



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI SOLUZIONI PER  
L'IMPERMEABILIZZAZIONE DI SOLETTE IN CALCESTRUZZO

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF WATERPROOFING SOLUTIONS FOR  
CONCRETE SLABS

Relatore:

Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di laurea di:

Mattia Esposito

Correlatore:

Dott. Ing. Lorenzo Paolo Ingrassia

Anno Accademico 2021-2022

## Sommario

1. Introduzione.....	4
2. Stato dell'Arte.....	6
2.1. La necessità di impermeabilizzare gli impalcati da ponte.....	6
2.2. Sistemi Impermeabilizzanti.....	8
2.2.1. Le caratteristiche dei sistemi impermeabilizzanti.....	10
2.2.2. Prove in sito per i sistemi impermeabilizzanti.....	12
3. Materiali e Metodi .....	15
3.1. Materiali .....	15
3.1.1. Calcestruzzo.....	15
3.1.2. Conglomerato bituminoso .....	16
3.1.3. Sistemi impermeabilizzanti .....	18
3.2. Confezionamento dei provini .....	31
3.2.1. Piastre in calcestruzzo.....	31
3.2.2. Messa in opera del sistema di impermeabilizzazione.....	35
3.2.3. Compattazione del conglomerato bituminoso .....	43
3.2.4. Carotaggio dei provini .....	45
3.3. Metodi di prova .....	47
3.3.1. Prova a taglio di tipo Leutner .....	47
3.3.2. Prova di adesione Pull-Off.....	49
3.4. Condizionamento delle piastre .....	51
3.5. Programma sperimentale.....	52

4. Risultati e Analisi .....	53
4.1. Prove Leutner .....	53
4.1.1 Resina Bicomponente .....	53
4.1.2 Geotessuto e Bitume .....	58
4.1.3. Geocomposito A .....	61
4.1.4. Geocomposito B .....	64
4.1.5. Geocomposito C .....	66
4.1.6. Geocomposito D .....	68
4.2. Prove Pull-Off .....	72
4.2.1. Resina Bicomponente .....	72
4.2.2. Geotessuto e Bitume .....	73
4.2.3. Geocomposito A .....	76
4.2.4. Geocomposito B .....	78
4.2.5. Geocomposito C .....	80
4.2.6. Geocomposito D .....	83
5. Conclusioni .....	88
Bibliografia .....	90
Norme Tecniche .....	93

# 1. Introduzione

Al giorno d'oggi la salvaguardia e la conservazione delle infrastrutture, e nello specifico dei ponti, è una delle tematiche più trattate e discusse. Con l'aumento della mobilità e a causa della globalizzazione, molti degli impalcati da ponte in calcestruzzo hanno parzialmente o quasi del tutto perso le loro capacità a causa soprattutto del degrado del calcestruzzo. Infatti, il deterioramento del calcestruzzo armato in un impalcato da ponte si manifesta attraverso fessurazioni, delaminazioni, distacchi ed altro, ed avviene per mezzo di due fenomeni principali: infiltrazione di acqua e di cloruri provenienti dai Sali disgelanti.

L'obiettivo è dunque quello di evitare l'accumulo di acqua sulla superficie dell'impalcato, attraverso dei sistemi di drenaggio, ed evitare quanto più possibile che questa si infiltri all'interno del calcestruzzo. A tale scopo sono stati studiati dei sistemi impermeabilizzanti che, una volta applicati sulla superficie dell'impalcato, garantiscono la totale impermeabilizzazione e allo stesso tempo adeguata resistenza meccanica nei confronti del carico veicolare. I più utilizzati sono le membrane preformate applicate al calcestruzzo oppure sistemi di impermeabilizzazione realizzati in opera.

Nello specifico, l'attenzione è stata dedicata a sei tipi di sistemi impermeabilizzanti: Resina Bicomponente, sistema Geotessuto e Bitume steso in opera e quattro Geocompositi preformati differenti. La Resina Bicomponente è appunto realizzata mescolando due componenti (A e B) e successivamente stesa sulla superficie di calcestruzzo dell'impalcato. Può essere previsto o meno uno spolvero. Il sistema Geotessuto e Bitume steso in opera è composto da uno strato di bitume modificato steso in sito con l'interclusione di un "tessuto non tessuto". Anche in questo caso si prevede uno spolvero per evitare che il bitume venga trascinato via al passaggio delle macchine operatrici. I Geocompositi, invece, sono membrane preformate che vanno applicate a fiamma.

A tale scopo, lo studio oggetto di questa tesi è volto a valutare la resistenza a taglio e le proprietà di adesione di sistemi composti da lastre di calcestruzzo, impermeabilizzante, strato di conglomerato bituminoso, confezionate in laboratorio. La valutazione delle suddette proprietà è stata effettuata mediante prove a taglio di tipo Leutner e prove di adesione Pull-Off.

L'indagine sperimentale svolta è descritta nel presente lavoro di tesi che è articolato nei seguenti capitoli:

- Capitolo 2 – Stato dell'Arte

Descrive in generale il Sistema Impalcato da Ponte con le relative problematiche dovute al degrado e i Sistemi di Impermeabilizzazione.

- Capitolo 3 – Materiali e Metodi

Descrive in maniera approfondita tutti i materiali impiegati nella sperimentazione e i metodi utilizzati per la caratterizzazione meccanica.

- Capitolo 4 – Risultati e Analisi

Riporta i risultati ottenuti dalla sperimentazione e i confronti tra i vari sistemi di impermeabilizzazione.

- Capitolo 5 – Conclusioni

Propone una sintesi conclusiva dei risultati e delle valutazioni di tipo economico-sostenibile sui sistemi impermeabilizzanti.

## **2. Stato dell'Arte**

Nella società odierna, la necessità del potenziamento della rete infrastrutturale è in forte crescita a causa della globalizzazione e dell'aumento della qualità e dinamicità della vita. Se da una parte la nostra dipendenza dalle infrastrutture è sempre più marcata, dall'altra parte sempre molte più infrastrutture stanno invecchiando ed andando incontro ad un eccessivo degrado, perdendo così la loro capacità di soddisfare la crescente domanda. Ad oggi le infrastrutture che più risentono dei fenomeni di deterioramento in Italia sono i ponti. Il motivo principale è che quasi la totalità di essi sono stati costruiti negli anni '60-'70 quando le conoscenze sul comportamento del calcestruzzo non erano sufficienti a prevederne e a garantirne la resistenza a lungo termine, a cui si aggiunge il fatto della scarsa frequenza di interventi di manutenzione o di ripristino per mancanza di fondi e poiché sarebbe richiesta una interruzione del traffico veicolare. Considerando che i ponti rappresentano dei nodi critici all'interno della rete infrastrutturale italiana, sorge la necessità di sviluppare ed implementare materiali, tecniche e procedure per costruire, ispezionare, monitorare e ripristinare velocemente le opere, affinché siano garantite una lunga vita utile e un'adeguata sicurezza ai veicoli transitanti.

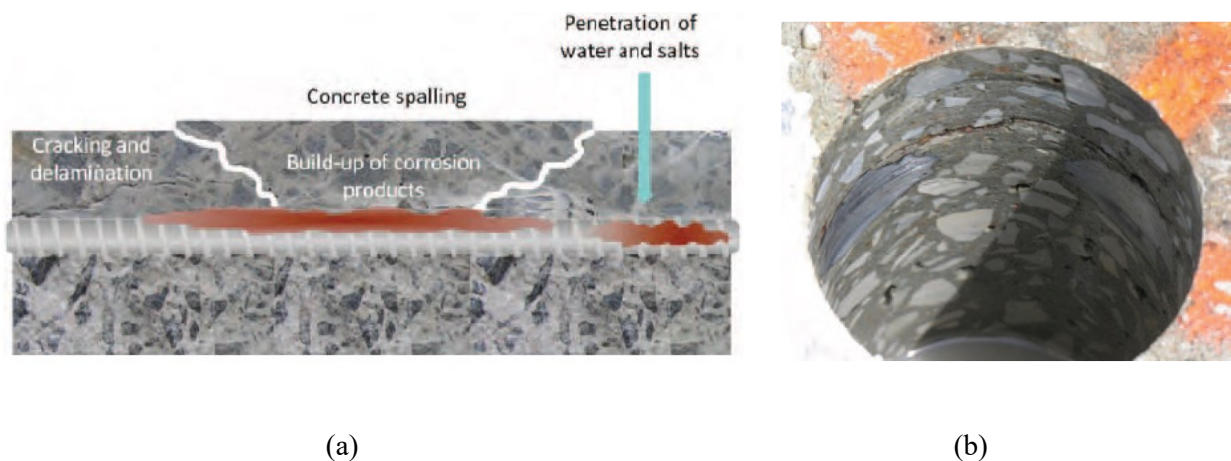
### **2.1. La necessità di impermeabilizzare gli impalcati da ponte**

A causa di una scarsa qualità dei materiali utilizzati nella fase di costruzione iniziale oppure per fenomeni di degrado che si presentano durante la vita in esercizio, gli impalcati da ponte in calcestruzzo armato possono subire una parziale o totale perdita di funzionalità nel tempo. In particolare, i fenomeni di degrado comprendono fessurazioni a fatica causate dalle tensioni cicliche indotte dai carichi veicolari e danni dovuti al clima, tra i quali ricadono gli effetti dei cicli gelo-disgelo, delle acque meteoriche e dei sali disgelanti. Il deterioramento di un impalcato da ponte in calcestruzzo armato, attraverso manifestazione di fessurazioni, delaminazioni, distacchi ed altro, riveste enorme criticità nel processo manutentivo di gestione di un'infrastruttura di trasporto, con serie ricadute in termini di stabilità e vita utile di un ponte [1].

Nello specifico, le principali cause di deterioramento della struttura sono da imputare, quasi esclusivamente, all'infiltrazione di acqua meteorica e di cloruri provenienti dai prodotti chimici

antigelo impiegati per le operazioni di manutenzione invernali. Infatti, per preservare la percorribilità e la sicurezza delle pavimentazioni durante le stagioni invernali, le agenzie ricorrono frequentemente all'uso di Sali a base cloridrica come il cloruro di sodio (NaCl), il cloruro di calcio (CaCl<sub>2</sub>) e il cloruro di magnesio (MgCl<sub>2</sub>) nonostante i loro noti impatti negativi sull'ambiente, quali danni alla vegetazione e inquinamento delle risorse d'acqua [2] [3] [4]. In generale, il più utilizzato risulta il sodio cloruro poiché è il più efficace alle basse temperature [4] ed è anche il più economico, essendo disponibile in grandi quantità.

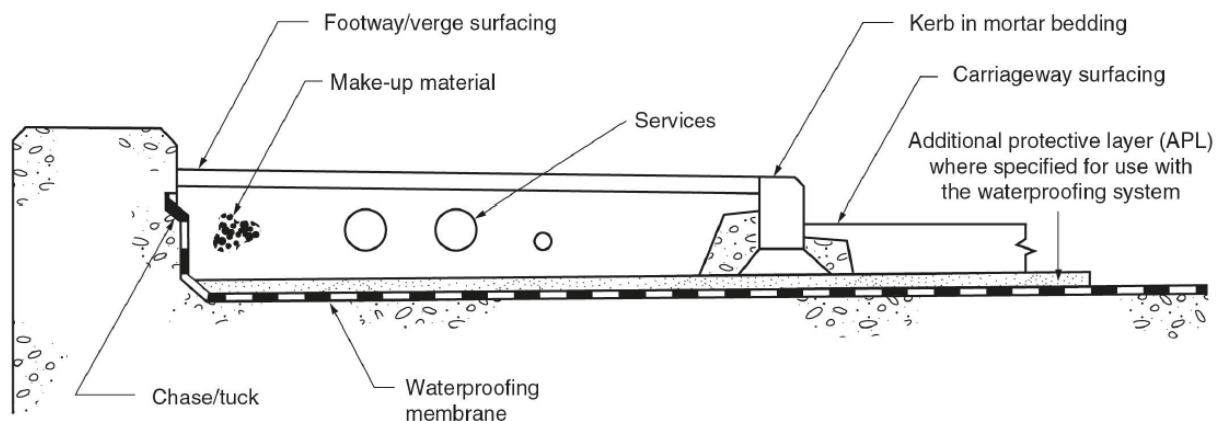
Le barre d'armatura nel calcestruzzo sono normalmente protette dalla corrosione grazie all'alta alcalinità dei materiali a base cementizia e ad un adeguato copriferro. I cloruri dei sali disgelanti (NaCl) possono penetrare all'interno del calcestruzzo abbassando l'alcalinità del calcestruzzo stesso ed innescando il fenomeno della corrosione dell'armatura (reazione alcali-aggregato) [5]. Aumentando di volume durante la corrosione, le barre di armatura possono deteriorare il calcestruzzo formando delle fessure verticali che interessano tutto lo spessore del materiale oppure si può manifestare il fenomeno della delaminazione lungo il piano orizzontale (Figura 1). Una volta formate le fessure, queste permettono l'infiltrazione di acqua nello strato di calcestruzzo causandone la completa rottura. Quest'ultima avviene quando la pressione dell'acqua, soggetta a cicli gelo-disgelo (con aumento di volume) e alla pressione esercitata dal traffico veicolare, raggiunge la massima tensione a trazione resistente del calcestruzzo.



**Figura 1.** (a) processo di corrosione, (b) delaminazione [1]

I ponti dovrebbero, pertanto, essere concepiti in modo tale da evitare l'accumulo superficiale di acqua meteorica attraverso la predisposizione di adeguati sistemi di drenaggio ed essere provvisti si

sistemi di impermeabilizzazione da applicare tra l'impalcato in calcestruzzo e la sovrastante pavimentazione in conglomerato bituminoso. Nella figura 2 è riportato un esempio di sistema impalcato da ponte.



**Figura 2.** Sistema impalcato da ponte [6]

## 2.2. Sistemi Impermeabilizzanti

Un sistema impermeabilizzante è definito come un materiale o una combinazione di materiali tali da svolgere la funzione di barriera impermeabile contro l'infiltrazione di acqua e sali antigelo per l'impalcato da ponte in calcestruzzo [6] [7]. La letteratura scientifica mostra l'ampia gamma di prodotti utilizzabili per l'impermeabilizzazione, differenti per tipologia di materiale, requisiti tecnici, dettagli di progettazione, modalità di posa in opera, prestazioni e costi [8] [9] [10]. La costante evoluzione tecnologica e industriale ha portato allo sviluppo di nuovi prodotti in grado di garantire sempre più elevate prestazioni, flessibilità nell'utilizzo e una maggiore sostenibilità ambientale. Tali sistemi impermeabilizzanti sono studiati con l'obiettivo di resistere al carico veicolare, avere buone capacità adesive con le superfici in calcestruzzo e in conglomerato bituminoso, essere resistenti ai sali disgelanti e preservare tali capacità a lungo termine [6].

Le soluzioni impermeabilizzanti più utilizzate oggi si dividono in membrane preformate applicate al calcestruzzo e sistemi di impermeabilizzazione realizzati in opera [5] [6] [7] [11]. Secondo le specifiche AASHTO, un sistema impermeabilizzante a membrana preformata è costituito da un primer applicato sulla superficie in calcestruzzo opportunamente preparata, un singolo strato di



membrana preformata aderente e, quando richiesto, una copertura protettiva o una mano d'attacco. L'applicazione del primer sulla superficie in calcestruzzo ha lo scopo di incrementare l'adesione con la membrana, mentre l'eventuale copertura protettiva sulla membrana ha le funzioni di incrementare l'adesione con il conglomerato bituminoso, proteggere la membrana e garantire una buona resistenza all'usura. Le membrane preformate sono solitamente fornite sotto forma di rotoli e sono costituite da materiali elastomerici, polimerici o bituminosi [11] [12]. Si dividono a loro volta in membrane preformate autoadesive e termo-applicate. La messa in opera delle membrane preformate autoadesive (Figura 3a) avviene rimuovendo il lato adesivo inferiore sensibile alla pressione applicata sulla membrana, mentre le membrane preformate termo-applicate (Figura 3b) vengono incollate a fiamma sull'impalcato attraverso un'ideale attrezzatura. Entrambe vengono progressivamente allungate e incollate al calcestruzzo lungo lo sviluppo longitudinale dell'impalcato.

I sistemi realizzati in opera (Figura 4) sono sistemi liquidi e possono essere suddivisi in tre categorie: prodotti acrilici, poliuretani o bituminosi. I sistemi liquidi acrilici e poliuretanic potrebbero mostrare nel tempo una bassa adesione con lo strato in conglomerato bituminoso con conseguente innesco prematuro di deformazioni della superficie, ed essere suscettibili a maggiori danneggiamenti a seguito del transito di macchine da cantiere o operazioni di fresatura durante gli interventi di manutenzione [11] [12]. I sistemi liquidi possono essere sia applicati a freddo che a caldo: un esempio di sistema liquido applicato a freddo sono le emulsioni bituminose con resine epossidiche [13], mentre un esempio di sistema liquido applicato a caldo sono i bitumi modificati [14] o asfalti epossidici opportunamente studiati [15]. I sistemi liquidi possono essere versati, stesi o spruzzati, in uno o più strati, utilizzando delle attrezzature di spruzzatura manuale o meccanica, seguita dal passaggio di rulli.



**Figura 3.** (a) applicazione membrana autoadesiva, (b) applicazione membrana a fiamma



**Figura 4.** Applicazione del sistema realizzato in opera

In fase di progettazione, sopra il sistema impermeabilizzante, può essere previsto uno strato protettivo aggiuntivo che funge da ulteriore strato impermeabilizzante e trasferisce in maniera più uniforme il carico veicolare alla superficie di calcestruzzo. Nella maggioranza dei casi, è composto da mastic asphalt non poroso oppure da conglomerato tradizionale.

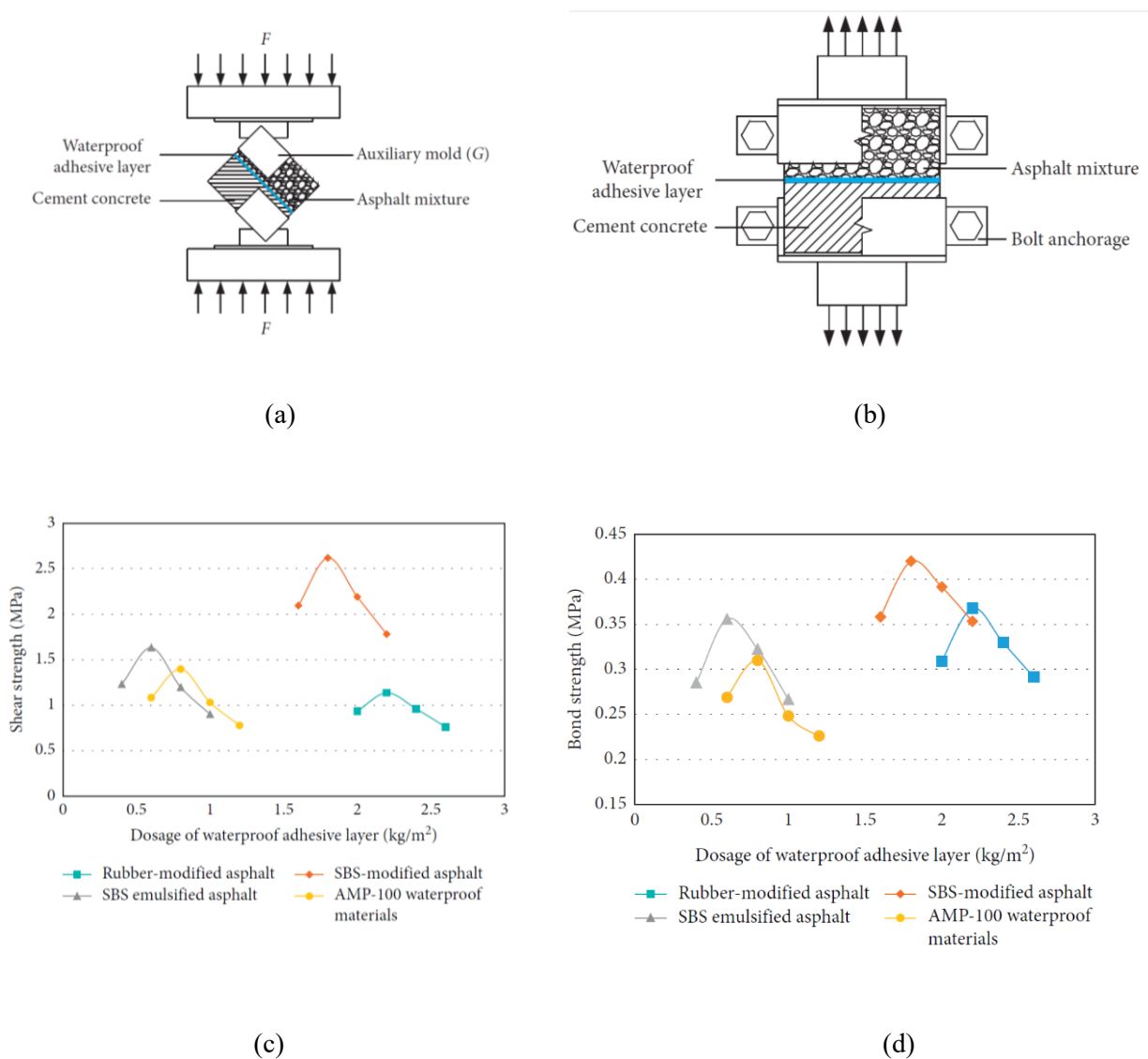
I sistemi di impermeabilizzazione vengono analizzati attraverso l'esecuzione di prove sia di laboratorio che in sito, con lo scopo di verificare che i requisiti richiesti dalle normative Europee, AASHTO e ASTM, quali le proprietà adesive, di resistenza al taglio, di resistenza all'acqua e di resistenza alla pressione dinamica dell'acqua, siano soddisfatte [16] [17] [18].

