ottengono dopo 10 ore alla temperatura di 20°C.

Alcuni test effettuati dall'azienda produttrice sul legante hanno fornito i seguenti valori:

<b>Caratteristiche</b>	<b>Normativa</b>	<b>Valori</b>	<b>Unità di Misura</b>
<b>Densità Relativa</b>	ASTM D 792	1.15 ± 0.05	Kg/dmc
<b>Durezza superficiale</b>	ASTM D 2240	60 ± 5	Shore A
<b>Carico di rottura per trazione</b>	ASTM D 638	>2	MPa
<b>Allungamento a rottura per trazione</b>	ASTM D 638	>100	%
<b>Adesione al CIs</b>	ASTM D 4541	>1.85	MPa/rottura coesiva

**Tabella 3.20: proprietà resina.**

Contestualmente alla stesura della resina su qualsiasi superficie (sia essa acciaio o calcestruzzo) è opportuno (per aumentare l'aderenza) l'utilizzo di un primer, che viene fornito suddiviso in due componenti, e dal momento in cui questi vengono miscelati, risulta lavorabile per circa 15-20 minuti.

### **3.4.2 Soluzione B**

Il legante usato per questa soluzione è un bitume (50/70 dmm) tradizionalmente impiegato nel nord dell'Italia.

I bitumi sono miscele disomogenee. Si può distinguere nel bitume una parte grossa (asfalteni) immersa in una matrice legante (malteni, composti da resine ed oli)

Gli asfalteni sono neri e di grandi dimensioni e sono responsabili: della resistenza meccanica, del comportamento visco-elasto-plastico, dell'adesività e della minore deformabilità.

Le resine conferiscono invece elasticità, flessibilità, duttilità e adesività; gli oli sono responsabili della fluidità del bitume.

Normalmente i bitumi impiegati per la costruzione delle pavimentazioni si presentano non liquidi a temperatura ambiente.

Le proprietà più importanti di un bitume impiegato per usi stradali sono:

ADESIONE, ovvero la capacità di legarsi ad altri materiali;

CONSISTENZA, ovvero la capacità, all'aumentare della temperatura, di perdere consistenza;

RESISTENZA, data in funzione del tempo di applicazione dei carichi (gli effetti di questa caratteristica sono simili a quelli dati dall'aumento di temperatura a causa della natura viscosa del materiale).

In merito alla consistenza del materiale in esame, essa è funzione della sensibilità termica del bitume, e in questo frangente grande importanza rivestono le variazioni termiche che le pavimentazioni subiscono. Le variazioni termiche durante l'anno possono raggiungere anche un intervallo di circa 70°C, passando ad esempio da temperature massime di 60°C a minime di -5/-10°C. Esse producono o degli stress termici che portano al degrado della pavimentazione.

Tuttavia il bitume deve garantire certe proprietà alla temperatura di esercizio ed avere una certa stabilità nell'intervallo di variazione termica che realmente si ha nella vita utile di una pavimentazione. Per poter soddisfare queste indicazioni spesso vengono introdotti degli additivi.

Di seguito alcuni dati di prove caratterizzanti il bitume usato in questa sperimentazione.

Proprietà	Norme	
Penetrazione a 25°C [mm]	EN 1426	65
Palla & anello [°C]	EN 1427	45
Punto di rottura Fraas [°C]	EN 12593	≤ -8
Viscosità dinamica a 60°C [Pa·s]	EN 12596	≥ 145
Duttilità a 25°C [mm]	ASTM D 113	≥ 800

**Tabella 3.21: Caratterizzazione Bitume.**

### 3.4.3 Soluzione C

La soluzione C differisce dalle altre in quanto non si utilizza un definito legante, ma vengono usati diversi prodotti impiegati per costruire vari strati (tescnica di posa simile a quella multiple-layer). La soluzione si distingue inoltre per l'estrema riduzione degli spessori e del peso gravante sull'impalcato.

Il legante utilizzato sono resine metacriliche, che forniscono una elevata resistenza all'acqua e alle sostanze aggressive. La soluzione consiste in una serie di strati successivi (circa 6) a definire una pavimentazione totalmente impermeabile e direttamente carrabile, con spessore di circa 10 mm e peso estremamente ridotto (quasi 90%) rispetto alle soluzioni classiche in conglomerato bituminoso.

Gli strati che costituiscono la pavimentazione sono i seguenti:

Primer + quarzo (X),

Membrana impermeabilizzante (Y),

Primer + quarzo (Z),

Strato integrato d'usura (W),

Aggregati naturali (K),

Impregnante (J).

Ad esclusione degli aggregati, tutte le altre sostanze menzionate sono frutto di miscelazione di uno specifico prodotto fornito allo stato liquido e successivamente miscelato con un catalizzatore.

Di seguito vengono esposti alcuni valori di prove effettuate sui componenti di ciascuno strato che costituisce la pavimentazione. Per una maggiore specifica della posa e delle funzioni di ciascuno strato si rimanda al capitolo successivo.

Primer			
Viscosità	25°C	100 – 130 mPas	DIN 53018
Densità	25°C	0.99 g/ml	ISO 2811
POT LIFE <sup>12</sup> a 20°C		c.a. 15 min.	
Tempo indurimento a 20°C		c.a. 30 min	

**Tabella 3.22: risultati prove su primer.**

Membrana			
Viscosità	25°C	650 – 1000 mPas	DIN 53018
Densità	25°C	1.23 g/ml	ISO 2811
POT LIFE a 20°C		c.a. 15 min.	
Tempo indurimento in profondità a 20°C		c.a. 60 min	

**Tabella 3.23: risultati prove su membrana.**

Resina per strato d'usura			
Viscosità	25°C	160-200 mPas	DIN 53018
Densità	25°C	0.99 g/ml	ISO 2811
POT LIFE a 20°C		c.a. 18 min.	
Tempo indurimento in profondità a 20°C		c.a. 60 - 120 min	

**Tabella 3.24: Risultati prove su resina per strato d'usura.**

Impregnante			
Viscosità	25°C	190-270 mPas	DIN 53018
Densità	25°C	1.1 g/ml	ISO 2811
POT LIFE a 20°C		c.a. 15 min.	
Tempo indurimento a 20°C		c.a. 60 min	
Ricoprimento a 25°C		c.a. 90 min	

**Tabella 3.25: Risultati prove strato impregnante.**

Sono state descritte le soluzioni prese in considerazione nella sperimentazione e definite le variabili prese in esame. Ciascuna variabile, sia essa aggregato o legante, è stata analizzata secondo le prove standard utilizzate per definire e specificare i materiali di comune impiego. Definito ciò, nei capitoli successivi verranno studiati e analizzati i risultati ottenuti dalle prove eseguite sulle soluzioni proposte.

<sup>12</sup> Pot Life: è un indice di reazione chimica che denota il tempo entro il quale è possibile applicare la sostanza, prima che il processo di polimerizzazione ed il conseguente aumento di viscosità renda ciò impossibile.

# 4 Protocolli Di Prova

## 4.1 Introduzione

Nel capitolo precedente sono state individuate le soluzioni e i materiali utilizzati definendo un prospetto di tutte le miscele che saranno analizzate. Sono stati inoltre riportate le caratteristiche, mediante prove normate, di ciascun materiale impiegato.

L'oggetto del presente capitolo, invece, sarà la descrizione dei protocolli e le relative prove che sono state svolte sull'insieme dei provini prodotti. Le miscele saranno confrontate ponendo attenzione alle loro caratteristiche prestazionali, alla luce delle prove svolte.

### 4.1.1 I provini: le tipologie

Definire le caratteristiche di un provino da sottoporre a determinate prove per caratterizzare un ambito di studio, non è certamente una operazione semplice, specialmente se le caratteristiche che si vogliono rappresentare non sono espressamente definite in un protocollo di prova.

Le difficoltà maggiori consistono nel ricreare la soluzione reale che si va a studiare andandola a riprodurre in scala ridotta, cercando però di non alterare le possibili risposte del materiale.

Come già anticipato non esistono protocolli specifici per produrre provini adatti e rappresentativi del lavoro che qui si sta descrivendo. Per tal motivo i provini utilizzati sono frutto di una logica rappresentazione in scala delle reali condizioni, adattate ai materiali e ai macchinari che si hanno a disposizione.

Sono state individuate due tipologie di campioni, che saranno indicate come:

- lastre,
- provini cilindrici.

Con il termine Marshall non si intende in modo stretto il protocollo classico per il confezionamento dei campioni: essi sono stati così chiamati perché sono stati realizzati utilizzando le fustelle in acciaio normalmente adoperate.

#### 4.1.2 Le Lastre

Le lastre sono state poi impiegate per eseguire prove di:

- altezza in sabbia,
- skid tester,
- drenabilità orizzontale,
- ormaiamento,
- pull off.

Queste prove non richiedono particolari restrizioni nel confezionamento del provino. Infatti, le prime tre sono prove che necessitano di una superficie piana che rappresenti la tessitura della pavimentazione, mentre le ultime due necessitano anche di una rappresentazione degli strati della pavimentazione, dell'impalcato e della loro interfaccia.

La scelta di utilizzare una lastra come provino per eseguire le prove risulta essere una conseguenza logica delle necessità richieste dalle prove appena descritte.

#### Definizione del provino

Ciascuna lastra è composta da un supporto in conglomerato cementizio, che vuole essere rappresentativo dell'impalcato (Figura 4.1), e dalla pavimentazione stesa al di sopra. Le dimensioni del campione (larghezza 30 cm, lunghezza 40 cm e spessore variabile dai 3 ai 5 cm) sono dettate da esigenze pratiche per poter effettuare le prove con la macchina ormaiola.



**Figura 4.1: lastra in calcestruzzo.**



**Figura 4.2: particolare superficie lastra in calcestruzzo.**



**Figura 4.3: rugosità superficiale lastra in calcestruzzo.**

Dalla ricerche bibliografiche svolte e dalle raccomandazioni delle aziende produttrici, estrema importanza è attribuita alla preparazione della superficie di posa. Queste raccomandazioni sono importanti per aumentare l'adesione della pavimentazione all'impalcato.

In laboratorio è stato previsto di preparare la superficie di posa della lastra passando con una spazzola in acciaio, in modo da distaccare le asperità più precarie, seguito da un getto di aria compressa, per eliminare polveri o residui (che possono compromettere un'efficiente adesione tra sottostrato e pavimentazione).

Le lastre, denominate ciascuna con la lettera L seguita da un numero, sono state racchiuse in fustelle di legno. Queste camicie (Figura 4.4-4.5) sono state opportunamente create e ricoperte da fogli di carta e di nylon in modo da evitare danni successivi alla rimozione del campione.



**Figura 4.4: fustella per provino.**



**Figura 4.5: fustella per provino.**

Sulle lastre, così confinate, è stata stesa la pavimentazione.

Per la posa della soluzione B sono stata impiegate, invece, fustelle in acciaio, e per la soluzione C non è stata necessaria nessuna camicia.

#### **4.1.1.1 Soluzione A**

La stesa della pavimentazione sulla lastra in calcestruzzo ha avuto principalmente due step diversi:

1. la preparazione della malta sintetica e del primer,
2. la posa sulla lastra del materiale.

La prima parte consiste nel miscelare, in opportuni rapporti, i materiali visti nel capitolo precedente.

Per dare una omogeneità ai campioni, è stato definito un quantitativo base di ciascun materiale necessario per realizzare un provino standard (con caratteristiche geometriche delle lastre e dei campioni Marshall). I materiali impiegati inoltre risultano essere nelle proporzioni raccomandate dalla azienda produttrice. Analogamente si può scrivere per il primer applicato all'interfaccia tra calcestruzzo e pavimentazione.



Il primer è stato prodotto miscelando i due componenti con rapporto 2 a 1. Per coprire in modo uniforme (con uno spessore finale di qualche millimetro) tutta la superficie sono stati utilizzati circa 80 grammi di polimero miscelati con circa 40 grammi di catalizzatore

Successivamente è stata prodotta la malta sintetica. Dall'unione del catalizzatore e del polimero (con rapporto 1 a 1.5), è stata ottenuta una resina viscosa e densa di colore nero.

L'aggregato viene poi introdotto gradualmente nel legante continuando ad agitare meccanicamente la miscela. L'aggregato deve essere aggiunto in modo graduale, poiché all'aumentare del contenuto dell'inerte aumenta la difficoltà di miscelazione del composto. Aggiungere gli aggregati in un solo momento produce infatti la formazione di "grumi" di aggregato che non si amalgamano in modo omogeneo con il legante.

I rapporti e le quantità dei vari componenti per tutti i campioni sono riportati nella tabella 4.1.

% resina introdotta	catalizzatore [g]	polimero [g]	aggregato [g]
50%	175.50	263.25	4387.50
75%	263.25	394.88	4387.50
100%	351.00	526.50	4387.50

**Tabella 4.1: quantitativi materiali utilizzati.**

Dopo aver confezionato le miscele, si procede, prima, con la stesura del primer e, successivamente, (prima che questo asciughi) dello strato di pavimentazione.



**Figura 4.6: lastra in calcestruzzo pronta per stesura pavimentazione.**



**Figura 4.7: fase di stesura della pavimentazione.**



**Figura 4.8: esempio di lastra (A-2-C-75) confezionata con soluzione A.**

#### **4.1.1.2 Soluzione B**

Per confezionare le miscele di tipo B (in conglomerato bituminoso) sono state utilizzate camicie in acciaio, di dimensioni uguali a quelle descritte nei precedenti paragrafi (ovvero con larghezza di 30 cm e lunghezza di 40 cm).

La soluzione B demanda la funzione di impermeabilizzazione ad una guaina bituminosa, stesa direttamente sulla superficie in calcestruzzo, previo riscaldamento a mezzo di una fiamma dell'estradosso in bitume per fondere la guaina sulla lastra in calcestruzzo.

La pavimentazione invece è costituita da uno strato di conglomerato bituminoso, opportunamente confezionato, che viene steso direttamente sulla guaina con uno spessore finale di circa 2 cm. La produzione dei campioni di tipo B prevede le seguenti fasi:

- stesa della guaina bituminosa,
- confezionamento e posa del conglomerato bituminoso,
- compattazione.

Dopo aver steso la guaina bituminosa e aver verificato che risulti perfettamente aderente alla lastra in calcestruzzo, si procede a ritagliare la guaina in modo da ricoprire solo la superficie della lastra in calcestruzzo. Questa operazione risulta importante ai fini delle prove di pull off che verranno eseguite successivamente.

La lastra in calcestruzzo viene poi inserita nella fustella in acciaio in modo che la superficie superiore sia a circa 2 cm dal bordo della camicia (in tal modo di otterrà lo spessore finale della pavimentazione).

La fase successiva prevede la preparazione del conglomerato bituminoso. Il bitume e gli aggregati, riscaldati in forno ad una temperatura di circa 160°C, vengono inseriti nella miscelatrice. I materiali vengono quindi impastati nella macchina fino a formare il conglomerato bituminoso (figura 4.9).



**Figura 4.9. miscelatrice impiegata per produrre il conglomerato bituminoso.**

Per tale soluzione sono state prodotte due lastre, entrambe confezionate con un quantitativo di bitume pari al 5% e utilizzando la miscela di calcare con curva granulometria di tipo 2.



**Figura 4.10: stesura conglomerato sulla lastra.**

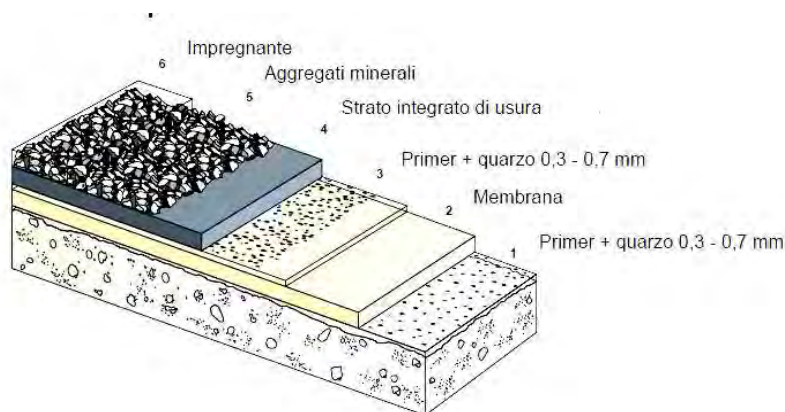
Il conglomerato posato sulla lastra è stato compattato fino ad ottenere uno spessore omogeneo di 2 cm. Il provino è stato poi lasciato un giorno a riposo per il raffreddamento e quindi tolto dalla camicia. In figura 4.11 è riportata l'immagine del provino finito.



**Figura 4.11: provino definito con soluzione B.**

### 4.1.1.3 Soluzione C

La pavimentazione di tipo C risulta, per la tecnica adottata, totalmente differente dalle soluzioni A e B. Il piano di posa in calcestruzzo viene infatti ricoperto da una serie di strati (circa 6, figura 4.12) fino ad ottenere, a maturazione avvenuta, un unico strato impermeabile e direttamente carrabile con spessore di circa 10 mm.



**Figura 4.12: Stratificazione soluzione C.**

La preparazione del piano di posa deve seguire le modalità già viste per le altre soluzioni, con lo scopo di rendere massimo il potere adesivo della pavimentazione al supporto in calcestruzzo.

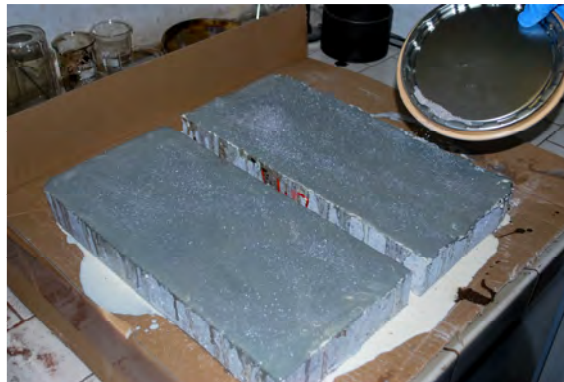
Le strati rappresentati nella figura 4.12 sono composti da:

1. uno strato di primer (su cui viene spolverata della sabbia di quarzo) con funzione di impermeabilizzante,
2. uno strato costituito dalla miscelazione di due sostanze (un catalizzatore e una resina), con funzione di membrana,
3. un secondo strato di primer, su cui viene spolverata della sabbia di quarzo,
4. uno strato di legante (ottenuto dalla miscelazione di una resina, di un filler e di un catalizzatore) su cui viene stesa della bauxite, per conferire una tessitura superficiale,
5. un legante trasparente (resina e catalizzatore) a formare uno strato di finitura.

I dati dei quantitativi proposti dall'azienda produttrice e quelli adattati ai campioni prodotti in laboratorio sono riportati nella tabella 4.13.

Strati	Dosaggio [g/mq]	Dosaggio impiegato [g]	Dosaggio catalizzatore [g]
Primer 1	400	61	1.2
Quarzo per Primer	300	46	
membrana	2000	304	6.1
Primer 2	300	46	0.9
Quarzo per Primer	300	46	
resina	1000	365	7.3
Filler	1500	548	
Bauxite	5000	761	
strato finale	700	106	2.1

**Figura 4.13: quantitativo materiale strati pavimentazione.**



**Figura 4.14: fase di stesura del quarzo sul primer d'attacco manto d'usura.**



**Figura 4.15: fase ultimata di stesura della Bauxite a creare la tessitura superficiale.**





Figura 4.16: fase di stesura strato finale.

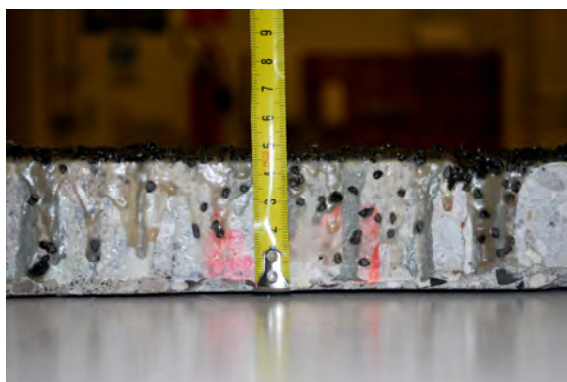


Figura 4.17: Prospetto laterale lastra in calcestruzzo da 5 cm con soluzione C sopra.

Riassumendo, l'insieme dei campioni prodotti per eseguire la sperimentazione e il relativo identificativo sono riportati nella tabella 4.2-4.3.

Soluzione	Miscela	Aggregato	% legante	Nome lastra	identificativo
A	1	Sabbia di Quarzo	100	L1	A-1-SQ-100-L1
				L9	A-1-SQ-100-L9
		Scoria fina	100	L2	A-1-SF-100-L2
				L3	A-1-SF-100-L3
	2	Calcare	100	L4	A-2-C-100-L4
				L13	A-2-C-100-L13
		Scoria grossa	100	L5	A-2-SG-100-L5
B	2	Calcare	100	L15	B-2-C-100-L15
				L16	B-2-C-100-L16
C	-	Bauxite	100	L8	C-00-B-100-L8
				L17	C-00-B-100-L17
				L19	C-00-B-100-L19

Tabella 4.2: Prospetto lastre legante 100%

Soluzione	Miscela	Aggregato	% legante	Nome lastra	identificativo
A	1	Sabbia di Quarzo	50	L7	A-1-SQ-50-L7
				L10	A-1-SQ-50-L10
	2	Calcare	50	L6	A-2-C-50-L6
				L11	A-2-C-50-L11
		Calcare	75	L12	A-2-C-75-L12
				L18	A-2-C-75-L18

**Tabella 4.3: prospetto lastre con legante 50% e 75%.**

#### 4.1.3 Provini Cilindrici.

I provini sono stati utilizzati per effettuare le seguenti prove:

- *Indirect Tensile Fatigue Test - ITFT*
- *Indirect Tensile Stiffness Modulus - ITSM*

Queste prove sono state eseguite per valutare, a parità di aggregato e di tipo di legante:

1. l'influenza sulla vita utile a fatica e sul modulo di rigidità della percentuale di legante introdotta nella miscela,
2. la resistenza delle miscele di tipo A con quelle di tipo B.

Per perseguire poter effettuare quindi le prove di *Indirect Tensile Fatigue Test* e *Indirect Tensile Stiffness Modulus*, si è resa necessaria la realizzazione di una serie di provini di forma cilindrica con diametro di circa 10 cm e altezza di circa 6 cm.

Come già anticipato, questi provini sono stati confezionati, attraverso l'utilizzo di particolari camicie (come indicato nella figura 4.18).



**Figura 4.18: casseri utilizzati per confezionare i provini.**



I provini sono stati confezionati utilizzando le soluzioni A e B e le tipologie di aggregato per le quali era previsto uno studio variando la percentuale del legante. Per la soluzione A sono stati confezionati campioni con sabbia di quarzo, con il 50% e il 100% di legante, e con calcare, con il 50%, il 75% e il 100% di legante. Per la soluzione B invece sono stati confezionati campioni con calcare con il 100% di legante (bitume).

Il confezionamento dei provini consiste, per la soluzione A, nel miscelare la resina, nella percentuale voluta (50,75 o 100), con l'aggregato, e nel versare il tutto all'interno della camicia (figura 4.18). I provini non hanno avuto bisogno di essere compattati.

% resina introdotta	Catalizzatore [g]	Polimero [g]	Aggregato [g]
50%	32.50	48.75	812.50
75%	48.75	73.13	812.50
100%	65.00	97.50	812.50

**Tabella 4.4: prospetto quantità materiali introdotti nei provini in funzione della % di legante scelta.**

I provini (Figure 4.19) con la soluzione di tipo B sono stati fatti utilizzando il medesimo conglomerato bituminoso realizzato per le lastre, opportunamente addensato con il compattatore Marshall.



**Figura 4.19: provini in conglomerato bituminoso.**

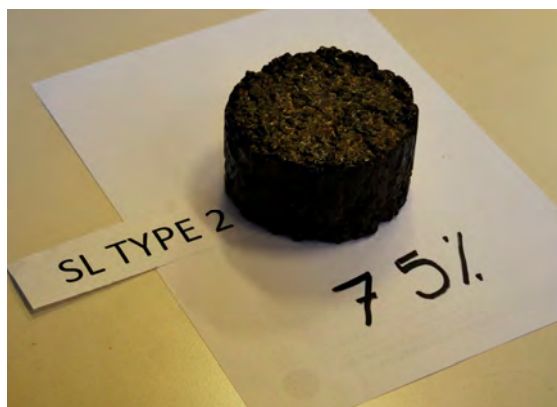


Figura 4.20: Provino con resina al 75%.



Figura 4.21: Provino in resina 100%.

Nelle tabelle 4.5 e 4.6 sono riportati i dati di tutti provini cilindrici realizzati.

Soluzione	Miscela	aggregato	% legante	Nome	identificativo
A	1	Sabbia di quarzo	100	A7	A-1-SQ-100-A7
				A8	A-1-SQ-100-A8
				A14	A-1-SQ-100-A14
	2	Calcare	100	A3	A-2-C-100-A3
				A4	A-2-C-100-A4
				A12	A-2-C-100-A12
B	2	Calcare	100	B1	B-2-C-100-B1
				B2	B-2-C-100-B2
				B3	B-2-C-100-B3

Tabella 4.5: Prospetto provini cilindrici con legante 100%.

Soluzione	Miscela	aggregato	% legante	Nome	identificativo
A	1	Sabbia di quarzo	50	A5	A-1-SQ-50-A5
				A6	A-1-SQ-50-A6
				A15	A-1-SQ-50-A15
	2	Calcare	50	A1	A-2-C-50-A1
				A2	A-2-C-50-A2
				A13	A-2-C-50-A13
			75	A10	A-2-C-75-A10
				A11	A-2-C-75-A11
				A9	A-2-C-75-A9

**Tabella 4.6: Prospetto provini con legante 50% e 75%.**

Definito l'insieme e le modalità di realizzazione dei provini ed assegnato per ognuno un identificativo che lo distingue, verranno di seguito definite le prove realizzate (facendo riferimento alla normativa corrispondente e definendo il protocollo adottato).

## 4.2 Prove e protocolli

Rispetto alle prove viste nel capitolo precedente (che servivano per descrivere le proprietà del singolo aggregato) queste servono a caratterizzare una particolare soluzione di posa, con definite tipologie e quantità di aggregato e di legante.

La caratterizzazione avviene tramite delle prove per valutare: la micro e macro tessitura superficiale (prove di skid tester e di altezza in sabbia), il drenaggio orizzontale, la resistenza alle deformazioni permanenti, e valutare infine il potere di adesione tra pavimentazione e supporto in calcestruzzo (attraverso prove di pull off).

Le prove ITFT e ITSM sono state effettuate con lo scopo di studiare alcuni fenomeni riscontrati durante la sperimentazione sui campioni e di caratterizzare a fatica le varie miscele.

Ogni prova verrà descritta indicando la normativa e il protocollo utilizzato, giustificando, qualora fosse necessario, eventuali semplificazioni e/o modifiche adottate durante la sperimentazione.

Le prove eseguite sono riassunte nella tabella 4.7.

Prova	normativa
BPN	UNI EN 13036 - 4
Altezza in Sabbia	UNI EN 13036 - 1
Drenabilità orizzontale	UNI EN 13036 - 3
Ormaiamento	UNI EN 12697 - 22
Pull Off	UNI EN 1542 – 2 e ASTM D4541
ITSM	UNI EN 12697 - 26
ITFT	UNI EN 12697 - 24

**Tabella 4.7: Prospetto prove eseguite.**

#### **4.2.1 Prova altezza in sabbia**

La norma UNI EN 13036 – 1 definisce lo scopo ed il campo di applicazione della prova di “altezza in sabbia”.

*“La presente norma europea specifica un metodo per la determinazione della profondità media della macrotessitura della superficie della pavimentazione mediante accurata applicazione di un volume noto di materiale sulla superficie e successiva misurazione dell’area totale coperta. La tecnica è progettata per fornire un valore di profondità medio della sola macrotessitura della pavimentazione ed è considerata insensibile alle caratteristiche di micro tessitura della pavimentazione.*

*Questo metodo di prova è idoneo alle prove sul campo per la determinazione della profondità media della macrotessitura della superficie di una pavimentazione [...].”*

Da quanto riportato in normativa, lo scopo della prova è quello di valutare la macrotessitura della pavimentazione mediante un parametro detto “altezza in sabbia”. Il valore del parametro, ricavato dall’esecuzione della prova, viene confrontato con intervalli tabulati, attribuendo alla macrotessitura superficiale del provino una classificazione: molto fina, fina, media, grossa, molto grossa.

Il campo d’applicazione di questa prova è compatibile con i provini realizzati.

Prima di indicare la procedura di calcolo dell’altezza in sabbia viene ora descritta la strumentazione necessaria (norma UNI EN 13036 – 1:2002)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Argomentazioni tratte dalla norma UNI EN 13036 – 1:2002

### **“Contenitore del campione**

*Un contenitore cilindrico di metallo o plastica con volume interno predeterminato di almeno 25 000 mm<sup>3</sup> (25 ml) ....[...].*

### **Strumento per la distribuzione del materiale**

*Un disco rigido piatto di circa 25 mm di spessore e con diametro compreso tra 60 mm e 75 mm deve essere utilizzato per distribuire la sabbia. La superficie o la faccia inferiore del disco deve essere coperta con un materiale gommoso rigido e può essere fissata una maniglia idonea alla superficie superiore del disco.*

### **Spazzole**

*Una spazzola metallica rigida e una spazzola a setole morbide devono essere utilizzate per pulire accuratamente la superficie della pavimentazione prima dell'applicazione del campione di materiale.*

### **Parabrezza**

*Un parabrezza o schermo idoneo può essere posizionato sulla superficie della pavimentazione per proteggere il campione di materiale dal vento e dalle turbolenze prodotte dal traffico.*

### **Riga e bilancia**

*Si dovrebbe utilizzare una riga normalizzata di lunghezza maggiore o uguale a 300 mm e con tacche da 1 mm. Con questo metodo di prova si raccomanda l'utilizzo di una bilancia da laboratorio con sensibilità a 0,1 g, per un ulteriore controllo e per garantire che la massa del materiale utilizzato per la misurazione della profondità della macrotessitura superficiale sia costante.”*

La norma definisce poi il metodo e le precauzioni da prendere per eseguire la prova <sup>2</sup>.

## **PROCEDIMENTO**

### **“Superficie di prova**

*Ispezionare la superficie della pavimentazione da misurare e scegliere un'area asciutta omogenea che non presenti particolari caratteristiche localizzate quali incrinature e giunti.*

---

<sup>2</sup> Argomentazioni tratte riportando testo norma UNI EN 13036-1:2002.

*Pulire accuratamente la superficie prima con la spazzola metallica rigida e quindi con la spazzola a setole morbide per rimuovere eventuali residui, detriti o particelle aggregate con legami allentati. Posizionare il parabrezza portatile intorno all'area di prova della superficie.*

### **Campione di materiale**

*Riempire il cilindro con volume noto di materiale asciutto e picchiettare delicatamente la base del cilindro diverse volte su una superficie rigida. Aggiungere altro materiale per riempire il cilindro fino all'orlo e livellare con un regolo. Se è disponibile una bilancia da laboratorio, determinare la massa di materiale nel cilindro e utilizzare questa massa di campione di materiale per ogni misurazione.*

### **Determinazione**

*Versare il volume o la massa di materiale misurato sulla superficie di prova pulita. Utilizzando lo strumento a disco con superficie inferiore coperta di gomma, distribuire accuratamente il materiale formando un'impronta circolare e riempiendo i vuoti superficiali fino alle punte delle particelle di aggregato. Esercitare una leggera pressione sulla mano, sufficiente da garantire che il disco distribuisca il materiale toccando le punte delle particelle di aggregato superficiali.*

*Misurare e registrare il diametro dell'area circolare coperta dal materiale in un minimo di quattro punti equidistanti lungo la circonferenza del campione. Calcolare e registrare il diametro medio.... [...].*

### **Numero di misurazioni di prova**

*Lo stesso operatore dovrebbe eseguire almeno quattro misurazioni a distanze casuali su un dato tipo di superficie di pavimentazione di prova. La media aritmetica dei singoli valori deve essere considerata come la profondità media della tessitura (macrotessitura) superficiale della superficie della pavimentazione sottoposta a prova.”*

Definito il protocollo di prova secondo la norma UNI EN 13036-1, si è proceduto all'esecuzione della prova.

Inizialmente si è proceduto a trattare la superficie della lastra con una spazzola con setole in acciaio e successivamente con una spazzola a setole morbide. Si è utilizzata uno

speciale tipo di sabbia vagliata attraverso i setacci con maglia di apertura da 0.250 mm e da 0.18 mm, tenendo il passante al setaccio da 0.25 mm e il trattenuto al setaccio da 0.18 mm. La sabbia, riempito il cilindro metallico in dotazione di volume pari a circa 25000 mm<sup>3</sup>, è stata versata su di un'area asciutta. Attraverso movimenti circolari con lo strumento per la distribuzione del materiale, si è provveduto a creare la "circonferenza" caratteristica della macrotessitura della pavimentazione. Sono stati poi misurati i due diametri perpendicolari tra loro. La prova è stata poi ripetuta una seconda volta con le stesse modalità e sullo stesso provino.



