



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e ambientale (LM7 – DM270/04)

CARATTERIZZAZIONE A TAGLIO E FLESSIONE DI GEOCOMPOSITI
CON COMPOUND INNOVATIVO PER PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI

SHEAR AND FLEXURAL CHARACTERIZATION OF
GEOCOMPOSITES WITH AN INNOVATIVE COMPOUND FOR
FLEXIBLE PAVEMENTS

Relatore:
Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di Laurea di
Mattia Di Matteo

Anno Accademico 2023/2024

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 2. STATO DELL'ARTE	6
2.1 PAVIMENTAZIONE STRADALE	6
2.2 HOT MIX ASPHALT	7
2.3 WARM MIX ASPHALT	8
2.3.1 ADDITIVI (WMA)	9
2.4 DISSESTI	9
2.4.1 RINFORZI STRADALI	14
2.4.2 GEOCOMPOSITI	16
CAPITOLO 3. MATERIALI	18
3.1 CONGLOMERATO BITUMINOSO A CALDO CON BITUME MODIFICATO	19
3.2 CONGLOMERATO BITUMINOSO TIEPIDO CON BITUME MODIFICATO	21
3.3. EMULSIONE BITUMINOSA	23
3.4. GEOCOMPOSITI	24
CAPITOLO 4. INDAGINE SPERIMENTALE E PROTOCOLLI DI PROVA	25
4.1 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI	25
4.1.1 MISCELAZIONE	25
4.1.2 COMPATTAZIONE DEI PROVINI	26
4.1.3 NOMENCLATURA, CAROTAGGIO E TAGLIO DEI PROVINI	30
4.2 PROVA LEUTNER	32
4.3 PROVA ASTRA	35
4.4 PROVE DI FLESSIONE STATICA SU TRE PUNTI (3PB)	37
CAPITOLO 5. RISULTATI SPERIMENTALI	41
5.1 GEOCOMPOSITO A1	41
5.1.1 PROVE DI TAGLIO LEUTNER	41
5.1.2 PROVE DI TAGLIO ASTRA	44
5.1.3 PROVE FLESSIONALI 3PB	45
5.2 GEOCOMPOSITO A2	47
5.2.1 PROVE DI TAGLIO LEUTNER	47
5.2.2 PROVE DI TAGLIO ASTRA	49
5.2.3 PROVE FLESSIONALI 3PB	50
5.3 GEOCOMPOSITO I1	51
5.3.1 PROVE DI TAGLIO LEUTNER	51
5.3.2 PROVE DI TAGLIO ASTRA	53
5.3.3 PROVE FLESSIONALI 3PB	54
5.4 GEOCOMPOSITO I2	55
5.4.1 PROVE DI TAGLIO LEUTNER	55
5.4.2 PROVE DI TAGLIO ASTRA	57

5.4.3 PROVE FLESSIONALI 3PB	58
5.5 RIASSUNTO DELLE PRESTAZIONI E CONFRONTO	60
<u>CAPITOLO 6. CONCLUSIONI</u>	65
<u>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</u>	67

Capitolo 1. Introduzione

Il deterioramento delle pavimentazioni stradali è una problematica che richiede una continua ricerca di nuovi strumenti, chiamati a limitare il danno causato dal carico del traffico veicolare, che è in costante aumento sia in termini di quantità di mezzi che di peso trasportato. Oltre a quello dovuto alla ciclicità del carico veicolare va aggiunto il danno causato dalle condizioni ambientali, e nello specifico alla combinazione di due fattori: le grandi variazioni termiche, che la pavimentazione è chiamata a sopportare lungo l'arco delle stagioni, durante la sua vita utile; e l'acqua. Infatti, qualora la pavimentazione presenti fessurazioni superficiali, l'acqua sarebbe libera di penetrare più facilmente fino agli strati più profondi della struttura, dove le basse temperature possono causarne il congelamento, con aumenti di volume di circa il 9%. I danni causati da carico veicolare, variazioni termiche e acqua si manifestano sotto diverse forme di deterioramento, le più comuni sono fessurazioni da fatica, di riflesso e ormaiamento. Il meccanismo che porta alla fessurazione superficiale però avviene ben più in profondità. Negli strati più profondi, infatti, si originano microfessurazioni che, propagandosi, arrivano fino al manto di usura della pavimentazione. Con scarse condizioni di regolarità della superficie stradale, e portanza vengono meno i requisiti di sicurezza che questa è chiamata a offrire e vanno quindi ripristinati.