### **2.2.1. Le caratteristiche dei sistemi impermeabilizzanti**

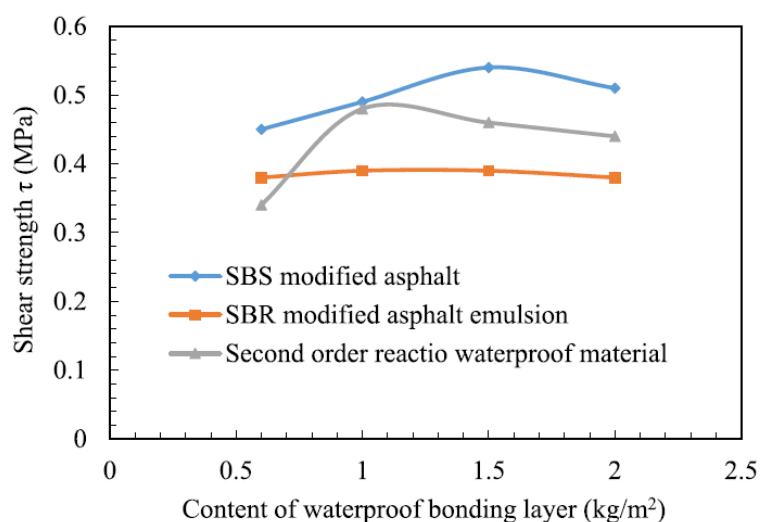
Le caratteristiche meccaniche richieste dalle normative Europee per i sistemi impermeabilizzanti sono molteplici. Oltre alla resistenza ai carichi veicolari e alla resistenza all'acqua e ai sali disgelanti, la resistenza al taglio e il livello di adesione sono le principali caratteristiche meccaniche da garantire in un sistema di impermeabilizzazione [19] [20] [21] [22]. Infatti, il sistema o la membrana impermeabilizzanti rappresentano un elemento di discontinuità all'interno del pacchetto strutturale. Affinché gli sforzi tangenziali indotti dal carico veicolare transitante non causino uno scorrimento all'interfaccia tra lo strato in conglomerato bituminoso e l'impalcato in calcestruzzo, è fondamentale che i due siano solidali per garantire il corretto trasferimento delle tensioni. In questo

modo viene assicurata l'efficacia e la durabilità dell'impalcato [14], evitando quanto più possibile l'insorgere di deterioramenti locali [11] [23].

Le caratteristiche meccaniche dipendono in prima istanza dal tipo di materiale impiegato e dalla sua compatibilità con il calcestruzzo e il conglomerato bituminoso. A titolo di esempio, in Figura (5a-d) si riportano i risultati di laboratorio ottenuti da Jin et al. [24], che mostrano la supremazia delle membrane con bitume modificato SBS steso in sito a rispetto alle emulsioni con lo stesso bitume SBS e rispetto a bitumi modificati con polverino di gomma. Inoltre, si evidenzia che anche il dosaggio è un fattore da prendere in considerazione, in quanto conferisce al sistema una maggiore adesione ma può anche enfatizzare l'effetto di discontinuità all'interno della struttura.



**Figura 5.** (a) Configurazione delle prove di taglio, (b) configurazione delle prove di adesione, (c) (d) rispettivi risultati sperimentali di resistenza a taglio e adesione al variare del dosaggio di prodotto [24]



**Figura 6.** Risultati di resistenza a taglio al variare del dosaggio di bitume [14]

Nello studio specifico, prestazioni ottimali sono state ottenute per un dosaggio di bitume pari a 1,8 kg/m<sup>2</sup>. Simili risultati sono stati ottenuti da Guo et Al. [14] e Zhang et Al. [18], che confermano il dosaggio ottimale di bitume modificato SBS attorno a 1,6 kg/m<sup>2</sup> e il fatto che le prestazioni sono migliori rispetto alle emulsioni, come mostrato in Figura 6.

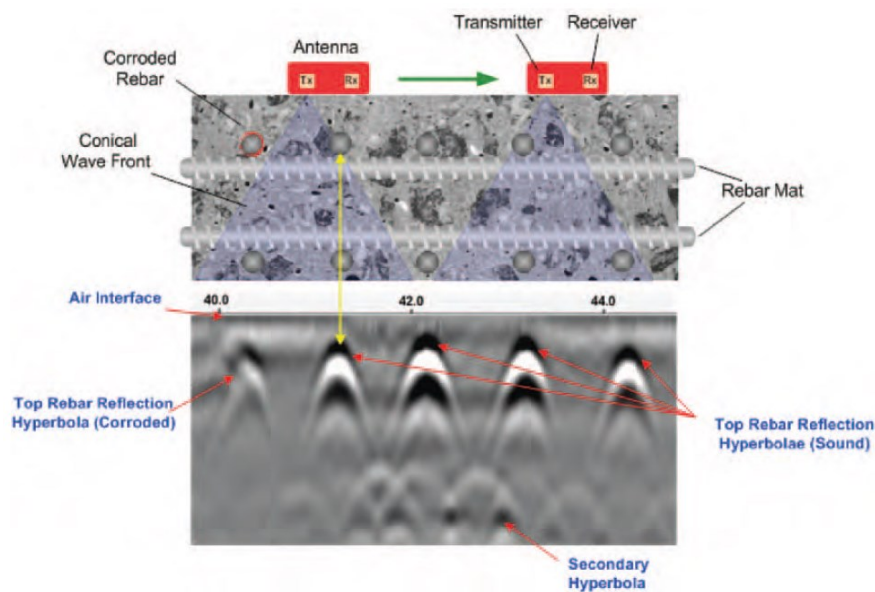
Inoltre, è stato dimostrato come la resistenza al taglio e l'adesione del sistema impermeabilizzante al calcestruzzo siano fortemente influenzate dal tipo di calcestruzzo, dalla sua finitura superficiale (macrotessitura) e dal contenuto di acqua, nonché dalla temperatura con cui il calcestruzzo si trova al momento della stesa dell'impermeabilizzazione. Un basso contenuto di acqua, un'elevata rugosità della superficie di calcestruzzo (accompagnata da una preliminare pulizia) ed una temperatura media dell'impalcato in calcestruzzo sono risultate essere le condizioni più favorevoli al raggiungimento di buone prestazioni da parte del materiale [25] [26].

### 2.2.2. Prove in sito per i sistemi impermeabilizzanti

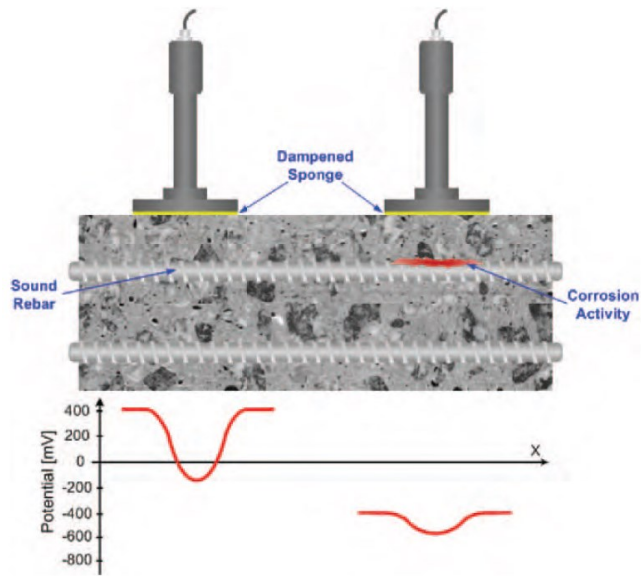
Le prove in sito maggiormente utilizzate per l'ispezione e il monitoraggio degli impalcati da ponte in calcestruzzo armato riguardano, ad esempio, il campionamento fisico, l'ispezione visiva, i dispositivi integrati, metodi ad ultrasuoni [1] [8]. Negli ultimi anni sono state sviluppate molte tecnologie di misura non distruttive (Non Destructive Testing NDT), che non pregiudicano l'integrità dell'impalcato come invece avviene nel caso del campionamento fisico.

Nella classifica delle tecnologie più utilizzate si trovano il metodo “impact echo”, impulsi o onde ultrasoniche, ground penetrating radar (GPR). Il principio di base che le accomuna è la generazione di onde di varia natura sulla superficie percorribile dai veicoli e la misurazione della rispettiva risposta dei materiali tramite dei ricevitori sulla superficie stessa. Infatti, in presenza di difetti strutturali come delaminazioni e fessurazioni, le onde vengono rifratte in diverso modo rispetto a quelle rifratte da un materiale integro.

Alcuni esempi di individuazione e analisi dello stato di corrosione delle armature, sono riportati in Figura 7 e 8. In Figura 7 si osserva il principio di funzionamento del GPR, in cui si studia il diverso pattern di rifrazione degli impulsi radar in corrispondenza delle barre in acciaio, mentre in Figura 8 è riportata la diversa risposta del materiale in termini di potenziale elettrico.



**Figura 7.** Principio di funzionamento del GPR [1]



**Figura 8.** Tecnologia ad impulsi elettrici [1]

Va messo in evidenza che le tecnologie non distruttive (NDT) sono in grado di valutare lo stato di degrado del calcestruzzo e delle armature, quindi, permettono indirettamente di stabilire l'efficacia o meno del sistema di impermeabilizzazione. Risultano, invece, essere inefficaci nell'investigare le proprietà meccaniche proprie del sistema di impermeabilizzazione, come la resistenza al taglio e l'adesione, misurabili solo tramite delle prove distruttive in sito o in laboratorio.

## 3. Materiali e Metodi

### 3.1. Materiali

Nel presente capitolo vengono descritte le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali impiegati nella sperimentazione e le modalità di confezionamento delle lastre dalle quali verranno poi ricavati i provini da testare.

Tra i materiali sono inclusi il calcestruzzo, i sistemi di impermeabilizzazione e il conglomerato bituminoso. Poiché l'oggetto dello studio è il confronto prestazionale tra i diversi sistemi di impermeabilizzazione per impalcati da ponte, il calcestruzzo e il conglomerato bituminoso sono i medesimi per tutte le configurazioni testate al fine di ottenere dei risultati paragonabili.

#### 3.1.1. Calcestruzzo

La Normativa Tecnica EN 13375 [N1] stabilisce il tipo e le proprietà del calcestruzzo da impiegare nella realizzazione di impalcati da ponte dotati di sistema di impermeabilizzazione. La Norma indica l'utilizzo di un calcestruzzo MC (0,45), la cui composizione e caratteristiche sono riportate nella Norma Tecnica UNI EN 1766 [N2]. Tale Norma prescrive le seguenti proprietà:

- Cemento tipo CEM I 42,5 R secondo la Norma UNI EN 197-1 [N3]. La dicitura "CEM I" indica un cemento di tipo Portland con percentuale di clinker compresa tra il 95 % e il 100 %, la classe "42,5" indica la resistenza minima a compressione raggiunta dal calcestruzzo dopo 28 giorni di stagionatura in  $\text{N/mm}^2$ , e "R" indica un cemento a presa "rapida" ovvero con una resistenza a compressione minima del calcestruzzo dopo 2 giorni pari a  $20 \text{ N/mm}^2$ ;
- Contenuto di cemento pari a  $395 \text{ kg/cm}^3$ ;
- Rapporto acqua su cemento pari a 0,45 idoneo a raggiungere un'adeguata lavorabilità del calcestruzzo esente da trasudamento o segregazione;
- Aggregati naturali a base silicea, con dimensione massima pari a 10 mm.

Il calcestruzzo avente tali caratteristiche è stato prodotto nell'impianto di Osimo (AN) ed utilizzato per il confezionamento di piastre di dimensioni 30 x 30 cm.

### 3.1.2. Conglomerato bituminoso

La Norma Tecnica UNI EN 13375 [N1] specifica il tipo e le proprietà del conglomerato bituminoso da impiegare per la realizzazione di impalcati da ponte dotati di sistema di impermeabilizzazione. La Norma indica l'utilizzo di un conglomerato bituminoso con aggregato di dimensione massima pari a 10 o 11 mm, con una percentuale di bitume minima pari al 6 % rispetto al peso della miscela e con una temperatura di compattazione pari a  $160 \pm 10$  °C.

Al fine di soddisfare queste caratteristiche, è stato impiegato un conglomerato bituminoso tradizionale a caldo di solito utilizzato per strati di binder. La densità massima, risultata essere pari a  $2,467 \text{ g/cm}^3$ , è stata ricavata con la seguente formula:

$$\rho_{max} = \frac{100}{\frac{(100 - \%_{bitume})}{\rho_{aggregato}} + \frac{\%_{bitume}}{\rho_{bitume}}}$$

Dove:

- % bitume: è stata ricavata tramite estrazione ed è pari a 5,1% rispetto alla miscela;
- $\rho_{aggregato}$ : densità massima degli aggregati pari a  $2,670 \text{ g/cm}^3$ ;
- $\rho_{bitume}$ : densità massima del bitume assunta pari a  $1,020 \text{ g/cm}^3$ .

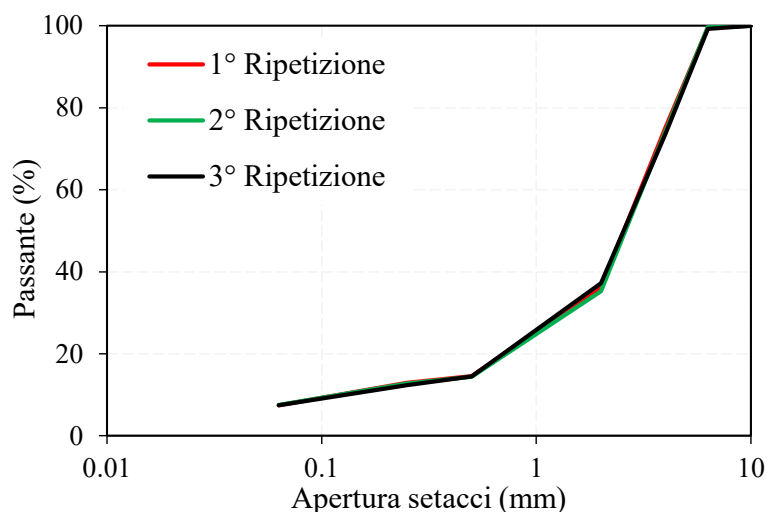
Il conglomerato bituminoso è stato prodotto in un impianto sito a Fermo (FM), prelevato alla bocca dell'impianto e disposto su scatole di cartone da circa 10 kg l'una. In seguito, il materiale è stato trasportato e stoccato presso il Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche.

#### *Gli aggregati*

Gli aggregati impiegati sono aggregati vergini di natura calcarea. Con lo scopo di verificare le reali proprietà del materiale, sono state eseguite delle estrazioni del bitume con solvente su tre campioni di circa 1 kg ciascuno, in accordo con la UNI EN 12697-1 [N4]. Dopo di che, gli aggregati sono stati sottoposti a setacciatura tramite vibrovaglio, in accordo con la UNI EN 933-1 [N5].

La Figura 9 mostra le curve granulometriche ottenute per le tre ripetizioni. Come si può notare, le curve sono coincidenti, mostrando l'affidabilità dei risultati.





**Figura 9.** Risultati delle analisi granulometriche sugli aggregati estratti dal CB

Nella Tabella 1 vengono riportati i valori medi dei passanti percentuali ad ogni setaccio della serie utilizzata. Dai risultati si evince che la dimensione massima dell'aggregato è pari a 6,3 mm, minore della dimensione massima dettata dalla Norma (10 mm).

Setaccio (mm)	10	6,3	4	2	0,5	0,25	0,063
Passante (%)	100	99,5	74,3	36,2	14,5	12,7	7,5

**Tabella 1.** Valori medi dei passanti percentuali

### *Il bitume*

Dai risultati ottenuti dalle estrazioni si è attestato che la percentuale di bitume rispetto all'aggregato è pari al  $5,3 \pm 0,2$  %, di poco minore rispetto alla quantità minima richiesta dalla Norma (6 %). Il bitume impiegato è un bitume vergine con classe di penetrazione 50/70 e nella Tabella 2 sono riportate le proprietà dichiarate dal produttore.

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Prestazione</b>	<b>Normativa/Norma armonizzata</b>
Penetrazione a 25 °C	0.1 mm	50÷70	EN 1426 - EN 12591:2009
Punto di rammollimento	°C	46÷54	EN 1426 - EN 12591:2009
Indice di penetrazione	--	-1.5÷0.7	Annex A EN 12591:2009
Penetrazione residua	%	≥50	EN 1426 - EN 12591:2009
Aumento del rammollimento dopo RTFOT	°C	≤11	EN 1427 - EN 12591:2009

**Tabella 2.** Proprietà del bitume dichiarate dal produttore

Il conglomerato è stato prodotto a 170 °C e compattato alla temperatura di 160 °C coerentemente con la temperatura richiesta dalla Norma.

### **3.1.3. Sistemi impermeabilizzanti**

#### *Resina Bicomponente*

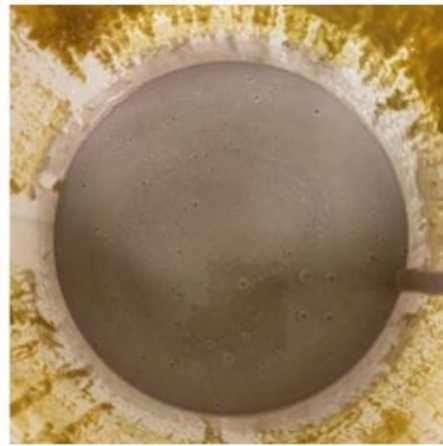
La Resina Bicomponente è un rivestimento bicomponente elastico anticorrosivo senza solventi. È un formulato a base di resine epossidiche modificate con resine epossipoliamicidiche elastiche e bitumi sintetici non tossici. La sua natura chimica e le sue prestazioni sono state studiate per l'impermeabilizzazione del calcestruzzo anche preliminarmente alla realizzazione di manti bituminosi posti a caldo. Rispetto a materiali simili già presenti sul mercato, l'utilizzo della Resina Bicomponente ha lo scopo di garantire degli interventi di impermeabilizzazione in modalità "apri e chiudi" in notturno grazie ad un rapido indurimento.

La Resina Bicomponente è composta da due componenti, chiamate A e B, il cui rapporto in peso o in volume è 1:1. Come mostrato in figura, la componente A ha un colore grigio scuro, mentre la componente B è un materiale bifase, il quale necessita di una accurata miscelazione fino ad ottenere un colore simile al grigio chiaro. In sito, la Resina Bicomponente, viene solitamente applicata a

spruzzo mediante un'apparecchiatura chiamata macchina bicomponente volumetrica, mentre in laboratorio può anche essere applicata a pennello.



(a)



(b)

**Figura 10.** Componenti A e B della Resina Bicomponente

Le caratteristiche tecniche fornite dal produttore indicano che:

- La densità delle due componenti A e B miscelate è di  $1460 \text{ kg/m}^3$ ;
- La viscosità è pari a  $7800 \text{ mPas}$  (riferita a test condotti a  $10 \text{ giri/minuto}$ , Spindle RH5);
- Il tempo di lavorabilità (Pot Life) è pari a  $20 \div 25$  minuti;
- Lo spessore del prodotto steso deve essere di  $2 \div 4 \text{ mm}$ ;
- Il tempo di fuori polvere è pari a  $40 \div 60$  minuti;
- Gli strati successivi possono essere applicati dopo un minimo di  $180$  minuti.

Sullo strato di Resina Bicomponente fresca, può essere prevista l'applicazione di uno spolvero con quarzo  $0,8 \div 1,2 \text{ mm}$  in ragione di circa  $3 \text{ kg/m}^2$ . Il quarzo serve a fare uno spolvero a rifiuto al fine di garantire una migliore adesione con gli strati successivi. Una volta che il prodotto è indurito si dovrà aspirare via la quota parte di quarzo in eccesso e non correttamente ancorata.

Due fustini da  $20 \text{ kg}$  di materiale l'uno, uno per ogni componente e prodotti ad aprile 2022, sono stati recapitati nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche dove sono stati stoccati a temperatura ambiente in un luogo fresco e asciutto.

### *Geotessuto e Bitume*

Tale sistema impermeabilizzante è composto da due componenti: un bitume super hard modificato con elastomeri SBS-R (stirolobutadiene-stirololo-radicalo) e un “tessuto non tessuto” in poliestere caratterizzato da uno spessore di 1,4 mm.

I due materiali combinati tra loro danno luogo ad uno strato impermeabilizzante da realizzare direttamente in sito. Si realizza un primo strato di bitume super hard, si applica il tessuto non tessuto e di conseguenza si stende una seconda mano di bitume super hard. Infine, si termina con uno spolvero di sabbia calcarea 0/3.

Nelle Tabelle 3 e 4 vengono riportate le caratteristiche tecniche del “tessuto non tessuto” e del bitume fornite dal produttore.

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Prestazione</b>	<b>Normativa</b>
Massa areica	g/m <sup>2</sup>	200	EN 965
Spessore	mm	1,4	EN 964-1
Resistenza a trazione	kN/m	MD 5.5 (-1) CMD 6.5 T (-1)	UNI EN ISO 10319
Allungamento	%	MD 50 L (+/-30%) CMD 70 (+/-30%)	UNI EN ISO 10319
Punzonamento	kN	0,85 (-0,15)	UNI EN ISO 12236
Permeabilità	m/s	0,10 (-0,03)	UNI EN ISO 11058
Punto di fusione	°C	240	

**Tabella 3.** Caratteristiche del Geotessuto

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Prestazione</b>	<b>Normativa</b>
Penetrazione a 25°C	dmm	50-70	EN 1426
Punto di rammollimento	°C	70-80	EN 1427
Punto di rottura Fraass	°C	<-16	EN 12593
Ritorno elastico a 25°C	%	>90	EN 13398
Energia di coesione	J/cm <sup>2</sup>	>3	EN 13703
Viscosità dinamica a 160°C	Pa s	0,4 – 0,7	EN 13302
Punto di infiammabilità	°C	>250	EN ISO 2592
Indice di penetrazione		>+3	
Penetrazione a 25°C residua (RTFOT)	%	>60	EN 1426
Differenza punto di rammollimento	°C	<8	EN 1427

**Tabella 4.** Caratteristiche del Bitume

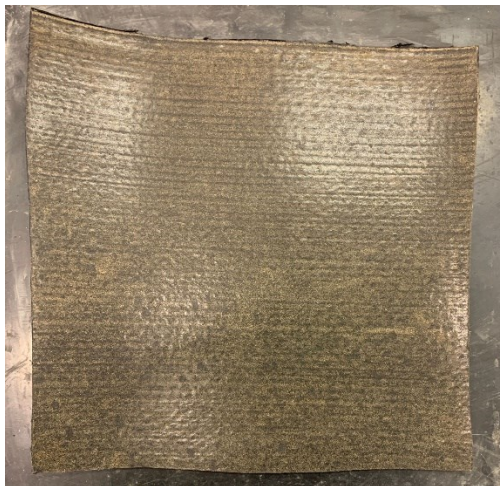
#### *Geocomposito A*

Il geocomposito è una membrana con mescola elastoplastomerica ottenuta dalla modifica di bitume distillato con poliolefine e copolimeri selezionati, che si caratterizza per la buona flessibilità alle basse temperature, l'elevata adesività e la resistenza all'invecchiamento ai raggi UV. Il compound ad elevato contenuto di polimeri garantisce la tenuta nel tempo delle sormonte e assicura una posa facile con risultati di qualità. La particolare combinazione di mescola e armatura rende il Geocomposito un prodotto specifico per le applicazioni in cui diventa critica la resistenza dell'elemento di tenuta a sollecitazioni di tipo statico e dinamico, condizione che si realizza nell'impermeabilizzazione di opere idrauliche, stradali, ponti o superfici trafficabili in genere. L'armatura in poliestere a filo continuo ad alta grammatura conferisce alla membrana ottime caratteristiche dinamometriche, elevata resistenza ai carichi statici e dinamici e buona stabilità dimensionale. Il Geocomposito ha uno spessore di 5 mm ed è fornito in rotoli di dimensioni 1 x 7,5 m (altezza x lunghezza).