**Figura 4.22: attrezzatura impiegata per prova altezza in sabbia.**

Determinati i diametri dalle varie prove, si è definito il diametro medio per ciascuna lastra attraverso una semplice media aritmetica. Si è calcolata poi l'area media ottenuta dal diametro medio calcolato e successivamente il parametro AS (altezza in sabbia) che caratterizza la macrotessitura, attraverso il rapporto tra il volume di sabbia versato e l'area media calcolata.

Il valore AS è stato poi confrontato con gli intervalli di valori tabulati (tabella XX) a determinare la macrotessitura della pavimentazione.

<b>Altezza media in sabbia (AS)</b> <b>[mm]</b>	<b>Macrotessitura</b> <b>Superficiale</b>
HS ≤ 0.20	Molto fina
0.20 < HS ≤ 0.40	Fina
0.40 < HS ≤ 0.80	Media
0.80 < HS ≤ 1.20	Grossa
HS > 1.20	Molto grossa

**Tabella 4.8: qualità macrotessitura.**

#### 4.2.2 Prova mediante Skid Tester – il *British Pendulum Number (BPN)*

Le caratteristiche superficiali della pavimentazione sono state inoltre indagate mediante lo skid tester.

Il protocollo fornisce un determinato indice, denominato British Pendulum Number (BPN), il quale, confrontato con intervalli tabulati per la classificazione dei manti d'usura, definisce le condizioni superficiali della pavimentazione oggetto di studio.

La norma 13036-4:2011 alla quale si fa riferimento per questa prova indica quanto esposto in seguito.

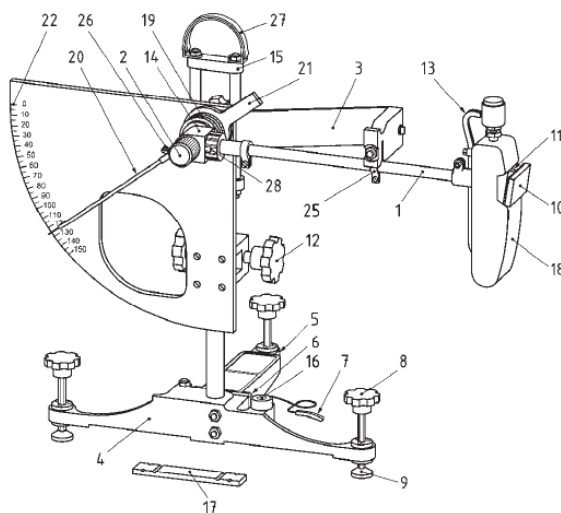
*“La norma descrive un metodo per la determinazione dell’aderenza superficiale di pavimentazioni stradali ed aeroportuali, impiegando il braccio di un pendolo. Il metodo è applicabile in campo oppure in laboratorio”.*<sup>3</sup>

Ed ancora prosegue definendo l’ambito di utilizzo

*“La presente norma descrive un metodo per determinare lo scorrimento/resistenza di una superficie utilizzando un dispositivo che rimane fermo nella posizione di test. La resistenza allo scivolamento/slittamento viene misurata per mezzo di un cursore montato all’estremità di un braccio a pendolo.*

*Il metodo fornisce una misura della proprietà di resistenza di una superficie o nel campo o in laboratorio.”*<sup>4</sup>

La prova viene eseguita attraverso l'utilizzo di una particolare strumentazione rappresentata nella figura 4.36.



**Figura 4.23: strumentazione utilizzata per prova skid tester.**

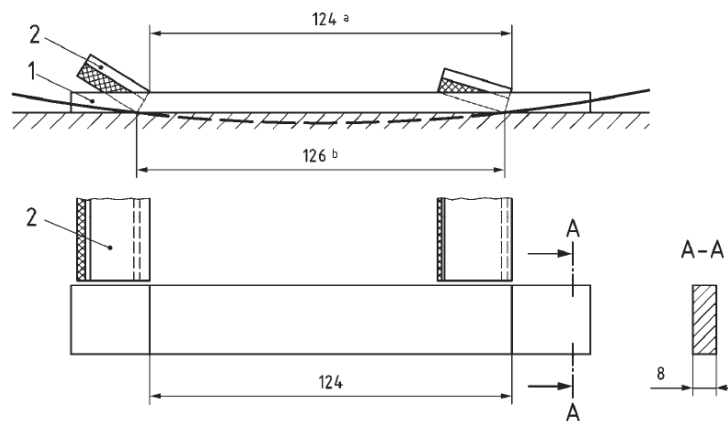
<sup>3</sup> Argomentazioni tratte dalla norma UNI EN 13036-4:2011.

<sup>4</sup> Argomentazione tratta da norma UNI EN 13036-4:2011 scritta in lingua Inglese e qui tradotta in Italiano



La prova è stata eseguita in laboratorio, in accordo con il protocollo definito dalla norma. Vengono di seguito descritti i vari step per lo svolgimento della stessa.

- Preparazione della strumentazione: è stata disposta su di un piano di posa orizzontale una lastra in acciaio, sede del supporto della strumentazione (4) dotato di viti senza fine(8) per la regolazione del macchinario di prova.
- Il pendolo (1) è stato fissato nella scanalatura (14) e, attraverso una manopola (12), è stato sollevato e posizionato sopra al provino (in corrispondenza di 17)
- Centrato il provino rispetto allo strumento e poggiato nella mezzeria il regolo (17), si è provveduto agendo sulla manopola (12) alla regolazione dell'altezza del pendolo in modo da soddisfare quanto riportato in normativa (figura 4.37).



**Figura 4.24: Fase di regolazione del pendolo.**

- Il pendolo, dopo essere stato regolato, è stato agganciato (25) in posizione orizzontale rispetto al piano di posa.
- Per mezzo di un recipiente, contenente acqua potabile, è stata bagnata la superficie di contatto tra provino e gommino (10).
- Si è posizionata verticalmente l'asta (20)
- Il pendolo, dopo essere stato sganciato, è stato lasciato cadere ed impattare sulla superficie del campione. È stata poi letta e registrata la misurazione sulla scala graduata: la lettura è quella indicata dall'asta (20) arrotondata al multiplo di 5 più vicino.

Tale prova è stata eseguita per 5 volte. I valori così trovati sono stati poi mediati ottenendo quindi un indice medio. Tale indice è stato corretto in funzione della temperatura di prova.

T°C	5-7	8-10	11-13	14-16	17-20	21-24	25-29	30-40
BPN	-3	-2	-1	0	1	2	3	4

**Tabella 4.9: Tabella correzione indice BPN.**

Categoria	Indice BPN	Classificazione del manto
A	BPN > 65	Manto antisdrucchiolevole per eccellenza
B	55 < BPN < 65	Manto abbastanza antisdrucchiolevole
C	45 < BPN < 55	Manto soddisfacente in condizioni favorevoli
D	BPN < 45	Manto sdrucchiolevole

**Tabella 4.10: classificazione superfici.**

#### 4.2.3 Prova di Misurazione della drenabilità orizzontale della superficie della pavimentazioni

La norma UNI EN 13036-3:2006 definisce lo scopo ed il campo di applicazione di questa prova<sup>5</sup>.

*“La presente norma europea descrive un metodo per la determinazione della drenabilità orizzontale di una superficie stradale come indicatore di tessitura superficiale relativamente bassa utilizzando l’indicatore d’efflusso come dispositivo fisso.*

*Il metodo fornisce una misura della drenabilità nell’area di contatto strada/pneumatico da utilizzare su tutte le superfici stradali lisce non porose sul campo oppure in laboratorio. Poiché il metodo misura la drenabilità orizzontale<sup>6</sup> solo di una piccola area della superficie, la selezione dell’area di prova dovrebbe essere valutata attentamente, così che sia rappresentativa dell’area generale su cui devono essere effettuate le misurazioni.”*

Il principio alla base di questa prova è quello di studiare la drenabilità orizzontale delle superfici, simulando il drenaggio di acqua dell’area di contatto, al di sotto del pneumatico di un veicolo in movimento.

La prova consiste nel posizionare un indicatore d’efflusso, riempito d’acqua, collocandolo sopra la superficie di prova. Viene registrato poi il tempo necessario affinché il livello dell’acqua scenda da una tacca superiore ad una inferiore. L’indicatore d’efflusso ha dimensioni e caratteristiche prestabilite dalla norma.

<sup>5</sup> Argomentazioni tratte riportando testo norma UNI EN 13036-3:2006.

<sup>6</sup> Drenabilità orizzontale: capacità della tessitura della superficie stradale di fornire vuoti interconnessi attraverso i quali l’acqua può essere espulsa da un pneumatico in movimento.

## **Descrizione dell'indicatore d'efflusso**

*L'indicatore d'efflusso è composto da un cilindro di plastica solida trasparente, con altezza ( $400 \pm 1$ ) mm, diametro interno ( $50 \pm 0,5$ ) mm, che è incollato a un anello di pesatura di ottone (vedere figura 1). Un anello portante di ottone con un anello di gomma di precisione collegato a esso (vedere figura 2) deve essere avvitato al lato inferiore dell'anello di pesatura. La massa totale dell'indicatore d'efflusso deve essere ( $3\ 500 \pm 10$ ) g. La massa dell'anello portante deve essere di ( $138 \pm 3$ ) g. L'anello di gomma è vulcanizzato sull'anello portante. La proprietà dell'anello di gomma vulcanizzato deve essere la seguente:*

*- durezza  $48 \pm 1$ , Shore A, in conformità alla ISO 868. L'anello portante deve essere contrassegnato con il marchio del fabbricante e con il numero di serie e la data di scadenza (mese, anno) (vedere figura 2).*

*Una cassa da trasporto con dispositivi di fissaggio deve essere utilizzata per il trasporto e lo stoccaggio dell'apparecchiatura senza danni.*

*I dispositivi di fissaggio devono assicurare che:*

- il cilindro dell'apparecchiatura non sia in contatto con la superficie interna dalla parte superiore della cassa da trasporto;*
- l'anello di pesatura di ottone sia disposto su un dispositivo di fissaggio, in modo che il cilindro sia scarico;*
- il giunto adesivo tra il cilindro e l'anello di pesatura non tocchi nessun dispositivo di fissaggio;*
- l'anello di gomma non tocchi nessun dispositivo di fissaggio;*
- l'indicatore d'efflusso sia stoccato in posizione verticale.”*

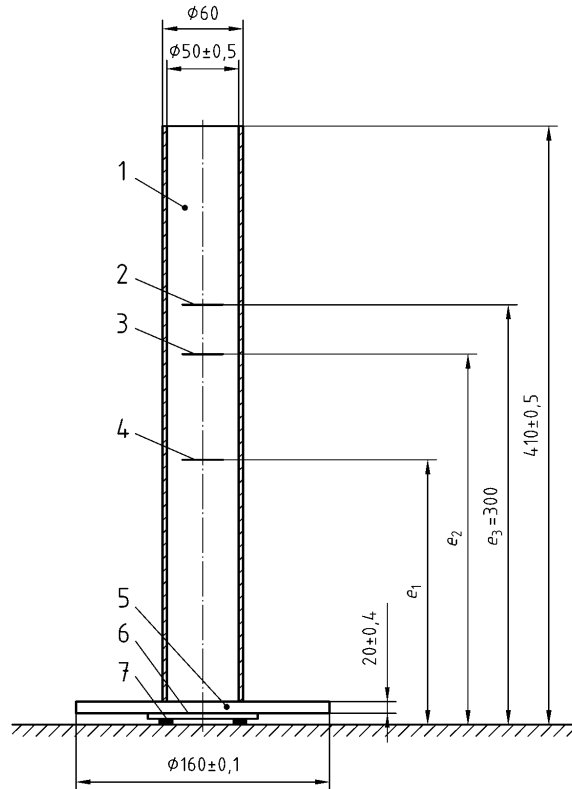


Figura. 4.2.3.1: Legenda: 1) Plastica trasparente 2) Tacca superiore 3) Tacca Intermedia 4) Tacca inferiore 5) Anello di pesatura in ottone 6) Anello portante di ottone 7) Anello in gomma.

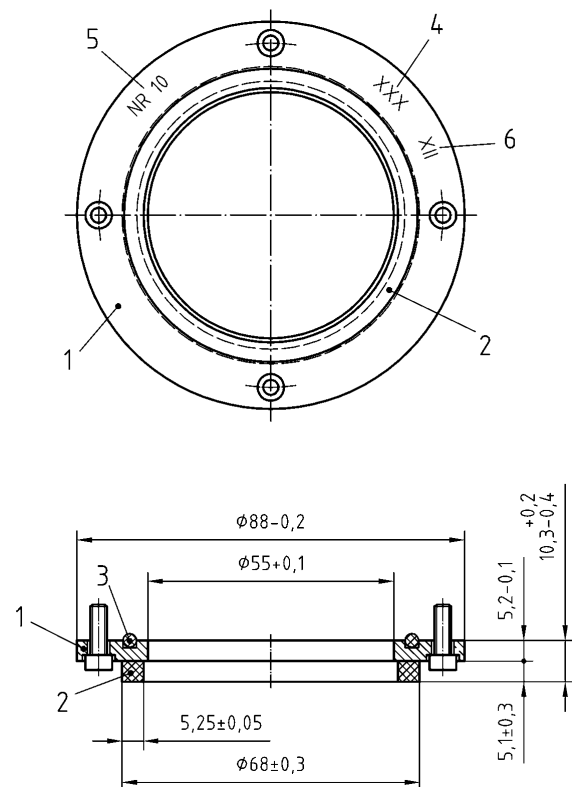


Figura. 4.2.3.2 legenda: 1) Anello portante 2) anello in gomma di precisione 3) Sigillo 4) Marchio del centro di taratura certificato 5) numero di serie 6) data di scadenza 7) Taratura.

## **Preparazione dell'indicatore d'efflusso per le prove**

Prima di ciascuna prova l'anello di gomma deve essere controllato per verificare che non ci siano incisioni, crepe, danni superficiali o deformazioni, e che sia pulito. Se danneggiato, l'anello deve essere sostituito. La tenuta all'acqua dell'indicatore d'efflusso nelle condizioni di prova deve essere controllata su una lastra di vetro orizzontale prima di iniziare e dopo aver completato una serie di prove. Non deve verificarsi nessuna diminuzione del livello dell'acqua per un periodo di 5 min.

## **Altre apparecchiature utilizzate**

- Scopino.
- Recipiente per lo stoccaggio dell'acqua, contenente acqua potabile.
- Secchio per l'acqua, per lo stoccaggio temporaneo.
- Bottiglia di riempimento.
- Cronometro con accuratezza di 0,1 s.

## **Procedimento di prova<sup>7</sup>**

Prima di iniziare la prova è necessario bagnare l'anello di gomma. Subito dopo, si posiziona l'indicatore d'efflusso verticalmente sulla superficie di prova, facendo particolare attenzione che l'anello di gomma non entri in contatto con una particella minerale isolata e sporgente, o con una depressione isolata sulla superficie stradale.

Successivamente l'indicatore d'efflusso viene riempito con acqua potabile. Viene misurato il tempo in secondi (con precisione  $\pm 0,5$  secondi) impiegato dal livello dell'acqua per scendere dalla tacca superiore alla tacca inferiore sulla parete del cilindro. La lettura è effettuata quando il livello dell'acqua coincide con le tacche sulle parti anteriore e posteriore del cilindro. Il tempo, letto e arrotondato al secondo intero più vicino, è stato registrato.

Se il livello dell'acqua impiega più di 3 min per raggiungere la tacca intermedia, posizionata a un terzo di distanza tra le due tacche, è necessario fermare il cronometro quando il livello dell'acqua raggiunge quella intermedia (e bisogna registrare il tempo arrotondato al secondo più vicino come valore della prova). Il risultato per il punto di prova si ottiene moltiplicando per sei il tempo segnato.

---

<sup>7</sup> Protocollo di prova descritto nella norma UNI EN 13036-3:2006

Una volta che si è segnato il tempo, si può sollevare l'indicatore d'efflusso dalla superficie e si può collocarlo in modo che l'anello di gomma possa recuperare la propria forma iniziale.

Al termine della prova, gli indicatori d'efflusso devono essere asciugati. I cilindri e gli anelli di gomma devono essere puliti da depositi.

La norma prevede inoltre alcuni accorgimenti nella scelta del punto sul quale effettuare la prova (come di seguito descritto).

### **Campionamento**

Dato che la drenabilità orizzontale di una superficie stradale varia considerevolmente lungo la larghezza della strada, devono essere eseguite prove sull'area più trafficata (carreggiata) e in qualunque altro punto se richiesto.

**La posizione deve essere selezionata in modo tale che il campione di prova sia un'area omogenea che contenga caratteristiche localizzate non uniche, quali crepe e giunzioni, e sia rappresentativo del sito.** Il numero di campioni necessari per ottenere la drenabilità orizzontale di un'area deve dipendere dalla variabilità delle caratteristiche della superficie.

In genere, si devono svolgere almeno 10 prove a circa 2,5 m di distanza l'una dall'altra, per ottenere il valore dell'indicatore d'efflusso per una lunghezza di 25 m.

### **Risultati delle prove**

I risultati dei dieci punti di prova  $OT_i$  devono essere mediati per ottenere il valore  $OTP$  per la lunghezza della superficie.

Non deve essere effettuata nessuna correzione per la temperatura.

$$OT_p = (OT_{p1} + OT_{p2} + OT_{p3} \dots + OT_{p10})/10$$

dove:

$OTP$  è il tempo di efflusso per una superficie della lunghezza di 25 m;

$OT_1 \dots OT_{10}$  sono il tempo di efflusso sul punto di prova 1 ... fino al punto di prova 10.

Il protocollo di prova, appena descritto, è stato leggermente modificato per adattarlo ai provini a disposizione.

I campioni, la cui superficie è stata pulita con l'ausilio di aria compressa, sono stati posti su un piano orizzontale. L'anello in gomma, dopo essere stato immerso in un

recipiente contenente acqua potabile, è stato predisposto sull'area oggetto di prova. Al di sopra dell'anello è stato poi posto l'indicatore di efflusso e il peso. Chiuso il foro inferiore mediante un tappo, l'indicatore d'efflusso è stato riempito fino al superamento della tacca superiore. Rimosso il tappo, è stato misurato, tramite cronometro digitale, il tempo necessario affinché l'acqua raggiungesse la tacca inferiore (o quella intermedia, a seconda dei casi).

Le prove effettuate, non disponendo di campioni di prova molto estesi, sono state 2. Considerando la superficie relativamente piccola a disposizione ed essendo questa rappresentativa della condizione reale (ipotesi alla base della definizione del provino stesso), le due prove possono essere considerate indicative della soluzione testata.

I risultati sono stati poi elaborati, come indicato nella norma.

#### **4.2.4 Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)**

L'Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) è una prova non distruttiva per la misurazione del modulo di rigidezza di materiali per pavimentazioni stradali. Il test viene condotto di norma su campioni cilindrici con un diametro di circa 100 mm (o di 150 mm), che possono essere preparati in laboratorio (compattazione Marshall) oppure possono essere prelevati da pavimentazioni stradali tramite carotaggi. Il protocollo di riferimento è descritto nella norma UNI EN 12697 parte 26.

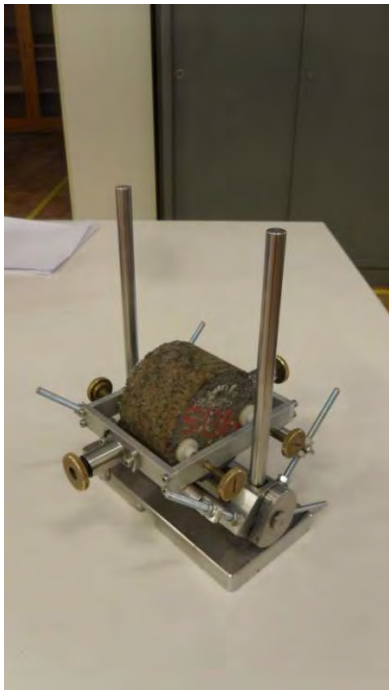
E' necessario impostare la deformazione diametrale orizzontale che si vuole raggiungere durante la prova. L'apparecchiatura sottopone il provino ad una serie di impulsi di condizionamento (almeno dieci), necessari per valutare la tensione che andrà applicata per produrre la deformazione prefissata. Infine vengono applicati al provino ulteriori cinque impulsi (alla tensione ricavata precedentemente) e viene calcolato il modulo di rigidezza del conglomerato come rapporto tra la tensione applicata e la deformazione corrispondente.

#### **Apparecchiatura e modalità di prova**

Le apparecchiature di prova (Figure 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27) sono le seguenti:

- attuatore di carico pneumatico, per mezzo del quale si possono applicare impulsi ripetuti alternati a periodi di pausa (il carico applicato deve avere una forma ad onda di tipo semisinusoidale con un tempo di applicazione del carico compreso tra i 50 ms e 150 ms);

- cella climatica, in grado di condizionare il materiale a temperature variabili tra -10°C e 60°C;
- coppia di coltelli di carico concavi, lunghi 100 mm, larghi 10 mm, e con altezza della parte concava pari a 0.3 mm;
- due trasduttori differenziali a variabilità lineare (LVDTs), montati su un apposito telaio, capaci di misurare la deformazione diametrale orizzontale.

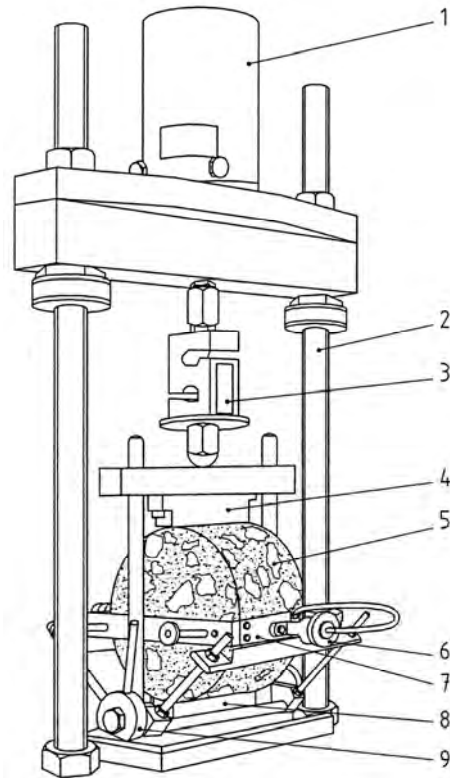


**Figura 4.25** Castello per posizionamento.



**Figura 4.26:** Cella Cooper.





**Figura 4.27: 1) Pneumatic load actuator 2) Steel load frame 3) load cell 4) Upper loading platen 5) Test specimen 6) LVDT adjuster 7) LVDT mounting frame 8) Lower loading platen 9) LVDT alignment .**

Per eseguire la prova il campione deve essere posto tra i coltelli della pressa; viene quindi sottoposto agli impulsi di carico necessari per la misura del modulo di rigidezza. La prova ITSM viene eseguita in genere due volte per ogni provino: la prima volta si pone il provino sopra il coltello di carico inferiore in corrispondenza del primo diametro, in seguito lo si ruota di 90° attorno al suo asse orizzontale, riposizionandolo sopra il coltello. È importante che i valori del modulo di rigidezza che si ottengono dai due diametri non differiscano per più del 20%, altrimenti è necessario eseguire nuovamente la prova. Utilizzando le misurazioni ricavate dai cinque impulsi di carico, il modulo di rigidezza deve essere determinato per ciascun impulso con la seguente formula:

$$S_m = \frac{F(v + 0,2I)}{zh}$$

dove  $S_m$  è il modulo di rigidezza in MPa

$F$  è il carico verticale in N

$z$  è la deformazione orizzontale in mm

$h$  è l'altezza del campione in mm

$v$  è il rapporto di Poisson.

Normalmente le temperature consigliate per i test sono 2°C, 10°C, 20°C, altri valori di temperatura sono comunque possibili. Si sottolinea che alle alte temperature alcuni conglomerati bituminosi possono presentare eccessive deformazioni con tendenza al collasso.

Si ricorda infine che, essendo la prova ITSM di tipo non distruttivo, è possibile, dopo ventiquattro ore da cui è stato effettuato il test, eseguire altre prove.

Tutte le prove ITSM eseguite durante la sperimentazione sono state svolte mediante apparecchiatura Cooper NU-14 all'interno del Laboratorio Sperimentale Stradale dell'Università di Padova.

La registrazione dei dati avviene grazie ad un'interfaccia digitale connessa ad un computer che monitorizza e registra i segnali elettrici provenienti dall'attuatore di carico e dai trasduttori

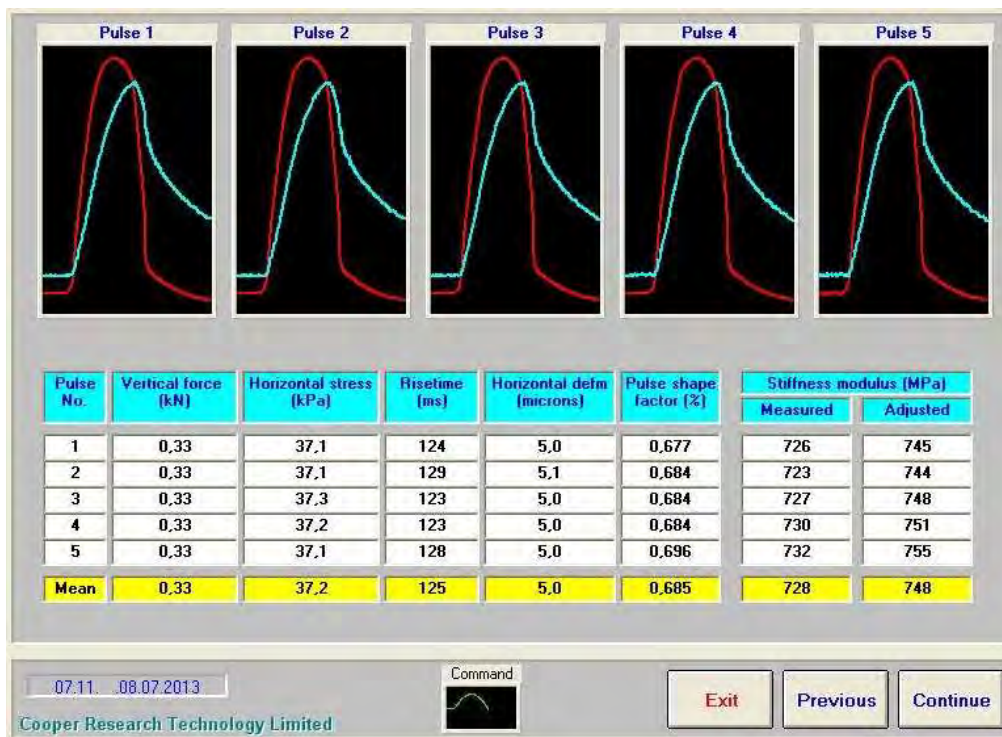


Figura 4.28: esempio di risultati ottenuti con la prova ITSM.

### Protocollo di prova seguito

La prova è stata eseguita sui provini Marshall visti in precedenza; la temperatura della cella di prova è stata imposta a 25°C ed i provini stessi sono stati lasciati condizionare a tale temperatura per circa 24 ore. Una volta condizionati, i provini sono stati misurati, mediante un calibro digitale, rilevando altezza media e diametro medio ottenuti dalla media aritmetica di quattro misurazioni per ciascuna dimensione; è stata

inoltre misurata la massa del provino. Le misure medie ricavate sono valori fondamentali e richiesti come dati di input dalla macchina.

La fase successiva è stata quella di inserire il provino nell'apposito castello avendo l'accortezza di posizionare il provino stesso e l'apparecchiatura il più possibile al centro sotto l'attuatore. Questa necessità, richiesta anche dal protocollo di prova, porta ad un risultato migliore in termini di qualità. Inserito il castello e il provino nella cella di carico, si collegano i trasduttori ed si inseriscono i dati di input richiesti: in questo modo è possibile avviare la prova, registrando successivamente i risultati ottenuti.

Le prove sono state svolte due volte per ogni provino, ruotando ogni volta il provino stesso di circa 90° rispetto alla direzione di carico.

#### **4.2.5 Determinazione della resistenza a fatica – Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT).**

Gli stessi provini sottoposti alla prova ITSM (che non è distruttiva) vengono successivamente testati per comprendere la loro resistenza a fatica.

Per fatica si intende il collasso del materiale attraverso l'applicazione di un certo numero di carichi ciclici, nonostante le sollecitazioni indotte si mantengano al di sotto dei valori di rottura.

L'esecuzione delle prove di fatica può avvenire unicamente nella modalità a tensione controllata. Dal legame tra la deformazione orizzontale ( $\Delta H$ ) e quella verticale ( $\Delta V$ ), è possibile calcolare il valore del modulo anche nel corso delle prove a fatica, durante le quali viene misurata solo la deformazione verticale.

Come per le prove di modulo, dopo aver effettuato il condizionamento alla temperatura di prova nella camera climatica, il provino viene posizionato in un telaio metallico appoggiandolo sulla barra inferiore. In questo caso l'equipaggiamento è molto più semplice in quanto non occorrono misuratori di deformazione, come è possibile osservare nella figura 4.28 in cui il provino risulta collocato tra le due barre di carico sistemate in maniera perfettamente simmetrica.

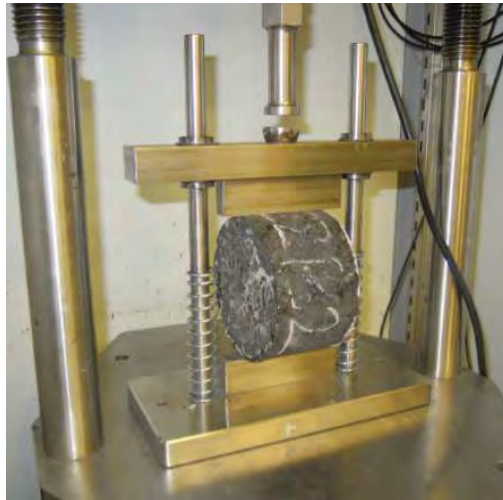


Figura 4.29: esempio di provino sottoposto a prova ITFT.

### **Apparecchiatura per la prova di resistenza a fatica ITFT**

L'apparecchiatura è controllata da un software che ne automatizza la procedura di input, attraverso una specifica finestra di dialogo. In particolare, nella schermata iniziale, vengono inseriti: i dati relativi alla geometria del provino (diametro e spessore); la temperatura; il rise-time; la massima deformazione verticale e la tensione orizzontale con cui si sollecita il provino ad ogni impulso. Attraverso la massima deformazione verticale si imposta un controllo che serve per interrompere la prova quando essa viene superata. L'esperienza consiglia di impostare un valore di 10 mm, in maniera tale da avere un margine sufficiente per concludere la prova.

Il parametro della tensione orizzontale viene scelto dall'operatore in base alla propria esperienza. Con il software in dotazione le prove terminano con il raggiungimento della massima deformazione verticale accumulata o per l'impossibilità dell'attuatore di continuare ad applicare la sollecitazione imposta per più di 50 cicli consecutivi.

Il software di gestione acquisisce i dati solo con cadenza logaritmica: si hanno quindi a disposizione un discreto quantitativo di informazioni fino a 10'000 cicli, poi la frequenza di acquisizione si abbassa ulteriormente.

Al termine della prova viene restituito un file di output, come riportato nella figura 4.29, in cui si vedono il numero di cicli di carico necessari per la rottura del campione e le deformazioni permanenti accumulate.

## Protocollo di prova seguito

I provini sono stati inizialmente condizionati, per circa 24 ore, alla temperatura di 25°C, successivamente sono state misurate altezza media e diametro medio, ottenuti, come in precedenza, dalla media aritmetica di quattro misurazioni per ciascuna dimensione; è stata misurata anche la massa del provino.

Successivamente si è inserito il provino stesso nel castello, avendo cura di centrarlo il più possibile, per avere successivamente un risultato migliore in termini qualitativi.

Inserito poi il castello e il provino nella cella di carico e inseriti i dati di input richiesti dalla macchina, si è dato avvio alla prova registrando i dati ottenuti.

La prova è stata eseguita sui provini Marshall imponendo le seguenti tensioni: 200 KPa, 350 KPa e 500 KPa.

La figura 4.29 indica un esempio di dati di output forniti dalla macchina.