Il Geocomposito è idoneo per l'applicazione diretta al di sotto del conglomerato bituminoso steso a caldo. Si applica di norma mediante fiamma previa accurata preparazione della superficie in

calcestruzzo armato opportunamente pulita e livellata mediante fissativo bituminoso (primer) in quantità di circa 300 g/m<sup>2</sup>.

Nella Figura 11 è riportata la superficie superiore del Geocomposito A.



**Figura 11.** Geocomposito A

Nella Tabella 5 vengono riportate le caratteristiche meccaniche e termiche per l'impermeabilizzazione sotto superfici soggette a traffico dichiarate dal produttore.

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Prestazione</b>	<b>Normativa</b>
Resistenza a trazione L/T (carico max)	N/5 cm	1200/1000	EN 12311-1
Allungamento a rottura L/T	%	50/50	EN 12311-1
Resistenza al punzonamento statico	kg	25	EN 12730 B
Resistenza al punzonamento dinamico	mm	1500	EN 12730 A
Assorbimento d'acqua	%	1,5	EN 14223
Flessibilità alle basse temperature	°C	-15	EN 1109
Resistenza ad elevate temperature	°C	140	EN 1110
Stabilità dimensionale	%	0,5	EN 1107-1
Forza di coesione	N/mm <sup>2</sup>	0,4	EN 13596
Resistenza al taglio	N/mm <sup>2</sup>	0,2	EN 13653
Fessurazione impalcato	°C	-10	EN 14224
Compatibilità con il calore di condizionamento	%	90	EN 14691
Impermeabilità all'acqua	kPa	250	EN 1928 B

**Tabella 5.** Caratteristiche meccaniche e termiche del Geocomposito A

Un rotolo di Geocomposito è stato recapitato nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche dove è stato stoccato a temperatura ambiente in un luogo fresco e asciutto.

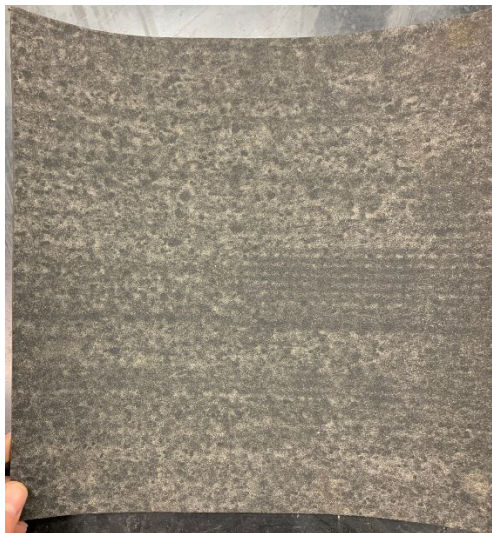
### *Geocomposito B*

Il Geocomposito è una membrana con miscela speciale, ottenuta dalla modifica di bitume distillato con una combinazione di polimeri a base SBS (Stirene-Butadiene-Stirene) e copolimeri termoplastici. Lo speciale compound rende la membrana estremamente elastica, molto flessibile alle basse temperature, resistente al calore ed all'invecchiamento termico oltre che particolarmente adesiva. Queste caratteristiche rendono il Geocomposito un prodotto molto versatile, adatto ad essere utilizzato sia alle basse che alle alte temperature, in quei climi in cui l'escursione termica può

mettere a dura prova il manto impermeabile. Il Geocomposito è una membrana progettata per applicazioni specifiche in cui la resistenza dello strato impermeabile a forze statiche e dinamiche diventa un fattore critico, come nel caso di lavori di ingegneria stradale e di superfici carrabili in generale. L'armatura in poliestere a filo continuo ad alta grammatura conferisce alla membrana buone caratteristiche dinamometriche, elevata resistenza ai carichi statici e dinamici e buona stabilità dimensionale. Il Geocomposito ha uno spessore di 5 mm ed è fornito in rotoli di dimensioni 1 x 7,5 m (altezza x lunghezza).

Il Geocomposito è idoneo per l'applicazione diretta al di sotto del conglomerato bituminoso steso a caldo. Si applica di norma mediante fiamma previa accurata preparazione della superficie in calcestruzzo armato opportunamente pulita e livellata mediante fissativo bituminoso (primer) in quantità di circa 300 g/m<sup>2</sup>.

Nella Figura 12 è riportata la superficie superiore del Geocomposito B.



**Figura 12.** Geocomposito B



Nella tabella 6 vengono riportate le caratteristiche meccaniche e termiche per l'impermeabilizzazione sotto superfici soggette a traffico dichiarate dal produttore.

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Prestazione</b>	<b>Normativa</b>
Resistenza a trazione L/T (carico max)	N/5 cm	1200/1000	EN 12311-1
Allungamento a rottura L/T	%	50/50	EN 12311-1
Resistenza al punzonamento statico	kg	25	EN 12730 B
Resistenza al punzonamento dinamico	mm	1500	EN 12730 A
Assorbimento d'acqua	%	1,5	EN 14223
Flessibilità alle basse temperature	°C	-20	EN 1109
Resistenza ad elevate temperature	°C	100	EN 1110
Stabilità dimensionale	%	0,5	EN 1107-1
Forza di coesione	N/mm <sup>2</sup>	0,4	EN 13596
Resistenza al taglio	N/mm <sup>2</sup>	0,2	EN 13653
Fessurazione impalcato	°C	-10	EN 14224
Compatibilità con il calore di condizionamento	%	90	EN 14691
Impermeabilità all'acqua	kPa	250	EN 1928 B

**Tabella 6.** Caratteristiche meccaniche del Geocomposito B

Un rotolo di Geocomposito è stato recapitato nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche dove è stato stoccato a temperatura ambiente in un luogo fresco e asciutto.

### *Geocomposito C*

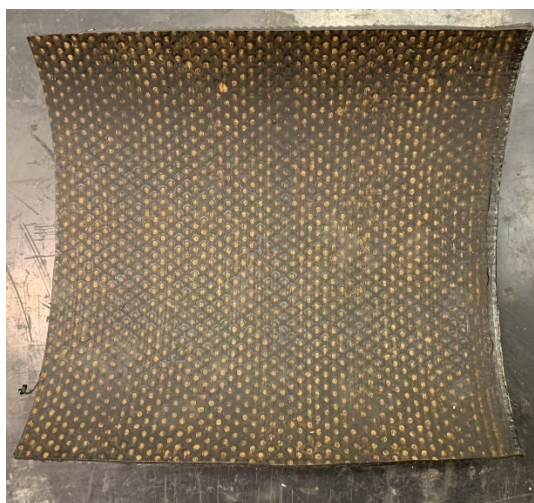
Il Geocomposito è una membrana armata con “tessuto non tessuto” di alta grammatura in poliestere da filo continuo isotropo, termofissato, caratterizzato da elevatissima resistenza meccanica, notevole allungamento a rottura, ottima resistenza al punzonamento e alla perforazione. Il “tessuto non tessuto” è immerso in uno strato di bitume distillato additivato con un alto tenore di polimeri elastomerici e plastomerici tali da ottenere una lega ad “inversione di fase” la cui fase continua è

formata dal polimero nel quale è disperso il bitume, dove le caratteristiche sono determinate dalla matrice polimerica e non dal bitume. Le prestazioni del bitume vengono pertanto incrementate e risulta migliorata la durabilità e la resistenza alle basse e alle alte temperature. L'elevatissima resistenza al punzonamento caratterizza le grandi prestazioni del Geocomposito che è particolarmente indicato per l'impermeabilizzazione di opere di genio civile per le quali la resistenza meccanica è la caratteristica principale (impalcati da ponte, gallerie, opere idrauliche).

Il Geocomposito ha la faccia superiore rivestita con talco fine serigrafato, omogeneamente distribuito, studiato per promuovere l'aderenza con lo strato successivo di conglomerato bituminoso. La faccia inferiore è rivestita con un film plastico fusibile. Il Geocomposito ha uno spessore di 5 mm e viene fornito in rotoli di dimensioni 1 x 10 m (altezza x lunghezza).

L'applicazione della membrana viene eseguita a fiamma. Il raggiungimento del giusto grado di scioglimento della faccia inferiore, idoneo per l'applicazione, è segnalato dalla groffatura che diventa liscia e dalla superficie che diventa lucida.

Nella Figura 13 è riportata la superficie superiore del Geocomposito C.



**Figura 13.** Geocomposito C

Nella Tabella 7 vengono riportate le caratteristiche meccaniche e termiche per l'impermeabilizzazione sotto superfici soggette a traffico dichiarate dal produttore.

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Prestazione</b>	<b>Normativa</b>
Impermeabilità	kPa	500	EN 1928-B
Res. al distacco delle giunzioni	N/50 mm	50/100	EN 12316-1
Res. a trazione delle giunzioni L/T	N/50 mm	900/800	EN 12317-1
Forza a trazione massima L/T	N/50 mm	1300/1100	EN 12311-1
Allungamento a trazione L/T	%	50/50	EN 12311-1
Res. al punzonamento dinamico	Mm	1500-1750	EN 12691-A
Res. al punzonamento statico	kg	30	EN 12730-B
Res. alla lacerazione con chiodo L/T	N	250/250	EN 12310-1
Stabilità dimensionale L/T	%	0,5	EN 1107-1
Flessibilità a freddo dopo invecchiamento	°C	-15	EN 1109
Res. allo scorr. ad alte temp. dopo invecchiamento	°C °C	140 130	EN 1110 EN 1296-110
<b>Caratteristiche specifiche per l'impermeabilizzazione sotto superfici soggette a traffico (EN 14695)</b>			
Impermeabilità dinamica	kPa	≥500	EN 14694
Comp. Per condiz. Termico	%	≥80	EN 14691
Forza di adesione	N/mm <sup>2</sup>	≥0.4	EN 13596
Resistenza allo sforzo di taglio	N/mm <sup>2</sup>	≥0.30	EN 13653
Resistenza alla compattazione	-	Supera	EN 14692
Res. alla fessurazione-Tipo 1	°C	≥-20	EN 14224
Res. alla fessurazione-Tipo 3	°C	≥-20	EN 14224
Assorbimento d'acqua	%	≤0.5	EN 14223
Comportamento sotto asfalto colato	-	Supera	EN 14693

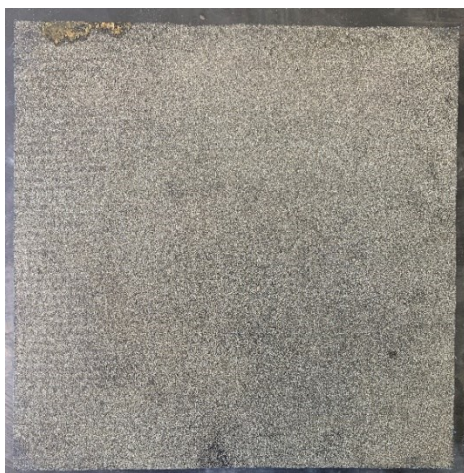
**Tabella 7.** Caratteristiche meccaniche e termiche del Geocomposito C

Un rotolo di Geocomposito è stato recapitato nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche dove è stato stoccato a temperatura ambiente in un luogo fresco e asciutto.

## *Geocomposito D*

Il Geocomposito è una membrana armata con “tessuto non tessuto” di alta grammatura in poliestere da filo continuo isotropo che conferisce elevate proprietà meccaniche in termini di resistenza, allungamento a rottura, resistenza al punzonamento e alla perforazione. Il “tessuto non tessuto” è immerso in uno strato di bitume distillato additivato con un alto tenore di polimeri elastomerici e plastomerici. Il tenore degli additivi è così elevato tale da ottenere una lega ad “inversione di fase”: la fase continua è formata da polimero, che quindi ne determina le proprietà, nel quale è disperso il bitume.

Il Geocomposito ha uno spessore di 5 mm e viene fornito in rotoli di dimensioni 1 x 10 metri (altezza x lunghezza). La faccia superiore è rivestita con talco fine serigrafato, omogeneamente distribuito, studiato per agevolare lo svolgimento delle spire dei rotoli e per promuovere l’aderenza con lo strato successivo di conglomerato bituminoso. La faccia inferiore, invece, è rivestita con un film plastico fusibile groffata per aumentare la superficie soggetta alla fiamma e quindi una posa più veloce e sicura. Nella Figura 14 viene riportata la superficie superiore del Geocomposito D.



**Figura 14.** Superficie superiore del Geocomposito D

L’applicazione della membrana viene eseguita a fiamma. Il raggiungimento del giusto grado di scioglimento della faccia inferiore, idoneo per l’applicazione, è segnalato dalla groffatura che diventa liscia e dalla superficie che diventa lucida.

La Tabella 8 riassume le caratteristiche meccaniche, termiche e specifiche per l’impermeabilizzazione sotto superfici soggette a traffico dichiarate dal produttore.

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Prestazione</b>	<b>Normativa</b>
Impermeabilità	kPa	60	EN 1928-B
Res. al distacco delle giunzioni	N/50 mm	50/100	EN 12316-1
Res. a trazione delle giunzioni L/T	N/50 mm	750/600	EN 12317-1
Forza a trazione massima L/T	N/50 mm	850/700	EN 12311-1
Allungamento a trazione L/T	%	50/50	EN 12311-1
Res. al punzonamento dinamico	Mm	1250-1500	EN 12691-A
Res. al punzonamento statico	kg kg	20/25 25/30	EN 12730-A EN 12730-B
Res. alla lacerazione con chiodo L/T	N	200/250	EN 12310-1
Stabilità dimensionale L/T	%	-0.5/+0.3	EN 1107-1
Flessibilità a freddo dopo invecchiamento	°C °C	-15 -5	EN 1109 EN 1296-1109
Res. allo scorr. ad alte temp. dopo invecchiamento	°C °C	130 120	EN 1110 EN 1296-110
Resistenza ai raggi U.V.	-	Supera	EN 1297
Euroclasse di reazione al fuoco	-	E	EN 13501-1
Comportamento al fuoco esterno	-	F roof	EN 13501-5
<b>Caratteristiche termiche</b>			
Conduttività termica	W/mK	0.2	-
Capacità termica	KJ/K	6.5	-
<b>Caratteristiche specifiche per l'impermeabilizzazione sotto superfici soggette a traffico (EN 14695)</b>			
Impermeabilità dinamica	kPa	≥500	EN 14694
Comp. Per condiz. Termico	%	≥80	EN 14691
Forza di adesione	N/mm <sup>2</sup>	≥0.4	EN 13596
Resistenza allo sforzo di taglio	N/mm <sup>2</sup>	≥0.30	EN 13653
Resistenza alla compattazione	-	Supera	EN 14692
Res. alla fessurazione-Tipo 1	°C	≥-20	EN 14224
Res. alla fessurazione-Tipo 3	°C	≥-20	EN 14224
Assorbimento d'acqua	%	≤0.5	EN 14223
Comportamento sotto asfalto colato	-	Supera	EN 14693

**Tabella 8.** Caratteristiche meccaniche e termiche del Geocomposito D

Un rotolo di Geocomposito è stato recapitato nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche dove è stato stoccato a temperatura ambiente in un luogo fresco e asciutto.

### *Primer Bituminoso*

Come richiesto dai produttori dei Geocompositi, al fine di promuovere l'adesione del Geocomposito (A, B, C e D) con la superficie del calcestruzzo, questo deve essere trattato mediante l'applicazione di un primer bituminoso. Il primer bituminoso a rapida essiccazione è composto da una miscela di bitumi e solventi puri, esente da solventi tossici o narcotici, di consistenza liquida. Ha un ottimo potere penetrante, aggrappante e consolidante nei confronti del calcestruzzo, con lo scopo di bloccare le polverosità e le porosità presenti sulla superficie, nonché di promuovere l'adesione delle membrane bitume-polimero. Solitamente è raccomandato per superfici in calcestruzzo asciutte ma può essere utilizzato anche in caso di superfici bagnate.

L'applicazione del primer bituminoso può essere eseguita con spazzolone, pennello, rullo o spruzzo alla temperatura consigliata di 5÷35 °C.

I primer utilizzati nella sperimentazione sono stati due, denominati primer 1 e primer 2: il primer 1 è stato utilizzato con i Geocompositi C e D mentre il primer 2 è stato utilizzato con i Geocompositi A e B. Nella Tabella 9 sono riportati i valori delle principali caratteristiche dei due primer bituminosi in oggetto.

<b>Caratteristica</b>	<b>U.d.m.</b>	<b>Primer 1-C, D</b>	<b>Primer 2-A, B</b>
Densità a 20 °C	kg/l	1 ± 0,1	0,95 ± 0,03
Residuo secco a 130 °C	%	55 ± 5	50 ± 3
Viscosità a 20 °C	sec	25-35	17-23
Punto d'infiammabilità a vaso chiuso	°C	23	23
Consumo in relazione al supporto	g/m <sup>2</sup>	100	250
Tempo di essiccazione al tatto	min	15-45	90-120
Temperatura di applicazione	°C	5-35	5-30

**Tabella 9.** Caratteristiche dei Primer bituminosi

## **3.2. Confezionamento dei provini**

In questo capitolo vengono descritte le procedure che sono state adottate per realizzare le lastre dalle quali sono stati successivamente ricavati i provini da testare. Per lastra si intende il sistema composto dalla piastra in calcestruzzo, dal materiale impermeabilizzante e dal conglomerato bituminoso.

### **3.2.1. Piastre in calcestruzzo**

Sono state prodotte, come mostrato nella Figura 15, un totale di 72 piastre di calcestruzzo ottenute con due getti differenti. L'altezza di 4 cm è dettata dalla norma UNI EN 13375 [N1]. Il materiale è stato gettato nei casseri e con l'ausilio di un vibratore per calcestruzzi è stato possibile ottenere un getto con assenza di segregazione di materiale. Successivamente, con l'ausilio di una staggia, è stato eliminato il materiale in eccesso al fine di ottenere uno spessore costante delle piastre pari a 4 cm. Per una corretta idratazione del calcestruzzo, le piastre sono state coperte da un telo impermeabile in poliestere. La rimozione del telo e lo scassero delle piastre sono stati eseguiti dopo 10 giorni.

A scassero avvenuto, le piastre ottenute con il primo getto di calcestruzzo sono state trasportate e stoccate nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche. Ad ogni piastra è stato assegnato un numero progressivo da 1 a 36. Lo stesso discorso vale anche per le piastre ottenute con il secondo getto.

Per l'utilizzo delle piastre sono stati attesi 28 giorni, necessari al calcestruzzo per il raggiungimento della totale resistenza a compressione nominale pari a  $42,5 \text{ N/mm}^2$ .



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 15.** Procedura di produzione delle piastre in calcestruzzo: (a) realizzazione dei casseri, (b) getto del calcestruzzo, (c) livellamento con staggia, (d) copertura con telo impermeabile

### *Misura della macrotessitura*

La Norma UNI EN 13375 [N1] sopracitata richiede, inoltre, che la superficie di calcestruzzo sulla quale va applicato il sistema impermeabilizzante abbia una macrotessitura compresa tra 0,5 mm e 1,0 mm, misurata con il metodo dell'altezza in sabbia in accordo con la UNI EN 13036-1 [N6]. Nel caso in cui la macrotessitura non dovesse risultare idonea si deve ricorrere ad una sabbiatura artificiale.

L'attrezzatura necessaria per la determinazione dell'altezza in sabbia è composta da un contenitore cilindrico di volume pari a 25 ml, da sfere di vetro, da un disco rigido piatto di 25 mm di spessore e 60 mm di diametro e da un righello con precisione del millimetro. La misurazione è stata eseguita



sulla superficie di dimensioni 30 x 30 cm<sup>2</sup> di ognuna delle 36 + 36 piastre in calcestruzzo. La procedura che è stata adottata può essere riassunta nelle seguenti fasi:

1. Si pulisce in maniera accurata la superficie della piastra con aria compressa;
2. Si riempie il cilindro di sfere di vetro, si danno tre colpi affinché le sfere si compattino, poi si riempie nuovamente e si livella. In questo modo il volume di sfere di vetro utilizzate è fisso;
3. Si versano le sfere di vetro al centro della superficie della piastra;
4. Si distribuisce, con l'ausilio del disco rigido, il materiale formando un'impronta il più possibile circolare applicando una leggera pressione. In questo modo le sfere di vetro saturano la porosità superficiale;
5. Si misurano due diametri dell'area circolare coperta dal materiale.

Il valore di altezza in sabbia è definito con l'indice Mean Texture Depth (MTD) espresso in mm:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$$

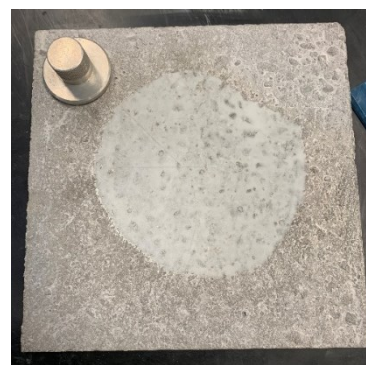
In cui:

- V è il volume delle sfere di vetro espresso in mm<sup>3</sup>, pari a 25000 mm<sup>3</sup>;
- D è la media dei due diametri misurati.

Nella Figura 16 viene riportata la strumentazione necessaria ad eseguire la misura della macrorugosità e la forma circolare ottenuta dopo l'esecuzione della procedura.