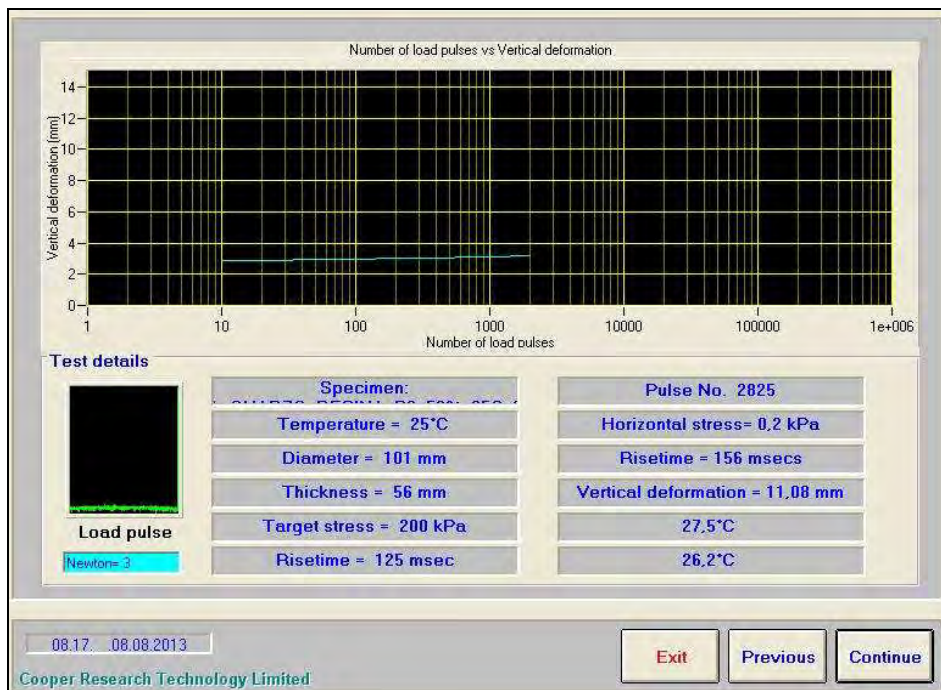


Figura 4.30: esempio di output ottenuti da prova ITFT.

### 4.2.6 Prova di Ormaiamento – Wheel Tracking test.

La prova Wheel Tracking o WTT fa riferimento alla normativa UNI EN 12697 parte 22.

La norma descrive i metodi di prova al fine di determinare la suscettibilità alla deformazione sotto carico di miscele bituminose con dimensione massima degli aggregati minore o uguale a 32 mm.

Le prove sono applicabili a provini prodotti in laboratorio o ricavati da pavimentazioni esistenti.

La deformazione sotto carico è valutata misurando la profondità dell'ormaia formatasi per il ripetuto passaggio della ruota a carico costante e a temperatura prefissata.

### **Esecuzione della prova**

La prova deve essere eseguita sul provino dopo almeno 48 ore dal suo confezionamento ad una temperatura maggiore di 25 – 30°C.

Prima di eseguire il test, il provino deve essere condizionato alla temperatura di prova per almeno 4 ore, se i provini hanno spessore inferiore ai 60 mm; il tempo minimo di condizionamento sale a 6 ore, se il provino ha spessore maggiore di 60mm.

La prova può essere eseguita seguendo due procedure indicate come *procedura A* e *procedura B*. Di seguito sarà descritta solo la *procedura B*, che prevede un numero di cicli di carico pari a 10000, con una misurazione ogni 250 cicli. La normativa prevede almeno 6-7 misurazioni la prima ora e successivamente almeno una ogni 500 cicli. Tale prova viene interrotta qualora la deformazione superi i 20mm.

La pendenza wheel-tracking in mm/1000 cicli, è calcolata come:

$$WTS_{AIR} = (d_{10000} - d_{5000})/5$$

dove:

- $WTS_{AIR}$  : la pendenza wheel- tacking, in millimetri per 10000 cicli di carico.
- $d_{5000}$  : la profondità dell'impronta dopo 5000 cicli di carico, espressa in mm.
- $d_{10000}$  : la profondità dell'impronta dopo 10000 cicli di carico, espressa in mm.

Se il test termina prima dei 10000 cicli, la pendenza viene calcolata sulla parte lineare della curva, a condizione che vengano raggiunti almeno 2000 cicli.

### **Dettagli della Wheel – tracking**

Ruota di carico:

- Diametro esterno compreso tra i 200 mm e i 205mm.
- Pneumatico a sezione rettangolare con larghezza  $w = 50 \pm 5$  mm.
- Spessore pneumatico di  $20 \pm 2$  mm
- Pneumatico costituito da gomma con un numero di durezza di 80 IRHD, secondo ISO 7619 e ISO 48.

Carico:

- Il carico agente sulla ruota vale:



$$[(700*w/50)\pm 10] \text{ [N]}$$

Ormaiatrice:

- il campione deve muoversi sotto la ruota di carico, in un piano orizzontale.
- Il centro dell'impronta della ruota deve essere più distante di 5 mm dal centro teorico del campione.
- La lunghezza dell'impronta deve essere di  $230 \pm 10$  mm e frequenza di  $26.5 \pm 1.0$  cicli ogni 60 secondi.

### Esecuzione del wheel tracking test

Il protocollo di prova prevede i seguenti step:

- produzione del provino e maturazione dello stesso per almeno 48 ore;
- confinamento del provino in apposito cassero metallico con lo scopo di evitare eccessive deformazioni laterali del provino durante la prova;
- posizionamento del provino sul piano di prova e fissaggio dello stesso mediante appositi supporti.;
- introduzione dei dati di input: temperatura di prova, identificativo prova, procedura seguita, ecc.;
- preriscaldamento della lastra per almeno 4 ore alla temperatura di 60°C;
- al termine del preriscaldamento, esecuzione di 5 cicli di condizionamento e successivamente dei 10000 cicli a 60°C della prova;
- al termine della prova si registrano i dati in output forniti dalla macchina.

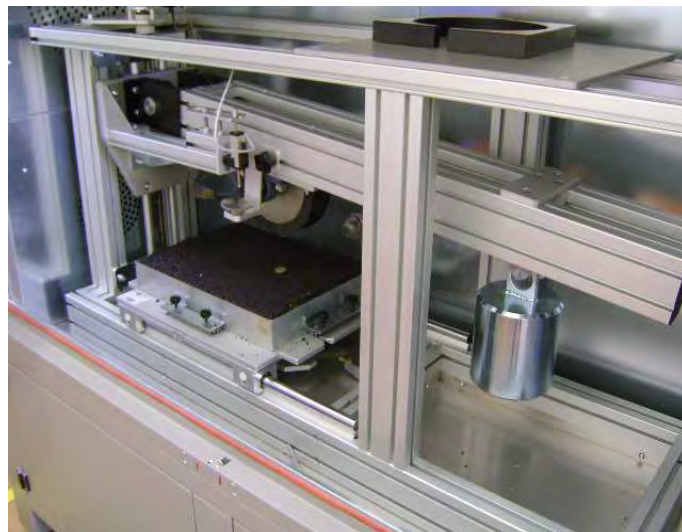


Figura 4.31: macchina ormaiatrice.

## Ormaiatrice

Viene di seguito descritta la macchina utilizzata per effettuare la prova di ormaiamento.

La macchina permette di eseguire le prove secondo la procedura A o secondo la procedura B in aria, in una camera riscaldata alla temperatura ambiente fino a 65°C su lastre compattate e contenute in apposite fustelle di dimensioni standardizzate (larghezza pari a 300 mm e lunghezza pari a 400 mm).

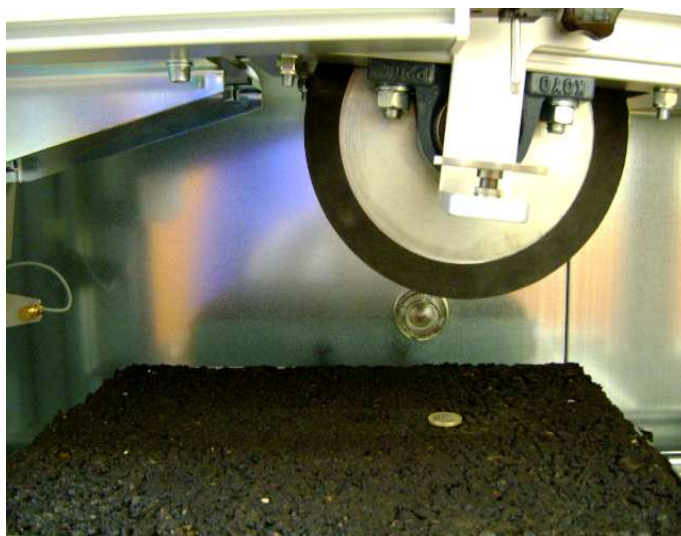
La prova viene eseguita facendo ripetutamente scorrere sul campione una ruota in gomma del diametro di 200 mm, come previsto dalla normativa, attraverso un carrello semovente. Grazie ad un dispositivo meccanico costituito da una trasmissione a camme comandata da un motore AC trifase, la tavola si muove con movimento alternato (corsa totale  $230 \pm 5$  mm con una frequenza di  $26.5 \pm 1$  cicli al minuto ( $\pm 1\%$ )).

La ruota è montata su un apposito braccio alla cui estremità si applica un peso; in questo modo la ruota realizza sul campione un carico di  $700 \pm 10$  N.

Il braccio porta-ruota può essere spostato in verticale grazie ad un apposito motore. La parte meccanica, costituita dalla ruota e dalla tavola semovente, è contenuta all'interno di una cabina termostata avente una gamma di temperature da 25°C a 65°C.

Un trasduttore di spostamento con corsa totale di 25 mm, monitorizza la profondità dell'impronta che si viene a creare al centro del campione, grazie all'azione della ruota durante l'esecuzione del test.

La deformazione del campione e la temperatura della camera vengono registrate dal sistema di acquisizione e possono essere inviate al PC.



**Figura 4.32: Ruota di carico.**



Il protocollo adottato durante questa sperimentazione viene di seguito descritto.

- Preparazione dei provini con dimensioni circa 30x40 cmq e spessori complessivi tra circa 5/6 cm.
- Il provino realizzato è stato tenuto nel cassero per circa 24 ore fino a completa maturazione e successivamente è stato rimosso dalla fustella.
- Essendo le resine molto meno deformabili del bitume non si è reso necessario confinare il provino per quest'ultima per eseguire la prova; il confinamento è stato fatto per le sole miscele bituminose.
- Le temperature alle quali è stata eseguita la prova sono 4 ed in particolare: 0°C, 20°C, 40°C e 60°C. Motivazioni di tale scelta: 1) la resina è un materiale termoindurente e quindi testare il materiale solo a temperature elevate non è a favore di sicurezza, 2) si è deciso di valutare la risposta della pavimentazione in tutto l'intervallo di esercizio reale (bisogna considerare che il condizionamento a 40°C e a 60°C può essere fatto direttamente nella macchina ormaiatrice; il condizionamento a 0°C e 20°C è stato fatto invece in una cella separata).
- Introduzione del provino e posizionamento della ruota di carico assicurandosi che il braccio risulti orizzontale.
- Si tenga presente che il contatto ruota provino è stato fatto solo a condizionamento avvenuto e non prima; questo perché il peso della ruota può, durante il condizionamento, produrre un'ormaia sul provino prima che abbia inizio la prova e quindi falsare il risultato finale ottenuto.
- Preparato e calibrato il macchinario rispetto al provino si è dato avvio alla prova; avviata la prova, il macchinario effettua prima 5 cicli di condizionamento, e poi inizia la prova vera e propria (10000 cicli).
- Trascrizione del WTS e delle deformazioni (con cadenza 250 cicli) ottenute come output dalla macchina.

La prova è stata eseguita per tutte le lastre descritte in precedenza. Ogni lastra è stata sottoposta a due prove di ormaimento, distanziate geometricamente secondo quanto richiesto dalla normativa. Il doppio condizionamento, al quale ogni lastra è stata soggetta, è stato intervallato da un tempo di riposo a temperatura ambiente, variabile in funzione dell'intervallo termico dei due condizionamenti successivi. Ciò è stato fatto allo scopo di condizionare ciascun provino partendo dalle medesime condizioni iniziali in modo da influenzare il meno possibile la risposta finale.

#### 4.2.7 Prove di adesione al supporto – Prove di Pull Off

Il protocollo scelto per questa prova è quello definito dalla normativa ASTM D4541, secondo il quale l'utilizzo di uno specifico macchinario permette di caratterizzare l'interazione tra il rivestimento ed il supporto. Mediante questa prova, infatti, è possibile determinare: quale strato risulta più debole (rivestimento, interfaccia o sottostrato) nei confronti della trazione esercitata e, soprattutto, l'entità dello sforzo necessario a rompere il campione.

La prova impone anzitutto la realizzazione di alcuni fori circolari sul campione: la profondità e le dimensioni di questi fori non sono stabilite nel testo della normativa richiamata, pertanto nella presente sperimentazione è stato utilizzato come riferimento un altro protocollo (UNI EN 1542-2) che prescrive di realizzare dei fori circolari di  $50 \pm 0.5$  mm di diametro (fino ad una profondità di  $15 \pm 5$  mm all'interno del sottostrato).



**Figura 4.33: esempio di incisione su lastra  
Diametro 50 mm e profondità 35 mm.**

La fase successiva consiste nel pulire la superficie interessata dal carotaggio, con aria compressa. Viene poi applicato in corrispondenza del foro un tassello in acciaio del diametro di circa 50 mm. Il tassello viene quindi incollato, interponendo tra superficie e tassello un adesivo bi-componente (una resina), il quale, ad indurimento avvenuto, rende solidali i due.



**Figura 4.34: Fase incollaggio del tassello.**

Una volta che l'adesivo si è indurito, il tassello può essere collegato allo strumento che permette di esercitare una sollecitazione di trazione sullo stesso fino a giungere alla rottura.

L'aumento della trazione deve essere progressivo e per normativa non superiore a 1MPa/s, e porta alla rottura del campione o al distacco del tassello metallico.

Viene di seguito descritto il protocollo eseguito in laboratorio.

- Le lastre sono state forate, mediante una punta a tazza di diametro 55 mm; per ogni lastra sono stati effettuati tre fori.
- Dopo il passaggio con aria compressa, sulla superficie della lastra in corrispondenza dei fori sono stati incollati i tasselli metallici. Come si nota dalla figura 4.33, per evitare che la resina finisse all'interno dei fori, si è provveduto ad applicare del nastro adesivo per coprire i fori stessi.



**Figura 4.35: particolare preparazione superficie per incollaggio.**

- La resina è stata lasciata ad asciugare per almeno tre giorni a temperatura ambiente.



**Figura 4.36: tassello metallico incollato.**

- Prima di effettuare la prova, viene predisposto all'interno del foro filettato presente al centro del tassello, un gancio (questo sarà poi unito alla strumentazione per eseguire la prova di strappo).
- Predisposta una piastra metallica con foro centrale di diametro maggiore di 50 mm a supporto del macchinario, viene posato lo strumento e viene messo in trazione il tassello fino a rottura.
- Viene infine registrata la forza di trazione esercitata, letta sul display dello strumento.

Tali prove sono indispensabili per determinare la forza di adesione tra i vari strati, andando a valutare le tensioni di rottura.

Tale prova è stata fatta in tre punti distinti per ciascuna lastra: due in corrispondenza dell'ormaja (prodotta nelle prove precedenti) e una al di fuori della stessa.

# 5 Analisi dei Dati

## 5.1 Introduzione

L'oggetto della presente trattazione è la sperimentazione eseguita su pavimentazioni polimeriche sottili per impalcati da ponte. Come già anticipato, sono state valutate diverse soluzioni di posa, indicate con le lettere A, B e C. Le tre tipologie di pavimentazione sono state poi confrontate mediante prove di caratterizzazione prestazionale.

Sono riportate in questo capitolo i risultati ottenuti dalle prove e le osservazioni in merito al confronto delle diverse soluzioni.

Prima di analizzare nello specifico i risultati ottenuti con le varie prove, si riporta un prospetto delle varie pavimentazioni ottenute dalla realizzazione dei provini. Nelle figure dalla 1 alla 18 sono riportate le foto di tutte le soluzioni sottoposte a prova durante la sperimentazione.

Le prove effettuate sui provini, seguono i protocolli esposti nelle normative di riferimento; talvolta, per evidenziare ed indagare in modo più approfondito determinati fenomeni, alcuni protocolli hanno subito delle modifiche rispetto a quanto esposto in normativa. Per tal ragione i risultati ottenuti dalle prove eseguite e di seguito riportati possono essere considerati solo per effettuare dei confronti e trarre delle conclusioni sul comportamento di tali sistemi; i valori osservati devono essere considerati come indicativi delle prestazioni delle soluzioni studiate e non come valori ufficiali da utilizzare in fase di progettazione.



Figura 1: A-1-SQ-50



Figura 2: A-1-SQ-100

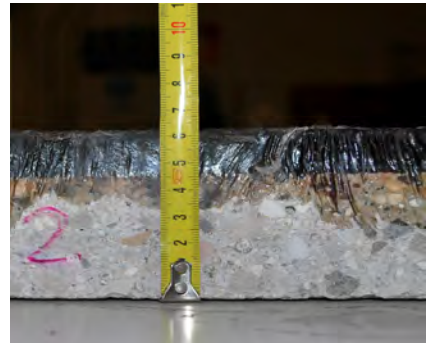


Figura 3: A-1-SF-100



Figura 4: A-2-C-50

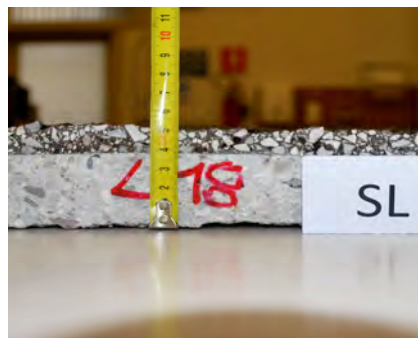


Figura 5: A-2-C-75

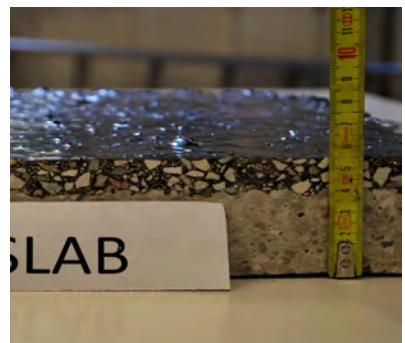


Figura 6: A-2-C-100

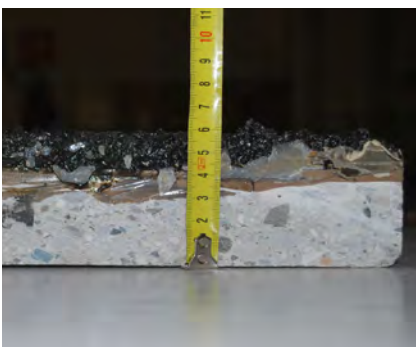


Figura 7: A-2-SG-100



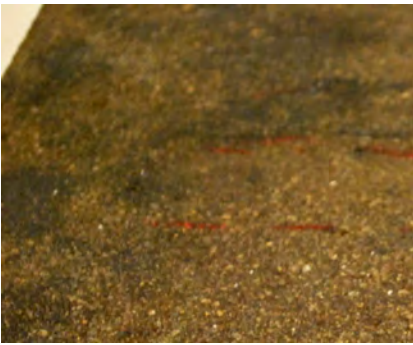
Figura 8: B-2-C-100



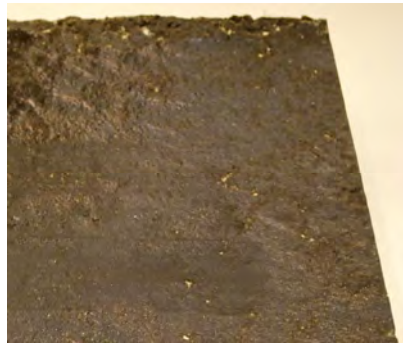
Figura 9: C-00-B-100

Figure 5.1 – 5.9: Spessori delle pavimentazioni.





**Figura 10: A-1-SQ-50**



**Figura 11: A-1-SQ-100**



**Figura 12: A-1-SF-100**



**Figura 13: A-2-C-50**



**Figura 14: A-2-C-75**



**Figura 15: A-2-C-100**



**Figura 16: A-2-SG-100**



**Figura 17: B-2-C-100**



**Figura 18: C-00-B-100**

**Figure 5.10 – 5.18: Superfici delle pavimentazione.**

## 5.2 Caratterizzazione superficiale

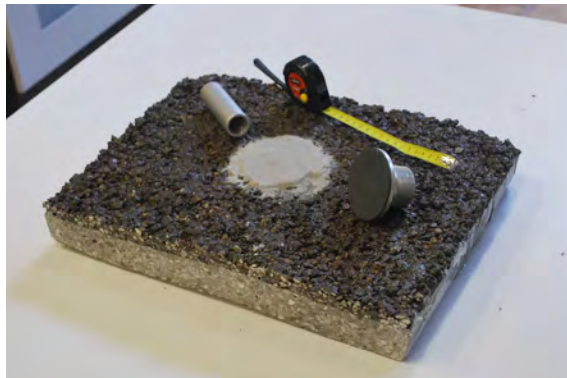
I provini realizzati sono stati sottoposti a prove di laboratorio, quali: la prova di altezza in sabbia, la prova con la strumentazione “skid tester” e la prova di drenabilità orizzontale. Queste prove sono state utilizzate per descrivere il comportamento superficiale delle varie soluzioni proposte.

I risultati ottenuti e le osservazioni conseguenti sono di seguito riportati.

### 5.2.1 Prova di altezza in sabbia.

Richiamando quanto visto nel capitolo precedente la prova di altezza in sabbia risulta essere estremamente utile per definire la macrotessitura della pavimentazione.

La prova consiste nel versare un volume noto di sabbia sulla superficie della pavimentazione e di stenderla con apposito strumento. La sabbia viene stesa in modo tale da colmare i vuoti presenti sulla superficie, provvedendo poi alla misurazione dell’area “circolare”<sup>1</sup> coperta dalla sabbia. Questa prova consente di ottenere un particolare indice, denominato altezza in sabbia (AS), il quale, secondo intervalli tabulati, definisce la classe di macrotessitura superficiale alla quale la pavimentazione appartiene.



**Figura 5.2.1: strumentazione utilizzata per prova altezza in sabbia.**

---

<sup>1</sup> L’area ottenuta stendendo la sabbia è tendenzialmente circolare e viene calcolata attraverso un diametro medio ottenuto dalla media aritmetica di almeno due diametri misurati rappresentativi l’impronta di sabbia sul provino.



Si riportano nelle tabelle seguenti (Tabelle 5.2.1, 5.2.2) i risultati ottenuti, dove ciascun provino è individuato mediante un identificativo.

Identificativo provino	P1	P1	P2	P2	D medio [mm]	A media [mmq]
	D <sub>1</sub> [cm]	D <sub>2</sub> [cm]	D <sub>1</sub> [cm]	D <sub>2</sub> [cm]		
A-MF-SQ-100-L1	31,5	32	32,5	32	320,0	80384
A-MF-SF-100-L3	20	19,5	20,5	19	197,5	30620
A-MF-SQ-50-L7	26	27	29	27	272,5	58291
A-MG-C-50-L6	12	16	15	17	150,0	17663
A-MG-C-100-L4	31	31	29	28	297,5	69477
A-MG-SG-100-L5	35	33	31	34	332,5	86787
C-00-B-100-L8	26,5	26	25	27	261,3	53577
A-MG-C-75-L12	20	20	19	20	197,5	30620
B-MG-C-100-L16	23	21	25	20	222,5	38862

**Tabella 5.2.1: risultati ottenuti prova altezza in sabbia.**

Il diametro medio è stato calcolato come media aritmetica delle 4 misure effettuate su ciascun provino; l'area media calcolata in funzione del diametro D medio.

I dati così ottenuti sono stati poi rapportati al volume di sabbia utilizzato (di valore costante e pari a 24722.8 mm<sup>3</sup>) per ottenere l'indice AS.

Identificativo provino	D medio [mm]	A media [mmq]	V medio [mmc]	AS
A-MF-SQ-100-L1	320,0	80384,0	24722,8	0,31
A-MF-SF-100-L3	197,5	30619,9	24722,8	0,81
A-MF-SQ-50-L7	272,5	58291,2	24722,8	0,42
A-MG-C-50-L6	150,0	17662,5	24722,8	1,40
A-MG-C-100-L4	297,5	69477,4	24722,8	0,36
A-MG-SG-100-L5	332,5	86786,7	24722,8	0,28
C-00-B-100-L8	261,3	53577,5	24722,8	0,46
A-MG-C-75-L12	197,5	30619,9	24722,8	0,81
B-MG-C-100-L16	222,5	38862,4	24722,8	0,64

**Tabella 5.2.2: risultati rielaborati prova altezza in sabbia.**

I valori di altezza in sabbia (AS) calcolati sono stati confrontati con gli intervalli riportati nella tabella 5.2.3.

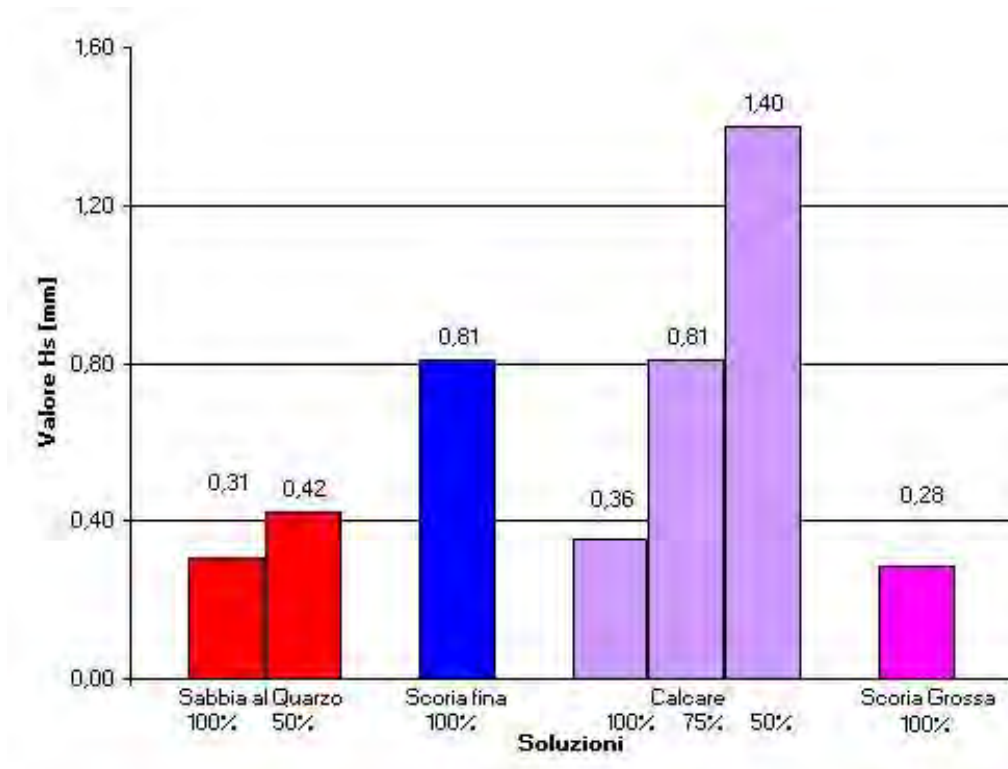
<b>Altezza media in sabbia (HS) [mm]</b>	<b>Macrotessitura Superficiale</b>
HS ≤ 0.20	Molto fina
0.20 < HS ≤ 0.40	Fina
0.40 < HS ≤ 0.80	Media
0.80 < HS ≤ 1.20	Grossa
HS > 1.20	Molto grossa

**Tabella 5.2.3: Prova altezza in sabbia:  
qualità macrotessitura.**

Si ottiene per ciascuna tipologia di pavimentazione una classificazione, riportata nella tabella 5.2.4.

<b>Identificativo provino</b>	<b>Macrotessitura superficiale</b>
A-MF-SQ-100-L1	fina
A-MF-SF-100-L3	grossa
A-MF-SQ-50-L7	media
A-MG-C-50-L6	molto grossa
A-MG-C-100-L4	fina
A-MG-SG-100-L5	fina
C-00-B-100-L8	media
A-MG-C-75-L12	grossa
B-MG-C-100-L16	media

**Tabella 5.2.4: Classificazione pavimentazione.**



**Grafico 5.2.1: Confronto macrotestitura superficiale soluzione A.**

Prima di valutare e confrontare le soluzioni A B e C tra di loro, è utile fare alcune considerazioni, evidenziando come l'aggregato e la percentuale di legante influenzino la macrotestitura superficiale.

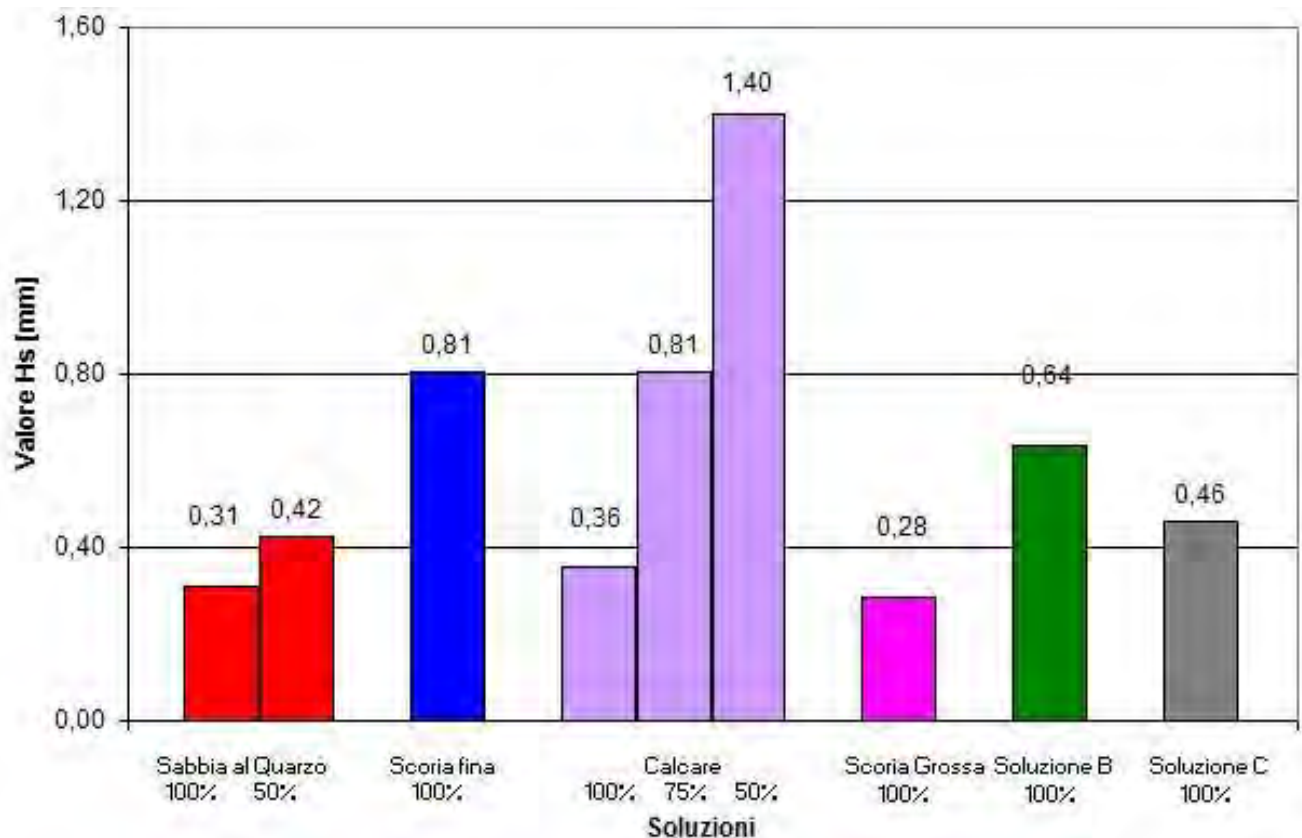
In riferimento al grafico in Figura 5.2.1 si possono fare alcune osservazioni. Non si riscontrano soluzioni con macrotestitura molto fina: infatti tutte le soluzioni hanno un valore di AS maggiore di 0.20. Ad esclusione della soluzione A-1-SF-100, tutte le soluzioni con un quantitativo di legante pari al 100% presentano una macrotestitura fina. Il valore più piccolo si riscontra per la soluzione A-2-C-100, mentre quello più elevato per la soluzione con il calcare e con la sabbia di quarzo. La scoria, specialmente quella grossa, è caratterizzata da grani aventi peso specifico più elevato rispetto agli altri aggregati (come la sabbia di quarzo e il calcare). Questo comporta, grazie anche al contenuto elevato di legante, un maggiore affondamento dei granuli all'interno della malta sintetica posata: ciò conferisce alla pavimentazione una macrotestitura poco accentuata.

In controtendenza a quanto esposto al punto precedente, la scoria fina ha macrotestitura media: tale valore è però condizionato dalla posa in opera. Per tale provino non è stata effettuata un livellamento accurato della superficie, come per gli altri provini, e questo ha portato ad una soluzione con maggiori asperità. Il fatto che ci sia stata una compattazione meccanica ha influenzato quindi le caratteristiche superficiali della pavimentazione.