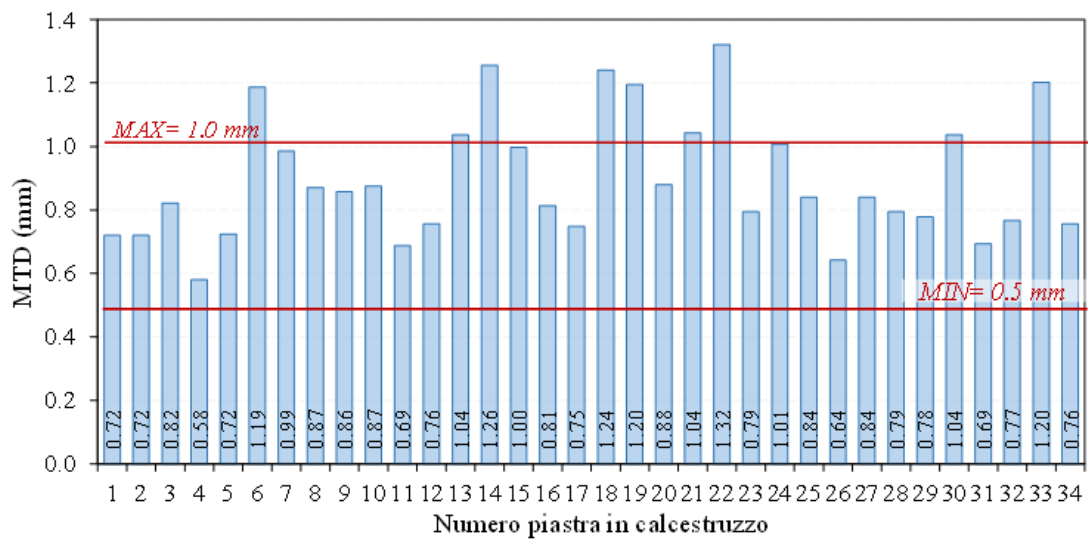
(a)



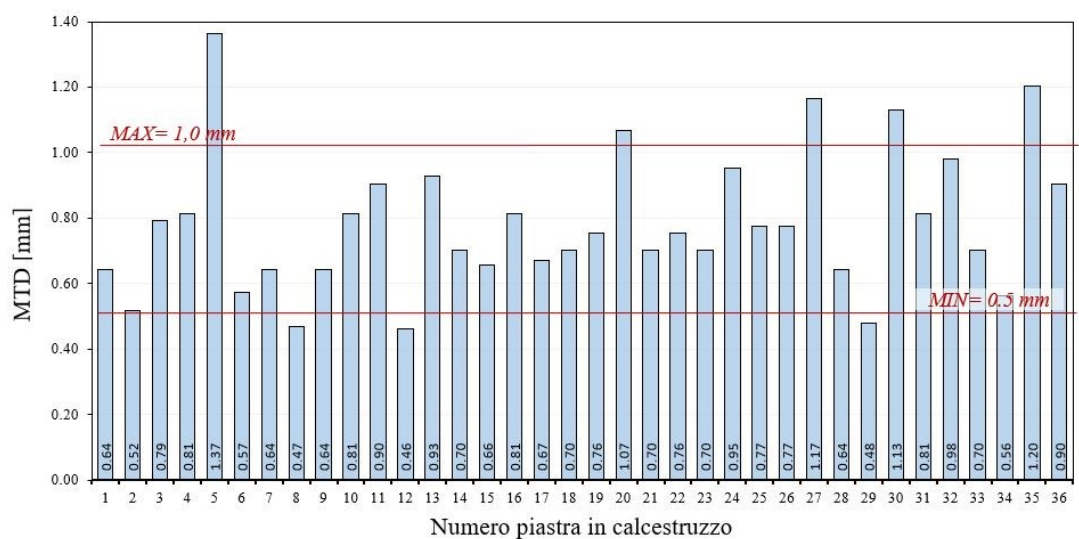
(b)

**Figura 16.** Strumentazione per la misura della macrorugosità

Nelle Figure 17 e 18 vengono riportati i risultati dell'altezza in sabbia per ognuna delle piastre. Nella stessa figura, sono evidenziati i limiti massimo e minimo richiesti dalla UNI EN 13375 [N1], rispettivamente pari a 1,0 mm e 0,5 mm. Come si può osservare, l'altezza in sabbia minima è soddisfatta per tutte le piastre realizzate nel primo getto mentre non vale lo stesso per il secondo getto; l'altezza in sabbia massima, invece, è soddisfatta per 25 piastre nel caso del primo getto e per 28 piastre nel caso del secondo getto. Le piastre che non ricadevano all'interno dell'intervallo stabilito dalla norma non sono state utilizzate.



**Figura 17.** Valori MTD caratteristici del primo getto



**Figura 18.** Valori MTD caratteristici del secondo getto

### 3.2.2. Messa in opera del sistema di impermeabilizzazione

#### *Resina Bicomponente*

Per la preparazione e l'applicazione dello strato di Resina Bicomponente è necessario preparare preventivamente la piastra in calcestruzzo. La piastra viene rivestita con una protezione in carta per evitare che avvenga la fuoriuscita di materiale (Figura 19) e pulita con l'ausilio di aria compressa per eliminare ogni forma di sporco presente sulla superficie.



**Figura 19.** Preparazione piastra in calcestruzzo: realizzazione bordo di carta

Successivamente si procede alla preparazione della Resina Bicomponente: mescolare accuratamente le due componenti A e B (Figura 20 e Figura 21), specialmente la componente B per via della sua composizione bifase, affinché diventi omogenea con un colore grigio chiaro.



**Figura 20.** Componente A correttamente mescolata



**Figura 21.** Componente B correttamente mescolata

La preparazione preliminare delle due componenti è estremamente importante poiché se le stesse non vengono adeguatamente miscelate il composto non indurisce e rimane liquido.

Una volta terminata la fase di preparazione preliminare è possibile andare a miscelare le due componenti A e B in parti uguali (1:1) come specificato dalla scheda tecnica. La scheda tecnica consiglia uno spessore di materiale che va dai 2 ai 4 mm e per garantire l'impermeabilizzazione si è optato per realizzare uno strato da 3 mm. La dose per ottenere questo spessore dello strato è di 200 g di componente A e 200 g di componente B. Le due componenti vengono mescolate per circa 1-2 minuti fino ad ottenere un composto omogeneo di colore grigio scuro.



**Figura 22.** Applicazione della Resina Bicomponente sulla piastra

A questo punto è possibile stendere il composto tramite un pennello (Figura 23), avendo cura di livellare la superficie il più possibile. In questa fase la Resina Bicomponente ha una consistenza piuttosto liquida, quindi, è necessario che la procedura venga eseguita su supporti perfettamente orizzontali (problematica che potrebbe essere non trascurabile in sito in caso di pendenze trasversali o longitudinali della pavimentazione).



(a)



(b)

**Figura 23.** Stesa della Resina Bicomponente

La Resina Bicomponente dopo circa 20 minuti non è più lavorabile, quindi, le operazioni di miscelazione e stesa devono essere eseguite abbastanza rapidamente. Dopo 180 minuti dall'applicazione del materiale è possibile compattare lo strato di conglomerato bituminoso.

Una volta stesa la Resina Bicomponente si può realizzare uno spolvero di sabbia silicea a perdere con una quantità di  $3 \text{ kg/m}^2$  che equivalgono, nel caso in esame, a circa 270 grammi per ogni lastra (Figura 24).

La Resina Bicomponente è stata testata con due differenti tempi di stagionatura: 3 ore e 6 ore. Una volta indurito lo strato di materiale è possibile rimuovere la protezione in carta applicata nella fase iniziale e verificare il corretto spessore dello strato eseguito.

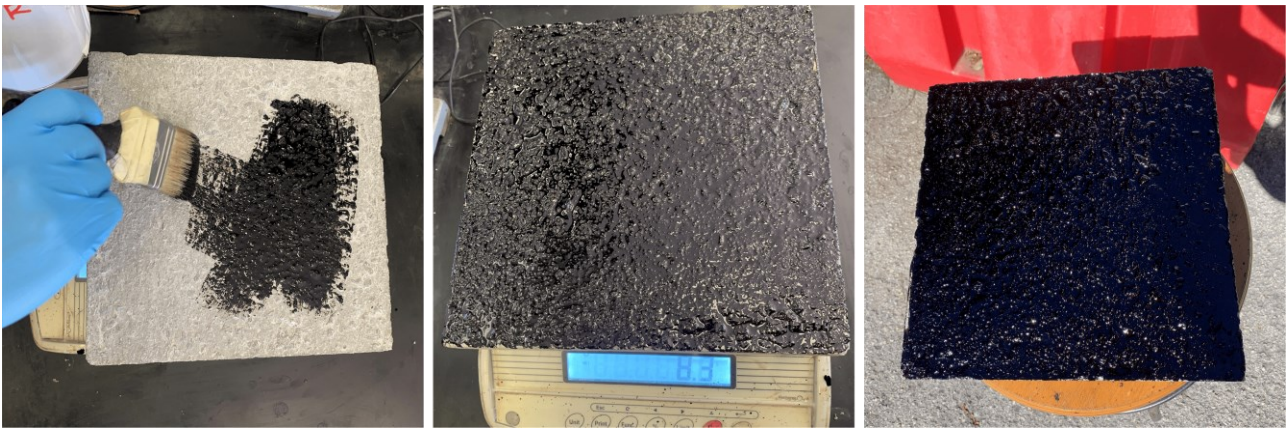


**Figura 24.** Realizzazione dello spolvero

### *Geocomposito applicato a fiamma*

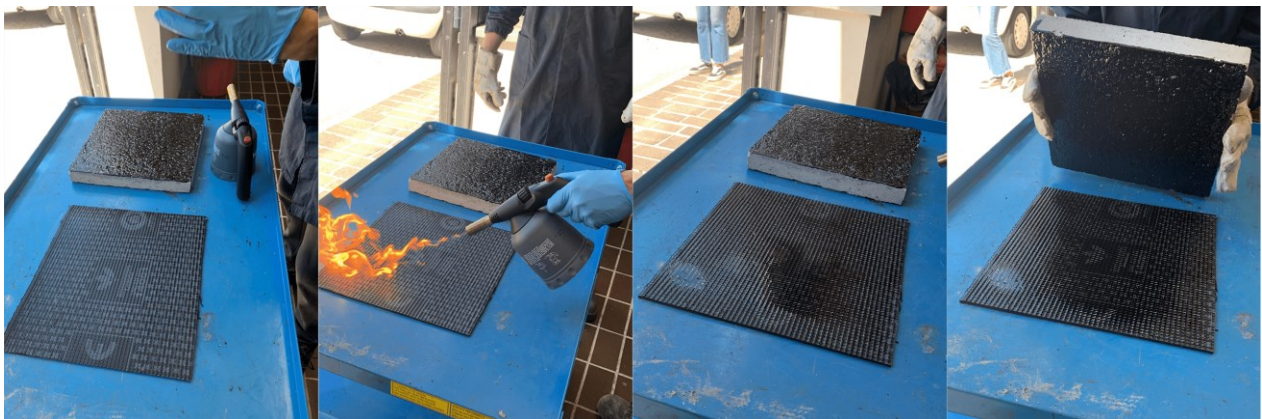
Per la preparazione e l'applicazione del Geocomposito applicato a fiamma è necessario preparare preventivamente la piastra in calcestruzzo andando ad eseguire una pulizia accurata tramite l'ausilio di aria compressa per eliminare ogni forma di sporco presente sulla superficie della piastra stessa. A questo punto, per completare la preparazione, è stato applicato un primer bituminoso con l'ausilio di un pennello sulla superficie della piastra in calcestruzzo (Figura 25). La quantità del prodotto, stabilita dal produttore, è riportata nella scheda tecnica del prodotto e risulta essere pari a  $100 \text{ g/m}^2$  (circa 9 grammi per una piastra  $30 \times 30 \text{ cm}$ ) per quanto riguarda il primer 1 e pari a  $250 \text{ g/m}^2$  (circa

22,5 grammi per una piastra 30 x 30 cm) per quanto riguarda il primer 2. Il primer bituminoso necessita di almeno 60 minuti per asciugare al sole.



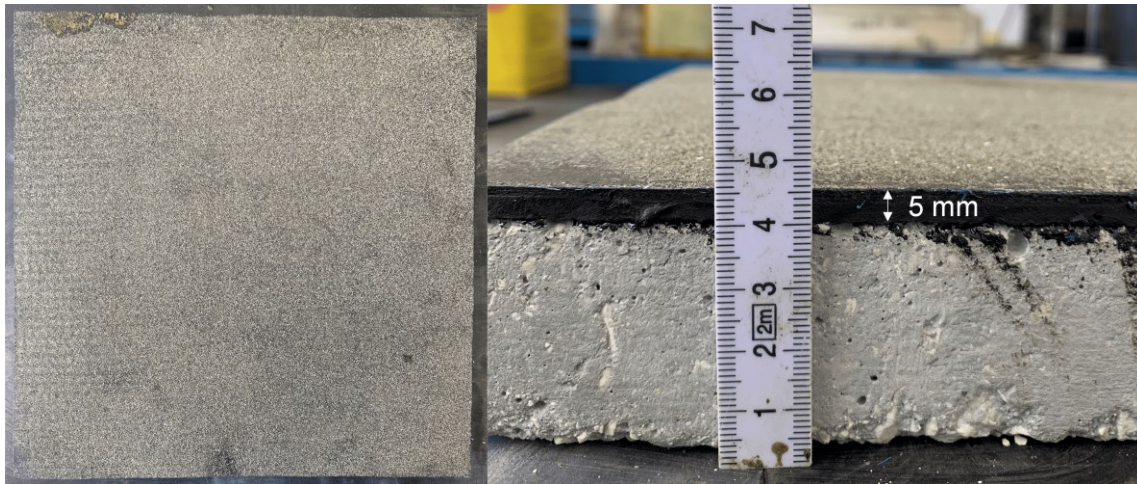
**Figura 25.** Applicazione del primer

Una volta asciugato il primer, è possibile procedere con l'applicazione della membrana. Tramite un bruciatore si scalda la faccia inferiore del Geocomposito, con l'obiettivo di sciogliere il film protettivo che riveste la superficie. Raggiunta tale condizione la superficie risulterà completamente lucida alla vista ed a quel punto è possibile procedere con l'incollaggio della membrana (Figura 26).



**Figura 26.** Applicazione a fiamma della membrana

Al termine del processo di incollaggio è possibile rimuovere il Geocomposito che risulta essere in eccesso dalla piastra in calcestruzzo tramite un taglierino e verificare l'effettivo spessore del sistema piastra-geocomposito (Figura 24).



**Figura 27.** Faccia superiore del Geocomposito e effettivo spessore della piastra con Geocomposito

### *Geotessuto e Bitume*

Per la preparazione e l'applicazione dello strato impermeabilizzante composto dal pacchetto:

- Bitume super hard
- Tessuto non tessuto
- Bitume super hard

è necessario preparare preventivamente la piastra in calcestruzzo. La piastra viene rivestita con una protezione in carta per evitare che avvenga la fuoriuscita di materiale (Figura 28) e pulita con l'ausilio di aria compressa per eliminare ogni forma di sporco presente sulla superficie.





**Figura 28.** Preparazione piastra con bordo di carta

Una volta effettuate le operazioni preliminari si stende il primo strato di bitume super hard preventivamente riscaldato in forno a 190 °C per 3 ore. La quantità di bitume necessaria per il primo strato è pari a 2,5 kg/m<sup>2</sup> (225 grammi per una piastra 30 x 30 cm). La stesa deve risultare il più omogenea possibile e per questo motivo ci si avvale dell'uso di una spatola; tale operazione deve essere effettuata molto velocemente a causa del rapido raffreddamento del bitume. Successivamente viene applicato il “tessuto non tessuto” attraverso l'utilizzo di un rullo gommato accertandosi dell'avvenuta aderenza con lo strato di bitume super hard (Figura 29).



(a)



(b)



(c)

**Figura 29.** Realizzazione geotessuto con bitume: (a) riscaldamento bitume, (b) prima stesa di bitume, (c) applicazione geotessuto

Dopo l'applicazione del "tessuto non tessuto" si procede con la stesa del secondo strato di bitume super hard caratterizzata da una quantità dello stesso pari a  $2 \text{ kg/m}^2$  (180 grammi per una piastra  $30 \times 30 \text{ cm}$ ). Come nel caso precedente, anche in questo caso, la stesa deve risultare il più omogenea possibile. Infine, è necessario effettuare uno spolvero con sabbia calcarea  $0/3 \text{ mm}$  per una quantità pari a  $1 \text{ kg/m}^2$  (90 grammi per una piastra  $30 \times 30 \text{ cm}$ ), il tutto con l'ausilio di un setaccio con aperture pari a  $3 \text{ mm}$  (Figura 30).



**Figura 30.** Esecuzione dello spolvero

Dopo circa un'ora è possibile rimuovere la protezione in carta ed osservare il reale spessore del sistema impermeabilizzante (Figura 31).



**Figura 31.** Effettivo spessore della piastra con geotessuto e bitume

### 3.2.3. Compattazione del conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso, fornito dall'impianto e stoccato presso il Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche all'interno di scatole di cartone, è stato preventivamente preparato: nelle 24 ore antecedenti al suo utilizzo il conglomerato bituminoso è stato messo in forno a circa 160 °C per 3 ore per poi essere depositato su delle lastre in acciaio per favorirne il maneggiamento e il porzionamento. Tre ore prima della fase di compattazione vera e propria il materiale viene messo nuovamente in forno alla temperatura di 160 °C (pari alla temperatura di compattazione).

Per ottenere uno spessore di 4 cm e una percentuale di vuoti target del 5%, per una lastra di dimensioni 30 cm x 30 cm (nella formula è presente 30,5 cm perché in realtà il cassero è leggermente più grande della piastra) e una densità massima della miscela pari a 2,467 g/cm<sup>3</sup>, la quantità di materiale necessaria risulta essere pari a 8720 g di conglomerato bituminoso.

$$\text{Quantità di materiale necessaria} = 30,5 \times 30,5 \times 4 \times 0,95 \times 2,467 = 8720 \text{ g}$$

Prima di procedere con la compattazione è necessario introdurre all'interno del cassero in acciaio la piastra in calcestruzzo con il sistema impermeabilizzante già applicato. Il procedimento consiste nell'appoggiare inizialmente la piastra sulla base del cassero e successivamente nel posizionare le pareti laterali così da completare il cassero in oggetto (Figura 32). Dopo di che, è possibile fissare la base del cassero alle rispettive pareti laterali tramite delle viti specifiche.



**Figura 32.** Inserimento della piastra nel cassero

In accordo con la Norma UNI EN 12697-33 [N7] il Roller Compactor (Figura 33) è l'apparecchiatura usata in laboratorio per compattare il conglomerato bituminoso. Esso simula efficacemente l'addensamento che avviene in sito ad opera dei rulli metallici, tramite passaggi ciclici (avanti ed indietro) di un rullo metallico curvo azionato da un sistema motorizzato ad aria compressa. La qualità del costipamento avviene mediante regolazione delle 4 pressioni ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) settabili attraverso i 4 manometri presenti ne pannello di controllo. In particolare, abbiamo:

- $p_1$  varia tra 0 e 2,5 bar (livello 1);
- $p_2$ ,  $p_3$  e  $p_4$  variano tra 0 e 10 bar (livello 2).

Per completare il settaggio del macchinario deve essere impostata l'altezza finale della lastra desiderata tramite una guida posta sul retro e nello specifico il valore di questa altezza è pari a 8,5 cm per rispettare i vuoti target.

La compattazione avviene in due fasi corrispondenti a due cicli di costipamento:

- Un primo ciclo caratterizzato da una pressione  $p_1$  pari ad 1 bar (Figura 33) e composto da 5 passaggi, simulando una livellazione parziale che avviene in sito;
- Un secondo ciclo caratterizzato da una pressione  $p_2$  pari a 2 bar (Figura 33) composto da 20 passaggi, simulando la compattazione che avviene in sito.



(a)

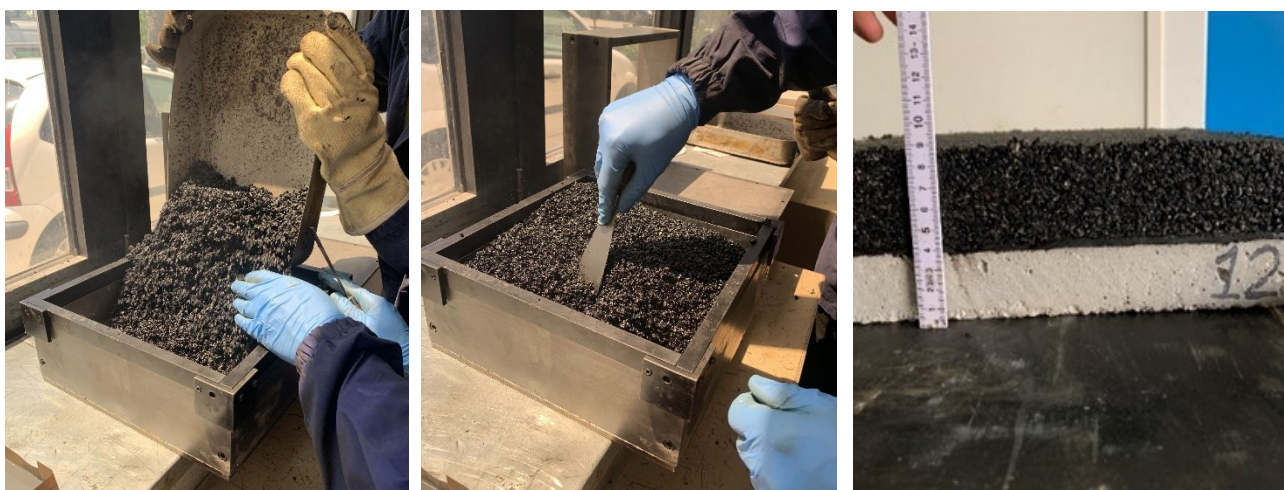


(b)

**Figura 33.** Roller Compactor

Una volta chiuso il cassero in acciaio e una volta inserito il collare si procede nel versare all'interno il conglomerato bituminoso, che si trova alla temperatura di 160 °C, con l'aiuto di una spatola per stendere in maniera più uniforme possibile il materiale (Figura 34). Quando la superficie risulta livellata si posizionano due fogli di carta per evitare che del materiale rimanga incollato sul rullo durante il passaggio. Prima di inserire il cassero all'interno del Roller Compactor si segna, tramite l'apposizione di scotch carta, il verso di compattazione della lastra che nel caso di Geocomposito applicato a fiamma e Geotessuto deve essere parallelo alla direzione longitudinale.

Al termine della compattazione il cassero viene tolto dal macchinario e lasciato raffreddare per circa 24 ore prima di procedere allo smontaggio e quindi allo scassero della lastra. A questo punto è possibile verificare l'effettivo spessore della lastra (Figura 34).



**Figura 34.** Stesa del conglomerato bituminoso e effettivo spessore della lastra

### **3.2.4. Carotaggio dei provini**

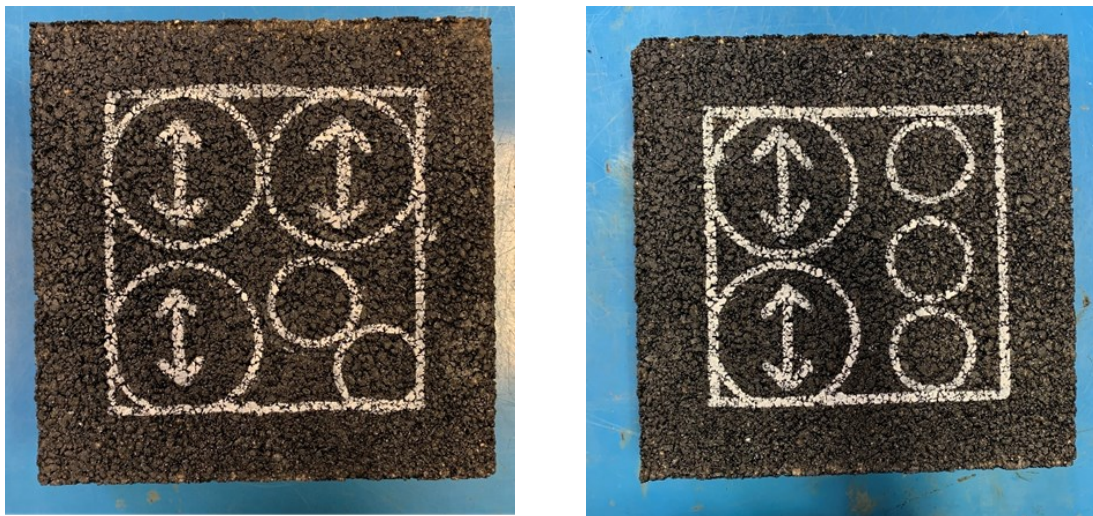
Prima di effettuare l'operazione di carotaggio si procede con la marcatura dei provini sulla superficie di conglomerato bituminoso (Figura 35). Per garantire l'assenza di difetti dovuti al bordo della lastra, la Norma UNI EN 13375 [N1] prescrive di carotare i provini ad una distanza di almeno 50 mm dal bordo. Per mezzo di una carotatrice a corona diamantata, sono state carotate due diverse tipologie di provini:

- Provini con diametro di 100 mm per le prove Leutner;
- Provini con diametro di 50 mm per le prove Pull-Off.

Per quanto riguarda i provini da 100 mm, il carotaggio è avvenuto sull'intero spessore della lastra mentre per quanto riguarda i provini da 50 mm, il carotaggio è avvenuto bloccando la carotatrice ad un'altezza di circa 20 mm dal fondo della lastra. Sono state realizzate due lastre per ogni configurazione e lo schema di carotaggio che è stato adottato è il seguente:

- Da una lastra 3 provini da 100 mm + 2 provini da 50 mm;
- Da una lastra 2 provini da 100 mm + 3 provini da 50 mm

È stato adottato tale schema sulla base delle ripetizioni di prova: sono richieste 5 ripetizioni per ciascuna prova.



**Figura 35.** Marcatura della superficie della lastra

### 3.3. Metodi di prova

Nel presente capitolo vengono descritti i metodi di prova che sono stati adottati per caratterizzare i diversi sistemi di impermeabilizzazione. Nello specifico si parla di prove di taglio diretto e prove di aderenza, per testare rispettivamente la resistenza a taglio dell'impermeabilizzazione e la resistenza a trazione del sistema.

#### 3.3.1. Prova a taglio di tipo Leutner

La prova a taglio di tipo Leutner è una prova di taglio diretto impiegata per la determinazione delle proprietà dell'interfaccia nei sistemi bituminosi multistrato. Prende il nome da R. Leutner ed è regolata dalla Norma UNI EN 12697-48 [N8]. Secondo lo schema di funzionamento, la struttura di base è collegata alla piastra di una pressa che avanza verso l'alto mentre la struttura superiore è messa in contrasto con il telaio di carico. L'apparecchiatura Leutner permette di testare provini bistrato di diametro pari a  $100 \pm 2$  mm.

La procedura di prova consiste nell'applicare una velocità di spostamento all'interfaccia pari a  $50 \pm 2$  mm/min, in assenza di sforzo normale. Inoltre, il provino deve essere orientato in modo tale che la direzione di compattazione del provino sia in accordo con quella dello sforzo di taglio, per simulare le tensioni tangenziali presenti in sito trasmesse dai carichi veicolari. Nella Figura 36 seguente viene riportato uno schema dell'apparecchiatura.

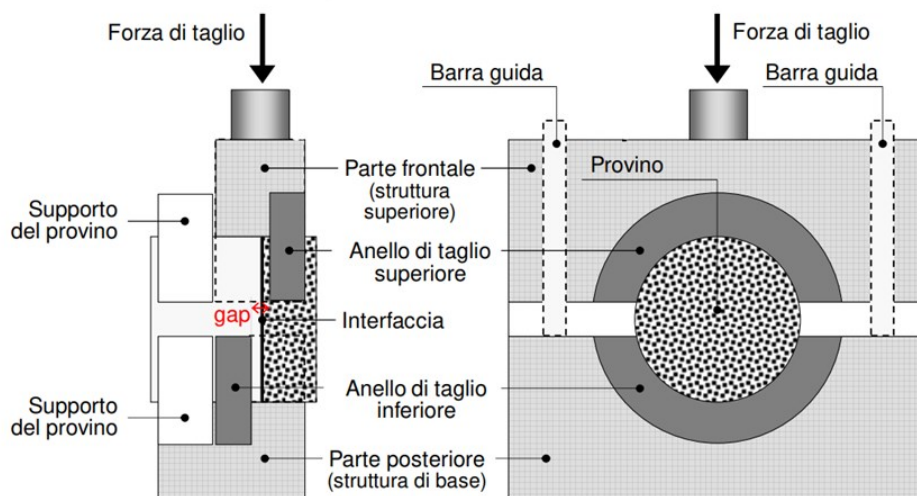


Figura 36. Schema dell'apparecchiatura Leutner

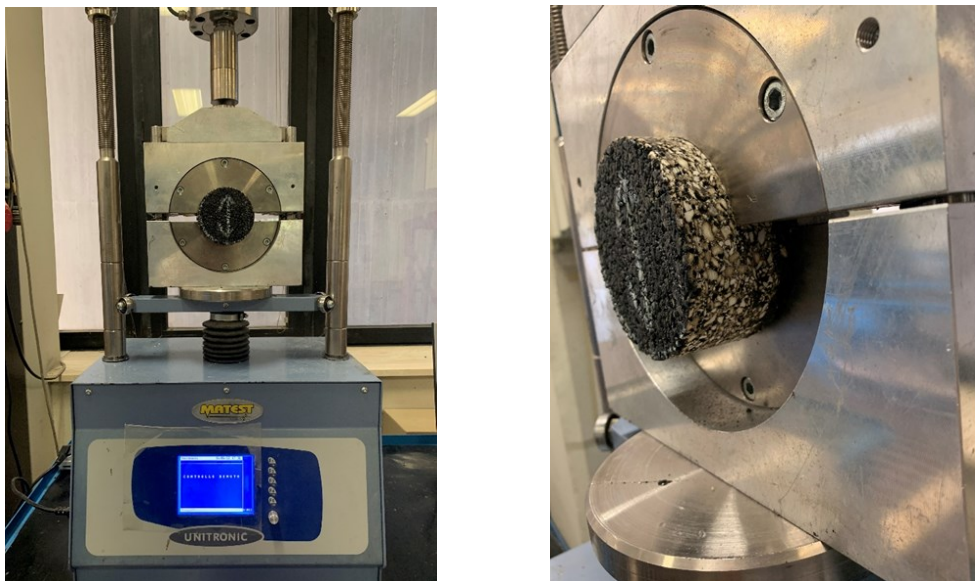
Per ciascun provino, la prova a taglio di tipo Leutner restituisce un file in cui sono riportati, in funzione dello spostamento, i valori della forza di taglio F. Dividendo la forza di taglio F per l'area nominale di contatto all'interfaccia, è possibile ottenere lo sforzo di taglio. È possibile ricavare lo sforzo di taglio massimo  $\tau_{\text{SBT max}}$  in MPa con la seguente formula:

$$\tau_{\text{SBT max}} = \frac{F_{\text{max}}}{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2} \times 1000$$

Dove:

- $F_{\text{max}}$ : forza massima registrata dal macchinario in kN;
- D: diametro del provino in mm.

Nella Figura 37 è rappresentato il macchinario sopra descritto ed in particolare è riportata la direzione di posizionamento del provino.



**Figura 37.** Prove Leutner: configurazione di prova

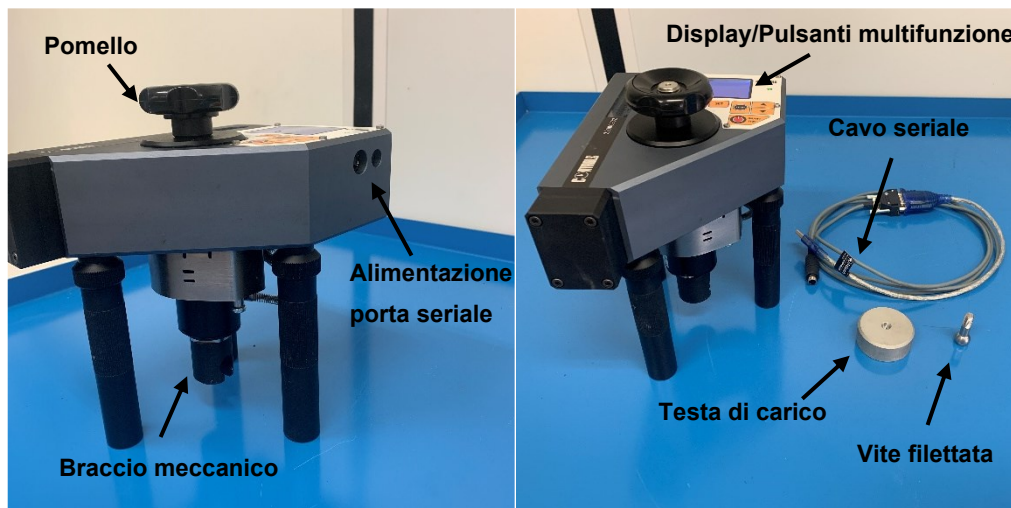
Al termine della prova viene effettuata una valutazione in merito alla superficie di rottura. La rottura può verificarsi all'interfaccia tra sistema impermeabilizzante e calcestruzzo, all'interfaccia tra sistema impermeabilizzante e conglomerato bituminoso oppure nel mezzo del sistema impermeabilizzante.



### 3.3.2. Prova di adesione Pull-Off

La prova di adesione Pull-Off ha come scopo la valutazione della resistenza a trazione del sistema. In accordo con la Norma UNI EN 13596 [N9] è stato utilizzato uno strumento caratterizzato dal controllo della velocità di applicazione della forza e dalla registrazione automatica del carico. Lo strumento, inoltre, deve garantire l'applicazione di uno sforzo di trazione pura impedendo che venga applicato un momento alla base del provino.

L'apparecchiatura è composta da un corpo rigido in metallo che poggia su tre piedi regolabili, da un display e da pulsanti fisici multifunzione necessari per visualizzare e modificare le impostazioni ed i risultati delle prove. Internamente al corpo rigido è presente un motore che permette di alzare e abbassare un braccio meccanico al quale viene agganciato il provino da testare per mezzo di una vite filettata. Il braccio meccanico può essere alzato e abbassato anche manualmente tramite un pomello al fine di facilitare il collegamento iniziale dello stesso con la testa di carico. Lateralmente al corpo rigido è presente una porta seriale che consente lo scambio di dati e di informazioni con un software installato in un pc. Nella Figura 38 sono evidenziate le componenti principali dello strumento appena descritto.



**Figura 38.** Componenti principali dello strumento per la prova di Pull-Off

L'incollaggio della testa di carico con il provino avviene per mezzo di una colla epossidica che raggiunge la massima resistenza a trazione dopo un giorno. Al fine di evitare l'insorgere di momenti

flettenti sul provino durante la prova, l'incollaggio deve garantire anche una corretta planarità della testa di carico.

Secondo la Norma di riferimento, la prova andrebbe eseguita ad una temperatura di 23 °C, ma è stato optato per 20 °C così da avere un riscontro con la prova a taglio di tipo Leutner. I provini prima di essere testati sono stati condizionati in camera climatica alla stessa temperatura di prova per 24 ore. La prova è stata effettuata a temperatura controllata all'interno di una camera climatica capace di ospitare un operatore.

Per quanto riguarda l'esecuzione della prova di Pull-Off, una volta che lo strumento è stato collegato alla testa di carico per mezzo della vite filettata, deve essere applicata una pretensione pari a 0,04 kN prima di iniziare il test. Durante la prova, la testa di carico viene tirata con uno sforzo crescente al fine di garantire una tensione costante di trazione pari a 0,15 N/s mm<sup>2</sup> applicata al provino. Dallo strumento vengono registrati sia il carico massimo applicato che lo sforzo. La prova termina quando lo strumento registra il massimo carico applicato e, a seconda delle impostazioni scelte, è possibile interrompere la prova manualmente oppure far proseguire la prova fino a raggiungere il fine corsa dello strumento.

Nella Figura 39 sono riportate alcune immagini che illustrano la testa di carico, la vite filettata e un esempio di display dello strumento dopo una prova.



**Figura 39.** Fasi della prova di Pull-Off

Al termine della prova viene effettuata una valutazione in merito alla superficie di rottura. La rottura può verificarsi all'interfaccia tra sistema impermeabilizzante e calcestruzzo, all'interfaccia tra sistema impermeabilizzante e conglomerato bituminoso oppure nel mezzo del sistema impermeabilizzante. La superficie di rottura rappresenta la superficie con la minima adesione.

### 3.4. Condizionamento delle piastre

Nella presente sperimentazione è stato eseguito il condizionamento delle piastre in calcestruzzo (prima di essere utilizzate) secondo due diversi tipi: la condizione asciutta (dry) e la condizione umida (wet). Per garantire una condizione umida ideale, le piastre in calcestruzzo sono state immerse in acqua per 7 giorni e successivamente messe in camera climatica a 25 °C per 24 ore (Figura 40). Ciò è stato deciso tenendo conto anche delle tempistiche degli interventi di manutenzione in sito.



**Figura 40.** Condizionamento wet

Nel caso di condizione asciutta (dry) è stato sufficiente pulire accuratamente la piastra in calcestruzzo prima di essere utilizzata.

### 3.5. Programma sperimentale

Il programma sperimentale che è stato adottato nella sperimentazione in oggetto è riportato nella Figura 41. Nel suddetto programma è riportato il numero di provini testati e quindi di prove eseguite per ogni sistema di impermeabilizzazione.

Geotessuto		Geocomposito D		Resina Bicomponente (3h)				Resina Bicomponente (6h)			
Dry	Wet	Dry	Wet	Con Spolvero		Senza Spolvero		Con Spolvero		Senza Spolvero	
				Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner
5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off

Geocomposito A		Geocomposito B		Geocomposito C	
Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner	5 Leutner
5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off	5 Pull off

**Figura 41.** Programma sperimentale

## **4. Risultati e Analisi**

Nel presente capitolo vengono illustrati i risultati delle prove di laboratorio previste dall'indagine sperimentale, volte ad indagare il comportamento dei vari sistemi di impermeabilizzazione che sono stati esaminati. Sono quindi descritti i risultati relativi alla prova di taglio di tipo Leutner e quelli relativi alla prova di adesione Pull-Off.

### **4.1. Prove Leutner**

Il presente capitolo è stato suddiviso in sezioni dove ognuna di esse riporta i risultati, le analisi e le considerazioni fatte per ogni sistema impermeabilizzante testato nella sperimentazione. Successivamente sarà riportato un confronto tra i vari sistemi.

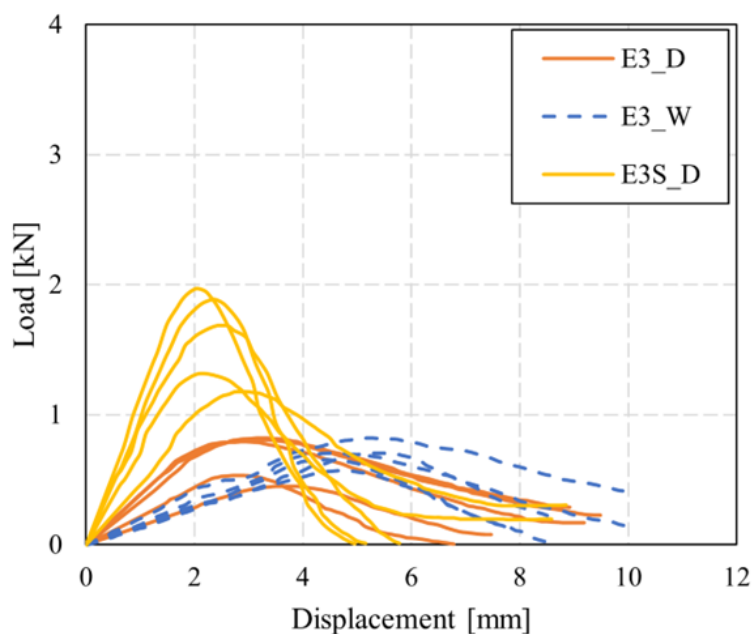
#### **4.1.1 Resina Bicomponente**

Il primo sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è la Resina Bicomponente. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo;
- Stagionatura della Resina Bicomponente a 3 e a 6 ore;
- Condizione dry, stagionatura della Resina Bicomponente a 3 e a 6 ore con spolvero.

Nei grafici riportati di seguito, in ascissa è presente lo spostamento espresso in millimetri mentre in ordinata si ha la forza di taglio espressa in kN.

Il primo grafico in Figura 42 riporta le curve della condizione di stagionatura della Resina Bicomponente a 3 ore, in condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo, ed in presenza o meno dello spolvero (solo condizione dry):



**Figura 42.** Grafico dei risultati Leutner della Resina Bicomponente nella configurazione di 3 ore di stagionatura

Nella Tabella 10 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

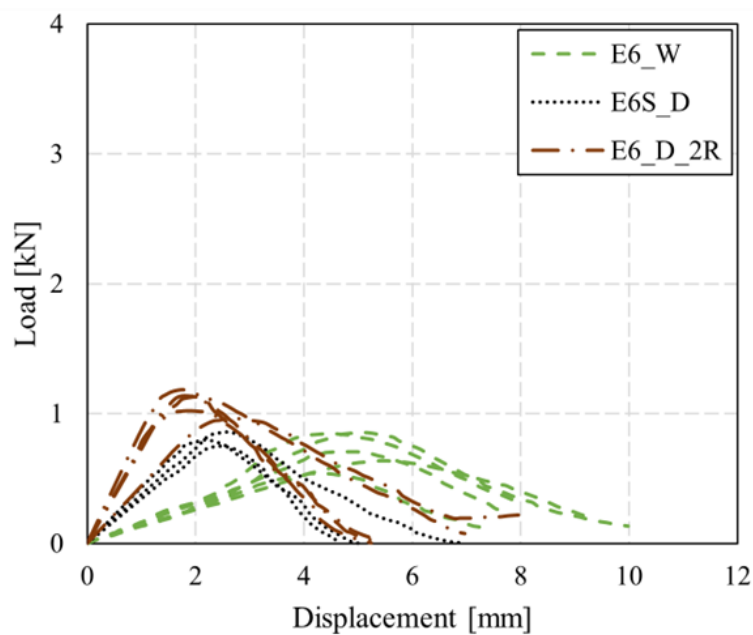
Provino	Valori di picco (kN)	Spostamento (mm)
E3_D	0,82	3,15
E3_W	0,82	5,11
E3S_D	1,97	2,05

**Tabella 10.** Valori di picco della Resina Bicomponente a 3 ore di stagionatura

La resina bicomponente con stagionatura a 3 ore presenta valori della forza di taglio simili tra le varie ripetizioni nella configurazione wet mentre presenta valori leggermente diversi per le varie ripetizioni nella configurazione dry. La configurazione dry e la configurazione wet presentano comunque valori di picco equivalenti (0,82 kN, Tabella 10). La Resina Bicomponente nella configurazione dry e con spolvero mostra valori della forza di taglio diversi tra le varie ripetizioni con valore di picco pari a 1,97 kN (Tabella 10). In questa ultima configurazione, dato che i due

gruppi di curve quasi sovrapponibili provenivano da due lastre diverse, i risultati sono stati probabilmente influenzati dalla procedura di preparazione delle lastre. Inoltre, si nota che la superficie umida della piastra in calcestruzzo sembra migliorare le capacità di accumulo delle deformazioni, mostrando dei picchi posticipati rispetto alla condizione dry. La pendenza del tratto iniziale delle curve rappresenta la rigidità della membrana, dunque, la Resina Bicomponente con lo spolvero risulta più rigida rispetto a quello senza.

Il secondo grafico, della Figura 43, riporta le curve della condizione di stagionatura della Resina Bicomponente a 6 ore, nella condizione dry e wet del calcestruzzo.



**Figura 43.** Grafico dei risultati Leutner della Resina Bicomponente nella configurazione di 6 ore di stagionatura

Nella Tabella 11 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

Provino	Valori di picco (kN)	Spostamento (mm)
E6S_D	0,86	2,57
E6_W	0,86	4,39
E6_D_2R	1,18	1,74

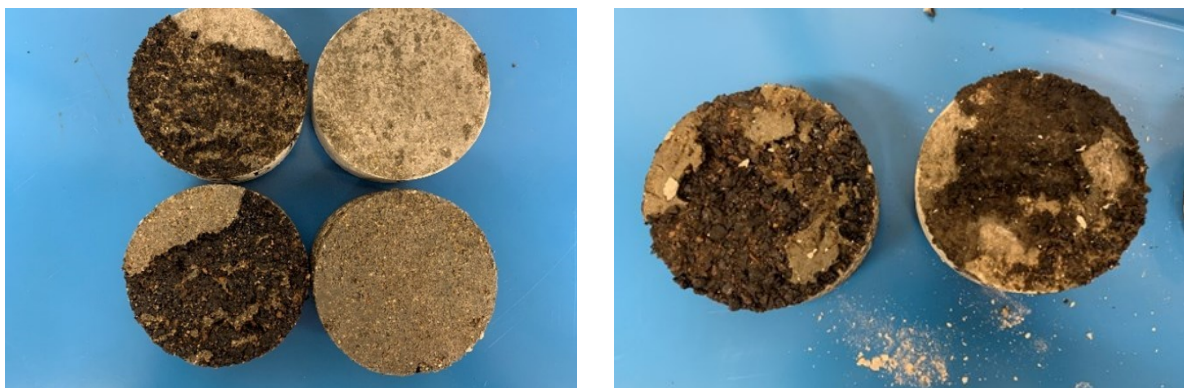
**Tabella 11.** Valori di picco della Resina Bicomponente a 6 ore di stagionatura

La resina bicomponente con stagionatura a 6 ore presenta valori della forza di taglio simili tra le varie ripetizioni sia nella configurazione dry che nella configurazione wet. La configurazione dry con spolvero e la configurazione wet presentano comunque valori di picco equivalenti tra di loro (0,86 kN, Tabella 11). Anche in questo caso, si nota che la superficie della piastra in calcestruzzo umida migliora le capacità di accumulo delle deformazioni, mostrando dei picchi corrispondenti ad un valore di spostamento di circa tre volte superiore a quello della condizione dry (Tabella 11). Dalla pendenza pre-picco si osserva che la resina Bicomponente con spolvero risulta essere più rigida rispetto a quella senza spolvero.