Le soluzioni con percentuali di legante pari al 50 %, testate solo con sabbia di quarzo e con calcare, mostrano che la percentuale di legante influenza in modo sensibile la macrotestitura: si è passati infatti da macrotestiture fine a medie per la sabbia di quarzo, mentre da fine a molto grosse per il calcare. Questo risultato positivo comporta però problemi in fase di miscelazione, perché la minore quantità di resina nella miscela riduce la possibilità che i grani si leghino tra di loro. Molti granuli, specialmente nella soluzione con il calcare, non risultano totalmente ricoperti dal legante rendendoli quindi più suscettibili al distacco, se sollecitati.

Buoni risultati si hanno invece per la soluzione A-2-C-75: il giusto dosaggio di legante conferisce un'adesione migliore tra i grani e quindi una maggiore stabilità se sollecitati.

I risultati ottenuti per la soluzione A sono stati confrontati poi con quelli della soluzione B e C (Figura 5.2.2).



**Grafico 5.2.2: Confronto macrotestitura soluzione A, B e C.**

Le soluzioni studiate presentano una macrotestitura superficiale che varia da fine a molto grossa; non sono state infatti riscontrate macrotestiture molto fini per nessuna delle soluzioni analizzate.

I provini A-1-SF-100 e A-2-C-75 hanno una macrotestitura grossa: il valore ottenuto per la prova di altezza in sabbia, porta a considerare queste soluzioni come ottime soluzioni. La macrotestitura fina è stata riscontrata solo per le applicazioni stese con la soluzione A; per le soluzioni B e C la macrotestitura è risultata media.

Il quantitativo di legante aggiunto, seppur in percentuale minore rispetto all'aggregato, ha influito sulla macrotestitura, rendendola sempre più accentuata al ridurre della percentuale inserita.

La macrotestitura più grossa si è ottenuta con la soluzione A-2-C-50 mentre quella più fina A-1-SG-100.

Generalmente il metodo di posa multiple layer conferisce alla pavimentazione, una macrotestitura più grossa rispetto alla posa premixed. Tale constatazione non ha trovato conferma nei dati sperimentali ottenuti. La soluzione C infatti, è caratterizzata da una tecnica di posa simile a quella multiple layer e presenta una macrotestitura media a differenza di altre pavimentazioni posate con tecnica premixed che presentano addirittura macrotestitura molto grossa.

Il calcare, indipendentemente dalla percentuale di legante aggiunta (ad esclusione delle miscele con il 100% di legante), conferisce una macrotestitura elevata: essendo stato impiegato solo con tecnica di posa premixed, non è da escludere che tale macrotestitura possa aumentare utilizzando una tecnica di posa multiple layer.

### 5.2.2. Prova Skid tester (BPN).

La prova di skid tester è stata eseguita sugli stessi provini presi in esame per la prova di altezza in sabbia. Per quanto riguarda il protocollo di prova seguito e lo scopo della prova si rimanda a quanto riportato nel capitolo precedente; di seguito è rappresentata una fase della prova e i risultati ottenuti su ciascun provino.



Figura 5.2.2: Fase prova skid tester.

Identificativo provino	P1	P2	P3	P4	P5	media	BPN
A-MF-SQ-100-L1	20	20	20	25	30	21	20
A-MF-SF-100-L3	80	70	70	70	70	73	75
A-MF-SQ-50-L7	70	65	65	65	70	67	65
A-MG-C-50-L6	95	90	90	95	95	93	95
A-MG-C-100-L4	40	35	35	35	30	35	35
A-MG-SG-100-L5	35	30	25	25	25	28	30
C-00-B-100-L8	75	77	75	74	77	76	75
A-MG-C-75-L12	100	95	85	85	85	90	90
B-MG-C-100-L16	100	110	110	110	105	107	110

Tabella 5.2.5: risultati prova BPN.

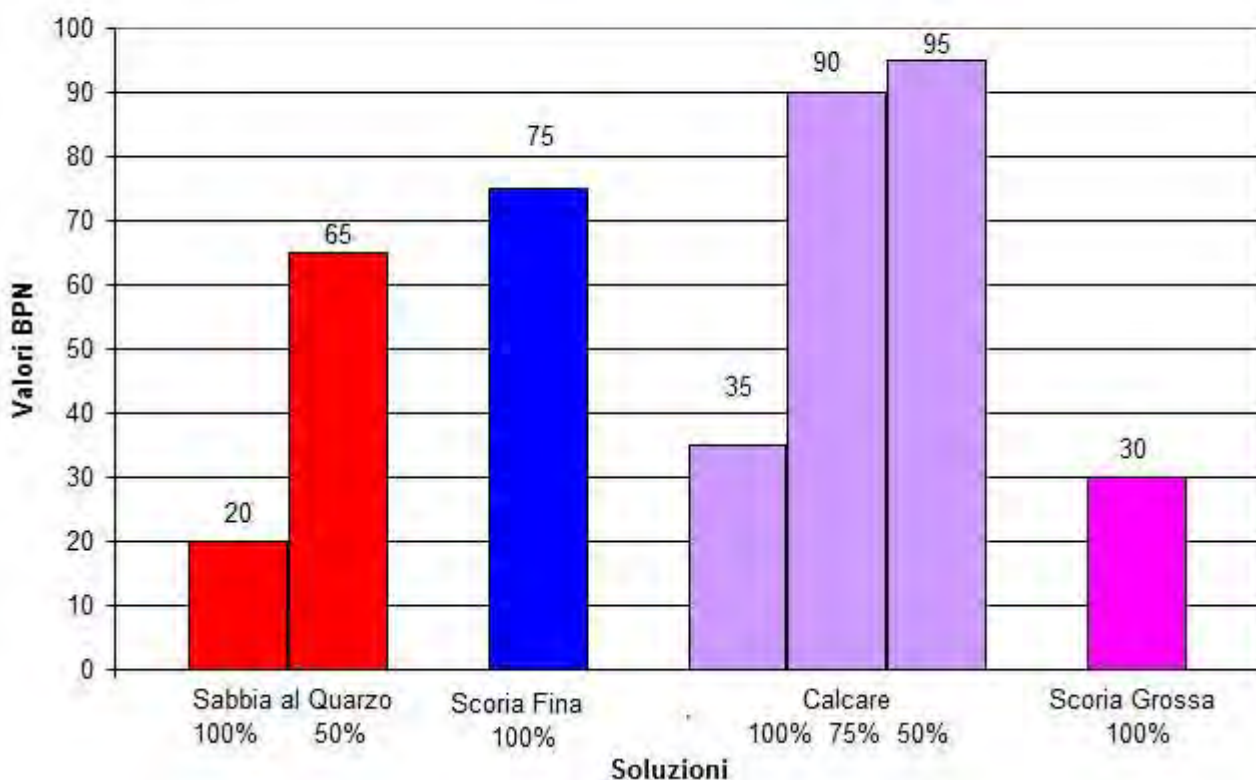
I dati riportati sono già stati corretti, in funzione della temperatura, come riportato in normativa.

I valori trovati sono stati confrontati con gli intervalli proposti di seguito; si è assegnato a ogni pavimentazione la categoria corrispondente.

Categoria	Indice BPN	Classificazione del manto
A	BPN > 65	Manto antisdrucchiolevole per eccellenza
B	55 < BPN < 65	Manto abbastanza antisdrucchiolevole
C	45 < BPN < 55	Manto soddisfacente in condizioni favorevoli
D	BPN < 45	Manto sdrucchiolevole

**Tabella 5.2.6: classificazione superficie.**

Come per l'altezza in sabbia, anche per la prova di skid tester, è conveniente rappresentare i risultati ottenuti per la sola soluzione A evidenziando come questi variano in funzione dell'aggregato e della percentuale di legante inserita.



**Grafico 5.2.3: confronto prova BPN soluzione A.**

Dai risultati ottenuti, possiamo osservare come tutte le miscele contenenti il 50% di legante appartengano alla classificazione A e quindi risultano avere ottime caratteristiche

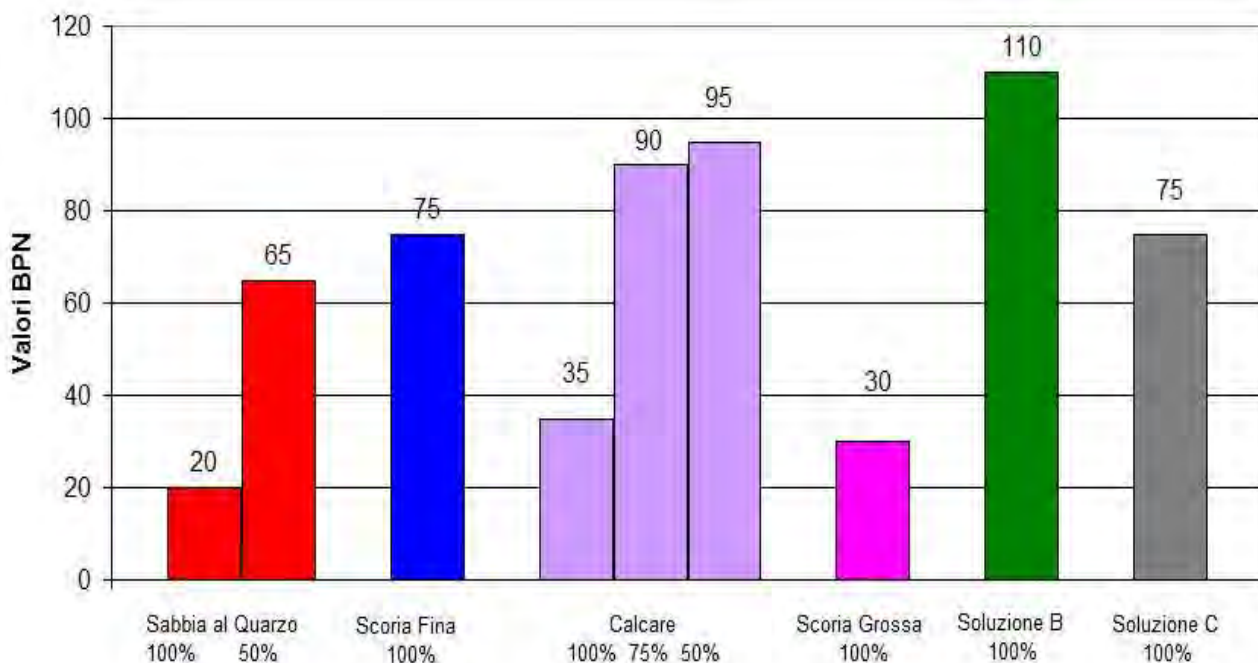
antisdrucchiolo, mentre le soluzioni al 100% non manifestano altrettante buone caratteristiche.

I risultati mostrano come la tessitura superficiale sia condizionata dal quantitativo di legante ed in particolare come, riducendolo, la superficie sia caratterizzata da manti antisdrucchiolo migliori; a parità di quantità di legante si è evidenziato come l'utilizzo di aggregati con pezzatura più grossa conferiscano caratteristiche migliori alla superficie rispetto a quelle confezionate con aggregato fine. L'aggregato, a parità di legante, influenza quindi il BPN rendendolo più elevato per i calcari e scorie e più basso per la sabbia di quarzo avendo i primi due pezzatura più grossa rispetto a quest'ultima.

La soluzione A-2-C-75 da un ottimo risultato (classificazione A) ed inoltre rispetto alla soluzione A-2-C-50 presenta una suscettività dei granuli a staccarsi, se sollecitati, minore.

La soluzione A-1-SQ-100 è la soluzione peggiore mentre la migliore è risultata la A-2-C-50.

Analogamente a quanto fatto con la prova di altezza in sabbia, si riporta il confronto tra le soluzioni A,B e C.



**Grafico 5.2.4: Confronto prova BPN soluzione A, B e C.**

Confrontando le soluzioni A con i risultati della prova eseguiti sui provini confezionati con soluzione B e C, possiamo osservare, come, ad esclusione delle superfici della soluzione A con legante al 100%, tutte i provini manifestano ottime caratteristiche



antisdrucchiolo. La soluzione C-00-B-100 ha un valore BPN in media con le soluzioni A con legante al 50% e aggregato fine mentre manifestano caratteristiche peggiori rispetto alle soluzioni A-2-C-50 e 75.

La soluzione A è influenzata, nella determinazione della qualità del manto, dalla percentuale di legante inserito; dal grafico riportato infatti si nota come la categoria D si ha solo per manti stesi con soluzione A e percentuale di legante al 100%. I manti d'usura con BPN più elevati si ottengono invece con la soluzione B.

Dalle prove BPN e di altezza in sabbia svolte, si sono ottenute le classificazioni mostrate in tabella 5.2.8.

<b>Identificativo provino</b>	<b>Manto superficiale</b>	<b>Macrotessitura superficiale</b>
A-MF-SQ-100-L1	sdrucchiolevo	fina
A-MF-SF-100-L3	antisdrucchiolo per eccellenza	grossa
A-MF-SQ-50-L7	antisdrucchiolo per eccellenza	media
A-MG-C-50-L6	antisdrucchiolo per eccellenza	molto grossa
A-MG-C-100-L4	sdrucchiolevo	fina
A-MG-SG-100-L5	sdrucchiolevo	fina
C-00-B-100-L8	antisdrucchiolo per eccellenza	media
A-MG-C-75-L12	antisdrucchiolo per eccellenza	grossa
B-MG-C-100-L16	antisdrucchiolo per eccellenza	media

**Tabella 5.2.7. Classificazione BPN ed Altezza in sabbia**

### **5.2.3 Prova di drenabilità orizzontale.**

Come anticipato nel capitolo precedente, tale prova serve a simulare la velocità, da parte della pavimentazione, a smaltire l'acqua che si interpone tra pneumatico e superficie carrabile durante la marcia del veicolo. Si tenga presente che la drenabilità orizzontale è sicuramente influenzata dalla pendenza longitudinale, fattore non considerato a favore di sicurezza, durante la sperimentazione.

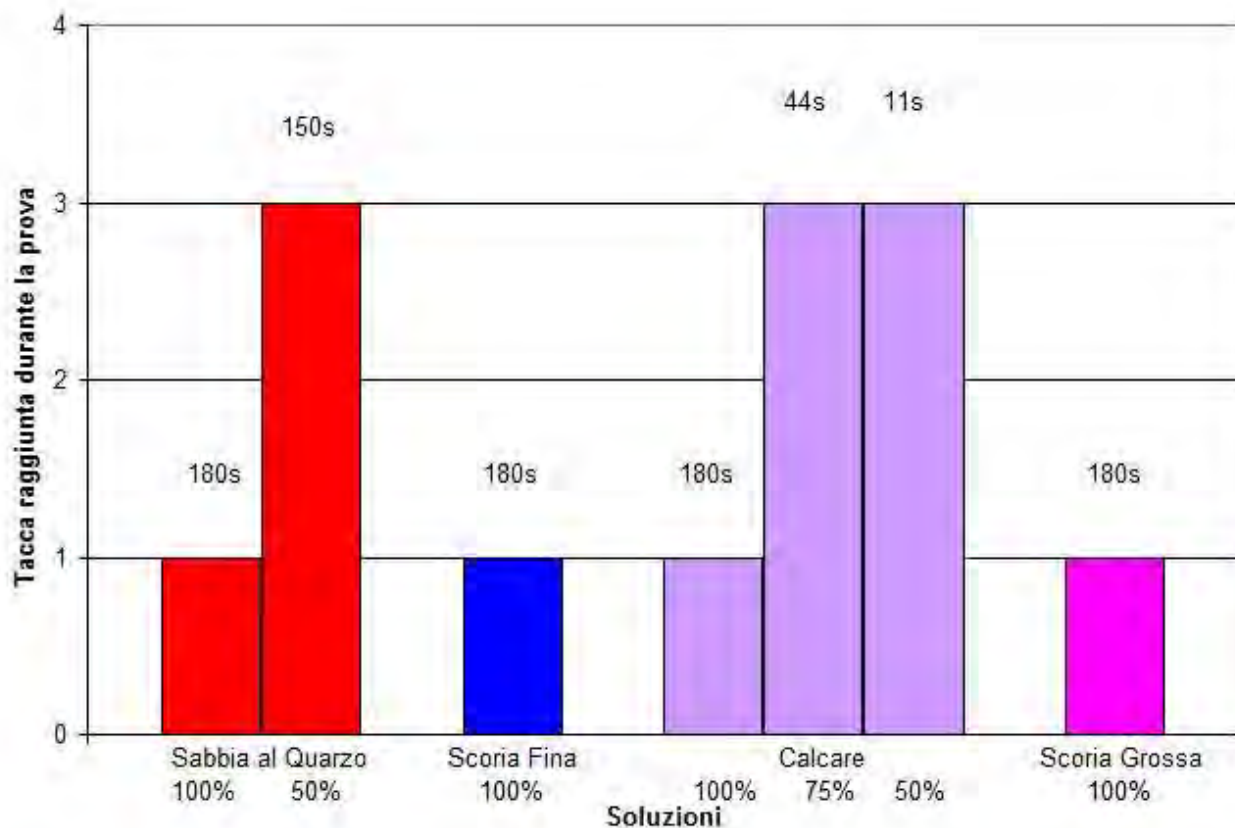
La prova consiste nel misurare il tempo impiegato dalla pavimentazione a smaltire, tramite la propria rugosità superficiale, un volume noto e costante di acqua. Il volume d'acqua è contenuto su di un cilindro in plastica, poggiato sulla pavimentazione interponendo una particolare spugna in gomma rigida precedentemente imbibita d'acqua, e dotato di tre tacche con funzione di individuare inizio e fine della prova. Il cilindro viene riempito d'acqua superando la tacca superiore; all'atto della apertura del foro inferiore, il tempo di durata della prova viene misurato quando il livello del liquido scendendo, raggiunge e supera la tacca superiore. La prova si conclude quando il livello dell'acqua raggiunge la tacca inferiore. Nel caso in cui trascorso un tempo di 180 s non si è raggiunto e superato la tacca intermedia (posta ad un terzo della distanza tra tacca superiore ed inferiore), la prova viene interrotta non al raggiungimento della tacca inferiore ma al

raggiungimento della tacca intermedia; come valore di prova, in questo caso, si prende il valore così misurato moltiplicato per 6.

Per alcune superfici testate, vista la loro pessima drenabilità, si è dovuto arrestare la prova prima del raggiungimento della tacca intermedia, in quanto pur con l'otturatore inferiore aperto, il livello di liquido non scendeva al di sotto della tacca superiore; per tali pavimentazioni si è indicato come tempo standard di prova >180s ad indicare una pavimentazione con pessime caratteristiche di drenabilità.

identificativo	Lastra	Tempo 1	Tempo 2	Tacca s.1	Tacca s. 2	Valore Medio
A-1-SQ-100	L1	180	180	prima	prima	180
A-1-SQ-50	L7	140	160	terza	terza	150
A-1-SF-100	L3	180	180	prima	prima	180
A-2-C-100	L4	180	180	prima	prima	180
A-2-C-75	L12	43	45	terza	terza	44
A-2-C50	L6	14	9	terza	terza	11
A-2-SG-100	L5	180	180	prima	prima	180
C-00-B-100	L8	629	855	terza	terza	742
B-2-C-100	L15	56	80	terza	terza	163

**Tabella 5.2.8: risultati prova drenabilità orizzontale.**



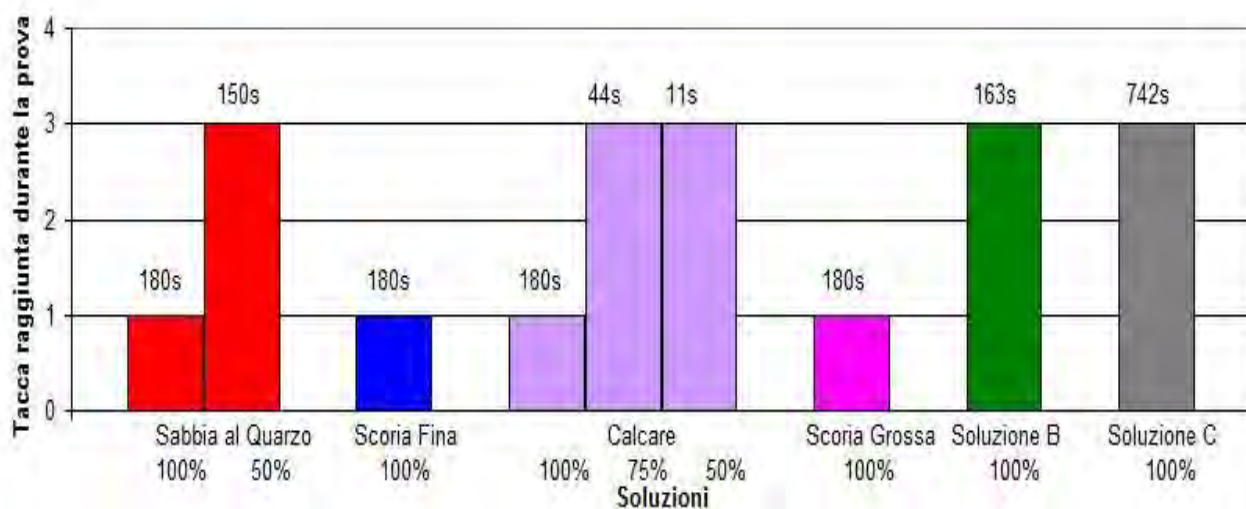
**Grafico 5.2.5: risultati drenabilità orizzontale Soluzione A.**

Il grafico riportato, mostra i risultati ottenuti dalla prova evidenziando la tacca raggiunta e il tempo necessario a raggiungerla; i valori 1, 2 e 3 riportati in ordinata indicano rispettivamente la tacca superiore, intermedia e quella inferiore raggiunta durante la prova mentre il valore riportato su ogni istogramma indica il tempo necessario per raggiungerla.

Dai risultati ottenuti si può osservare come tutte le soluzioni con 100% di legante, indipendentemente dall'aggregato utilizzato, presentano una drenabilità pessima. Durante la prova il livello dell'acqua non è mai sceso sotto la tacca superiore.

Le soluzioni con percentuali di legante inferiore invece mostrano una drenabilità accettabile; per la sabbia al quarzo il valore ottenuto, superiore al calcare, è in linea con quello della soluzione B (come vedremo in seguito) e può essere considerato buono. La soluzione A-2-C-75 e A-2-C-50 evidenziano un abbattimento del tempo di prova sensibile rispetto alla soluzione A-2-C-100 e sicuramente ottimo in termini di prestazione.

Confrontando i risultati ottenuti con la soluzione A con quelli ottenuti con la soluzione B e C, si ottengono i risultati nella Figura 5.2.6.



**Grafico 5.2.6: Confronto drenabilità superficiale soluzione A, B e C**

Dai risultati ottenuti possiamo osservare che sia la soluzione B che la soluzione C raggiungono, durante la prova, la tacca inferiore. La soluzione B ha una drenabilità totalmente in linea con quella ottenuta con la soluzione A-1-SQ-50.

La soluzione C presenta buoni valori di drenabilità; nel confronto con la soluzione A, ad esclusione delle pavimentazioni con 100% di legante, risulta essere però peggiore. La tecnica premixed, che caratterizza la soluzione A, da risultati migliori rispetto alla tecnica di posa multiple layer che caratterizza invece la soluzione C.

Essendo la soluzione B e C due soluzioni attualmente impiegate e quindi ritenute idonee, si possono considerare in modo positivo i risultati ottenuti con le soluzioni A-1-SQ-50 E A-2-C-50/75. La soluzione A con legante al 100% invece è da evitare in quanto il drenaggio superficiale risulta assai lento causando possibili problemi di acquaplaning o effetto spray ai veicoli in transito. Le soluzioni viste possono sicuramente aumentare le prestazioni in merito alla drenabilità se si considera, in fase di progettazione, una idonea pendenza da assegnare a ciascuna pavimentazione oppure eseguendo una migliore progettazione delle miscele.

### **5.3 Caratterizzazione Fisico – Meccanica**

Nei successivi paragrafi verranno riportati e commentati i risultati ottenuti dalle prove ITSM, ormaiamento e adesione eseguite sui provini; tali prove sono risultate utili, quanto necessarie, per caratterizzare le soluzioni proposte dal punto di vista fisico - meccanico.

#### **5.3.1 Modulo di rigidezza (*ITSM - indirect tensile stiffness modulus*)**

La prova ITSM, il cui protocollo è stato trattato nel capitolo precedente, è utile per valutare il modulo di rigidezza delle soluzioni proposte. Tale prova è stata eseguita su provini cilindrici di diametro 100 mm circa e altezza 60 mm circa. L'analisi non è stata svolta per tutte le soluzioni (A,B e C) e per tutte le varianti di aggregato/ percentuale di legante; tale scelta è dovuta a vari fattori:

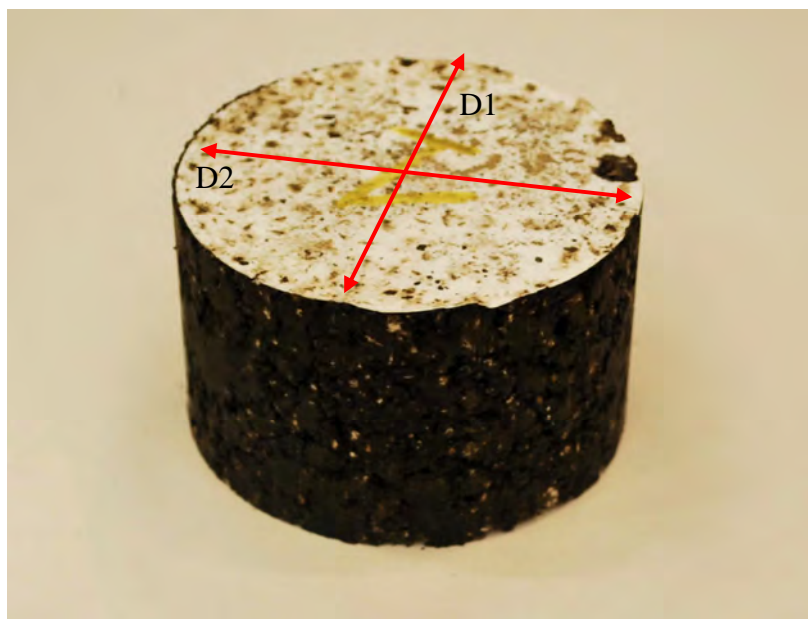
- La soluzione C non era idonea per creare dei provini cilindrici e quindi non poteva essere analizzata tramite prova ITSM.
- Lo scopo non è quello di assegnare valori di modulo per ciascuna combinazione (soluzione, aggregato, percentuale legante), ma quello di valutare come questa grandezza si modifica al variare della percentuale di legante;
- La soluzione B è stata analizzata per un confronto con i risultati ottenuti con la soluzione A.

Dalle prove eseguite si sono ottenuti i risultati di seguito riportati.

#### **Risultati prove ITSM**

Per ogni soluzione testata, differente per tipologia di aggregato e percentuale di legante, sono stati realizzati almeno tre provini; per ogni provino analizzato, si sono ottenuti due misurazioni del modulo, ognuno caratteristico del diametro preso in riferimento durante la prova. I due valori di modulo sono stati poi mediati ottenendo quello medio e caratteristico del provino analizzato.

Ogni soluzione studiata, definita da una particolare tipologia di aggregato e percentuale di resina inserita, era caratterizzato quindi da almeno tre valori di modulo medio di rigidezza. Si è provveduto quindi a determinare un unico modulo di rigidezza, caratteristico della soluzione, attraverso una semplice media aritmetica dei moduli medi ottenuti al punto precedente. Il modulo di rigidezza così determinato è caratteristico della soluzione, definita da un determinato aggregato e percentuale di legante.



**Figura 5.3.1: provino cilindrico B-00-C-100 sottoposto a prova ITSM.**

Di seguito i risultati ottenuti; la prova è stata eseguita alla temperatura di 25°C.

Prov.	SOL.	MATERIALE	%	1D [MPa]	2D [MPa]	VAL. MEDIO [MPa]
1	A	C	50	748	748	748
2	A	C	50	825	830	828
3	A	C	50	981	933	957
					Media	844

**Tabella 5.3.1.**

Prov.	SOL.	MATERIALE	%	1D [MPa]	2D [MPa]	VAL. MEDIO [MPa]
1	A	C	75	323	282	303
2	A	C	75	313	291	302
3	A	C	75	308	278	293
					Media	299

**Tabella 5.3.2.**

Prov.	SOL.	MATERIALE	%	1D [MPa]	2D [MPa]	VAL. MEDIO [MPa]
1	A	C	100	319	319	319
2	A	C	100	285	229	257
3	A	C	100	234	204	219
					Media	265

**Tabella 5.3.3.**

Prov.	SOL.	MATERIALE	%	1D [MPa]	2D [MPa]	VAL. MEDIO [MPa]
1	A	SQ	50	334	763	549
2	A	SQ	50	583	472	528
3	A	SQ	50	557	476	517
					Media	531

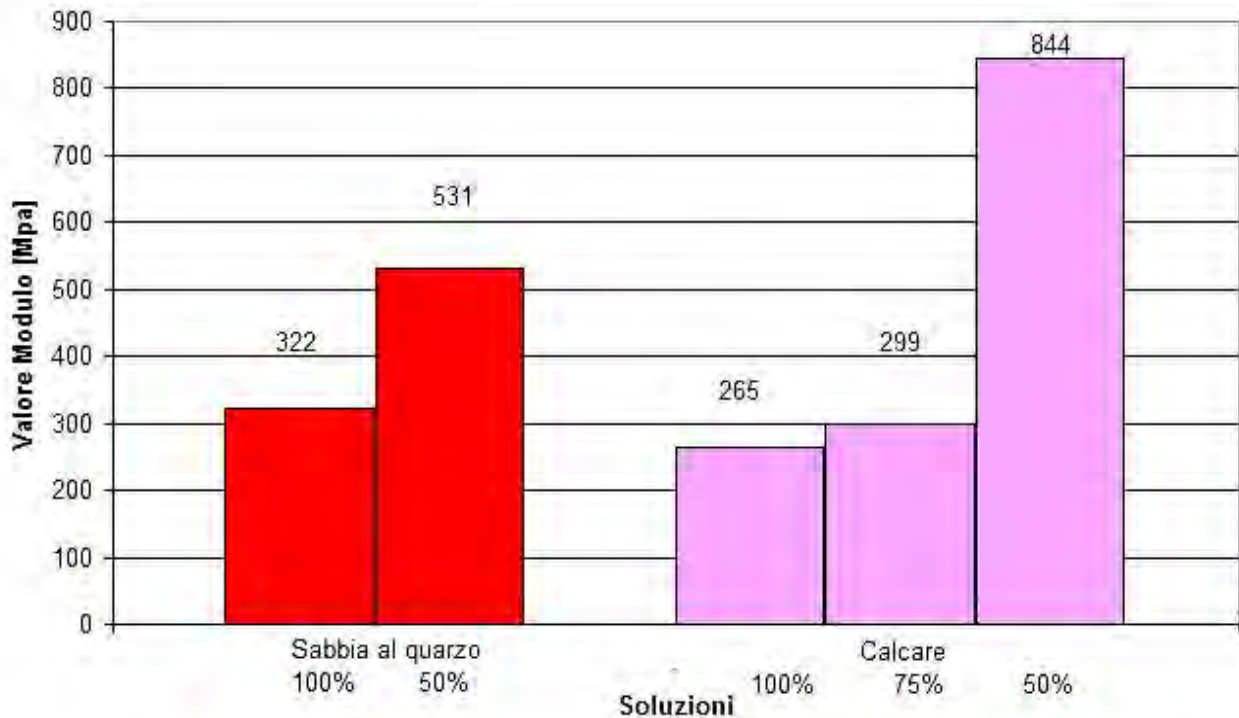
**Tabella 5.3.4.**

Prov.	SOL.	MATERIALE	%	1D [MPa]	2D [MPa]	VAL. MEDIO [MPa]
1	A	SQ	100	369	346	358
2	A	SQ	100	313	287	300
3	A	SQ	100	341	277	309
					Media	322

**Tabella 5.3.5.**

Prov.	SOL.	MATERIALE	%	1D [MPa]	2D [MPa]	VAL. MEDIO [MPa]
1	B	C	100	6138	6058	6098
2	B	C	100	4872	4350	4611
3	B	C	100	6545	6030	6288
4	B	C	100	6428	6673	6551
5	B	C	100	6349	3996	5173
6	B	C	100	5718	5401	5560
7	B	C	100	6437	6275	6356
8	B	C	100	7377	6991	7184
					media	5977

**Tabella 5.3.6.**



**Grafico 5.3.1: Comparazione modulo medio soluzione A.**

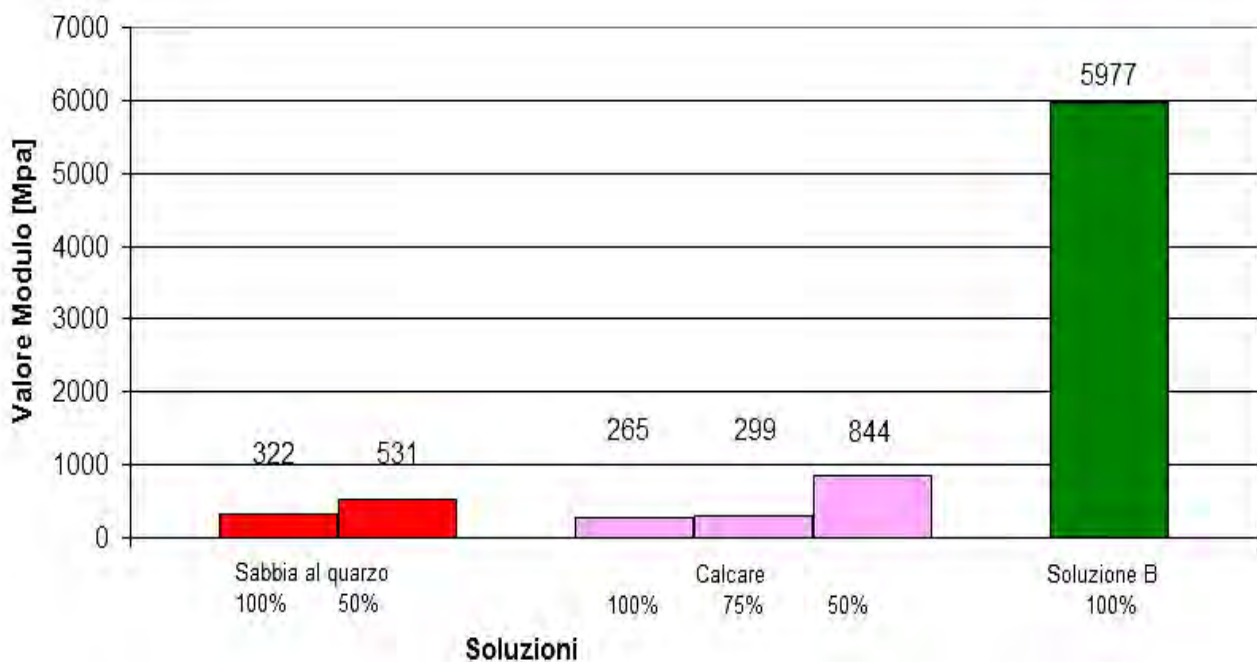
Dalla rappresentazione riportata si può osservare che a parità di aggregato il modulo è influenzato dalla percentuale di legante; un quantitativo di legante minore infatti comporta un aumento del valore del modulo. A parità di legante inserito è possibile osservare come le dimensioni dell'aggregato comportino diversi valori del modulo di rigidità; Moduli di rigidità più elevati si ottengono con aggregati di dimensioni maggiori, con aggregati di

dimensioni più fini il modulo risulta inferiore. Tra le prove eseguite la soluzione A-2-C-50 risulta essere quella con il modulo di rigidezza più elevato.