### *Rotture della Resina Bicomponente*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Leutner della Resina Bicomponente.



(a)

(b)

**Figura 44.** Rotture relative alla Resina Bicomponente

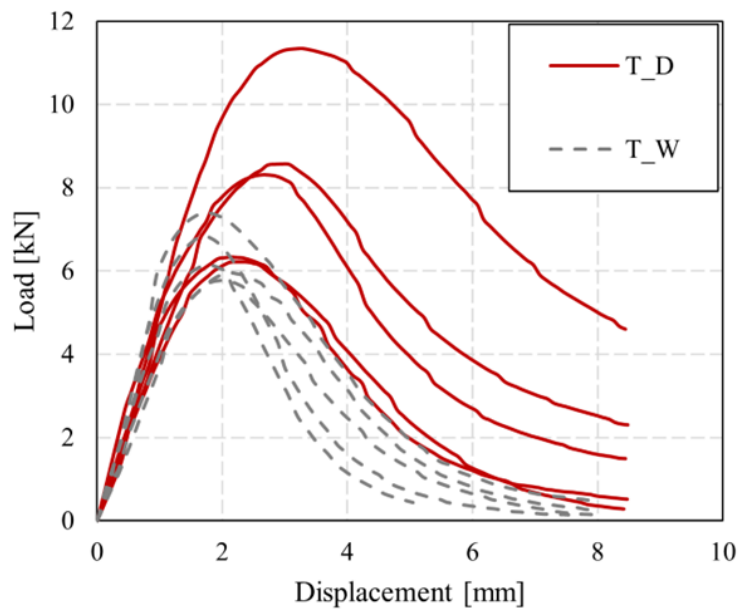
Nella Figura 44a si possono notare due tipi di rottura: rottura tra conglomerato bituminoso e Resina Bicomponente e rottura tra calcestruzzo e Resina Bicomponente. Nella Figura 44b si può osservare una rottura di tipo misto. Si conclude quindi che non c'è una superficie di rottura prevalente.

## 4.1.2 Geotessuto e Bitume

Il secondo sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geotessuto e Bitume. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Il grafico della Figura 45 riporta le curve del sistema Geotessuto e Bitume nelle condizioni dry e wet della piastra in calcestruzzo.



**Figura 45.** Grafico dei risultati Leutner del Geotessuto e Bitume

Nella Tabella 12 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

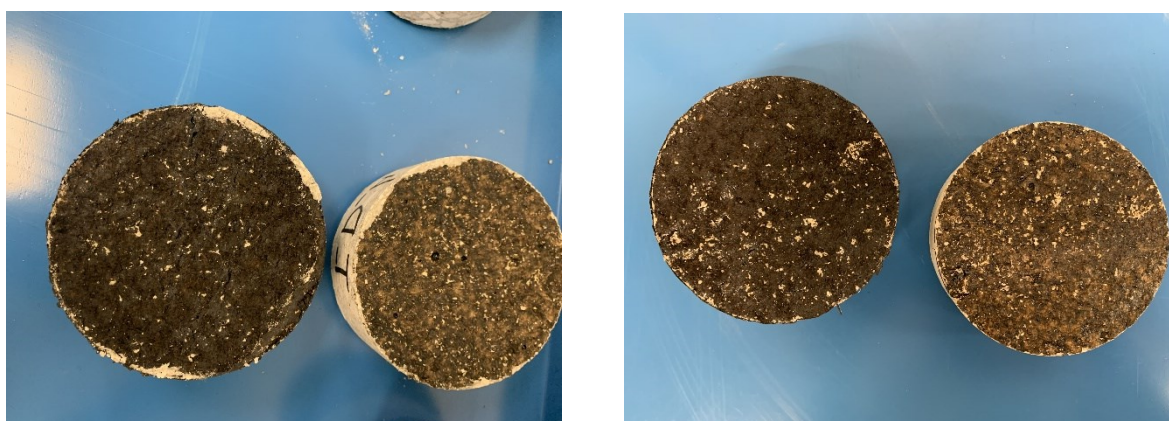
Provino	Valori di picco (kN)	Spostamento (mm)
T_D	8,57	2,97
T_W	7,39	1,77

**Tabella 12.** Valori di picco del Geotessuto e Bitume

Il Geotessuto e Bitume presenta valori della forza di taglio abbastanza simili tra le varie ripetizioni della configurazione wet mentre presenta valori abbastanza diversi tra le varie ripetizioni della configurazione dry. Nel caso della configurazione dry, si ritiene necessario escludere la curva che presenta un valore di picco molto più alto rispetto agli altri; il motivo di questo è imputabile quasi sicuramente ad una errata esecuzione della prova. In entrambi i casi (dry e wet) è possibile osservare due gruppi di curve quasi sovrapponibili e il motivo è dato dal fatto che i provini che hanno generato tale situazione provenivano da due lastre differenti. La configurazione dry presenta un valore di picco pari a 8,57 kN (Tabella 12) mentre la configurazione wet pari a 7,39 kN (Tabella 12). A differenza della Resina Bicomponente, il Geotessuto e Bitume non ha tratto vantaggi dalla superficie umida della piastra in calcestruzzo in quanto è la configurazione dry che presenta maggior accumulo di deformazioni (Tabella 12). Ciò è imputabile alla non compatibilità tra il bitume e l'acqua, e conferma i dati di letteratura. Per quanto riguarda la pendenza del tratto iniziale delle curve, si notano andamenti abbastanza simili tra di loro, quindi comparabile rigidità dei sistemi impermeabilizzanti.

#### *Rotture del Geotessuto e Bitume*

Nella Figura 46, a titolo di esempio, sono riportate varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Leutner del sistema Geotessuto e Bitume.

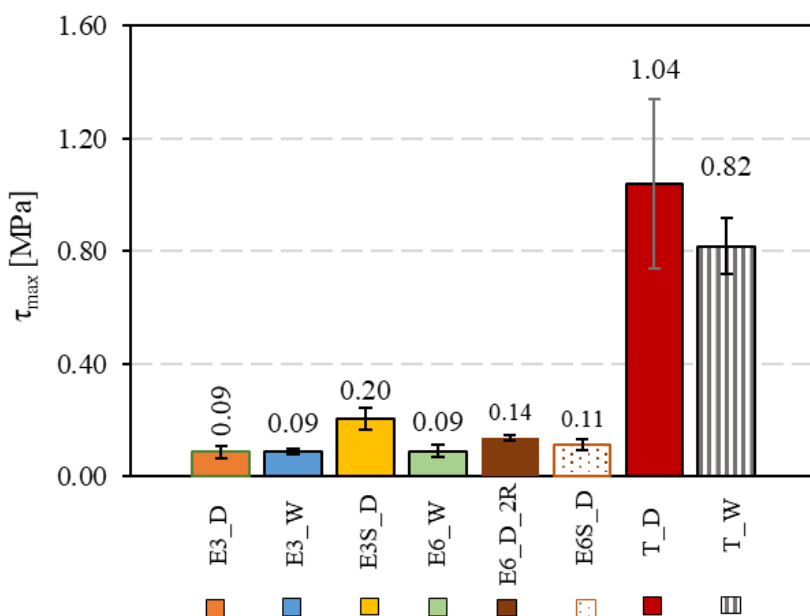


**Figura 46.** Rotture relative al Geotessuto e Bitume

In entrambe le immagini della Figura 46, si può notare una rottura che si è verificata all'interfaccia tra sistema impermeabilizzante e calcestruzzo. La superficie di calcestruzzo risulta, infatti, totalmente scoperta e con del bitume residuo.

### Confronto

Nel grafico della Figura 43 sono riportati i valori dello sforzo di taglio massimo  $\tau_{max}$  e le barre di errore che rappresentano le relative deviazioni dal valore medio per i primi due sistemi di impermeabilizzazione sopra analizzati.



**Figura 47.** Grafico dello sforzo di taglio massimo per Resina Bicomponente e Geotessuto e Bitume

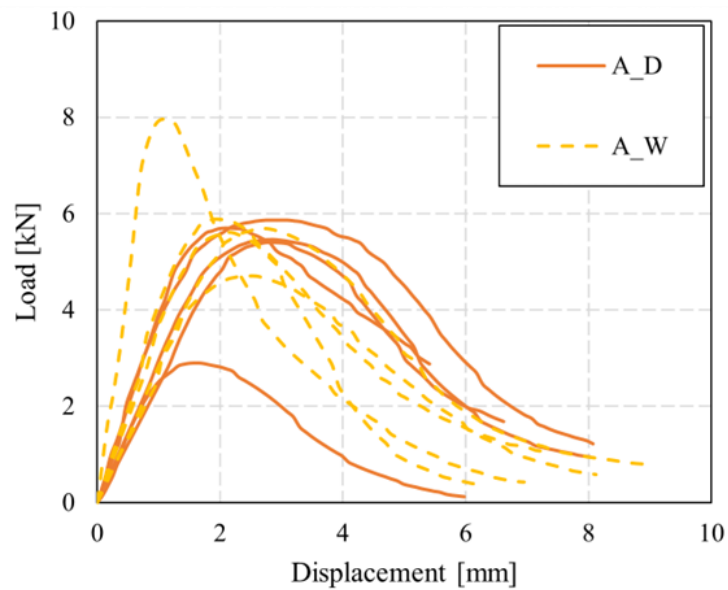
Dalla Figura 47 si evince che la Resina Bicomponente, in tutte le sue configurazioni, offre valori dello sforzo di taglio molto inferiori rispetto al Geotessuto e Bitume. Il Geotessuto e Bitume ha un valore di sforzo di taglio massimo pari a 1,04 MPa nella configurazione dry mentre la Resina Bicomponente è caratterizzata da un valore di sforzo di taglio massimo pari a 0,2 MPa nella configurazione dry con spolvero e con stagionatura della Resina pari a 3 ore.

### 4.1.3. Geocomposito A

Il terzo sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito A. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Il grafico della Figura 48 riporta le curve del Geocomposito A nelle condizioni dry e wet della piastra in calcestruzzo.



**Figura 48.** Grafico dei risultati Leutner del Geocomposito A

Nella Tabella 13 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

Provino	Valori di picco (kN)	Spostamento (mm)
A_D	5,87	2,82
A_W	5,88	1,89

**Tabella 13.** Valori di picco del Geocomposito A

Il Geocomposito A presenta valori della forza di taglio abbastanza simili tra le varie ripetizioni sia nella configurazione dry che nella configurazione wet. In entrambe le configurazioni c'è una curva che presenta un valore di picco totalmente diverso dal valore medio caratteristico di ogni configurazione e quindi si ritiene necessario escluderle. Tale differenza è imputabile ad un problema riscontrato durante l'esecuzione della prova. I valori di picco delle due configurazioni sono molto simili tra di loro ed in particolare il valore di picco nella configurazione dry è pari a 5,87 kN (Tabella 13) ed il valore di picco nella configurazione wet è pari a 5,88 kN (Tabella 13). Il Geocomposito A non sembra presentare alcuna penalizzazione in termini di accumulo di deformazioni nel caso di superficie umida della piastra in calcestruzzo. Per quanto riguarda la pendenza del tratto iniziale delle curve, si riscontrano andamenti abbastanza simili tra di loro.

#### *Rotture del Geocomposito A*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Leutner del Geocomposito A.



**Figura 49.** Rottura relativa al Geocomposito A



(a)



(b)

**Figura 50.** Rotture relative al Geocomposito A

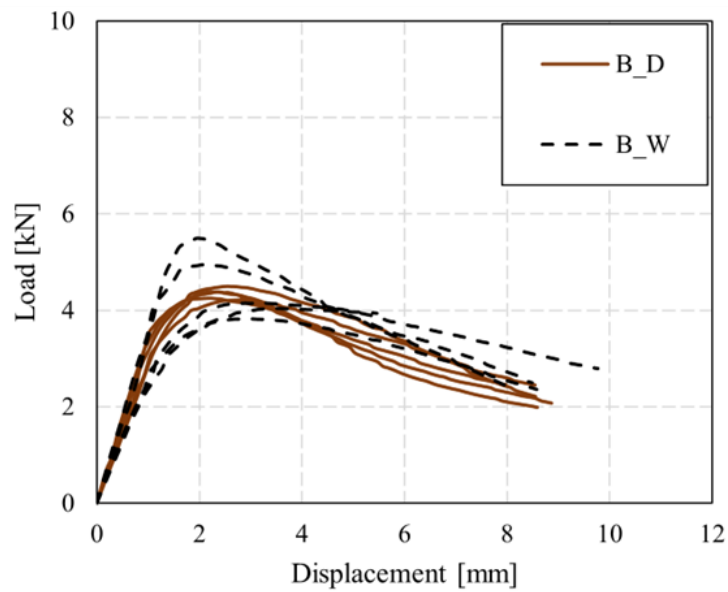
Nella Figura 49 si può notare che la rottura è avvenuta all'interfaccia tra il conglomerato bituminoso e il Geocomposito. Nella Figura 50a si può notare un parziale distacco del Geocomposito A ed una rottura che è avvenuta tra il calcestruzzo e il Geocomposito. Nella Figura 50b è riportata una rottura che è avvenuta nel mezzo del Geocomposito.

#### 4.1.4. Geocomposito B

Il quarto sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito B. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Il grafico della Figura 51 riporta le curve del Geocomposito B nelle condizioni dry e wet della piastra in calcestruzzo.



**Figura 51.** Grafico dei risultati Leutner del Geocomposito B

Nella Tabella 14 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

Provino	Valori di picco (kN)	Spostamento (mm)
B_D	4,50	2,54
B_W	5,49	1,94

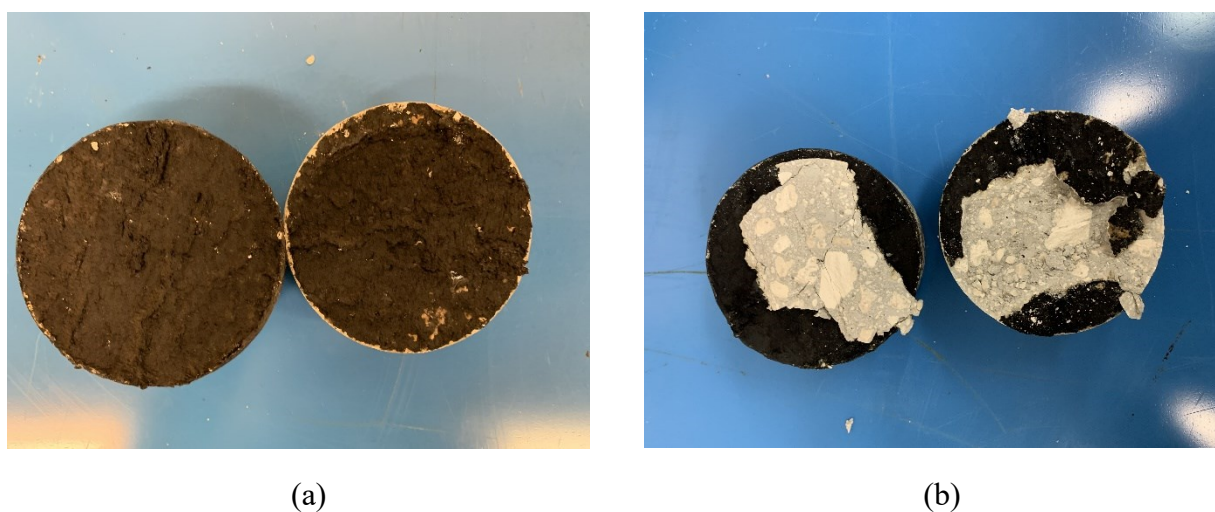
**Tabella 14.** Valori di picco del Geocomposito B



Il Geocomposito B presenta valori della forza di taglio molto simili tra le varie ripetizioni della configurazione dry mentre presenta valori più variabili tra le varie ripetizioni della configurazione wet. È possibile osservare, nella configurazione wet, due gruppi di curve quasi sovrapponibili e il motivo è dato dal fatto che i provini provenivano da due lastre differenti. In generale si può osservare un comportamento comparabile tra le due configurazioni. I valori di picco delle due configurazioni sono abbastanza simili tra di loro ed in particolare il valore di picco nella configurazione dry è pari a 4,50 kN (Tabella 14) ed il valore di picco nella configurazione wet è pari a 5,49 kN (Tabella 14). Il Geocomposito B non presenta vantaggi in termini di accumulo di deformazioni nel caso di superficie umida della piastra in calcestruzzo. Dalla pendenza pre-picco si osserva che il Geocomposito B presenta la medesima rigidezza nella configurazione dry e wet.

#### *Rotture del Geocomposito B*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Leutner del Geocomposito B.



**Figura 52.** Rotture relative al Geocomposito B

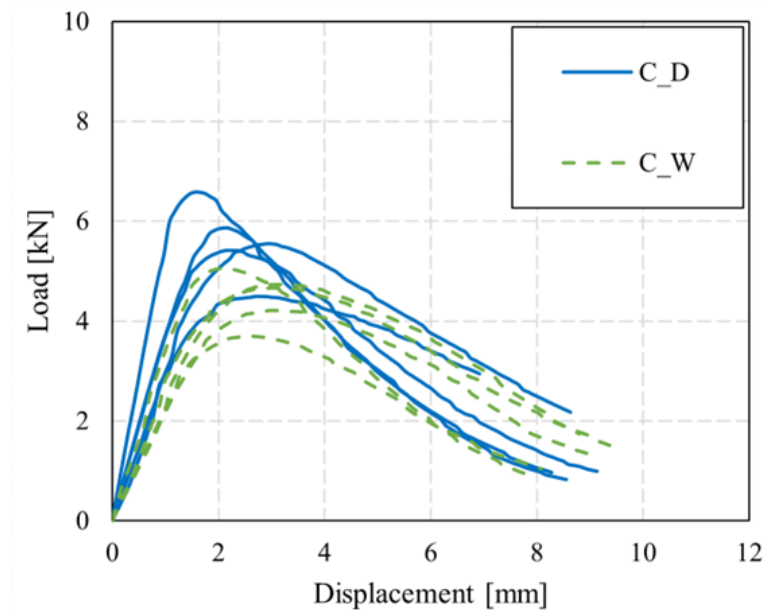
Nella Figura 52a si può notare che la rottura è avvenuta nel mezzo del Geocomposito mentre nella Figura 52b si può osservare una rottura che è avvenuta prevalentemente all'interfaccia tra il calcestruzzo e il primer bituminoso. In particolare, il calcestruzzo risulta completamente scoperto, evidenziando uno scarso potere penetrante del primer bituminoso impiegato.

### 4.1.5. Geocomposito C

Il quinto sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito C. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Il grafico della Figura 53 riporta le curve del Geocomposito C nelle condizioni dry e wet della piastra in calcestruzzo.



**Figura 53.** Grafico dei risultati Leutner del Geocomposito C

Nella Tabella 15 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

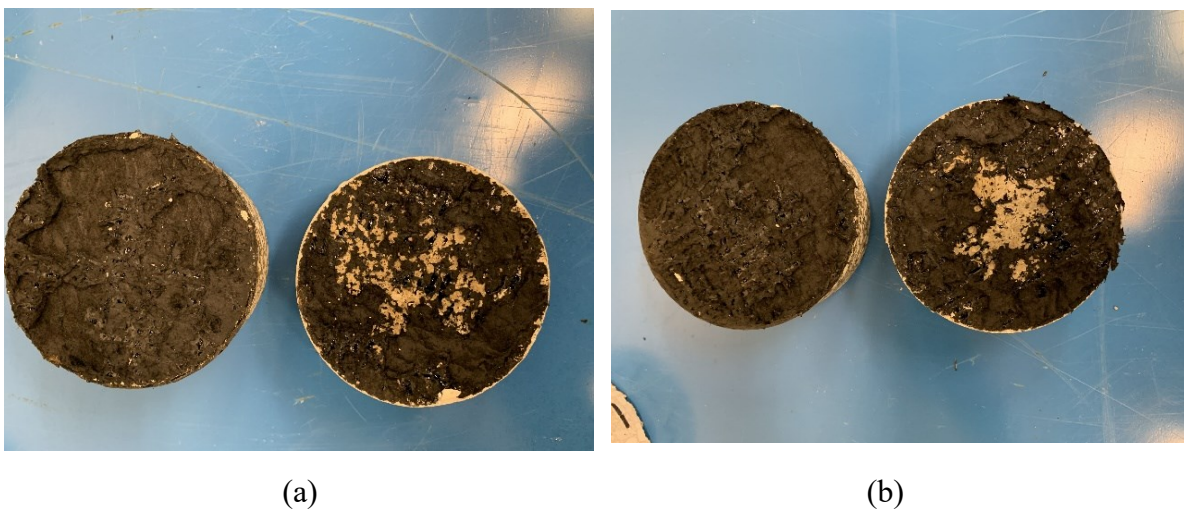
Provino	Valori di picco (kN)	Spostamento (mm)
C_D	6,58	1,56
C_W	5,06	2,14

**Tabella 15.** Valori di picco del Geocomposito C

Il Geocomposito C presenta valori della forza di taglio abbastanza diversi tra le varie ripetizioni di entrambe le configurazioni (dry e wet). I valori di picco delle due configurazioni sono abbastanza diversi tra di loro ed in particolare il valore di picco nella configurazione dry è pari a 6,58 kN (Tabella 15) ed il valore di picco nella configurazione wet è pari a 5,06 kN (Tabella 15). Il Geocomposito C presenta maggiore capacità di accumulare deformazioni nel caso di superficie umida della piastra in calcestruzzo, in quanto la deformazione corrispondente è leggermente maggiore della corrispondente condizione asciutta. Dalla pendenza pre-picco si osserva che il Geocomposito C risulta essere più rigido nel caso di superficie della piastra in calcestruzzo asciutta.