Analizzando i provini A-2-C-50/75/100 è possibile osservare come ad una variazione proporzionale del contenuto di legante, non corrisponda un'altrettanto proporzionale variazione del modulo.

Il modulo, variando la percentuale di legante subisce maggiori variazioni se contenente aggregato grosso. Per la sabbia di quarzo, passando dal 100% di legante al 50%, il modulo è aumentato di circa 1.65 volte, mentre per il calcare tale variazione ha portato ad un aumento del modulo di circa 3.18 volte.

Il modulo ottenuto con la soluzione A-2-C-75 è variato di poco rispetto alla soluzione A-2-C-100. Il valore basso del modulo riscontrato per la soluzione A-2-C-75 è un ottimo risultato per le applicazioni interessate.



**Grafico 5.3.2: Comparazione modulo medio soluzioni A e B.**

Si può riscontrare come il modulo fornito dalla soluzione B sia nettamente più elevato rispetto a quello ottenuto, a parità di aggregato utilizzato (calcare) con la soluzione A.

Dalle sperimentazioni esposte nel capitolo 2 è stato riscontrato come rivestimenti polimerici sottili con moduli elastici bassi interagissero meglio con il sottostrato sviluppando, in seguito a variazioni di temperatura, valori di tensione più contenuti; per questo motivo i risultati ottenuti risultano compatibili ed idonei alle applicazioni in oggetto.



Attraverso la misurazione del diametro medio e altezza media di ogni provino utilizzato per la prova ITSM, è stato possibile determinare il volume medio, il quale, rapportato con la massa del provino, anch'essa misurata, ha permesso di individuare la densità.

Di seguito si riportano i valori medi delle dimensioni misurate e i valori calcolati di volume e densità per ogni provino analizzato.

Sol.	Mat.	%	h medio [mm]	D medio [mm]	Volume [mmc]	Massa [g]	densità [g/mmc]
A	C	50	52,3	100,8	7971,8	807,8	0,101
A	C	50	57,7	100,1	7859,8	907,3	0,115
Media							0,108

**Tabella 5.3.7.**

Sol.	Mat.	%	h medio [mm]	D medio [mm]	Volume [mmc]	Massa [g]	densità [g/mmc]
A	C	100	55,6	99,1	7705,1	896,2	0,116
A	C	100	59,9	100,0	7844,1	961,6	0,123
A	C	100	59,8	101,1	8021,7	994,6	0,124
Media							0,121

**Tabella 5.3.8.**

Sol.	Mat.	%	h medio [mm]	D medio [mm]	Volume [mmc]	Massa [g]	densità [g/mmc]
A	C	75	55,0	100,8	7980,5	912,2	0,114
A	C	75	55,5	101,0	8003,8	935,4	0,117
A	C	75	49,7	101,1	8024,0	824,3	0,103
Media							0,111

**Tabella 5.3.9.**

Sol.	Mat.	%	h medio [mm]	D medio [mm]	Volume [mmc]	Massa [g]	densità [g/mmc]
A	SQ	50	51,7	100,9	7999,1	841,4	0,105
A	SQ	50	56,4	101,5	8080,5	911,1	0,113
Media							0,109

**Tabella 5.3.10.**

Sol.	Mat.	%	h medio [mm]	D medio [mm]	Volume [mmc]	Massa [g]	densità [g/mmc]
A	SQ	100	63,3	99,9	7837,4	1001,9	0,128
A	SQ	100	60,1	99,9	7834,7	898,3	0,115
Media							0,121

**Tabella 5.3.11.**

Sol.	Mat.	%	h medio [mm]	D medio [mm]	Volume [mmc]	Massa [g]	densità [g/mmc]
B	C	100	62,9	101,7	8125,2	1249,0	0,154
B	C	100	62,7	101,6	8107,6	1245,3	0,154
B	C	100	64,0	101,8	8127,2	1253,7	0,154
B	C	100	63,3	102,1	8178,4	1247,8	0,153
B	C	100	64,0	101,5	8092,0	1236,4	0,153
B	C	100	62,8	101,3	8062,2	1257,3	0,156
B	C	100	61,4	101,5	8092,0	1229,1	0,152
B	C	100	63,1	101,7	8126,8	1250,6	0,154
Media							0,154

Tabella 5.3.12.

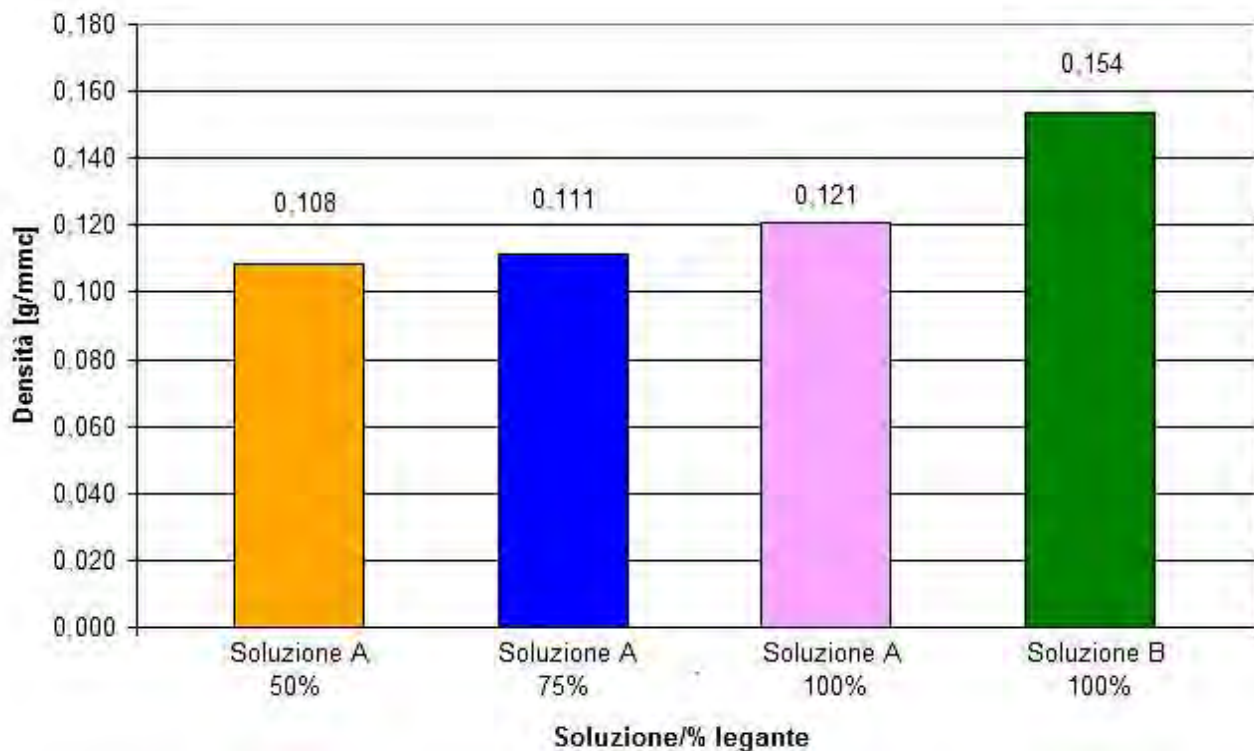


Grafico 5.3.3: confronto densità soluzioni A e B.

Nei risultati ottenuti l'aggregato non è un fattore influente, tale cioè da far variare il valore della densità; a parità di soluzione, sebbene fosse impiegato tipologie di aggregato differente, la quantità inserita è rimasta costante e pari a 820g. Si precisa che nella densità così calcolata non si è tenuto conto del primer per la soluzione A ne del peso della guaina bituminosa per la soluzione B (assai più pesante del primer non conteggiato nella soluzione A) che viene comunque steso sull'impalcato.

Dai risultati ottenuti si osserva che a parità di soluzione, la densità diminuisce in modo proporzionale alla riduzione di percentuale di legante inserito (i valori non sono perfettamente proporzionali in quanto a livello teorico si possono introdurre quantitativi

perfettamente uguali di aggregato/resina ma dal lato pratico questo risulta difficile se non impossibile).

Confrontando i valori di densità, si osservano valori per la soluzione B superiori del circa 36% rispetto a quelli rilevati per la soluzione A.

Il peso già superiore deve essere aumentato poi con il peso della guaina, non conteggiata, arrivando ad un aumento di circa il 38-39 %.

Risulta preferibile la soluzione A, in termini di peso, rispetto alla soluzione B.

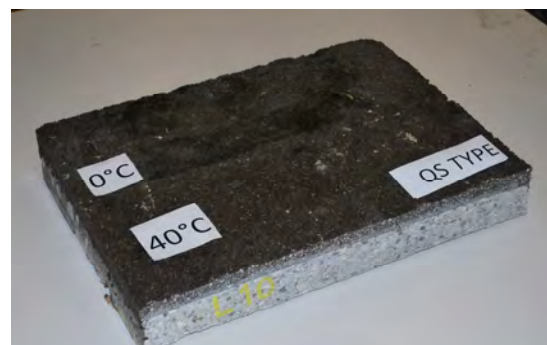
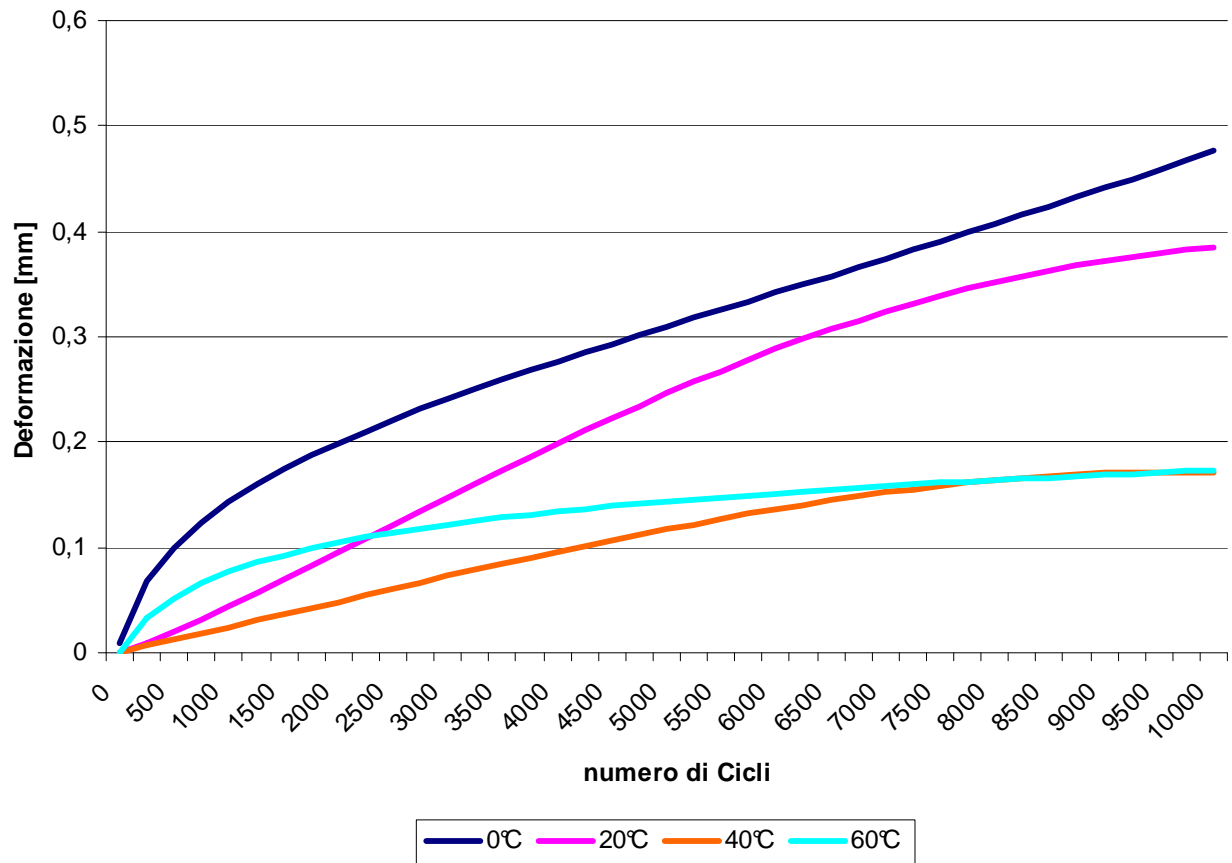
### **5.3.2. Le deformazioni permanenti: prova di ormaiamento**

Le prove per la determinazione delle deformazioni permanenti sono state svolte, contrariamente a quanto generalmente viene fatto, per quattro temperature; tali temperature (0°C, 20°C, 40°C e 60°C), sono state scelte per due ragioni:

- La resina epossidica impiegata, a differenza del bitume, è termoindurente; questa caratteristica conferisce al conglomerato polimerico maggiore resistenza alle deformazioni permanenti alle alte temperature. Alle basse temperature le deformazioni permanenti in un conglomerato polimerico risultano essere più elevate. Con la volontà di testare, nella condizione più critica, ciascuna soluzione, si sono analizzati i provini sia alle basse temperature sia a temperature più elevate.
- Analizzando quattro temperature possiamo valutare le deformazioni che si producono nell'intervallo di temperature a cui è sottoposta la pavimentazione in esercizio.

Nel capitolo precedente si è trattato del protocollo seguito e del dispositivo utilizzato per questa prova; di seguito si riportano i risultati ottenuti.

### A-1-SQ-100



**Tabella 5.3.9: deformazione permanente soluzione A-1-SQ-100.**

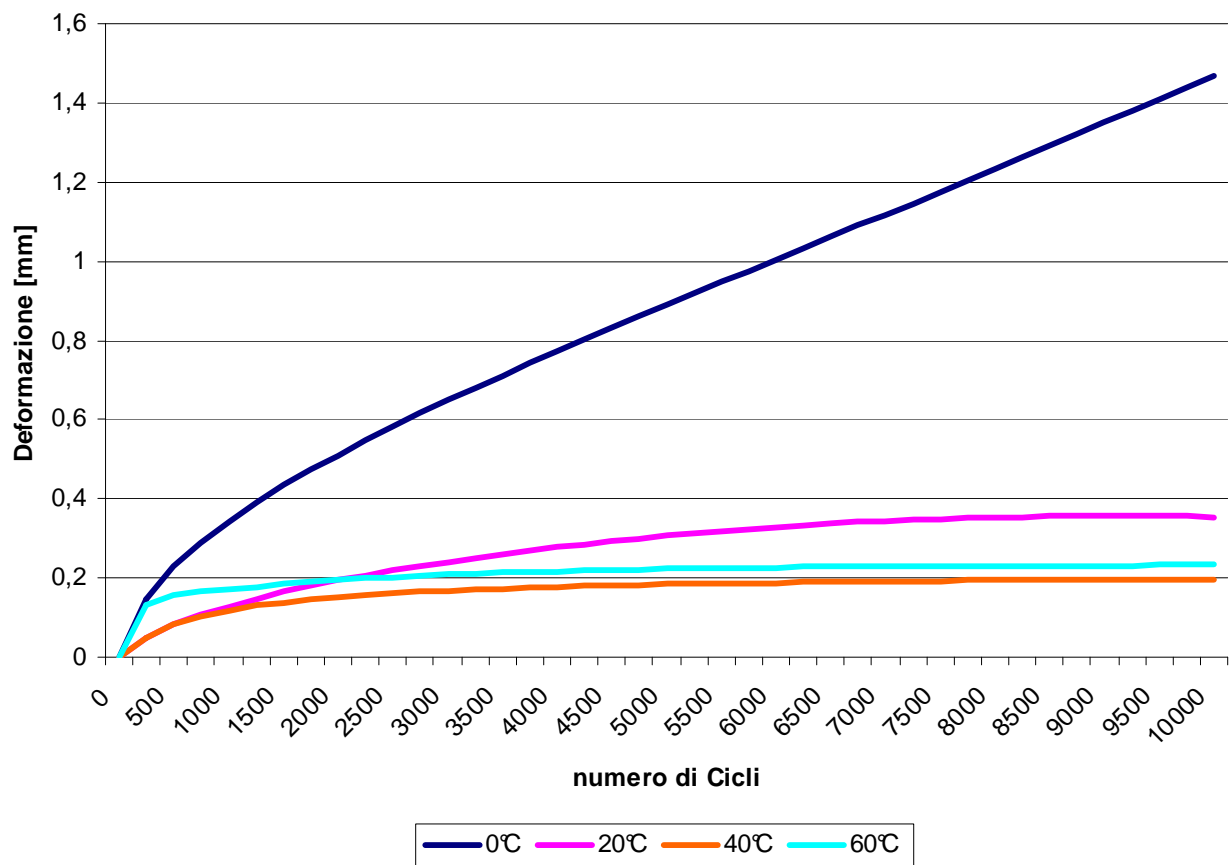
Dai risultati ottenuti e qui rappresentati, si può notare come la natura termoindurente del materiale produca deformazioni permanenti sempre più ridotte passando da temperature relativamente basse a temperature più elevate di esercizio. La natura termoindurente del materiale produce infatti un perfezionamento del reticolo alle alte temperature, questo

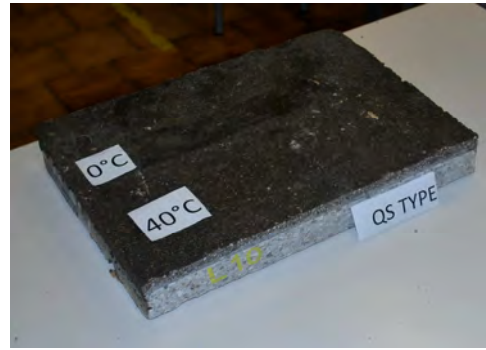
porta ad una maggiore resistenza del composto alle sollecitazioni, traducendosi in valori di deformazione più bassi rispetto a quelli riscontrati alle temperature inferiori.

I valori osservati di deformazione permanente risultano estremamente contenuti se paragonati con quelli normalmente ottenuti per i conglomerati bituminosi. La sabbia di quarzo conferisce alla resina maggiore resistenza; viste le dimensioni relativamente piccole dell'aggregato si hanno infatti pochi vuoti interstiziali e una porosità relativamente bassa.

L'evoluzione della deformazione è continua per la prova eseguita a 0°C con un valore massimo raggiunto pari a circa 0.5 mm. Le prove eseguite a 60°C e a 40°C danno come risultato una deformazione permanente finale di circa 0.15-0.2 mm.

### A-1-SQ-50





**Tabella 5.3.10: Deformazione permanente soluzione A-1-SQ-50.**

Anche dai risultati della prova eseguita sulla soluzione A-1-SQ-50, possiamo osservare come i valori ottenuti siano estremamente contenuti, rispetto a quelli normalmente osservati per i conglomerati bituminosi.

La soluzione A-1-SQ-50 contiene, rispetto alla soluzione precedente (A-1-SQ-100) un quantitativo di legante inferiore (50% in meno). Nei conglomerati bituminosi, aumentando la quantità di legante si ha contestualmente un aumento del valore delle deformazioni permanenti; dai risultati ottenuti è possibile vedere come, per le soluzioni con sabbia di quarzo, una riduzione del 50% di legante, non porta ad una riduzione dell'entità delle deformazioni, ma anzi ad un loro aumento. Mentre per la soluzione A-1-SQ-100 la deformazione massima raggiunta è pari a circa 0.5 mm a 0°C per la soluzione A-1-SQ-50 la deformazione massima è circa 1.4 mm, sempre a 0°C. I valori ottenuti dalle due prove risultano comunque più che accettabili. In entrambe le soluzioni si può osservare come la natura termoindurente del conglomerato produca deformazioni contenute alle alte temperature (praticamente uguali a 40 e 60°C), mentre si osservano deformazioni relativamente più accentuate alle basse temperature (0°C).

## A-1-SF-100

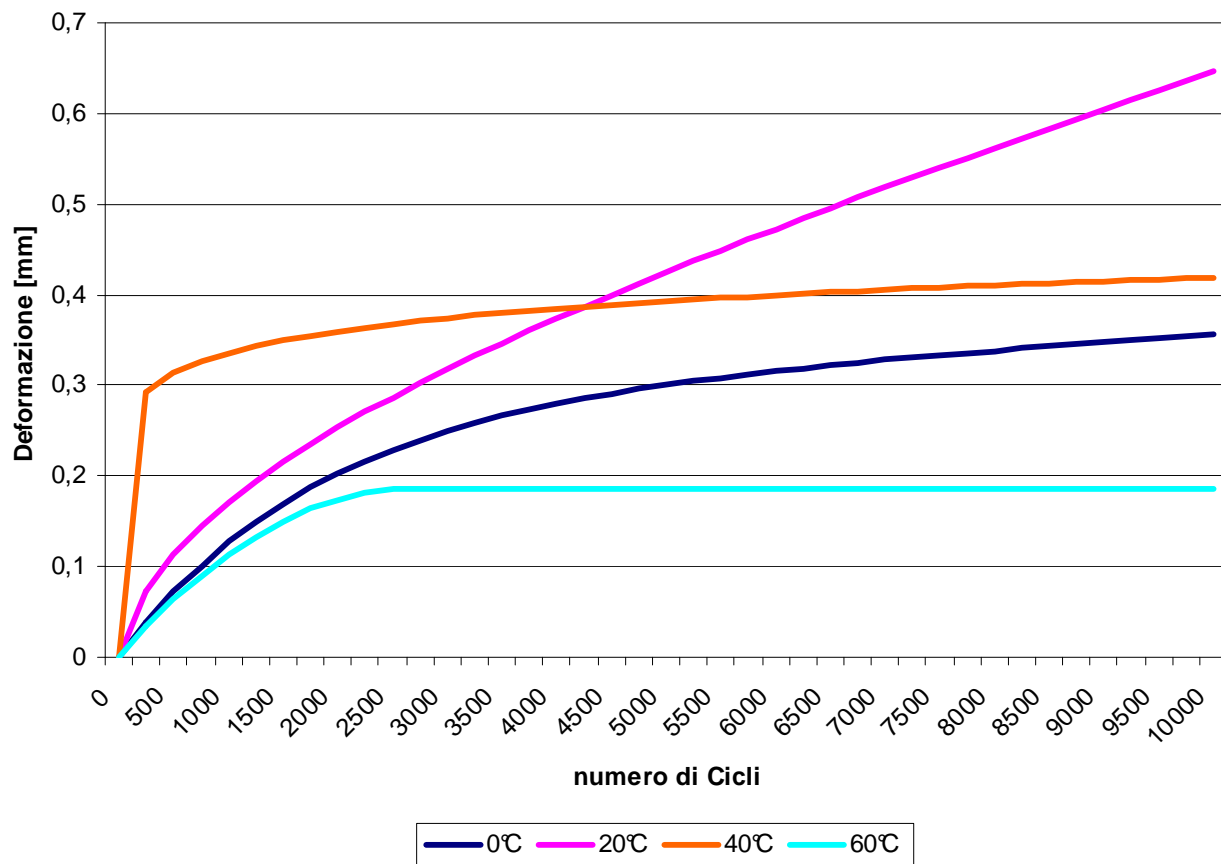


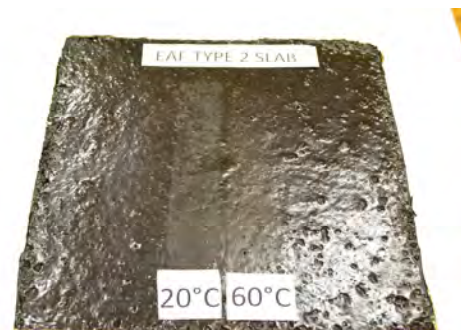
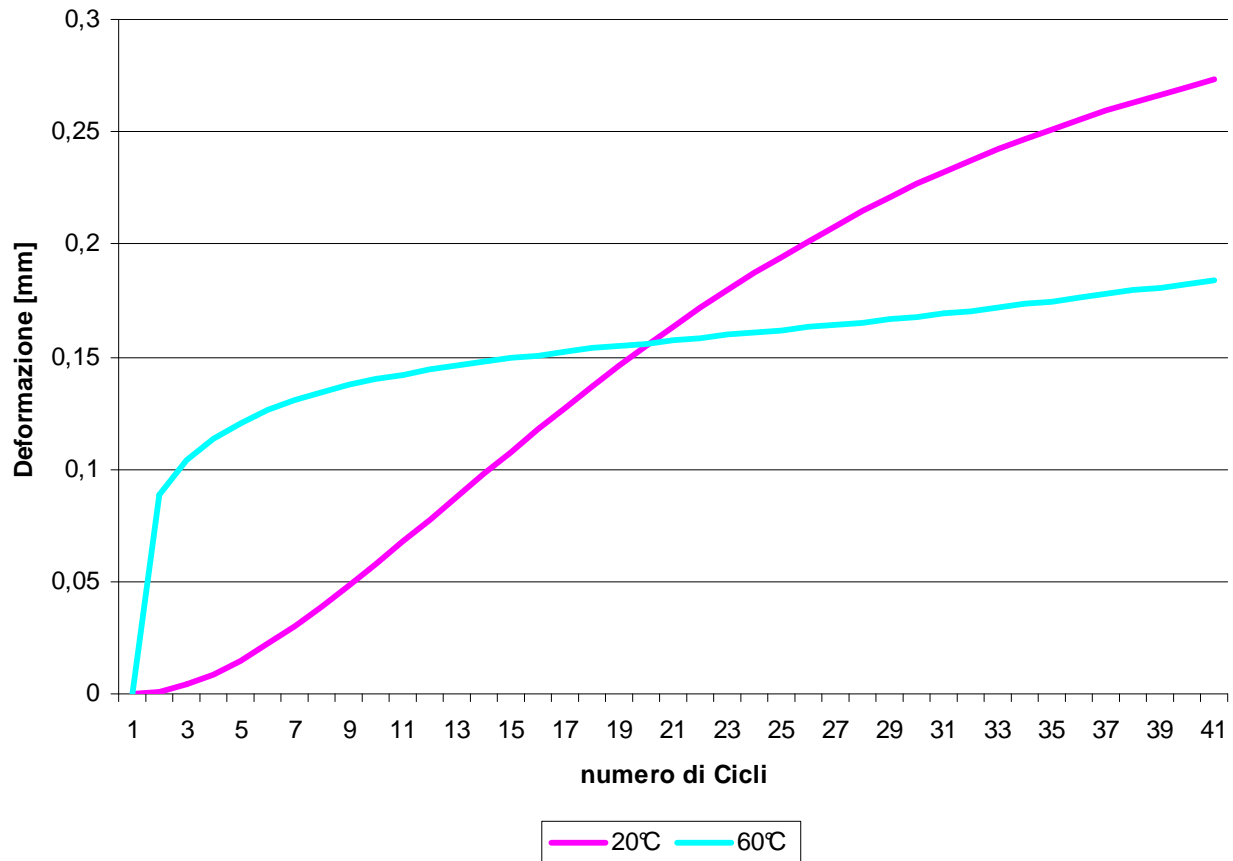
Tabella 5.3.11: deformazione permanente soluzione A-1-SF-100.

La prova eseguita sulla scoria fina, ha portato a risultati, sia in termini di valore che di fenomeni riscontrati totalmente in linea con quelli ottenuti per la sabbia di quarzo.

Dal confronto tra la soluzione A-1-SQ-100 e la soluzione A-1-SF-100 è possibile notare come nella soluzione con scoria si siano formate deformazioni permanenti più accentuate; essendo il quantitativo di legante identico, le maggiori deformazioni sono dovute al tipo di aggregato inserito. La scoria avendo un peso specifico più elevato rispetto

alla sabbia di quarzo tende a sedimentare sulla parte inferiore dello strato posato facendo trasudare in superficie la resina; Dalle immagini proposte si vede chiaramente come tale fenomeno abbia condizionato la resistenza alle deformazioni. Risulta chiaramente dalle immagini come l'ormai sia caratterizzata dalla deformazione del solo legante.

### A-2-SG-100



**Tabella 5.3.12: Deformazione permanente A-2-SG-100.**

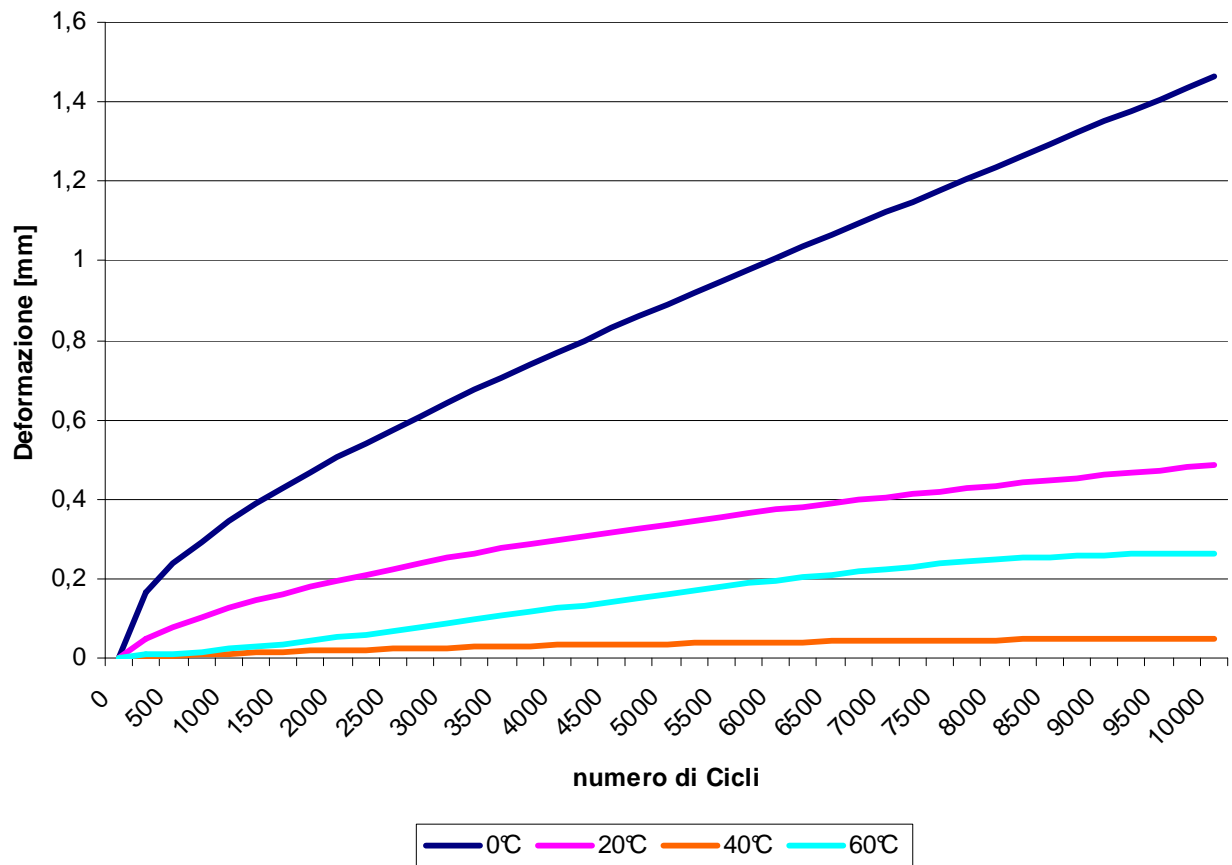
La pezzatura più grossa della scoria utilizzata per questi provini rispetto alla scoria usata nel caso precedente, ha prodotto risultati migliori in termini di deformazioni permanenti.

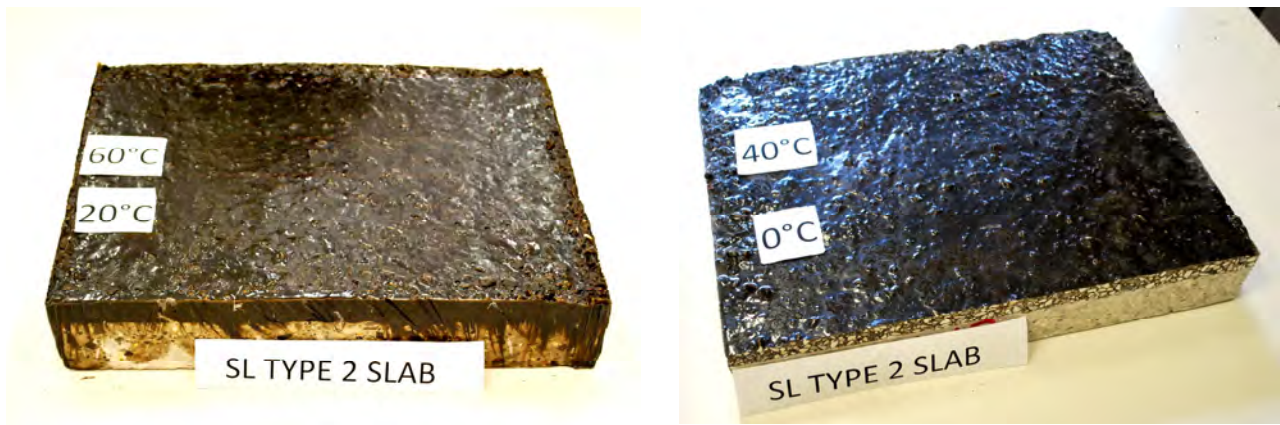


Anche per questa soluzione è ben visibile la natura termoindurente dei materiali con deformazioni maggiori a 20°C e più contenute a 60°C .

Le deformazioni permanenti registrate assumono valori in linea con quelle riscontrate con soluzioni A-1-SQ-100 e A-1-SF-100 (tale paragone viene fatto solo per le prove a 20°C e 60°C). Sono state effettuate anche prove a 20°C e a 40°C, i cui risultati sono stati invalidati per problemi dovuti ad un cattivo condizionamento dei provini.

### A-2-C-100





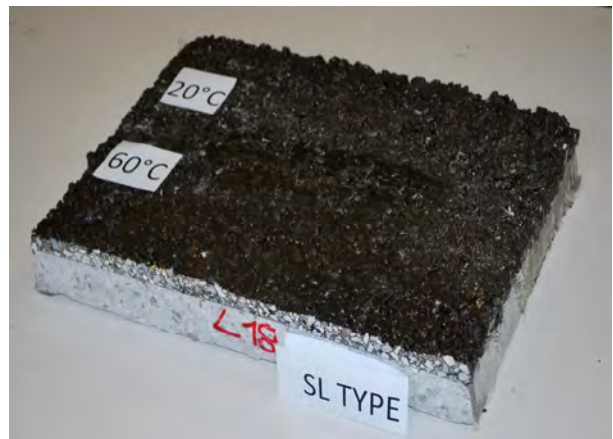
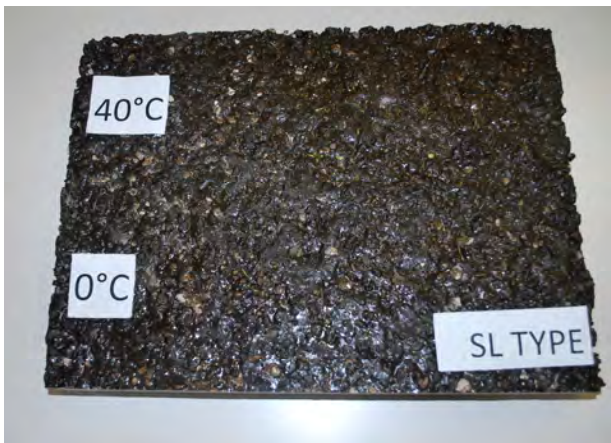
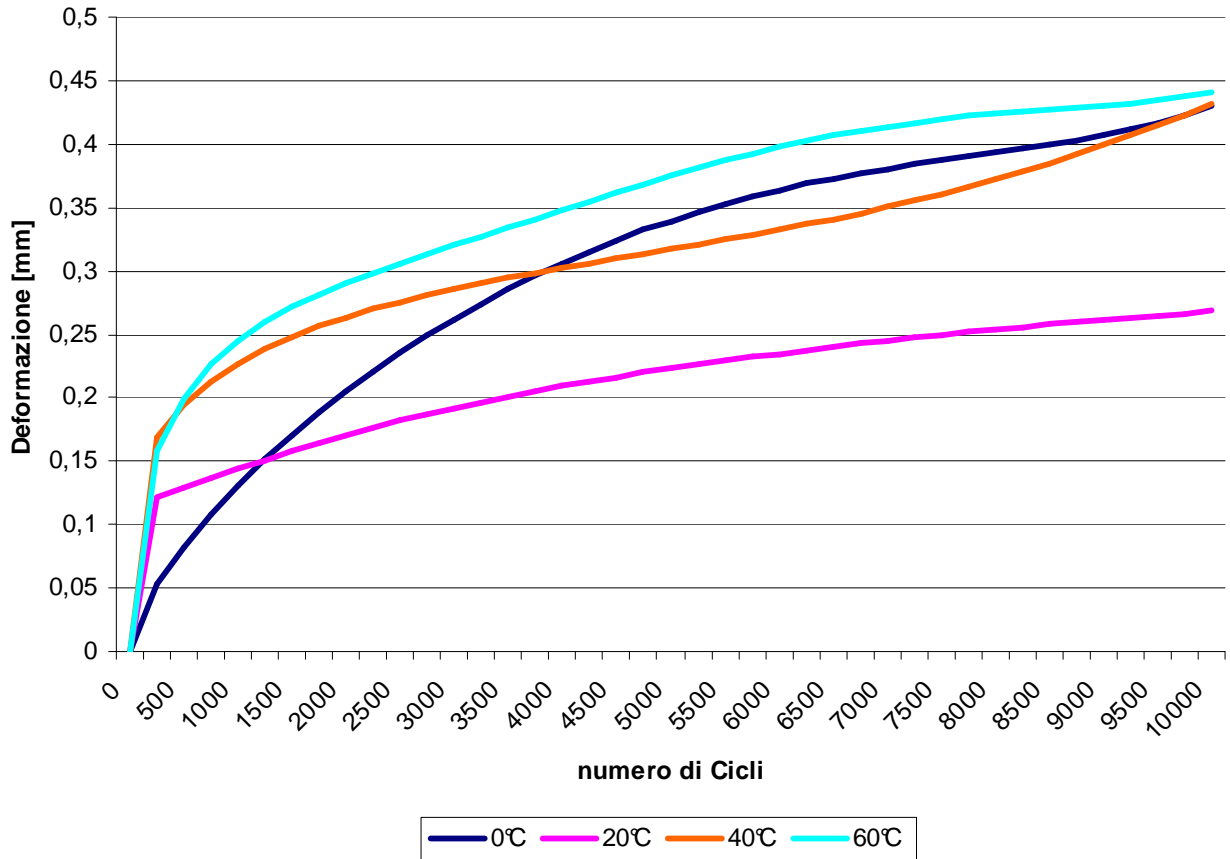
**Tabella 5.3.13: deformazione permanente soluzione A-2-C-100.**

La soluzione A-2-C-100 presenta delle deformazioni permanenti maggiori rispetto alle soluzioni A-1-SF-100 e A-1-SQ-100; il comportamento di tale soluzione risulta simile a quello osservato per la soluzione A-2-SQ-50.

I valori ottenuti con la prova a 40°C risultano poco rappresentativi e per tanto trascurabili; tali risultati sono infatti condizionati dalla prova di ormaiamento precedentemente eseguita sulla lastra (prova a 0°), la quale ha falsato le misurazioni eseguite durante la prova a 40°C.

Trascurando quindi i dati ottenuti con la prova a 40°C, il comportamento termoindurente del conglomerato comporta deformazioni massime a 0°C e minime a 60°C.

### A-2-C-75

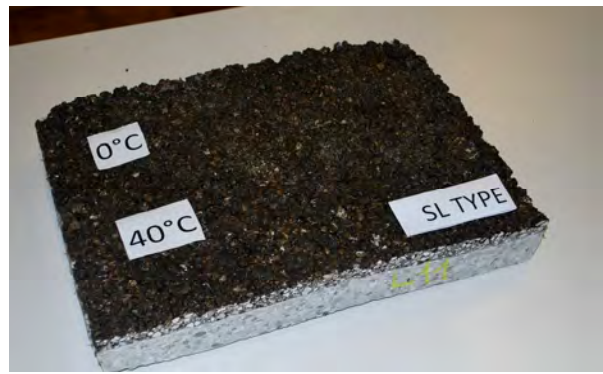
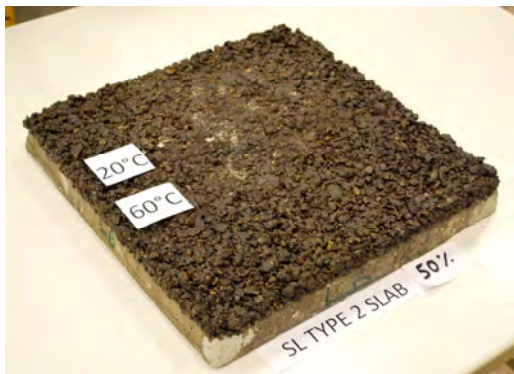
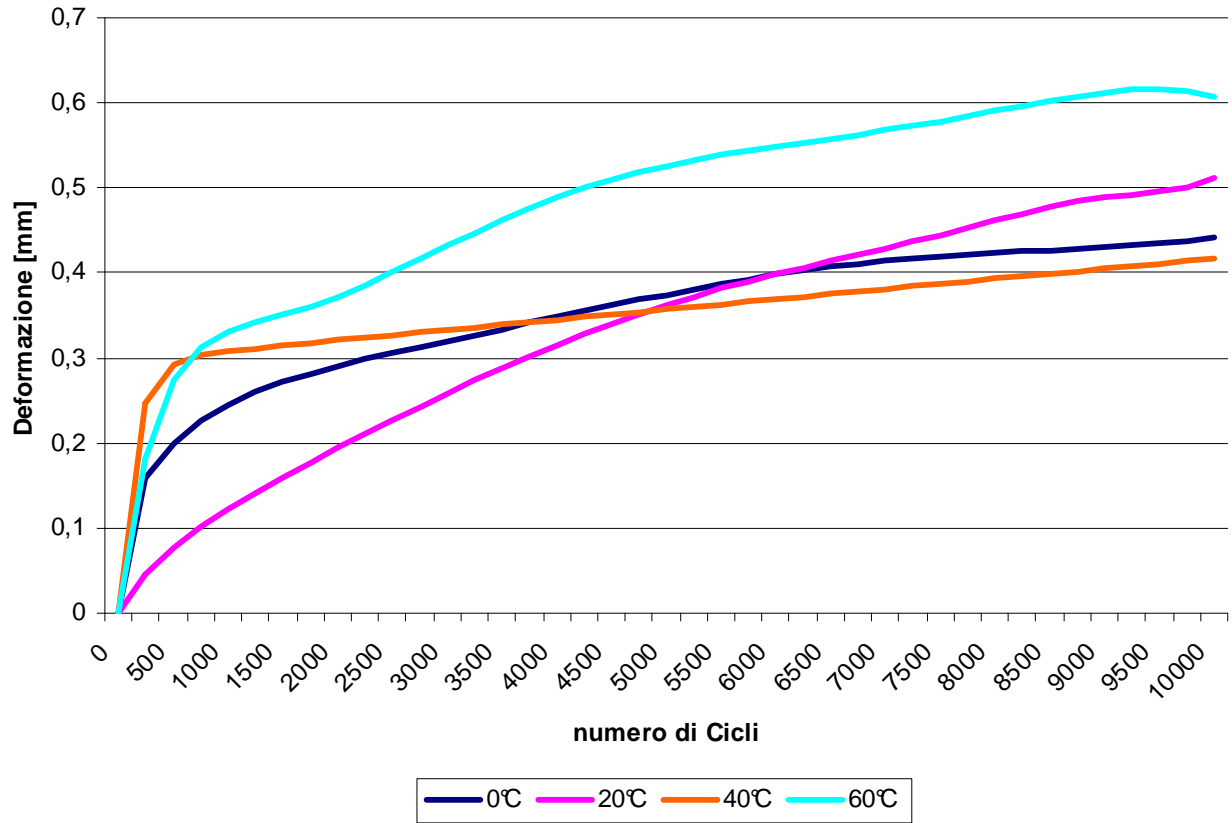


**Tabella 5.3.14: deformazione permanente soluzione A-2-C-75.**

Dai risultati ottenuti è possibile osservare una deformazioni massima praticamente uguale (ad eccezione della prova a 20°C) indipendentemente dalla temperatura di prova.

Tale fenomeno può essere dovuto al cattivo condizionamento del provino, oppure alla concentrazione di aggregato in prossimità al punto in cui si è avuto il passaggio della ruota.

## A-2-C-50



**Tabella 5.3.15: Deformazioni permanenti A-2-C-50.**

Il reale andamento delle deformazioni permanenti, può anche in questo caso, essere condizionato dallo spessore contenuto e dall'uso di aggregato grosso; è possibile infatti che un accumulo di aggregato, complice anche la ridotta quantità di legante presente, possa essersi formata in prossimità del passaggio della ruota. In tal modo le deformazioni sono state indipendenti dalla temperatura di prova e quasi sicuramente condizionate dall'aggregato stesso.

I risultati ottenuti per il calcare testato alle diverse temperature e per le diverse quantità di legante, ha fornito risultati in controtendenza rispetto a quelli ottenuti nelle miscele precedenti.

Se nei casi precedenti la natura termoindurente caratterizzava il comportamento del composto con deformazioni minori alle alte temperature e maggiori alle basse temperature, lo stesso non si può dire per i provini con aggregato di tipo calcareo. Il comportamento termoindurente si riscontra solo per la soluzione A-2-C-100 mentre per le soluzioni A-2-C-75/50 si nota una risposta diversa ed indipendente dalla temperatura di prova da parte della miscela analizzata.

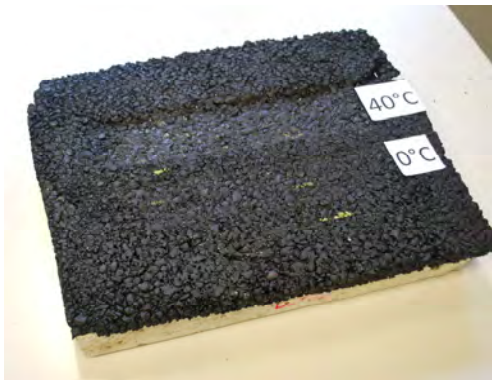
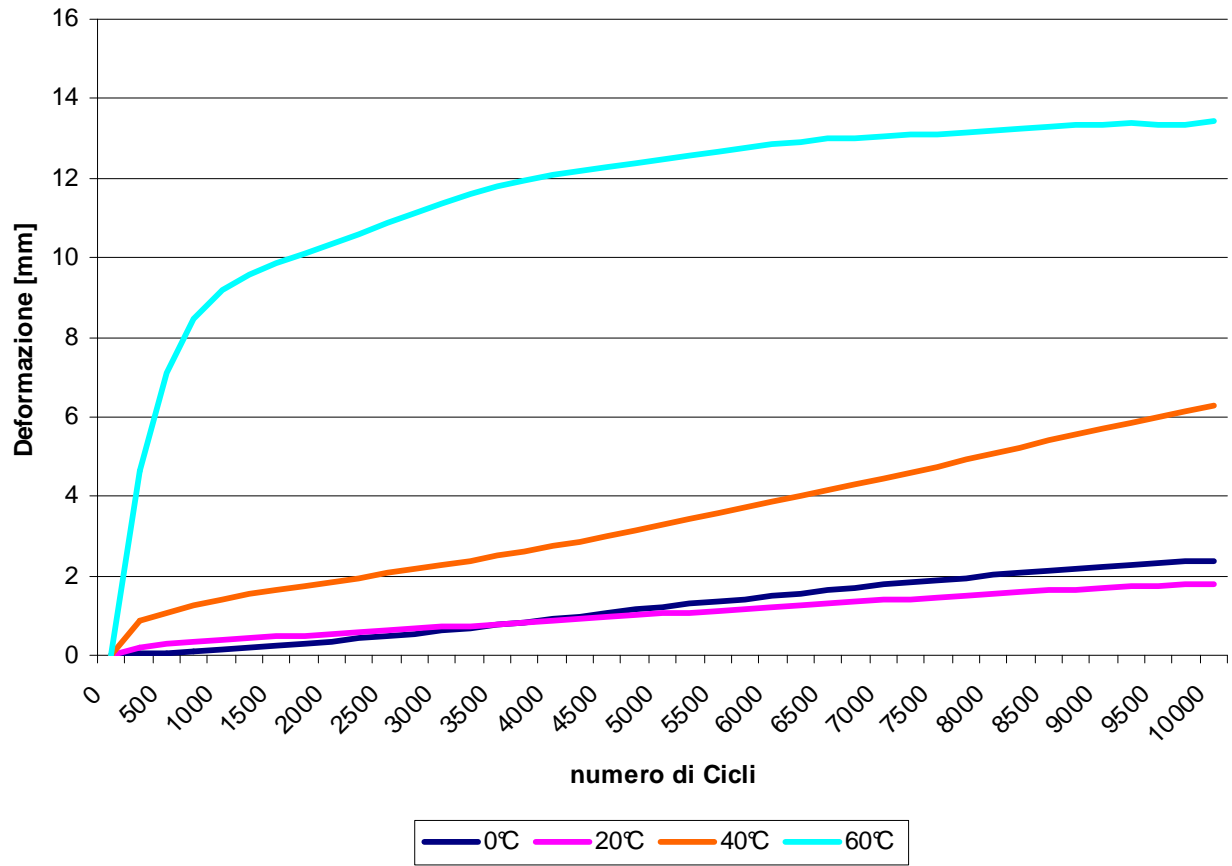
Come messo in evidenza precedentemente il legante conferisce la resistenza e il comportamento termoindurente al composto; l'aggregato ha invece un ruolo che acquisisce importanza riducendo il quantitativo di legante inserito.

Confrontando i risultati ottenuti con le soluzioni A-1-SQ-50 e A-2-C-50 possiamo osservare come le deformazioni massime del calcare risultano estremamente inferiori rispetto a quelle ottenute per la sabbia di quarzo. A parità di quantitativo di legante, di tipologia di prova ed poiché entrambe le miscele hanno una curva granulometrica continua, si può ritenere che un aggregato di dimensioni maggiori conferisca, rispetto ad un aggregato di dimensioni minori, maggiore resistenza all'ormaiamento. Tale tendenza è riscontrata anche paragonando, a parità di legante, la soluzione A-1-SF-100 e quella A-2-SG-100: si sono avute deformazioni permanenti più contenute per quest'ultima soluzione rispetto alla scoria fine.

Nel complesso il calcare, nelle varie percentuali testate, fornisce resistenze alle deformazioni permanenti soddisfacenti, in linea con quelle ottenute, a parità di tipologia di legante, con gli altri tipi di aggregato. Le prestazioni in definitiva sono sicuramente ottime, se non eccellenti, rispetto a quelle ottenute con le miscele bituminose.

Bisogna però precisare come i risultati ottenuti con le soluzioni in cui è stato usato il calcare (A-2-C-50 e 75) non siano stati soddisfacenti. Sebbene sia palese come un aggregato di dimensioni grosse e un quantitativo contenuto di resina producano deformazioni permanenti contenute, non è altrettanto chiaro capire come queste si differenziano al variare della temperatura.

### B-2-C-100







**Tabella 5.3.16: Deformazioni permanenti soluzione B-2-C-100.**

I fattori che influenzano il comportamento delle miscele bituminose sottoposte a fenomeni di accumulo di deformazioni permanenti sono diversi. L'uso di curve granulometriche continue e di aggregato con grani di dimensioni più grosse produce deformazioni permanenti più contenute. Contrariamente incrementi delle temperature di esercizio, contenuto dei vuoti e dosaggio del legante in quantitativi eccessivi, producono decrementi della resistenza all'ormaiamento.

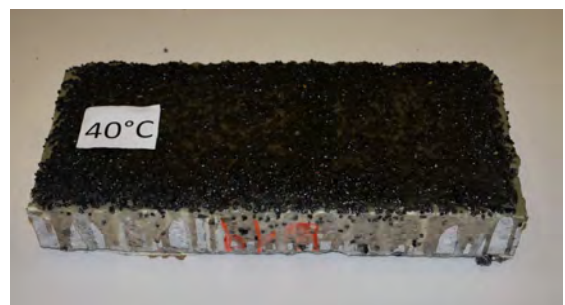
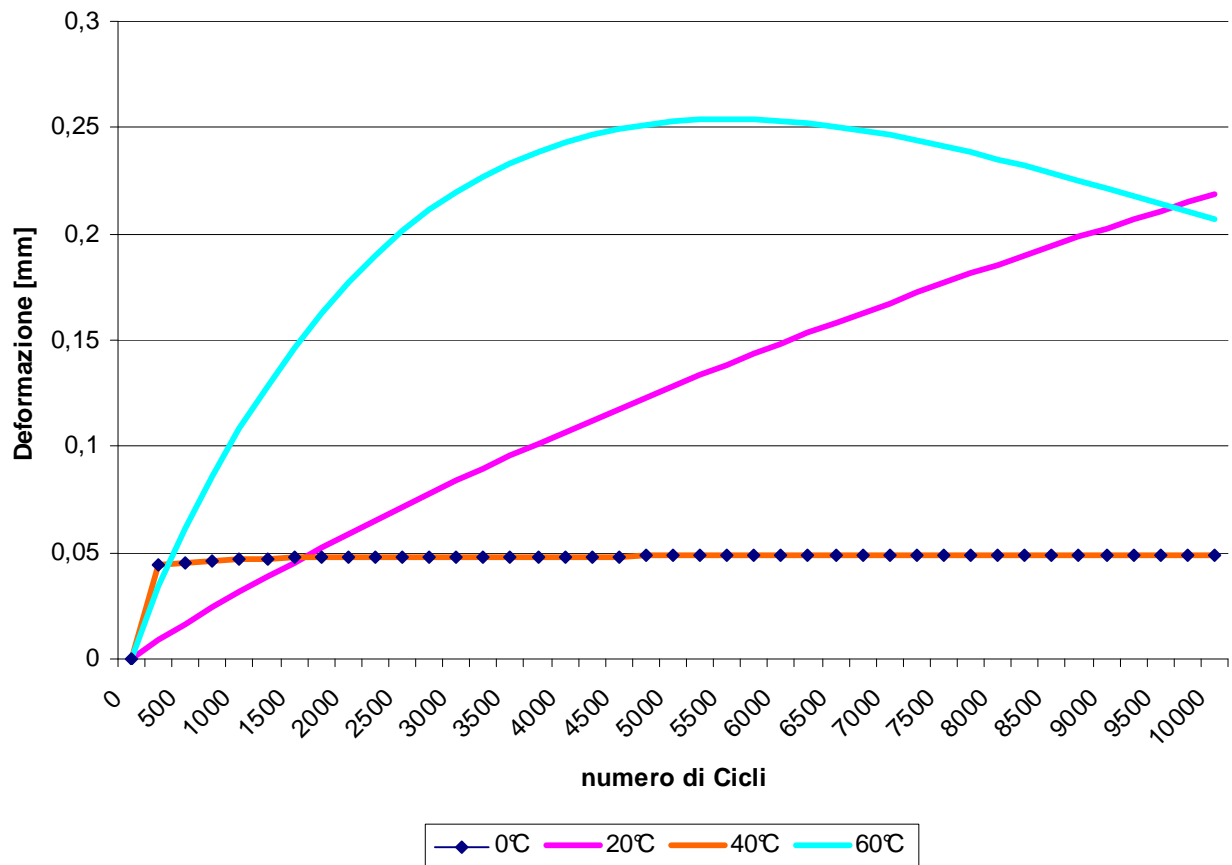
In riferimento a quanto esposto, si può notare come il mix design della soluzione B sia stato fatto cercando di massimizzare sia la macrotestitura superficiale che la resistenza alle deformazioni permanenti. Il calcare risulta infatti avere distribuzione granulometrica continua e dimensioni dei grani elevate (se confrontato con le altre miscele di aggregato usate). Il quantitativo di bitume utilizzato invece risulta essere pari a quello tradizionalmente impiegato.

Guardando i risultati ottenuti vediamo un comportamento totalmente in linea con le altre tipologie di miscele bituminose, caratterizzato da deformazioni permanenti elevate alle alte temperature (60°C). Tali deformazioni vanno via via riducendosi al ridursi della temperatura di prova ottenendo valori sempre più contenuti. La deformazione permanente cresce in modo continuo durante i 10000 cicli per temperature di 60°C, mentre cresce per poi stabilizzarsi per prove a 0°C e a 20°C.

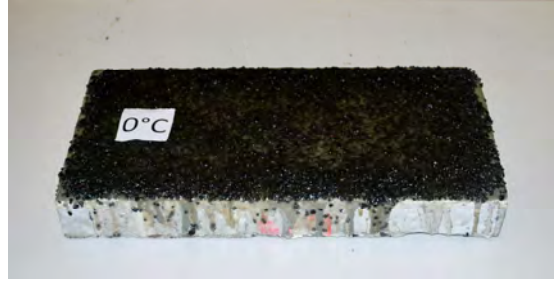
Nel confronto con la soluzione A, la soluzione con conglomerato bituminoso (tipo B) risulta avere un comportamento peggiore. Le deformazioni massime ottenute con la soluzione B risultano essere circa 10 volte più grandi rispetto a quelle peggiori ottenute con la soluzione A e 20 volte rispetto alle migliori. Si tenga presente però che la soluzione B si può ritenere ancora accettabile, essendo la deformazione massima contenuta nei 20 mm di accettabilità, ma sicuramente non preferibile alla soluzione A.

Nella soluzione B è evidente il fenomeno di compattazione e “rifluimento” laterale che porta alla formazione di un vero e proprio “solco” in corrispondenza del passaggio della ruota. Tale fenomeno è estremamente pericoloso per il traffico in transito.

### C-00-B-100



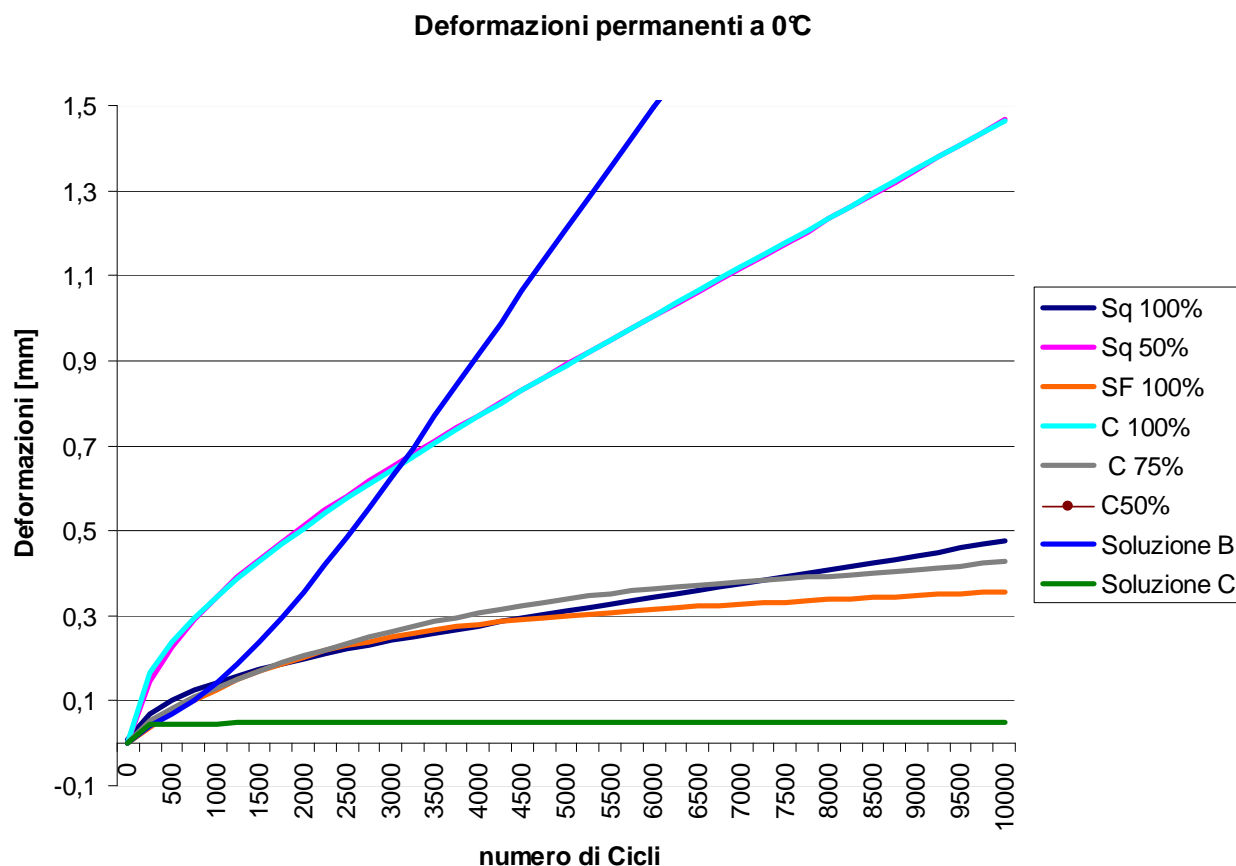




**Tabella 5.3.17: Deformazioni permanente soluzione C-00-B-100.**

La soluzione C-00-B-100, essendo anche questa una soluzione a base di resine (di tipo metacrilico), risulta avere deformazioni estremamente contenute. Il contributo alle deformazioni permanenti sono sicuramente condizionate dallo spessore, estremamente ridotto, di tale soluzione. Si può ritenere quindi che l'aggregato inserito abbia una funzione rilevante nella resistenza all'ormaiamento. La soluzione di posa, riconducibile ad una tecnica multiple layer anziché a quella premixed (caratterizzante le soluzioni A e B), conferisce maggiori resistenze all'accumulo di deformazioni permanenti. È stato riscontrato infatti come una stesa di tipo multiple-layer (usando soluzioni polimeriche uguali per tipologia di aggregato e di legante) abbia maggiore resistenza alle deformazioni permanenti rispetto ad una pavimentazione ottenuta con tecnica premixed. I risultati ottenuti per la soluzione C-00-B-100 sono i migliori osservati tra tutte le soluzioni testate.

I grafici seguenti riassumono le prove appena descritte, suddividendo i risultati in base alla temperatura a cui sono state effettuate le prove.