#### *Rotture del Geocomposito C*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Leutner del Geocomposito C.



**Figura 54.** Rotture relative al Geocomposito C

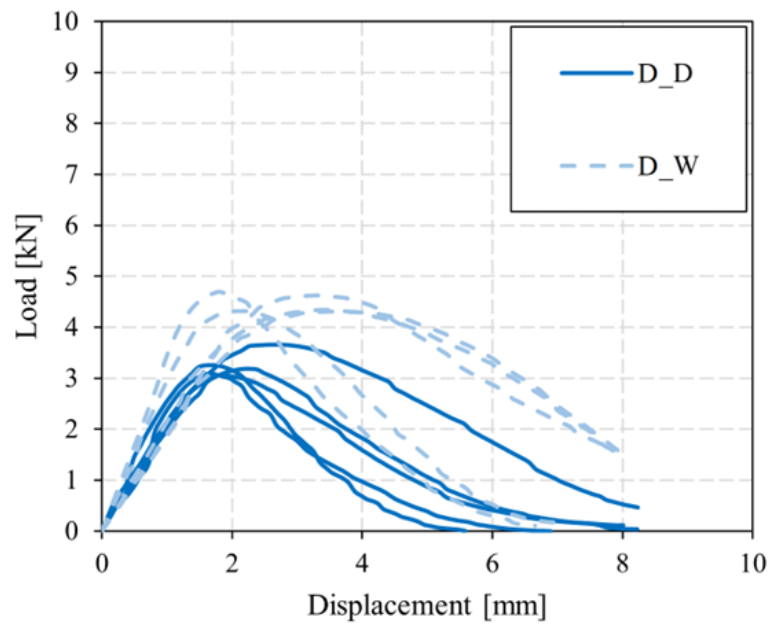
Sia nella Figura 54a che nella Figura 54b si può notare che la rottura è di tipo misto. Soprattutto nella zona centrale si può vedere la superficie del calcestruzzo.

### 4.1.6. Geocomposito D

Il sesto sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito D. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Il grafico della Figura 55 riporta le curve del Geocomposito D nelle condizioni dry e wet della piastra in calcestruzzo.



**Figura 55.** Grafico dei risultati Leutner del Geocomposito D

Nella Tabella 16 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

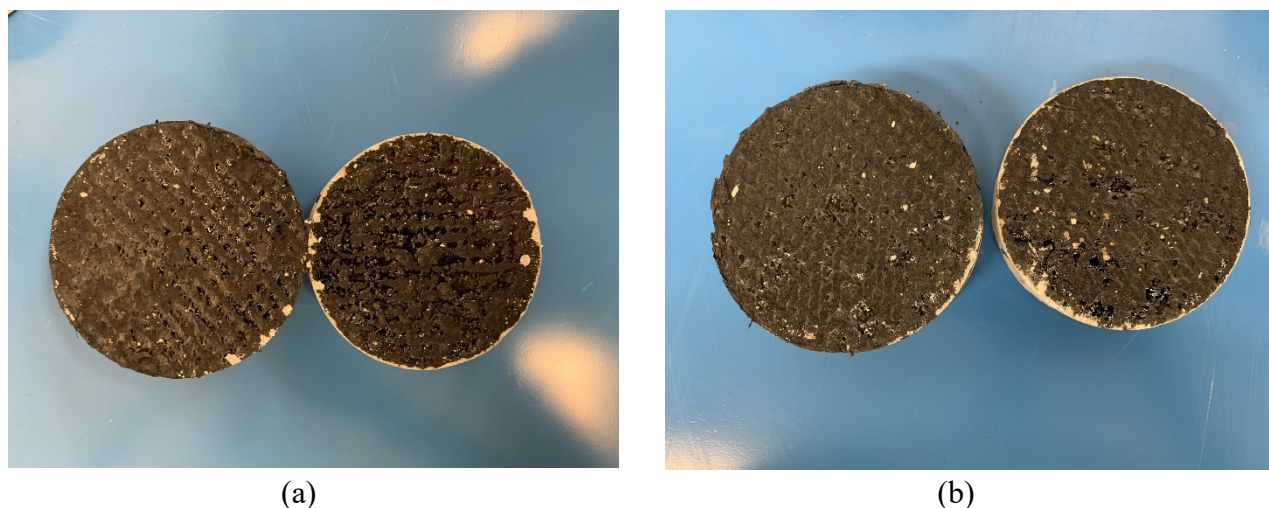
Provino	Valori di picco (kN)	Spostamento (mm)
D_D	3,65	2,55
D_W	4,69	1,80

**Tabella 16.** Valori di picco del Geocomposito D

Il Geocomposito D presenta valori della forza di taglio abbastanza simili tra le varie ripetizioni della configurazione dry mentre presenta valori leggermente diversi tra le varie ripetizioni della configurazione wet. I valori di picco delle due configurazioni sono abbastanza diversi tra di loro ed in particolare il valore di picco nella configurazione dry è pari a 3,65 kN (Tabella 16) ed il valore di picco nella configurazione wet è pari a 4,69 kN (Tabella 16). È possibile osservare, nella configurazione wet, due gruppi di curve quasi sovrapponibili e il motivo è legato al fatto che i provini provenivano da due lastre differenti. Il Geocomposito D presenta dei vantaggi in termini di accumulo di deformazioni nel caso di superficie umida della piastra in calcestruzzo (solo in uno dei due gruppi di curve sovrapponibili). La pendenza del tratto iniziale delle curve rappresenta la rigidità della membrana, dunque, il Geocomposito D risulta avere lo stesso comportamento nelle due configurazioni.

#### *Rotture del Geocomposito D*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Leutner del Geocomposito D.



**Figura 56.** Rotture relative al Geocomposito D

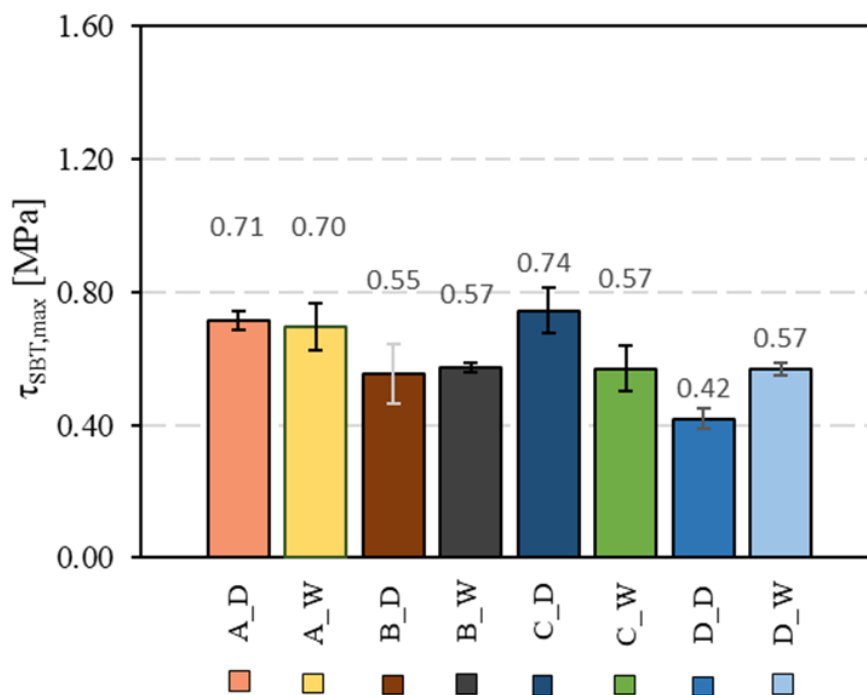
Nella Figura 56a si può notare come la rottura sia stata dovuta al perfetto scollamento del Geocomposito D all'interfaccia con il primer bituminoso. Nella Figura 56b, invece, la rottura è

avvenuta nel mezzo del Geocomposito; si possono notare infatti residui di Geocomposito in entrambe le parti del provino.

Va infine sottolineato che in tutte le varie rotture sopra descritte, il distacco non avviene mai in corrispondenza dell'interfaccia tra Geocomposito e conglomerato bituminoso, in quanto il sistema impermeabilizzante è composto da bitume e quindi c'è un'ottima compatibilità tra i materiali. È previsto infatti dai produttori dei Geocompositi che il bitume contenuto nella membrana si scioglie quando viene steso il conglomerato bituminoso alla temperatura di circa 160 °C e risalga nello strato superiore.

### Confronto

Nella Figura 57 sono riportati i valori dello sforzo di taglio massimo  $\tau_{\max}$  e le barre di errore che rappresentano le relative deviazioni dal valore medio per i quattro Geocompositi sopra analizzati.



**Figura 57.** Grafico dello sforzo di taglio massimo per i Geocompositi A, B, C e D

Dall'istogramma in Figura 57 si evince che il Geocomposito A e il Geocomposito B si comportano in egual maniera in entrambe le configurazioni (dry e wet). Il Geocomposito C offre uno sforzo di taglio massimo superiore nella configurazione dry mentre il Geocomposito D offre uno sforzo di taglio superiore nella configurazione wet. In ogni caso, quello che risulta avere lo sforzo di taglio massimo superiore in assoluto è il Geocomposito C nella configurazione dry. La condizione wet del calcestruzzo non penalizza le prestazioni dei Geocompositi, ad eccetto del Geocomposito C dove il valore dello sforzo di taglio massimo risulta essere inferiore rispetto a quello della condizione dry.

## 4.2. Prove Pull-Off

Il presente capitolo è stato suddiviso in sezioni dove ognuna di esse riporta i risultati, le analisi e le considerazioni fatte per ogni sistema impermeabilizzante testato nella sperimentazione. Successivamente sarà riportato un confronto tra i vari sistemi.

### 4.2.1. Resina Bicomponente

Il primo sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è la Resina Bicomponente. Le configurazioni adottate sono:

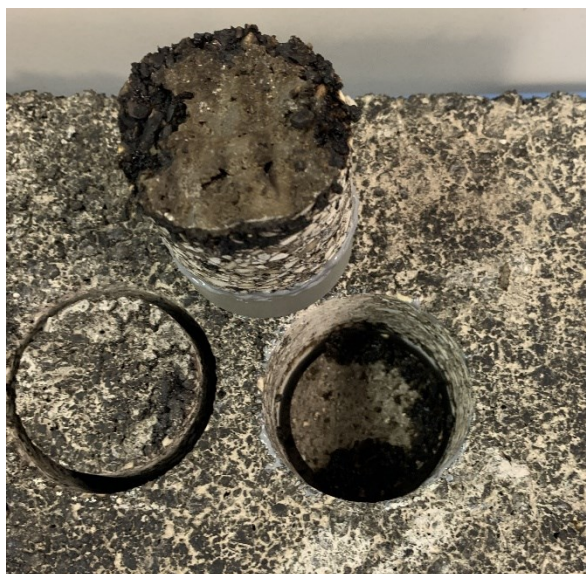
- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo;
- Stagionatura della Resina Bicomponente e 3 e a 6 ore;
- Condizione dry, stagionatura della Resina Bicomponente a 3 e a 6 ore con spolvero.

Non è stato possibile testare tutti i provini relativi alla Resina Bicomponente in quanto, a causa del ridotto diametro, il materiale non è stato in grado di resistere agli sforzi applicati dalla carotatrice. A titolo di esempio si riportano delle immagini (Figura 58 e Figura 59).



**Figura 58.** Provini della Resina Bicomponente





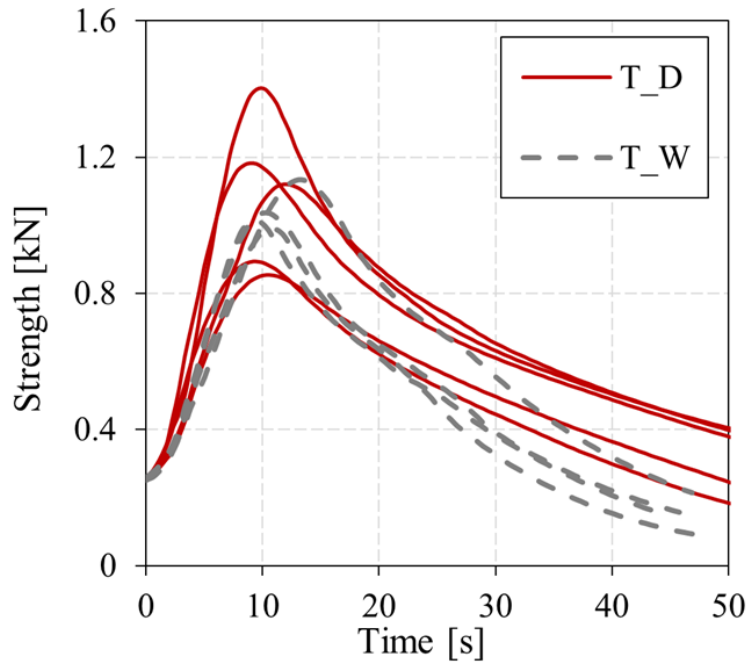
**Figura 59.** Provino della Resina Bicomponente

#### **4.2.2. Geotessuto e Bitume**

Il secondo sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geotessuto e Bitume. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Nel grafico riportato in Figura 60, in ascissa è presente il tempo espresso in secondi mentre in ordinata troviamo la forza di trazione pura espressa in kN.



**Figura 60.** Grafico dei risultati di Pull-Off del Geotessuto e Bitume

Nella Tabella 17 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

Provino	Valori di picco (kN)	Tempo (sec)
T_D	1,40	10,1
T_W	1,13	13,3

**Tabella 17.** Valori di picco del Geotessuto e Bitume

Il Geotessuto e Bitume presenta valori della forza di trazione pura abbastanza simili tra le varie ripetizioni della configurazione wet mentre presenta valori abbastanza diversi tra le varie ripetizioni della configurazione dry. In entrambi i casi è possibile osservare due gruppi di curve quasi sovrapponibili e il motivo è dato dal fatto che i provini provenivano da due lastre differenti. La configurazione dry presenta un valore di picco pari a 1,40 kN (Tabella 17) mentre la configurazione wet pari a 1,13 kN (Tabella 17). Nel caso di Geotessuto e Bitume, la configurazione dry offre delle prestazioni leggermente più elevate.

### *Rotture del Geotessuto e Bitume*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Pull-Off del Geotessuto e Bitume.



**Figura 61.** Rottura relativa al Geotessuto e Bitume



**Figura 62.** Rottura relativa al Geotessuto e Bitume

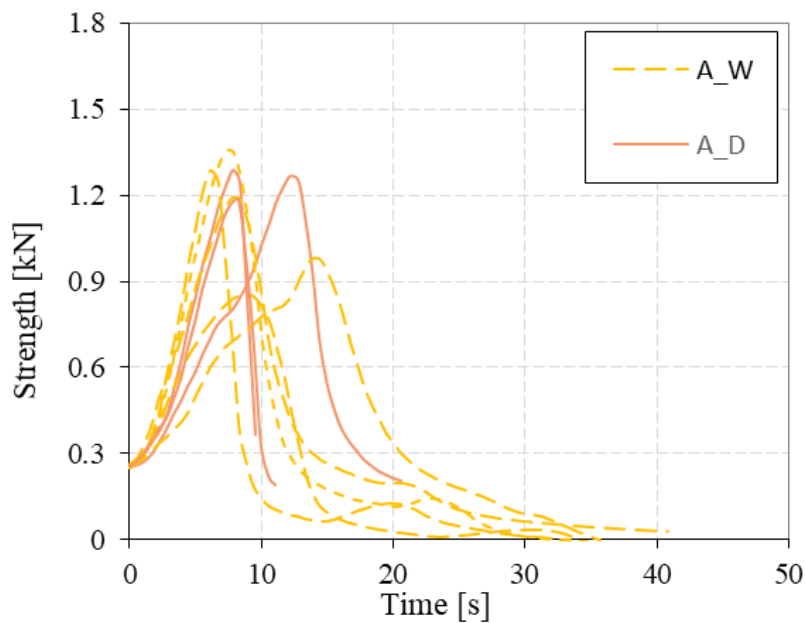
Sia nella Figura 61 che nella Figura 62 si nota chiaramente che il distacco dei provini è avvenuto sempre in corrispondenza dell'interfaccia tra calcestruzzo e bitume. Nella maggior parte dei casi il bitume è rimasto attaccato al Geotessuto lasciando pulita la superficie del calcestruzzo.

### 4.2.3. Geocomposito A

Il terzo sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito A. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Nel grafico riportato nella Figura 63, in ascissa è presente il tempo espresso in secondi mentre in ordinata troviamo la forza di trazione pura espressa in kN.



**Figura 63.** Grafico dei risultati di Pull-Off del Geocomposito A

Nella Tabella 18 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

Provino	Valori di picco (kN)	Tempo (sec)
A_D	1,32	8,8
A_W	1,35	7,8

**Tabella 18.** Valori di picco del Geocomposito A

Il Geocomposito A presenta valori della forza di trazione pura abbastanza simili tra le varie ripetizioni della configurazione dry (ad esclusione della curva che si trova spostata più a destra) mentre presenta valori abbastanza diversi tra le varie ripetizioni della configurazione wet. La configurazione dry presenta un valore di picco pari a 1,32 kN (Tabella 18) mentre la configurazione wet pari a 1,35 kN (Tabella 18). Nel caso del Geocomposito A i due picchi assumono valori paragonabili.

### *Rotture del Geocomposito A*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Pull-Off del Geocomposito A.



(a)



(b)

**Figura 64.** Rotture relative al Geocomposito A

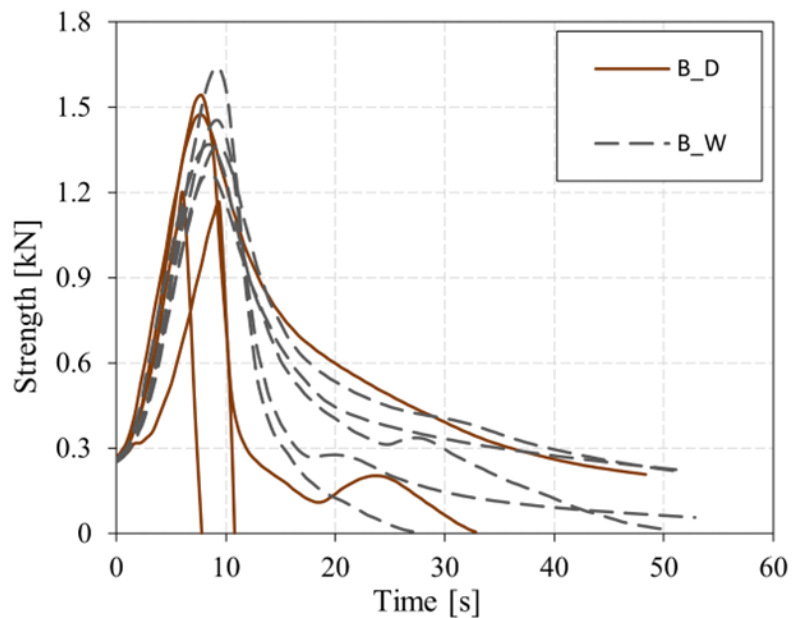
Sia nella Figura 64a che nella Figura 64b si nota chiaramente che il distacco dei provini è avvenuto sempre in corrispondenza dell'interfaccia tra calcestruzzo e Geocomposito ed in particolare in corrispondenza del primer. Nella maggior parte dei casi il primer è rimasto attaccato al Geocomposito lasciando pulita la superficie del calcestruzzo. Ciò significa che il primer non è propriamente penetrato nella lastra di calcestruzzo.

#### 4.2.4. Geocomposito B

Il quarto sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito B. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Nel grafico riportato nella Figura 65, in ascissa è presente il tempo espresso in secondi mentre in ordinata troviamo la forza di trazione pura espressa in kN.



**Figura 65.** Grafico dei risultati di Pull-Off del Geocomposito B

Nella Tabella 19 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

Provino	Valori di picco (kN)	Tempo (sec)
B_D	1,54	7,8
B_W	1,64	9

**Tabella 19.** Valori di picco del Geocomposito B

Il Geocomposito B presenta valori della forza di trazione pura abbastanza simili tra le varie ripetizioni della configurazione wet (ad esclusione della curva che si trova più in alto) mentre presenta valori abbastanza diversi tra le varie ripetizioni della configurazione dry. La configurazione dry presenta un valore di picco pari a 1,54 kN (Tabella 19) mentre la configurazione wet pari a 1,64 kN (Tabella 19). Nel caso del Geocomposito B i due picchi assumono valori paragonabili.

### *Rotture del Geocomposito B*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Pull-Off del Geocomposito B.



(a) (b) (c)

**Figura 66.** Rotture relative al Geocomposito B



(a) (b) (c)

**Figura 67.** Rotture relative al Geocomposito B

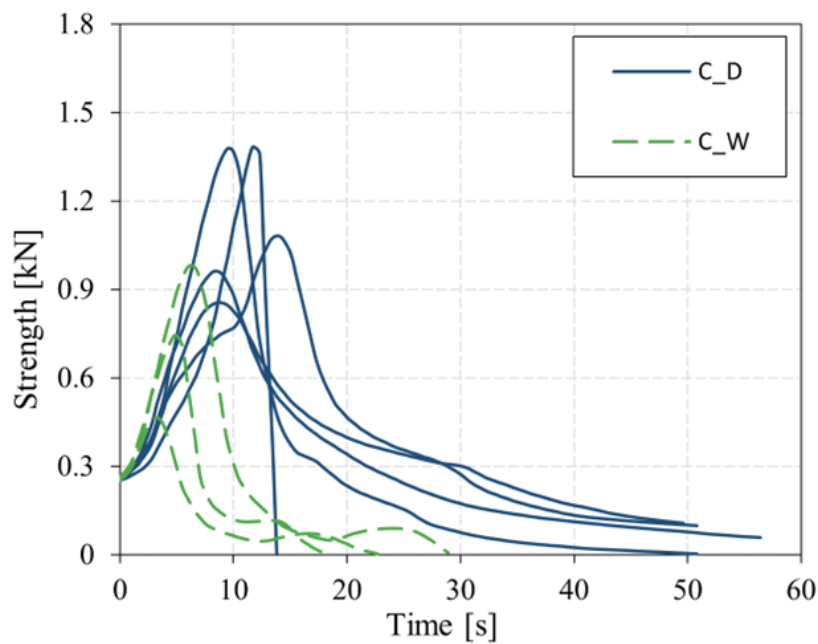
Nella figura 66 si nota che il distacco dei provini è avvenuto all'interfaccia tra Geocomposito e conglomerato bituminoso (Provino 66a) mentre è avvenuto all'interfaccia tra Geocomposito e calcestruzzo (Provino 66b e 66c), ed in particolare si osserva come il primer bituminoso sia rimasto legato al Geocomposito. Nella figura 67, invece, sono presenti due situazioni dove il distacco è avvenuto all'interfaccia tra Geocomposito e conglomerato bituminoso (Provino 67b e 67c) e una situazione (Provino 67a) dove il distacco è avvenuto all'interfaccia tra Geocomposito e calcestruzzo con il primer bituminoso che è rimasto legato al Geocomposito. Il primer bituminoso ha aderito efficacemente al calcestruzzo solo in determinate zone della piastra.