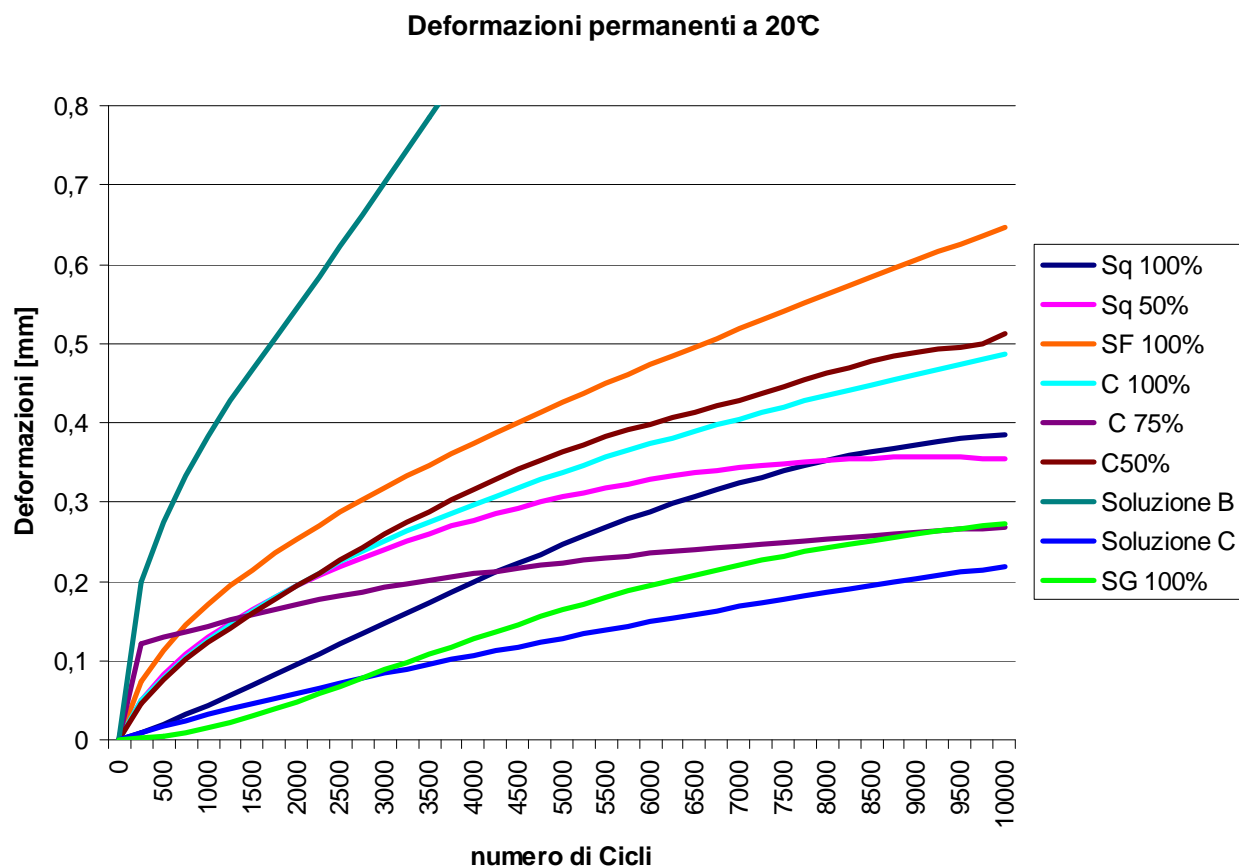
**Tabella 5.3.18: deformazioni permanenti a 0°C.**

La prova eseguita a 0°C risulta essere la più severa per le pavimentazioni polimeriche, la meno critica invece per le pavimentazioni in conglomerato bituminoso; nonostante questo le soluzioni B-2-C-100 risultano comunque le peggiori.

Essendo la prova a 0°C la più critica per le soluzioni polimeriche, i risultati ottenuti estremamente contenuti, risultano eccellenti se paragonati con quelli delle più comuni soluzioni utilizzate come ad esempio quelle in conglomerato bituminoso.

Tra le soluzioni polimeriche, la migliore risulta essere la soluzione C-00-B-100, mentre la peggiore è la soluzione A-1-SQ-50 e A-2-C-100.

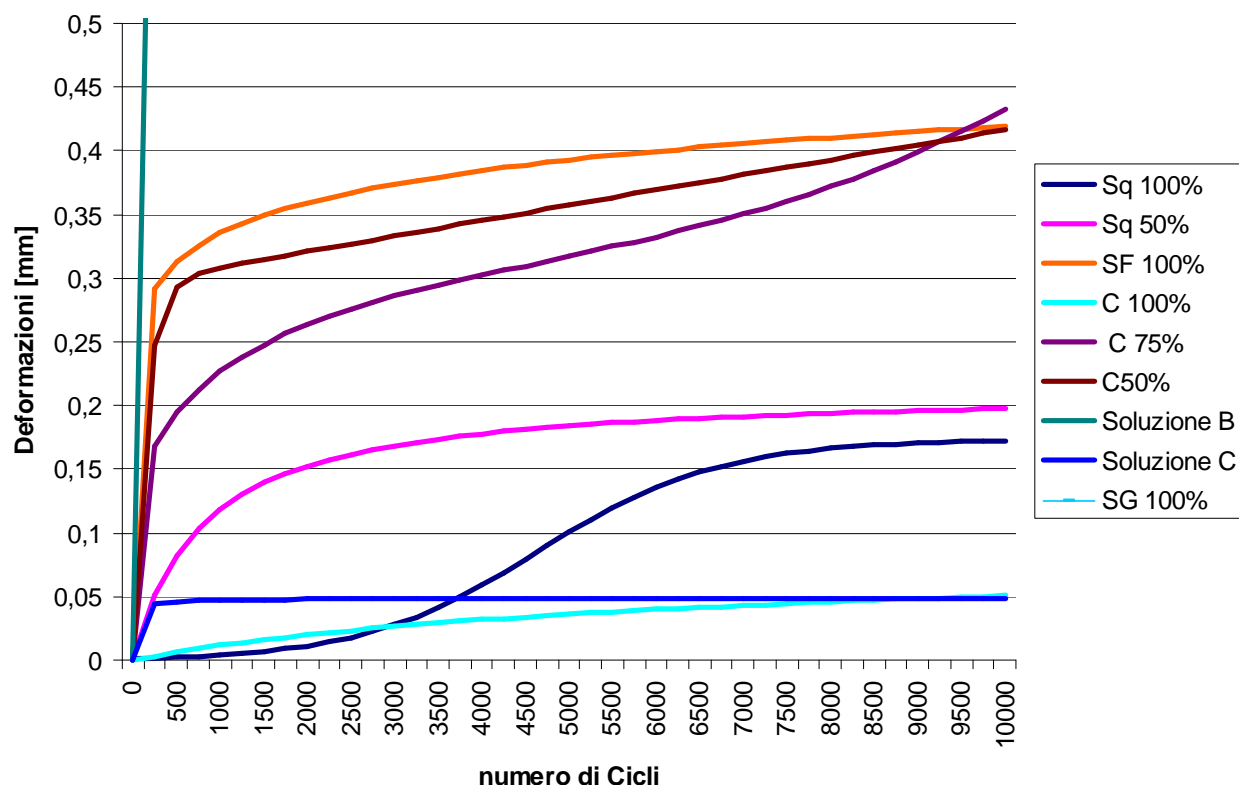
Globalmente, tutte le altre soluzioni analizzate presentano deformazioni praticamente identiche e comprese tra lo 0.3 e 0.5 mm.



**Tabella 5.3.19: deformazioni permanenti 20°C.**

La prova a 20°C evidenzia un netto miglioramento delle pavimentazioni polimeriche con valori di deformazione che variano tra lo 0.2 mm (soluzione C-00-B-100) e lo 0.65 mm (soluzione A-1-SF-100). Le deformazioni permanenti osservate per la soluzione B-2-C-100 sono più elevate rispetto a quelle polimeriche.

### Deformazioni permanenti a 40°C



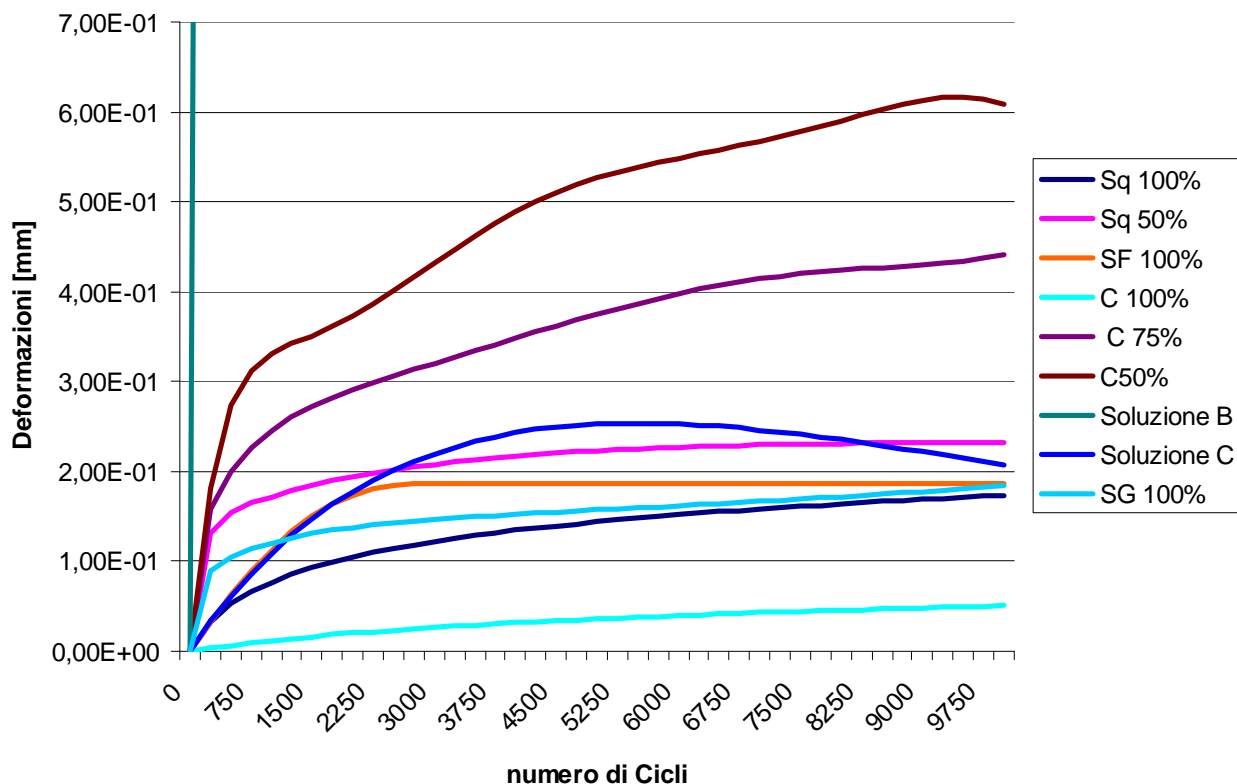
**Tabella 5.3.20: deformazioni permanenti 40°C.**

Alla temperatura di prova di 40°C le deformazioni osservate per la soluzione B-2-C-100 risultano circa 12 volte quelle osservate nei rivestimenti polimerici.

La soluzione migliore risulta essere la C-00-B-100 e la A-2-C-100 con valori estremamente contenuti di deformazioni e pari a circa 0.05 mm. Ottimi risultati sono stati ottenuti anche dalle soluzioni con sabbia di quarzo con valori di deformazione compresi tra lo 0.15 e 0.20 mm.

Globalmente tutte le altre soluzioni manifestano la stessa resistenza alle deformazioni permanenti alla temperatura di 40°C con un valore osservato pari a circa 0.4 mm.

### Deformazioni permanenti a 60°C



**Tabella 5.3.21: Deformazione permanente a 60°C.**

Contrariamente ai casi precedenti, dove la soluzione con minori deformazioni è sempre risultata la C-00-B-100, la soluzione migliore a 60 °C risulta essere la A-2-C-100 mentre la peggiore, tra quelle polimeriche, la A-2-C-50. I risultati estremamente contenuti mostrano come le pavimentazioni polimeriche risentano in modo estremamente limitato del fenomeno dell'ormaiamento. Le soluzioni B-2-C-100 confermano invece la loro scarsa attitudine a resistere alle deformazioni permanenti con valori osservati estremamente più elevati di quelli ottenuti per i rivestimenti polimerici.

Dall'indagine sperimentale eseguita si può osservare come le resine siano esse, epossidiche o metacriliche, impiegate con metodi di posa premixed o multiple Layer, risultano essere più resistenti alle deformazioni permanenti rispetto ai conglomerati bituminosi.

La tecnica di posa impiegata nel confezionare i provini in conglomerato polimerico influisce sulle deformazioni permanenti prodotte; rivestimenti posati con tecnica multiple layer risultano generalmente più resistenti alle deformazioni permanenti rispetto alle

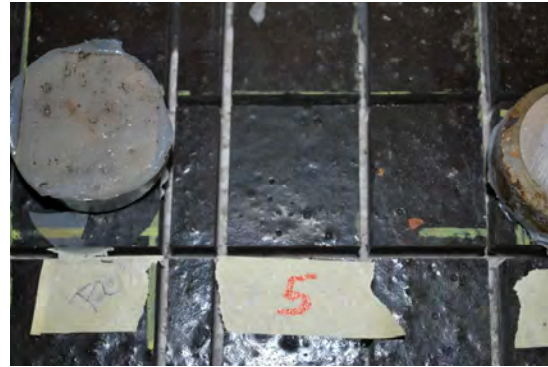
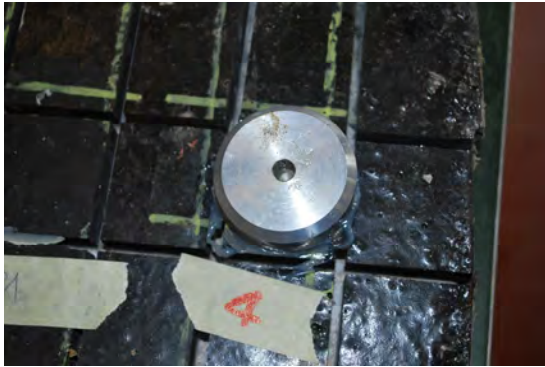
soluzioni premixed. Le dimensioni dell'aggregato influiscono sulle deformazioni permanenti: in particolare dimensioni più grandi producono riduzioni delle deformazioni. La soluzione B nel confronto con la soluzione A e C risulta la peggiore; può ritenersi però ancora accettabile in quanto le deformazioni sono contenute nei 20 mm massimi di accettabilità.

La natura termoindurente della resina epossidica utilizzata nella soluzione A conferisce al composto una resistenza alle deformazioni permanenti maggiore alle alte temperature e minore alle basse; tale comportamento è totalmente in controtendenza con quanto riscontrato con i conglomerati bituminosi.

### **5.3.3 Adesione tra gli strati: prova di pull off.**

La prova di adesione tra gli strati costituenti la pavimentazione è stata fatta per ultima rispetto alle altre, in quanto risulta essere distruttiva. Come da protocollo di prova, si sono eseguite dei fori, mediante punta a tazza, di diametro 50 mm e profondità circa 40 mm, su ogni lastra (mediamente 3, due in corrispondenza dell'ormai e una fuori ormai). Scopo di tali fori è stato valutare, nel limite del possibile, l'adesione tra gli strati sia in corrispondenza del passaggio dei veicoli sia in zone non interessate al transito. In corrispondenza di ciascun foro è stato applicato dapprima un adesivo e successivamente un tassello in acciaio. Trascorso il tempo necessario perché l'adesivo si indurisse (almeno 72 ore), i tasselli sono stati collegati al dispositivo di prova e messi in trazione registrando di volta in volta il valore di picco raggiunto al momento della rottura.

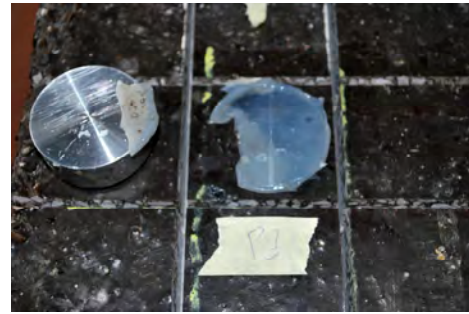
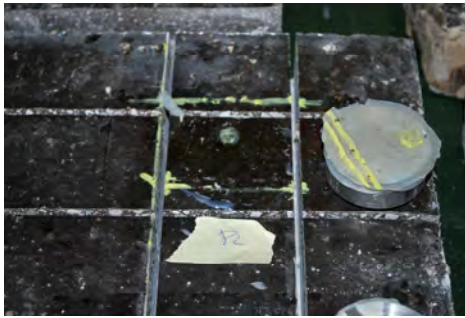
Soluzione	Material e	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
A	SF	100	L2	P1	2,510	1,279	fuori ormaia
				P2	1,085	0,553	ormaia
				P3	2,483	1,265	ormaia



**Tabella 5.3.22: Prova di adesione soluzione A-1-SF-100.**

Dai risultati ottenuti possiamo osservare un'ottima aderenza tra rivestimento polimerico e supporto in calcestruzzo. I valori ottenuti sono relativi alla resistenza a trazione sviluppata dalla resina interposta tra tassello e superficie, in quanto non si sono verificati distacchi del rivestimento dal supporto in calcestruzzo o all'interno del rivestimento stesso. Non si evidenziano nemmeno deterioramenti della superficie in corrispondenza delle zone testate. E' lecito considerare una resistenza a trazione della soluzione maggiore di 1.250 MPa (il valore ottenuto con il provino P2 è trascurabile perché condizionato da una errata maturazione dell'adesivo tra tassello e rivestimento). Un valore elevato di adesione tra supporto e rivestimento è dovuto all'elevato contenuto di legante nella pavimentazione, e in secondo luogo all'utilizzo del primer.

Soluzione	Materiali	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
A	C	100	L4	P1	2,600	1,325	ormaia
				P2	2,957	1,507	ormaia
				P3	2,906	1,481	fuori ormaia
				P3bis	2,268	1,157	Fuori ormaia
				P4	1.001	0.511	ormaia



**Tabella 5.3.23: Prova di adesione soluzione A-2-C-100.**

La soluzione proposta presenta un'ottima resistenza di adesione tra rivestimento e supporto; non si sono osservati distacchi del rivestimento in nessuno dei punti testati. L'elevato contenuto di legante epossidico del rivestimento, ha influenzato il potere adesivo tra rivestimento e supporto.

Soluzione	Materiali	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
A	C	50	L6	P1	2,454	1,250	fuori ormaia
				P2	2,883	1,469	ormaia
				P3	2,949	1,503	ormaia



**Tabella 5.3.24: Prove di adesione soluzione A-2-C-50.**



Le prove eseguite sulla soluzione A-2-C-50 hanno evidenziato un potere adesivo del rivestimento nei confronti del supporto minore, rispetto alle soluzioni A-1-SF-100 e A-2-C-100. Sebbene il valore di resistenza a trazione sia circa pari a 1250-1300 MPa, e quindi in linea con le altre soluzioni testate, per la soluzione A-2-C-50 il distacco non si è verificato in superficie ma all'interno del rivestimento. Tale fenomeno è dovuto al minor quantitativo di legante epossidico inserito nella malta polimerica: ciò comporta una minore adesione tra i granuli. È possibile osservare come i punti testati in corrispondenza alle ormaie forniscano valori di resistenza a trazione maggiori rispetto a punti testati fuori da ormaia. L'addensamento del conglomerato, causato dalla ruota della strumentazione durante la prova di ormaio, produce una maggiore adesione tra i granuli, che si traduce in una maggior resistenza a trazione da parte del rivestimento.

Soluzioni	Materiali	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
A	SQ	50	L7	P1	0,415	0,211	ormaia
				P2	1,343	0,684	ormaia
				P3	1,431	0,729	fuori ormaia



**Tabella 5.3.25: Prova di deformazione soluzione A-1-SQ-50.**

La prova di adesione per la soluzione A-1-SQ-50 evidenzia una resistenza a trazione del rivestimento limitata. Come per la soluzione A-2-C-50, si è verificato durante la prova un distacco all'interno del rivestimento. I valori ottenuti dalla prova sulla soluzione A-1-SQ-50 risultano inferiori rispetto alla soluzione A-2-C-50.

Soluzione	Materiale	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
A	SQ	100	L1	P1	1,890	0,963	ormai
				P2	1,233	0,628	ormai
				P3	1,518	0,774	fuori ormai

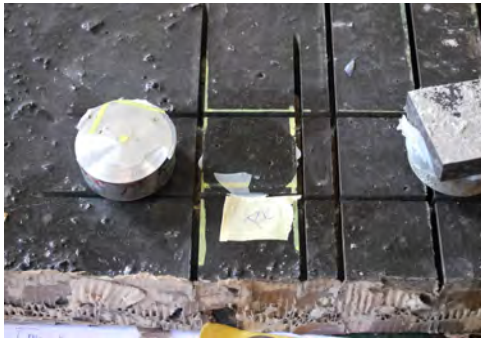


**Tabella 5.3.26: Prova di adesione soluzione A-1-SQ-100.**

Confrontando i risultati ottenuti con la soluzione A-1-SQ-100 con le altre soluzioni testate, si conferma la tendenza delle soluzioni contenenti il 100% di legante ad avere ottime caratteristiche di adesione tra rivestimento e supporto. Anche per la soluzione A-1-SQ-100 si evidenzia un distacco del tassello senza interessamento del rivestimento: la maggiore resistenza è dovuta all'alto quantitativo di legante epossidico introdotto nel conglomerato polimerico.

Confrontando i risultati ottenuti con la soluzione A-1-SQ-100 con quelli ottenuti con le scorie fine e con i calcari si può notare un abbassamento della resistenza a trazione.

Soluzione	Materiale	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
A	SG	100	L5	P1	2,212	1,127	ormaia
				P2	1,548	0,789	ormaia
				P3	2,726	1,389	fuori ormaia
				P4	2.245	1.145	Fuori ormaia
				P5	1.597	0.815	ormaia

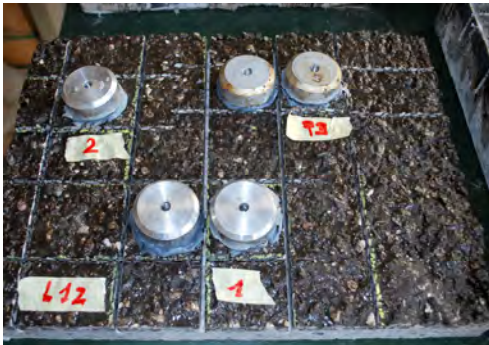


**Tabella 5.3.27: Prova di adesione soluzione A-2-SG-100.**

I risultati osservati per la soluzione A-2-SG-100 sono simili a quelli ottenuti dalle altre soluzioni con il 100% di legante. Risultano però superiori rispetto alla soluzione A-1-SQ-100.

Per la soluzione A-2-SG-100 si è osservato la tendenza del rivestimento a non distaccarsi dal supporto, ad eccezione del provino 1, per il quale si è verificato un distacco all'interfaccia supporto rivestimento. Poiché il provino P1 è stato posto vicino al bordo della lastra, è possibile che sia stata stesa una minore quantità di primer, influenzando così l'adesione.

Soluzioni	Materiali	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
A	C	75	L12	P1	2,178	1,110	ormaia
				P2	2,316	1,180	ormaia
				P3	2,754	1,403	fuori ormaia
				P4	2.939	1.499	Fuori ormaia
				P5	2.101	1.072	ormaia

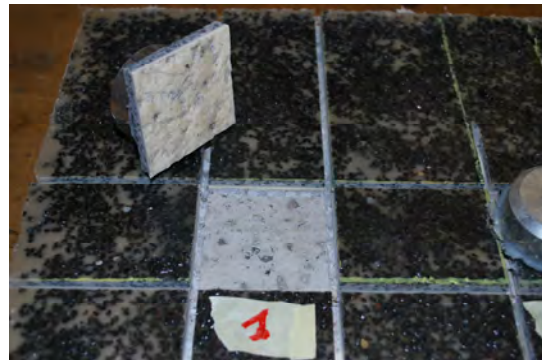


**Tabella 5.3.28: Prove di adesione soluzione A-2-C-75.**

Le prove eseguite sulla soluzione A-2-C-75 evidenziano come la resistenza di adesione sia in linea con le principali soluzioni con legante al 100% e addirittura superiori della soluzione A-1-SQ-100. Ottenere valori di resistenza in linea con le soluzioni con legante al 100%, utilizzando però quantitativi di legante inferiore, è sicuramente un ottimo risultato, specialmente in termini di riduzione dei costi.

Solo per la prova P3 si è verificato un distacco all'interno della malta polimerica, mentre per gli altri casi il distacco è avvenuto sempre in superficie; non è da escludere che tale distacco (P3) sia dovuto ad un accumulo di aggregato mal miscelato con il legante.

Soluzioni	Materiali	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
C	B	100	L8	P1	2,366	1,206	ormaia
				P2	2,356	1,201	ormaia
				P3	3,527	1,797	fuori ormaia



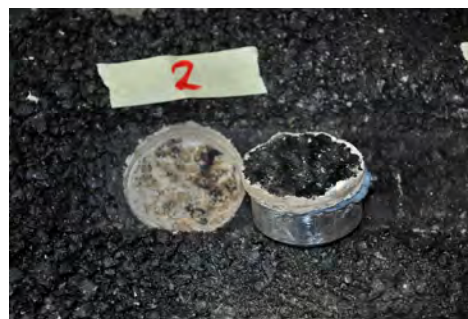
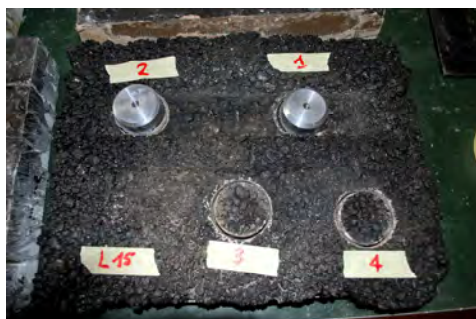
**Tabella 5.3.29: Prova di adesione soluzione C-00-B-100.**

La soluzione C-00-B-100 è caratterizzata da valori di resistenza a trazione elevati, valori simili per tutte le altre soluzioni studiate. Tutte le prove hanno portato però al distacco del rivestimento nello strato di interfaccia tra supporto e rivestimento.

È possibile osservare come la soluzione C-00-B-100 possieda uno strato debole: quello di interfaccia supporto-rivestimento. Confrontando questi risultati con quelli ottenuti con le soluzioni di tipo A, in nessuna prova svolta si è verificato il distacco in tale strato. L'unico caso (soluzione A-2-SG-100, provino P3) in cui si potrebbe essere verificato un distacco all'interfaccia, non viene considerato perché causato da un quantitativo insufficiente di primer). Sono quindi preferibili rivestimenti stesi con metodo premixed e contenenti leganti epossidici (soluzioni A) rispetto alla soluzione C-00-B-100 (metodo di posa multiple layer e legante metacrilico). Sebbene i valori di resistenza siano simili, un distacco all'interfaccia ha un impatto più negativo per l'impalcato rispetto ad un distacco in superficie o all'interno dello strato di rivestimento.



Soluzione	Materiale	% legante	nome lastra	Provino	Valore di Picco [KN]	Valore di Picco [Mpa]	Posizione carotaggio
B	C	100	L15	P1	1.027		Ormaia
				P2	1.378		ormaia



**Tabella 5.3.30: prova di adesione soluzione B-2-C-100.**

Dai risultati ottenuti per la soluzione B-2-C-100 è possibile osservare una pessima resistenza a trazione da parte di questi rivestimenti. Con riferimento alle figure, già nella fase di foratura e di preparazione della prova, si sono verificati distaccamenti del rivestimento nel caso dei provini P3 e P4, dove non è stato poi possibile eseguire nessun test. I provini P1 e P2, eseguiti in corrispondenza delle ormaie, hanno fornito risultati di resistenza comunque bassi, se confrontati con le altre soluzioni, e con distacchi localizzati all'interfaccia tra guaina e rivestimento.

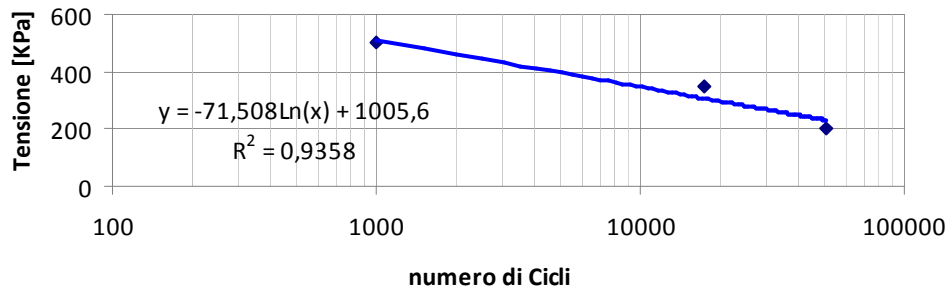
Dai risultati ottenuti dalle prove di adesione sulle varie soluzioni proposte, è possibile osservare come le soluzioni A siano le migliori (la resina epossidica impiegata come legante concorre con il primer ad assicurare un'ottima adesione tra rivestimento e supporto). Solo nel caso delle soluzioni A-2-C-50, A-2-C-75 e A-1-SQ-50 si sono osservati distacchi nello strato di rivestimento. Nel caso delle soluzioni con 100% di legante invece, il distacco è avvenuto in superficie senza interessare il rivestimento (ad esclusione della soluzione A-2-SG-100, provino P3). Un quantitativo elevato di legante concorre quindi a fornire una migliore adesione sia tra supporto e rivestimento sia all'interno del rivestimento stesso.

La soluzione C-00-B-100 assicura elevati valori di adesione ed in linea con quelli osservati per la soluzione A. Il tipo di distacco però, localizzato sempre all'interfaccia tra supporto e rivestimento, ne sconsiglia l'utilizzo.

La soluzione B-2-C-100 è risultata la peggiore: a causa della scarsa adesione non è stato possibile eseguire sempre la prova e i provini hanno mostrato una scarsa resistenza a trazione.

## 5.4 Caratterizzazione a fatica - Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)

La prova ITFT è stata eseguita sugli stessi provini utilizzati per la prova ITSM ottenendo per ognuno i risultati riportati nelle figure e nelle tabelle sottostanti.



Soluzione	materiale	% legante	tensione	n°cicli
B	C	100	200	50700
B	C	100	350	17350
B	C	100	500	1000

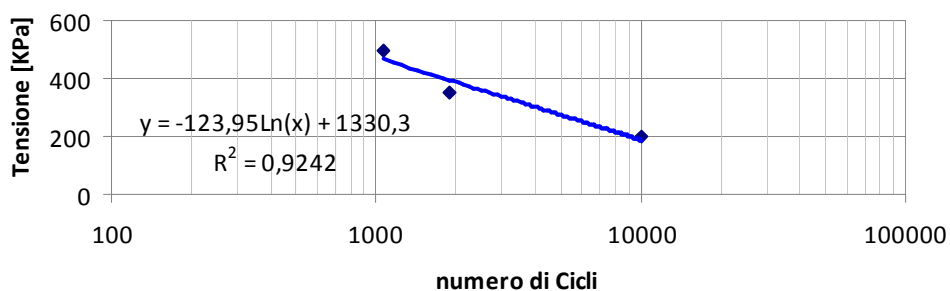


**Tabella 5.4.1: prova ITFT B- 2- C-100.**

Guardando i risultati è possibile notare una vita a fatica estremamente variabile in funzione della tensione alla quale è stato testato il provino; tale variazione è riscontrabile anche dalla pendenza accentuata della retta interpolatrice i risultati ottenuti.

La retta interpolatrice rappresenta in modo soddisfacente i risultati osservati.





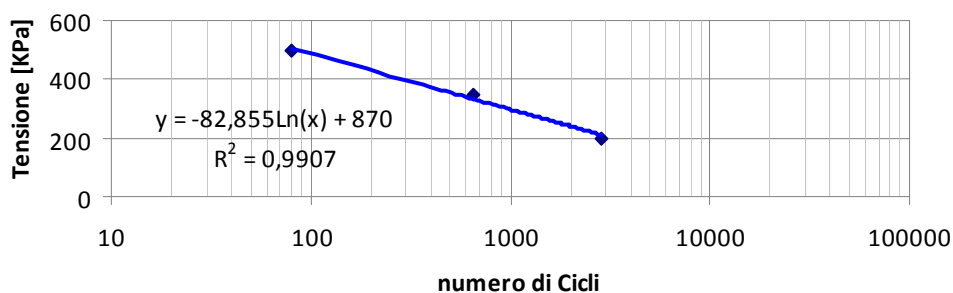
Soluzione	material e	% legante	tensione	n° cicli
A	C	50	200	10020
A	C	50	350	1880
A	C	50	500	1070



**Tabella 5.4.2: Prova ITFT A-2-C-50.**

Dai risultati osservati per la soluzione A-2-C-50, è possibile riscontrare una vita a fatica estremamente inferiore rispetto alla soluzione B-2-C-100. Per la soluzione A-2-C-50 la prova a 200KPa evidenzia infatti una riduzione del numero di cicli a circa un quinto rispetto a quelli osservati con la soluzione B-2-C-100; alla tensione di 500KPa il numero di cicli risulta invece praticamente identico.

Rispetto alla soluzione B-2-C-100, per la soluzione A-2-C-50 si evidenzia una retta interpolatrice meno pendente e quindi rappresentativa di una minore vita a fatica, in funzione della tensione di carico, della soluzione A-2-C-50 rispetto alla B-2-C-100.



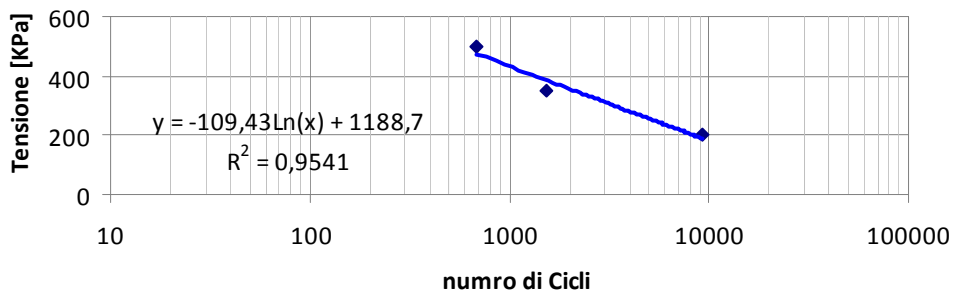
Soluzione	material e	% legante	tensione	n° cicli
A	C	75	200	2890
A	C	75	350	650
A	C	75	500	80



**Tabella 5.4.3: Prova ITFT A-2-C-75.**

I risultati osservati per la soluzione A-2-C-75 evidenziano una riduzione consistente dei numeri di cicli sopportati dalla miscela testata. La retta Interpolatrice, la quale rappresenta in modo eccellente i risultati ottenuti, presenta una pendenza più accentuata rispetto alla soluzione A-2-C-50 ma simile a quella della soluzione B-2-C-100.

Risultati così bassi sono dovuti ad un errato confezionamento dei provini; si è osservato infatti sul provino frantumato dalla prova la presenza di sacche di aggregato non miscelato con il legante. Tali punti nel provino concorrono ad una riduzione di resistenza a fatica della soluzione.

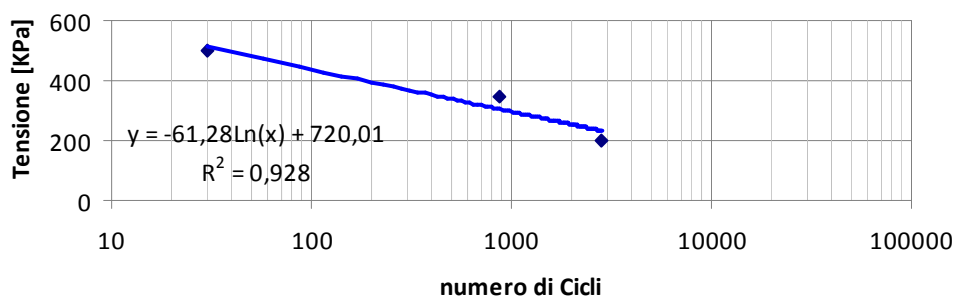


Soluzione	material e	% legante	tensione	n° cicli
A	C	100	200	9300
A	C	100	350	1530
A	C	100	500	680



**Tabella 5.4.4: Prova ITFT A-2-C-100.**

I risultati ottenuti con la prova ITFT per la soluzione A-2-C-100 evidenziano un comportamento a fatica in linea con la soluzione A-2-C-50. Per la soluzione A-2-C-100 si è osservata una pendenza della retta interpolatrice praticamente identica alla soluzione A-2-C-50: tra le due soluzioni è possibile riscontrare che un diverso quantitativo di legante aggiunto, a parità di aggregato, non produca variazioni significative sulla vita a fatica della soluzione.

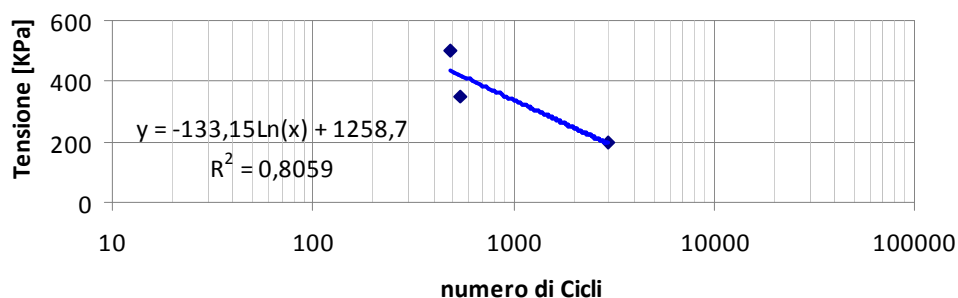


Soluzione	material e	% legante	tensione	n° cicli
A	SQ	50	200	2820
A	SQ	50	350	870
A	SQ	50	500	30



**Tabella 5.4.5: Prova ITFT A-1-SQ-50.**

La soluzione A-1-SQ-50 mostra una riduzione evidente, rispetto alle altre soluzioni testate, della vita a fatica. La retta interpolatrice risulta pendente in modo più accentuato rispetto alle altre soluzioni testate, suggerendo che la vita a fatica sia meno elevata rispetto alle altre soluzioni fino a qui testate.



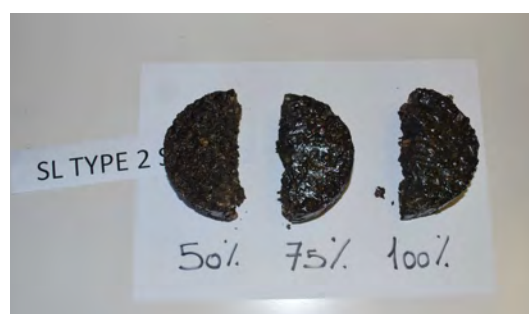
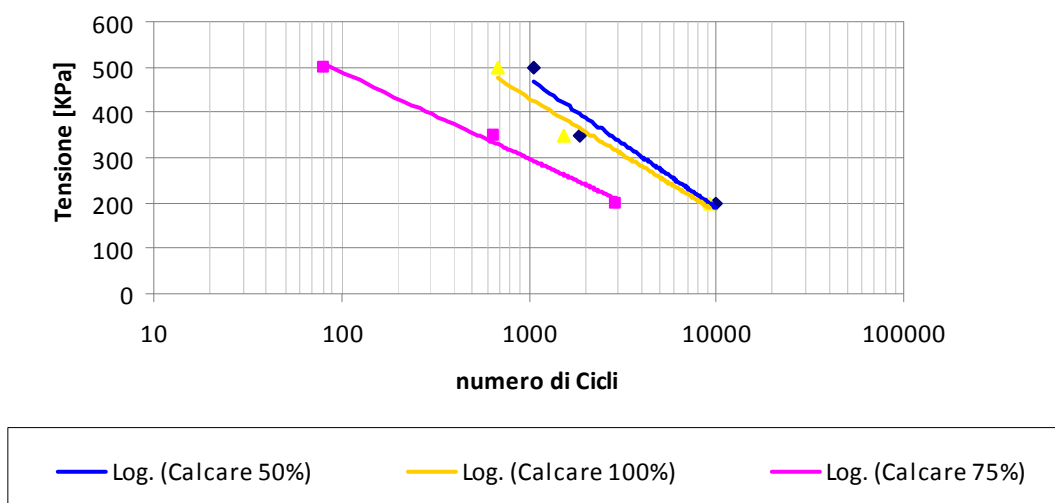
Soluzione	material e	% legante	tensione	n° cicli
A	SQ	100	200	2950
A	SQ	100	350	550
A	SQ	100	500	480



**Tabella 5.4.6: Prova ITFT A-1-SQ-100.**

I risultati ottenuti con la soluzione A-1-SQ-100 evidenziano che la soluzione A-1-SQ-50 ha una bassa resistenza a fatica.

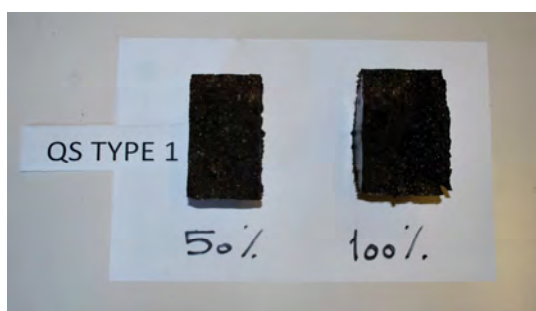
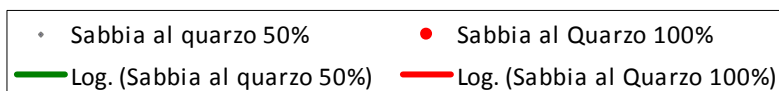
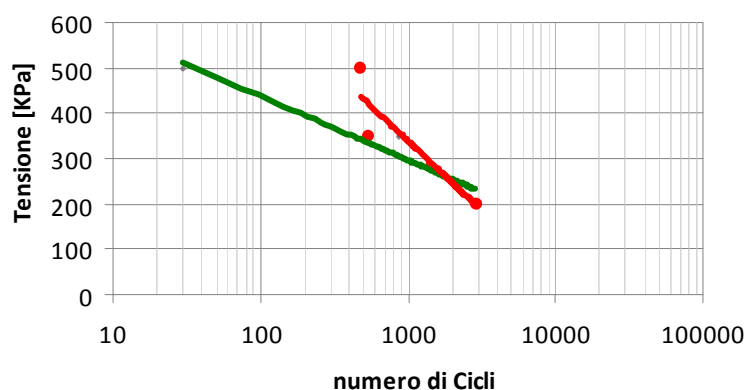
Da un veloce confronto, è evidente come con le soluzioni A-2-C siano preferibili a quelle A-1-SQ: questa considerazione potrebbe indicare chee aggregati di dimensioni maggiori inseriti nel conglomerato polimerico aumentino la vita a fatica dello stesso. È necessaria un'ulteriore sperimentazione per poter verificare quest'ultima affermazione.



**Tabella 5.4.7: Confronto prova ITFT soluzioni con calcare.**

Dai dati ottenuti è possibile osservare come la percentuale di legante inserita nella soluzione non influenzi la resistenza a fatica. Confrontando la soluzione A-2-C-50 con la A-2-C-100, è possibile osservare che entrambe le soluzioni sono descritte da una retta interpolatrice praticamente identica.

La soluzione A-2-C-75 risulta scadente, se confrontata con A-2-C-50/100: tale risultato è però condizionato dal confezionamento dei provini. I provini realizzati con la miscela A-2-C-75 sono caratterizzati da un conglomerato polimerico non omogeneo, con presenze all'interno dello stesso di sacche di aggregato non miscelato con il legante, le quali costituiscono punti deboli del provino sottoposto a cicli di carico.

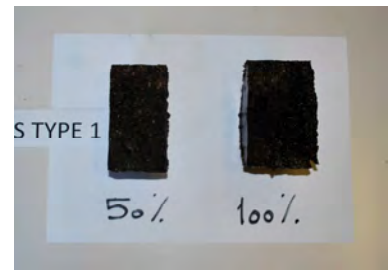
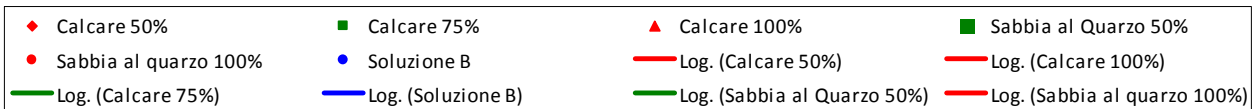
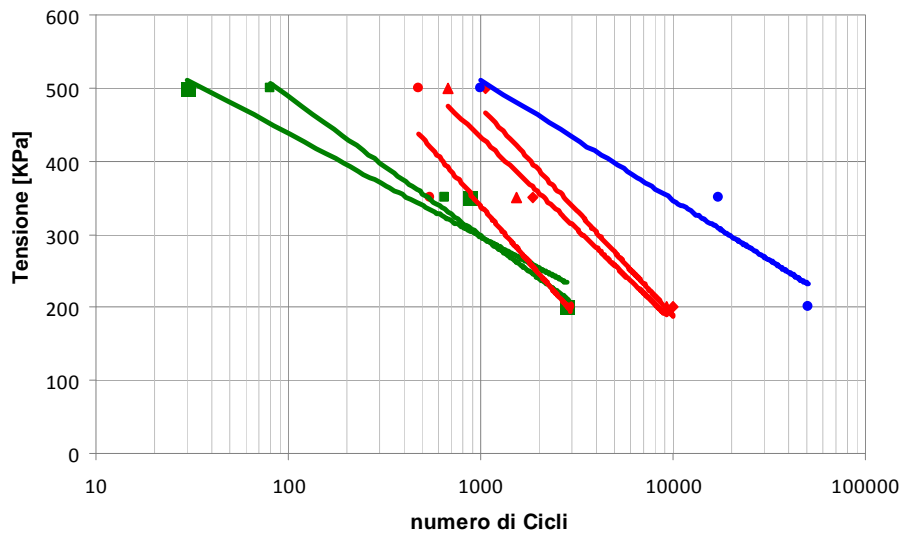


**Tabella 5.4.8: Confronto prova ITFT sabbia di quarzo.**

Dal confronto tra la soluzione A-1-SQ-50 e A-1-SQ-100 si osserva come la variazione di percentuale di legante inserita modifichi la resistenza a fatica della soluzione. Una riduzione del 50% di legante inserito riduce notevolmente la resistenza a fatica per cicli di carico ad alte tensioni (500KPa). Alle basse tensioni (200KPa) invece le variazioni del numero dei cicli, tra le due soluzioni, risulta minimo.

Riducendo il contenuto di legante diventa, in fase di miscelazione, difficoltoso ottenere un conglomerato omogeneo, specialmente se la miscelazione, come nel caso dei provini testati, viene fatta a mano. Non è pertanto da escludere che il provino di A-1-SQ-50 testato a 500KPa risulti confezionato in modo errato e per tal motivo le prestazioni osservate risultano condizionate negativamente.

Sia per la soluzione A-1-SQ -100 che per la soluzione A-1-SQ-50 si osserva globalmente una riduzione della vita a fatica se si confrontano i risultati ottenuti da queste soluzioni con quelle al calcare.



**Tabella 5.4.9: Confronto soluzione A e B.**

Dai risultati ottenuti è possibile osservare come la soluzione B-2-C-100 risulti la migliore come resistenza a fatica mentre la soluzione A-1-SQ-50 risulti la peggiore.

Ad esclusione di alcune prove eseguite sulla soluzione A-1-SQ-50 e A-2-C-75 (i risultati sono stati condizionati da provini mal confezionati), è possibile osservare una scarsa influenza della percentuale di legante sulla vita a fatica: variazioni, anche significative della percentuale di legante non evidenziano variazioni altrettanto sensibili di risposta a fatica della soluzione. Le soluzioni A-2-C-50/100 rispetto alle soluzioni A-1-SQ-50/100 forniscono vita a fatica maggiore; l'utilizzo di aggregati di dimensioni maggiori, indipendentemente dalla percentuale di legante inserita, aumenta la vita a fatica della soluzione.



# 6 Conclusioni

## 6.1 Introduzione

La sperimentazione, proposta in questo lavoro di tesi, ha lo scopo di studiare rivestimenti polimerici usati come pavimentazioni per impalcati da ponte. Questi rivestimenti hanno il vantaggio di poter essere stesi con spessori molto piccoli (dell'ordine dei 5-10 mm) e di assicurare perfetta impermeabilità ed essere direttamente carrabili.

Caratterizzare una pavimentazione vuol dire indagare alcuni aspetti funzionali della stessa attraverso prove di laboratorio. Il lavoro proposto consiste quindi in un insieme di prove che hanno lo scopo di evidenziare la risposta della pavimentazione polimerica nei confronti delle esigenze che devono essere soddisfatte durante il normale esercizio di una pavimentazione stradale.

Definito lo scopo della tesi è possibile suddividere il lavoro svolto in tre fasi: una prima fase di acquisizione delle informazioni necessarie per conoscere la soluzione studiata; una seconda fase di indagine mediante prove di laboratorio; una terza fase, infine, di analisi e confronto dei risultati ottenuti.

Attraverso un'ampia ricerca bibliografica è stato possibile definire delle linee guida per le prove da eseguire e le modalità per modificare le soluzioni studiate.

Sono state studiate le caratteristiche superficiali (macrotessitura, drenabilità e aderenza) e la risposta della pavimentazione alle più comuni forme di deterioramento (ormaiamento, fatica e adesione tra gli strati).

I risultati ottenuti con le diverse soluzioni sono stati poi confrontati tra di loro con lo scopo di individuare, qualitativamente, le prestazioni delle soluzioni polimeriche sottili rispetto alle più comuni soluzioni attualmente impiegate.

## 6.2 I materiali impiegati

Dalla ricerca bibliografica e dalle prove effettuate è stato possibile caratterizzare i materiali utilizzati.

Gli aggregati impiegati presentano caratteristiche in linea con quelle richieste dai principali manti d'usura, mentre i leganti polimerici presi in considerazione hanno evidenziato notevoli differenze rispetto al legante bituminoso.

Le resine presentano il pregio di poter essere lavorate a temperature ambiente, un vantaggio rispetto al bitume che viene lavorato invece a 160°C. Una miscelazione e una stesa a temperatura ambiente (anziché a 160/120°C) limita infatti la pericolosità nelle lavorazioni (diminuzione di lesioni, di ustioni e riduzione di fumi). Allo stesso tempo si ha una riduzione dell'impiego di particolari macchinari, per effettuare il preriscaldamento e la successiva miscelazione degli aggregati con il legante, e quindi una conseguente diminuzione dei costi di realizzazione.

La natura termoindurente della resina utilizzata comporta che il reticolo cristallino del legante migliori con l'aumento delle temperature: ciò risulta estremamente vantaggioso per la riduzione delle deformazioni permanenti prodotte dal traffico veicolare, soprattutto alle alte temperature di esercizio.

Le resine inoltre sono risultate chimicamente resistenti alle sostanze aggressive ed impermeabili a contatto con i liquidi. La compatibilità chimica con qualsiasi tipo di aggregato e la buona resistenza ai sali disgelanti amplificano ulteriormente gli ambiti di utilizzo di tali leganti.

Gli aggregati scelti, non dimostrando particolari esigenze di compatibilità con il legante, sono stati scelti cercando di massimizzare le caratteristiche richieste dai più comuni manti d'usura. Sono stati selezionati infatti aggregati poco porosi, puliti, con ottime resistenze all'attrito e con curve granulometriche correlabili alla tecnica di posa.

Per il lavoro svolto sono state scelte resine di tipo epossidico e metacrilico. Queste tipologie di leganti sono state poi confrontate con un tradizionale bitume impiegato nel Nord Italia.

Tra gli aggregati sono invece stati utilizzati: scorie d'acciaieria, bauxite, sabbia calcarea, pietrisco calcareo e sabbia di quarzo.

Le prove effettuate hanno evidenziato l'idoneità dei materiali ad essere impiegati per confezionare determinati rivestimenti.

### **6.3 I campioni di prova**

Le sperimentazioni e le conoscenze, acquisite dalla bibliografia e studiando gli aggregati, hanno permesso di definire la strada da seguire per la caratterizzazione prestazionale delle soluzioni testate.

Per eseguire le prove sono stati realizzati provini ad hoc, rappresentativi della reale pavimentazione, e adattati ai dispositivi di prova senza alterarne la risposta (che doveva risultare il più aderente possibile a quella reale). Per tal motivo sono stati realizzati due tipologie di provini: lastre rappresentanti superfici e stratigrafia dei rivestimenti reali, e provini di forma cilindrica, per indagare fatica e modulo elastico dei rivestimenti studiati.

### **6.4 I risultati ottenuti**

Dalle prove effettuate è stato possibile indagare come le variazioni di aggregato e del quantitativo di legante influenzassero le risposte della pavimentazione polimerica. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati con prove analoghe su rivestimenti in conglomerato bituminoso.

#### **6.4.1 Le caratteristiche superficiali**

Le caratteristiche superficiali delle soluzioni polimeriche studiate modificano la propria risposta in funzione del tipo di aggregato utilizzato ma soprattutto sono influenzate dalla tipologia di posa e dal quantitativo di resina inserito.

Le tecniche di posa, come evidenziato nel capitolo 2, influenzano pesantemente la macrotessitura e l'aderenza della superficie. L'utilizzo di tecniche premixed riduce le prestazioni, rispetto all'impiego di tecniche multiple layer.

Dai risultati osservati è stato possibile notare che, riducendo la percentuale di legante ed aumentando le dimensioni dell'aggregato, il divario prestazionale tra le tecnica di posa si riduce, andando a vantaggio della soluzione premixed.

Confrontando le soluzioni A (confezionate con tecnica premixed) con la soluzione C-00-B-100 (tecnica di posa multiple layer) è possibile riscontrare una pessima aderenza e macrorugosità superficiale di tutte le soluzioni con 100% di legante, indipendentemente dall'aggregato considerato. Il quantitativo eccessivo di legante utilizzato per le soluzioni A-1-SQ-100, A-1-SF-100, A-2-C-100 e A-2-SG-100 comporta un completo assorbimento, da parte del legante, dell'aggregato conferendo alla superficie un aspetto liscio e riflettente, privo di macrorugosità, privando completamente la pavimentazione di idonee caratteristiche di aderenza e di drenabilità.

Le soluzioni A-1-SQ-50 e A-2-C-50 evidenziano invece macrotestitura più accentuata, ottima aderenza e drenabilità. I risultati ottenuti per queste superfici sono in perfetta linea con quelli osservati per la soluzione B e C. Quantitativi di legante così ridotti però comportano una adesione tra i grani di aggregato molto più limitata rispetto alle soluzioni con 100% di legante. Lo svantaggio collegato a questa tipologia di soluzioni è la possibilità di rimozione degli aggregati, se sollecitati da accelerazioni, decelerazioni e sterzature dei veicoli in transito.

La soluzione A-2-C-75 risulta essere nel complesso la migliore: i risultati di aderenza, macrorugosità e drenabilità sono perfettamente in linea, se non migliori, con quelli osservati per le soluzioni B e C. Il quantitativo di legante nella miscela conferisce inoltre una maggiore stabilità agli aggregati, impedendo che si distacchino se sollecitati dai veicoli in transito.

Dai risultati ottenuti, le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni polimeriche risultano simili a quelli osservati per le soluzioni tradizionali in conglomerato bituminoso. È da evitare però l'impiego di soluzioni con alto contenuto di legante in quanto la superficie risultante non è sicuramente accettabile in termini di sicurezza.

Con maggiore interesse possono essere considerate le soluzioni con il 50% e il 75% di legante grazie alle buone caratteristiche osservate.

Per i motivi sopra citati e con l'obiettivo di aumentare il confort di marcia, riducendo la rumorosità derivante dalla pavimentazione, e mantenendo un'ottima sicurezza di guida, sono da preferire le pavimentazioni al 75% di legante confezionate con aggregato di dimensioni grosse.

#### **6.4.2 Le caratteristiche fisico-meccaniche**

Le caratteristiche fisico meccaniche sono state studiate sottoponendo i provini a diverse prove.

Dai risultati ottenuti le soluzioni polimeriche risultano, se confrontate con la soluzione B-2-C-100, migliori e idonee a soddisfare le esigenze richieste dai rivestimenti per impalcato da ponte.

Dalla ricerca bibliografica (vedere cap. 2) è emerso che i rivestimenti stesi su impalcato da ponte con moduli elastici contenuti migliorassero la vita utile delle pavimentazioni aumentandola. Le tensioni all'interno degli strati, causate da variazioni di temperatura in fase di esercizio, risultano di minore entità se il modulo elastico del rivestimento risulta contenuto.

Dalle prove eseguite è emerso come il modulo elastico delle soluzioni polimeriche sia estremamente più basso rispetto al conglomerato bituminoso. Per questo motivo la compatibilità tra il supporto e rivestimento, in seguito a variazioni termiche, risulta maggiore se la pavimentazione è in conglomerato polimerico anziché in conglomerato bituminoso.

Tra le diverse soluzioni polimeriche studiate è emerso come quantitativi elevati di legante riducessero il modulo di elasticità mentre l'impiego, a parità di quantitativo di legante, di aggregato con dimensioni grosse aumentasse il modulo.

Il divario tra i moduli ottenuti tra le soluzioni polimeriche e quelle bituminose è però talmente elevato da poter considerare qualsiasi delle soluzioni polimeriche analizzate accettabili indipendentemente dall'aggregato o quantitativo di legante impiegato.

La resistenza a degrado in fase di esercizio delle pavimentazioni polimeriche, è stata indagata attraverso le prove di adesione ed ormaimento.

Nel confronto con le soluzioni bituminose, le soluzioni polimeriche risultano migliori in entrambe le prove. La natura termoindurente del conglomerato polimerico, ha evidenziato, in controtendenza con il conglomerato bituminoso, un aumento della resistenza alle deformazioni permanenti passando da temperature di esercizio più basse a temperature più elevate.

Indipendentemente dalla combinazione di aggregato, quantitativo di legante e tecnica di posa scelta, le soluzioni polimeriche presentano deformazioni permanenti estremamente contenute e addirittura trascurabili se confrontate con le soluzioni B-2-C-100.

Confrontando le varie soluzioni polimeriche è possibile osservare come l'aggregato utilizzato influenzi la prova. Confrontando la soluzione A-2-SG-100 con quella A-1-SF-50 e la soluzione A-2-C-100 con quella A-2-SQ-50, si è osservato una maggiore resistenza alle deformazioni permanenti delle soluzioni aventi aggregato con dimensioni maggiori, a parità di quantitativo di legante. Confrontando invece la soluzione A-1-SQ-50 con quella A-1-SQ-100 è possibile osservare deformazioni inferiori di quest'ultima. Si può affermare quindi che le soluzioni con quantitativo elevato di legante subiscano minori deformazioni permanenti.

Anche le prove di adesione hanno evidenziato prestazioni migliori delle miscele polimeriche rispetto a quelle bituminose.

La maggior parte delle prove eseguite su rivestimenti polimerici ha evidenziato una perfetta adesione all'interfaccia tra supporto e rivestimento, con rotture in prevalenza in superficie o nello strato di rivestimento. Tra le varie soluzioni polimeriche è da evidenziare una migliore risposta delle soluzioni con legante di tipo epossidico rispetto a quelle confezionate con legante metacrilico. Il legante epossidico, oltre a fornire ottimi livelli di adesione, localizza i distacchi in superficie (senza danneggiare il rivestimento) o al più all'interno dello strato di rivestimento; le soluzioni C-00-B-100 caratterizzate da legante polimerico metacrilico forniscono elevati valori di resistenza di adesione ma il distacco avviene all'interfaccia (risultato pericoloso perché espone l'impalcato all'attacco di agenti esterni più o meno aggressivi).

Infine il contenuto di legante e l'utilizzo del primer si sono rivelati parametri fondamentali se non addirittura essenziali. Quantitativi elevati di legante e stesura omogenea del primer sull'intera superficie aumentano la forza di adesione tra rivestimento e supporto localizzando il distacco sempre più in superficie. Quantitativi più bassi di legante epossidico hanno evidenziato invece per le soluzioni A-2-SQ-50 e A-2-C-50 distacchi nello strato di rivestimento (verosimilmente si è trattato di un'adesione limitata tra i grani a causa del basso contenuto di legante).

Dai risultati ottenuti, sia dal punto fisico meccanico sia punto di vista delle caratteristiche superficiali, le pavimentazioni polimeriche risultano essere nel complesso ottimi sistemi di protezione dell'impalcato. Tali sistemi garantiscono, grazie al potere adesivo del primer e del legante polimerico, un'ottima adesione tra rivestimento e supporto. Tutto ciò si traduce in una perfetta, nonché uniforme, impermeabilità di tutta la superficie. Attraverso una corretta progettazione della tipologia e dei quantitativi di aggregati e di legante è possibile conferire alla pavimentazione risultante eccellenti caratteristiche di macrorugosità superficiale, di aderenza e di drenabilità. Con riferimento alle deformazioni permanenti, le soluzioni polimeriche risultano fornire ottime prestazioni, a tal punto da risultare preferibili alle più tradizionali soluzioni in conglomerato bituminoso.

# Bibliografia

1. *ACI 548.5R: Guide for Polymer Concrete Overlays*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., Jan. 1994, Reapproved 1998.
2. Colombo P., D. Festa, "Materiali per L'Ingegneria Civile", Edizioni Libreria Progetto Padova.
3. Donguk C., D. W. Fowler, D. L. Wheat, "Thermal stresses in polymer concrete overlays", *Properties and Uses of Polymers in Concrete*, ACI Special Publication No.166, 1996.
4. Missouri Department of Transportation, "Investigations of Failures of Epoxy Polymer Overlays in Missouri", Organizational Results Research Report, November, 2007.
5. Nabar, S. and P. Mendis, "Experience with Epoxy Polymer Concrete Bridge Deck Thin Overlays in Service for Over 10 Years", *In-place Performance of Polymer Concrete Overlays*, ACI Special Publication No. 169, 1997.
6. *NCHRP Synthesis 423: Long-Term Performance of Polymer Concrete for Bridge Decks*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.
7. Pasetto, M., C. Modena, S. Silvan, e P. Bruno, "Impermeabilizzazione e Pavimentazione di Ponti e Viadotti con Trattamenti Irruvidenti a base di Malta Sintetica", *X Congresso Nazionale Società Italiana Infrastrutture Viarie*, Catania, Italy, Oct. 26-28, 2000.
8. Ramous E., D. Festa, E. Bernardo, "Complementi di Scienza e Tecnologia dei Materiali", Edizioni Libreria Progetto Padova.
9. Sprinkel, M.M., "Nineteen Year performance of Polymer Concrete Bridge", *In Place Performance of Polymer Concrete Overlays*, ACI Special Publication No. 169, 1997.
10. Stenko, M.S. and A.J.Chawalwala, "Thin Polysulfide Epoxy Bridge Deck Overlays",

*Transportation Research Record 1749, Paper No. 01-0154*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2001.

11. Valente, D., *“I rivestimenti polimerici sottili per la pavimentazione degli impalcati da ponte. Caratterizzazione prestazionale e confronto con le soluzioni tradizionali”*, Tesi di laurea – Università di Padova – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – 2012/13.
12. De Rossi, R. *“Caratterizzazione dinamica con prova a flessione su quattro punti di miscele bituminose”* Tesi di Laurea – Università di Padova – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – 2010/11.
13. Fedele, D. *“resistenza all’accumulo di deformazioni permanenti di miscele bituminose confezionate con aggregati di riciclo”* Tesi di Laurea – Università di Padova – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - 2010/11.
14. AA. VV. *“Determinazione della forma dei granuli - Indice di forma”* – UNI EN 933-4: 2008.
15. AA. VV. *“Determinazione della forma dei granuli. Indice di appiattimento”* – UNI EN 933-3:2004.
16. AA. VV. *“Metodi per la determinazione della resistenza alla frammentazione”* – UNI EN 1097-2: 2010.
17. AA. VV. *“Valutazione dei fini – prova di equivalente in sabbia”* – UNI EN 933-8:2000.
18. AA. VV. *“determinazione della distribuzione granulometrica – analisi granulometrica per setacciatura”* – UNI EN 933-1:2009.
19. AA. VV. *“ Determinazione della massa volumica apparente di aggregati non addensati”* – CNR 62.



20. AA. VV. *“Metodo della traccia delle ruote (wheel tracking)”*- UNI EN 12697-22:2007.
21. AA. VV. *“Resistenza alla fatica”* – UNI EN 12697-24:2008.
22. AA. VV. *“Rigidezza”* – UNI EN 12697-26:2012.
23. AA. VV. *“Misurazione della profondità della macritessitura della superficie della pavimentazione tramite tecnica volumetrica ad impronta”* – UNI EN 13036:2002.
24. AA. VV. *“Misurazione della drenabilità orizzontale della superficie della pavimentazione”* – UNI EN 13036-3:2006.
25. AA. VV. *“Metodo per la misurazione della resistenza allo slittamento/derapaggio di una superficie: Metodo del pendolo”* – UNI EN 13036-4:2011.
26. Jamal-Aldin, H. Zalatimo, D. W. Fowler, *“Measurement of shrinkage-induced stress In polymer concrete overlays”*, *Properties and Uses of Polymers in Concrete*, ACI Special Publication No. 166, 1996.
27. Prof. C. Modena, *“Progetto di ponti – Costruzioni composte acciaio – cls-“*, appunti lezione anno accademico 2010/2011.
28. AA. VV. *“Determinazione della massa volumica reale dei granuli di un aggregato”* – CNR 64 – Consiglio nazionale delle ricerche.
29. AA. VV. *“Determinazione della massa volumica apparente dei granuli di un aggregato”* – CNR 63 – Consiglio nazionale delle ricerche.