#### 4.2.5. Geocomposito C

Il quinto sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito C. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Nel grafico riportato nella figura 68, in ascissa è presente il tempo espresso in secondi mentre in ordinata troviamo la forza di trazione pura espressa in kN.



**Figura 68.** Grafico dei risultati di Pull-Off del Geocomposito C



Nella Tabella 20 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

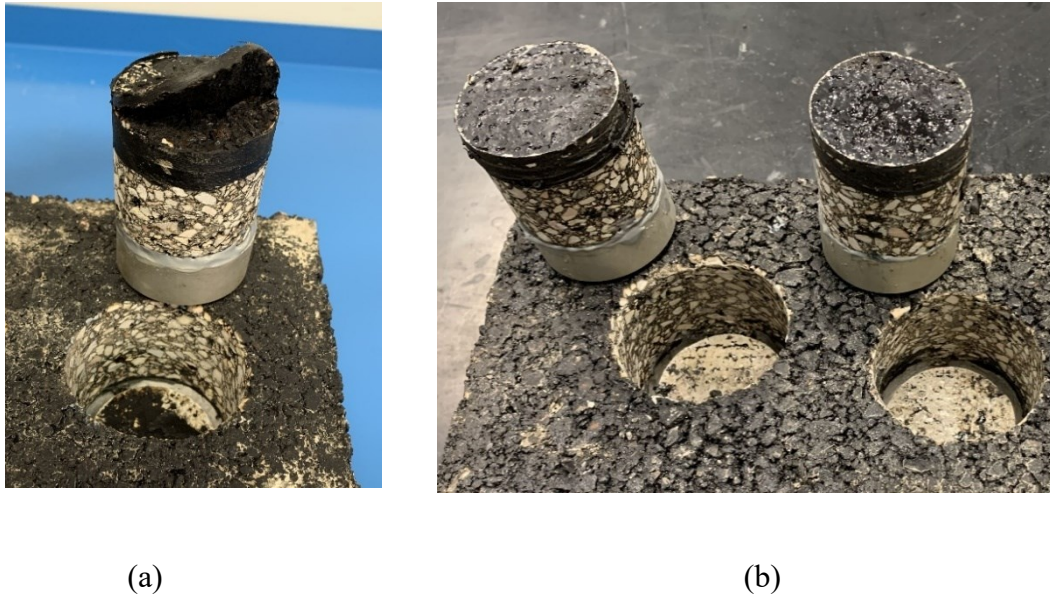
Provino	Valori di picco (kN)	Tempo (sec)
C_D	1,38	11,7
C_W	0,98	6,1

**Tabella 20.** Valori di picco del Geocomposito C

Il Geocomposito C presenta valori della forza di trazione pura abbastanza diversi tra le varie ripetizioni sia nella configurazione dry che nella configurazione wet. Nel caso della configurazione dry è possibile osservare due gruppi di curve quasi sovrapponibili (ad esclusione della curva che si trova spostata più a destra) e il motivo è dato dal fatto che i provini provenivano da due lastre differenti. La configurazione dry presenta un valore di picco pari a 1,38 kN (Tabella 20) mentre la configurazione wet pari a 0,98 kN (Tabella 20). Il Geocomposito C nella configurazione dry risulta essere più performante in termini di adesione.

### *Rotture del Geocomposito C*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Pull-Off del Geocomposito C.



**Figura 69.** Rotture relative al Geocomposito C



**Figura 70.** Rotture relative al Geocomposito C

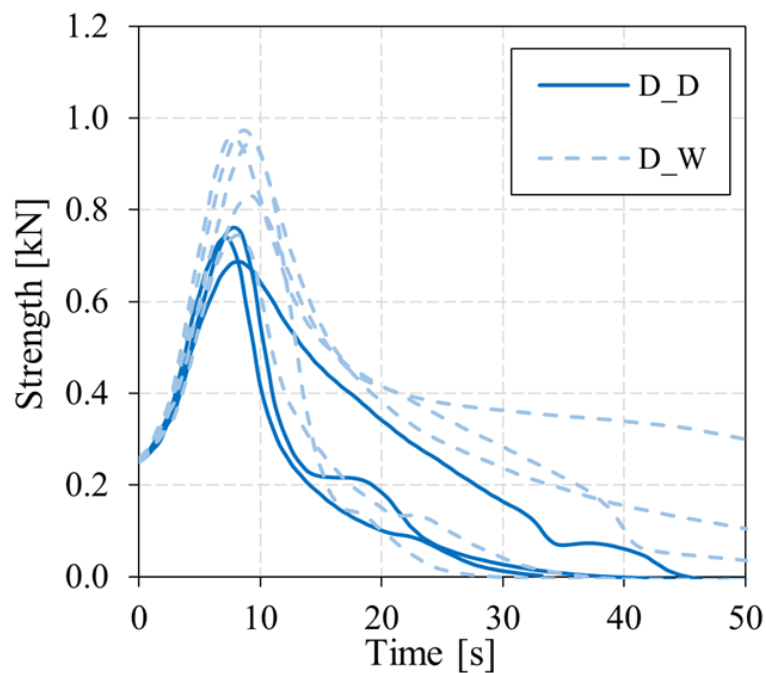
Nella Figura 69a si può notare che il distacco è avvenuto in corrispondenza dell'interfaccia tra calcestruzzo e Geocomposito ed in particolare si nota anche una rottura del Geocomposito in esame. Nella Figura 69b si può notare il medesimo distacco con rimanenza del primer a contatto con il Geocomposito; il primer, in questo caso, ha avuto uno scarso potere aggrappante. Nella Figura 70 si osserva sempre un distacco all'interfaccia tra il calcestruzzo e il Geocomposito (provino di sinistra) ma con il primer che è rimasto sulla superficie del calcestruzzo mentre si osserva un distacco avvenuto all'interfaccia tra Geotessuto e conglomerato bituminoso per il provino di destra.

#### 4.2.6. Geocomposito D

Il sesto sistema di impermeabilizzazione che è stato analizzato è il Geocomposito D. Le configurazioni adottate sono:

- Condizione dry e wet della piastra in calcestruzzo.

Nel grafico riportato nella Figura 71, in ascissa è presente il tempo espresso in secondi mentre in ordinata troviamo la forza di trazione pura espressa in kN.



**Figura 71.** Grafico dei risultati di Pull-Off del Geocomposito D

Nella Tabella 21 sono riportati i valori di picco per ogni configurazione.

Provino	Valori di picco (kN)	Tempo (sec)
D_D	0,76	7,8
D_W	0,97	8,4

**Tabella 21.** Valori di picco del Geocomposito D

Il Geocomposito D presenta valori della forza di trazione pura abbastanza diversi tra le varie ripetizioni della configurazione wet mentre presenta valori leggermente diversi tra le ripetizioni della configurazione configurazione dry. La configurazione dry presenta un valore di picco pari a 0,76 kN (Tabella 21) mentre la configurazione wet pari a 0,97 kN (Tabella 21). Il Geocomposito D nella configurazione wet risulta essere più performante in termini di adesione. Comunque, in entrambe le configurazioni, il valore della forza di trazione pura non supera il valore di 1 kN.

## *Rotture del Geocomposito D*

Di seguito sono riportate delle immagini, a titolo di esempio, delle varie tipologie di rotture dei provini che sono state ottenute durante le prove Pull-Off del Geocomposito D.



(a)



(b)

**Figura 72.** Rotture relative al Geocomposito D



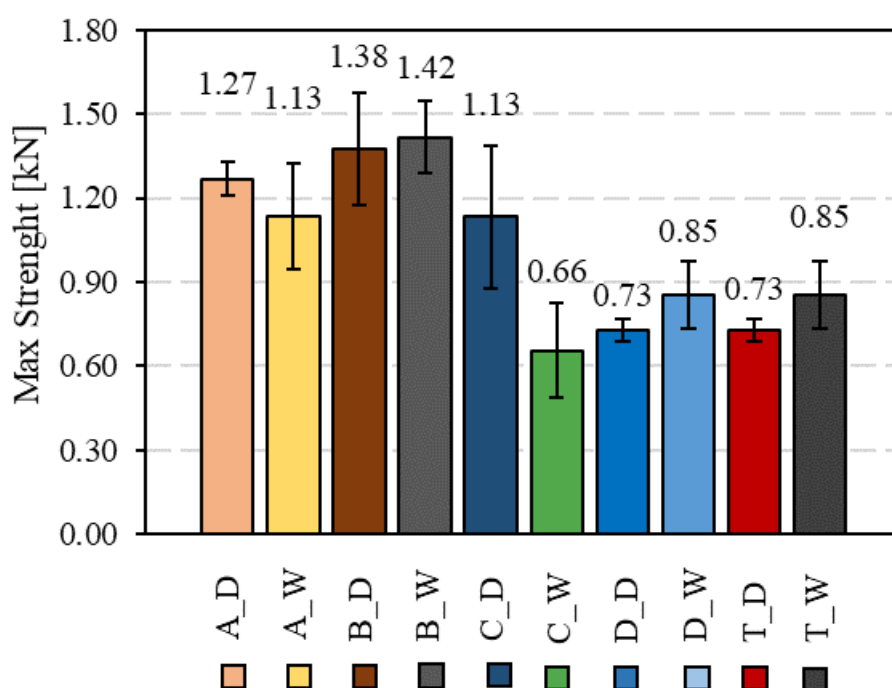
**Figura 73.** Rotture relative al Geocomposito D

Nella Figura 72a si nota che il distacco del provino è avvenuto all'interfaccia tra Geocomposito e conglomerato bituminoso (provino a sinistra) mentre è avvenuto all'interfaccia tra Geocomposito e calcestruzzo (provino a destra) ed in particolare si osserva come il primer bituminoso sia rimasto legato per metà al Geocomposito e per metà al calcestruzzo. Nella Figura 72b, invece, sono presenti due situazioni dove il distacco è avvenuto all'interfaccia tra Geocomposito e conglomerato bituminoso. Nella Figura 73 si osservano tre situazioni dove il distacco è avvenuto all'interfaccia tra

Geocomposito e calcestruzzo con il primer bituminoso che è rimasto legato, quasi totalmente, al calcestruzzo. Questo significa che il primer è penetrato nella superficie di calcestruzzo.

### Confronto

Nella Figura 74 sono riportati i valori medi della forza di adesione massima (delle varie ripetizioni) e le barre di errore che rappresentano le relative deviazioni dal valore medio per i quattro Geocompositi sopra analizzati.



**Figura 74.** Valori medi della forza di adesione massima

Dall'istogramma di Figura 74 si evince che il Geocomposito A offre una forza di adesione media, tra le varie ripetizioni, leggermente superiore nella configurazione dry. Il Geocomposito B si comporta praticamente in egual maniera in entrambe le configurazioni (dry e wet). Il Geocomposito C, invece, ha prestazioni nettamente superiori nella condizione dry della piastra in calcestruzzo. Per quanto riguarda il Geocomposito D e il sistema Geotessuto e Bitume steso in opera, questi offrono prestazioni leggermente migliori nella condizione wet della piastra in calcestruzzo. In ogni caso, quello che risulta avere la forza di adesione media tra le varie ripetizioni massima superiore in

assoluto è il Geocomposito B. La condizione wet del calcestruzzo non penalizza le prestazioni dei Geocompositi, ad eccezione del Geocomposito C dove il valore della forza di adesione media tra le varie ripetizioni risulta essere inferiore rispetto a quello della condizione dry.

Tutti i risultati relativi all'adesione confermano l'andamento ottenuto dalle prove Leutner (Figura 57), ad eccezione del sistema Geotessuto e Bitume steso in opera. Ciò conferma l'affidabilità dei risultati in quanto la resistenza allo scorrimento (a taglio diretto) è senza dubbio correlata al livello di adesione dei sistemi impermeabilizzanti, indispensabile affinché l'intero pacchetto impalcato fronteggi gli sforzi tangenziali indotti dal carico veicolare durante la vita utile.

## 5. Conclusioni

Lo studio eseguito nel presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di confrontare, attraverso prove di taglio Leutner e prove di adesione Pull-Off, il comportamento di una serie di sistemi di impermeabilizzazione per impalcati da ponte in calcestruzzo, che differiscono per materiali componenti e modalità di applicazione: la Resina Bicomponente, il Geotessuto e Bitume steso in opera e quattro differenti Geocompositi.

Inizialmente sono state realizzate le piastre in calcestruzzo delle quali è stata poi analizzata la macrorugosità superficiale ed è stato caratterizzato il conglomerato bituminoso tramite estrazione del bitume e setacciatura degli aggregati. Successivamente sono stati applicati i sistemi impermeabilizzanti alle piastre, sui quali è stato infine compattato lo strato di conglomerato bituminoso.

Dalle lastre così confezionate, sono stati ottenuti i provini da sottoporre a prove di laboratorio per lo studio delle proprietà meccaniche dei sistemi impermeabilizzanti, e nello specifico proprietà di resistenza al taglio diretto di tipo Leutner e adesione di tipo Pull-Off.

Dai risultati delle prove a taglio di tipo Leutner si evince che:

- La Resina Bicomponente presenta scarsi risultati nei confronti delle prove di taglio. Si ottengono prestazioni leggermente più elevate nel caso di stagionatura della Resina a 3 ore e trattamento con spolvero;
- Il sistema Geotessuto e Bitume steso in opera è contraddistinto da buone prestazioni nei confronti della resistenza a taglio con valori leggermente più elevati nella condizione dry della piastra in calcestruzzo;
- I Geocompositi mostrano discreti risultati nelle prove di taglio. In particolare, valori leggermente più elevati nella condizione wet della piastra in calcestruzzo nel caso di Geocompositi A, B e D. Nel caso del Geocomposito C, invece, le prestazioni sono risultate leggermente migliori nella condizione dry della piastra in calcestruzzo.



Dai risultati delle prove di adesione Pull-Off si evince che:

- La Resina Bicomponente è un sistema impermeabilizzante inadeguato all'applicazione su impalcati da ponte in quanto non garantisce un livello adeguato di adesione con i materiali dell'impalcato;
- Il sistema Geotessuto e Bitume steso in opera ha fornito discreti risultati nei confronti delle prove di adesione, con valori leggermente più elevati nella condizione dry della piastra in calcestruzzo;
- I Geocompositi sono caratterizzati da buone prestazioni in termini di adesione con valori paragonabili tra la condizione dry della piastra in calcestruzzo e la condizione wet per i Geocompositi A e B. I Geocompositi B e D risultano più performanti nel caso di superficie umida della piastra in calcestruzzo. Il Geocomposito C è fortemente penalizzato dalla superficie umida della piastra in calcestruzzo.

La Resina Bicomponente è stata sviluppata con l'obiettivo di eliminare il consumo di bitume usualmente impiegato nei sistemi impermeabilizzanti, limitando in tal modo il consumo di fonti non rinnovabili come il petrolio. D'altronde, tale soluzione non risulta applicabile poiché ha sia resistenza allo scorrimento che proprietà di adesione scarse.

Il sistema Geotessuto e Bitume steso in opera e i Geocompositi hanno un'alta adesione e dunque l'intero impalcato risulta essere solidale nel sopportare i carichi ciclici trasmessi dal traffico veicolare, senza l'insorgere di scorrimenti viscosi. D'altronde, va sottolineato che rispetto alla Resina Bicomponente, tali soluzioni prevedono elevati consumi di bitume, perlopiù modificato con elevati tenori di polimeri. Inoltre, va aggiunto che il Geotessuto e Bitume offre sicuramente ottime prestazioni, ma necessita di molta manodopera esperta in sito affinché il lavoro venga eseguito ad opera d'arte, mentre il Geocomposito preformato, prodotto industrialmente, va solamente applicato a fiamma.

In seguito a tale caratterizzazione preliminare in laboratorio, si dovrà prevedere un'ottimizzazione della composizione della Resina Bicomponente al fine di migliorare le prestazioni meccaniche.

Inoltre, al fine di valutare l'influenza delle reali condizioni degli impalcati da ponte in calcestruzzo, quali le diverse modalità di applicazione (grande scala rispetto alla piccola scala del laboratorio), le condizioni climatiche variabili e lo strato di conglomerato di spessore maggiore di 4 cm, dovrà essere prevista una stesa sperimentale in sito.

## Bibliografia

- [1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2012). Nondestructive testing to identify concrete bridge deck deterioration. Washington, DC: The National Academies Press.
- [2] Autelitano F., Rinaldi M., Giuliani F. (2019). Winter highway maintenance strategies: Are all the sodium chloride salts the same? *Construction and Building Materials*, 226:945-952.
- [3] Colorado Department of Transportation (2001). Evaluation of selected deicers based on a review of the literature. Report No. CDOT-DTD-R-2001-15.
- [4] Vignisdottir H.R., Ebrahimi B., Booto G.K., O’Born R., Brattebo H., Wallbaum H., Bohne A.A. (2019). A review of environmental impacts of winter road maintenance. *Cold Regions Science and Technology*, 158:143-153.
- [5] National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2012). Waterproofing membranes for concrete bridge decks. Washington, DC: The National Academies Press.
- [6] Highways England, Transport Scotland, Welsh Government, Department for Infrastructure (2022). Waterproofing and surfacing of concrete bridge decks. CD 358. London: The National Archives.
- [7] Transport Infrastructure Ireland (2019). Waterproofing and surfacing of concrete bridge decks. DN-STR-03009. Dublin: TII Publications.
- [8] Manning D.G. (1995). Waterproofing membranes for concrete bridge decks. Washington. DC: National Academy Press.
- [9] Price A.R. (1990). Laboratory tests on waterproofing systems for concrete bridge decks. Report 248, TRL. UK: Crowthorne.
- [10] Price A.R. (1991). Waterproofing of concrete bridge decks: site practice and failures. Report 317, TRL. UK: Crowthorne.
- [11] European Asphalt Pavement Association (2013) Asphalt pavements on bridge decks. Brussels, EAPA.
- [12] Mazzotta F., Lantieri C., Vignali V., Simone A., Dondi G., Sangiorgi C. (2017). Performance evaluation of recycled rubber waterproofing bituminous membranes for concrete bridge decks and other surfaces. *Construction and Building Materials*, 136, 524–532.

- [13] Yang G., Wang C. Fu H., Yan Z., Yin W. (2019). Waterborne epoxy resin–polyurethane–emulsified asphalt: Preparation and properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11): 04019265.
- [14] Guo M., Tan Y., Wang L., Ye Z., Hou Y., Wu J., Yang H. (2017). Study on water permeability, shear and pull-off performance of waterproof bonding layer for highway bridge. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11:396–400.
- [15] Zhang K., Luo Y. (2018). Interlaminar performance of waterproof and cohesive materials for concrete bridge deck under specific test conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8): 04018161.
- [16] Liu M., Han S., Ren W. (2018). Study on cohesion performance of waterborne epoxy resin emulsified asphalt as interlayer materials. *Construction and Building Materials*, 177:72-82.
- [17] Xu Q., Zhou Q., Medina C, Chang G-K., Rozycki D.K. (2009). Experimental and numerical analysis of a waterproofing adhesive layer used on concrete-bridge decks. *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 29:525–534.
- [18] Zhang H., Gao P., Zhang Z., Pan Y. (2020). Experimental study of the performance of a stress-absorbing waterproof layer for use in asphalt pavements on bridge decks. *Construction and Building Materials*, 254:119290.
- [19] Canestrari F., Ferrotti G., Cardone F., Stimilli A. (2015). Innovative testing protocol for evaluation of binder-reclaimed aggregate bond strength, *Transport Research Record*, 63–70:2444.
- [20] Cardone F., Virgili A., Graziani A. (2018). Evaluation of bonding between reclaimed asphalt aggregate and bitumen emulsion composites. *Construction and Building Materials*, 184:565–574.
- [21] Merusi F., Caruso A., Chiapponi L., Giuliani F. (2013). Mechanical analysis of failure processes at bitumen/aggregate interface. 92nd TRB Annual Meeting.
- [22] Canestrari F., Ferrotti G., Abuaddous M., Pasquini E. (2016). Geocomposite reinforcement of polymer-modified asphalt systems. *RILEM Bookseries*, 11:383-395.
- [23] Tao J., Lei Z., Yang B. (2011). Performance of fiberglass asphalt as waterproof and cohesive layer of bridge deck. 3rd ICTE.
- [24] Jin W., Zhao Y., Wang W., He F. (2021). Performance evaluation and optimization of waterproof adhesive layer for concrete bridge deck in Seasonal frozen region using AHP. *Advanced in Materials Science and Engineering*, 5555535.

[25] Feng D., Xu M., Wei W. (2014). Analysis of the influence of cement concrete deck moisture content on the bonding performance of waterproof adhesion layer. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 8(2):031.

[26] Liu Y., Wu J., Chen J. (2014). Mechanical properties of a waterproofing adhesive layer used on concrete bridges under heavy traffic and temperature loading. *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 48:102-109.

## Norme Tecniche

[N1] UNI EN 13375:2019, “Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Impermeabilizzazione di impalcati di ponte di calcestruzzo e altre superfici di calcestruzzo transitabili dai veicoli – Preparazione dei provini”.

[N2] UNI EN 1766:2017, “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – Calcestruzzi di riferimento per prove”.

[N3] UNI EN 197-1:2011, “Cemento – Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni”.

[N4] UNI EN 12697-1:2020, “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 1: Contenuto di legante solubile”.

[N5] UNI EN 933-1:2012, “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per setacciatura”.

[N6] UNI EN 13036-1:2010, “Caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali – Metodi di prova – Parte 1: Misurazione della profondità della macrotessitura delle superfici delle pavimentazioni tramite tecnica volumetrica ad impronta”.

[N7] UNI EN 12697-33:2019, “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 33: Provino preparato con compattatore a rullo”.

[N8] UNI EN 12697-48:2022, “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 48: Legame interstrato”.

[N9] UNI EN 13596:2005, “Membrane flessibili per impermeabilizzazione – Impermeabilizzazione di impalcati di ponte di calcestruzzo e altre superfici di calcestruzzo trafficabili dai veicoli – Determinazione della resistenza dell’aderenza”.