La ricerca negli ultimi anni si è focalizzata nello studio di dispositivi e tecniche poche invasive, che limitassero il disagio inevitabilmente creato dagli interventi di risanamento della pavimentazione, che spesso richiedono la rimozione completa della sovrastruttura e la necessità di non violare le quote esistenti del piano viabile. Vantaggi tecnici ed economici hanno trovato un buon incastro nei geosintetici di varia natura. I geosintetici sono materiali estremamente utile per diversi motivi legati alla loro versatilità e facilità di installazione, hanno funzioni di rinforzo e stabilizzazione, aumentando la capacità portante e riducendo i cedimenti, di separazione e filtrazione dei differenti materiali, di gestione dell'acqua grazie, ad esempio, a proprietà impermeabilizzanti, e di riduzione dell'impatto ambientale. I geosintetici sono validi sia per la costruzione di nuove strade, che per la manutenzione profonda e superficiale.

Il tema della riduzione dell'impatto ambientale e dell'emissione in atmosfera di agenti inquinanti, inoltre, ha spinto alla ricerca e alla conseguente produzione di conglomerati bituminosi tiepidi. Questi differiscono dai conglomerati bituminosi caldi convenzionali per la loro temperatura di produzione, fino a 40°C inferiore.

La presente Tesi, svolta presso il Dipartimento di Strade dell'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM), vuole analizzare le prestazioni di 4 geosintetici, in particolare geocompositi, per pavimentazioni stradali flessibili a contatto con conglomerati bituminosi tiepidi e caldi. In particolare, si indagano le differenze di prestazioni dei geocompositi tra le due differenti temperature di produzione. Nello specifico, si studiano le prestazioni a taglio per verificare la corretta adesione all'interfaccia tra gli strati, possibile grazie alla fusione del compound polimero che costituisce i geocompositi in esame, e a flessione per valutare l'incremento di resistenza alla propagazione della fessurazione dovuto al rinforzo.

Capitolo 2. Stato dell'arte

2.1 Pavimentazione stradale

La pavimentazione stradale, anche se non strettamente nell'accezione che oggi gli attribuiamo, ha origine molto antica. Le prime strade risalgono al 4000 a.C. con l'antico Egitto e al 3000 a.C. con la civiltà mesopotamica, in questa fase embrionale erano composte da blocchi di pietra e sabbia. I romani perfezionarono la tecnica e furono i primi ad introdurre una struttura stratificata, differenziando tipologia di materiali e granulometria. Il Medioevo fu un periodo buio anche per le costruzioni stradali e si dovette aspettare fino al Rinascimento per osservare un progresso effettivo. Infatti, nel 1820, durante la rivoluzione industriale, John Loudon McAdam, ideò il sistema macadam, che da lui prese il nome. L'innovativo sistema era basato su strati di pietrisco e polvere di aggregati calcarei che, mischiata ad acqua, fungeva da legante. Lo strato veniva poi compattato dal passaggio dei carri garantendo così, per la prima volta, proprietà impermeabilizzanti. Nei primi anni del 1900 per combattere la polvere sollevata dai mezzi che circolavano su strada, Ernest Guglielminetti sperimentò per la prima volta il bitume su un tratto di strada di 40 metri ed ebbe ottimi risultati. Durante i seguenti anni il suo utilizzo si diffuse ampiamente in Europa. [1,2]

Arriviamo così ai giorni nostri, dove la pavimentazione stradale ha una struttura stratificata con materiali di maggiore qualità e minore granulometria in superficie e dove il bitume è largamente usato come legante. La sovrastruttura stradale è chiamata a svolgere delle funzioni essenziali come garantire la trasmissione e distribuzione delle azioni indotte dal traffico, resistere ai carichi ciclici, alle variazioni termiche e proteggere il sottofondo da acqua e gelo e, infine, garantire regolarità del profilo superficiale e aderenza della pavimentazione per fornire sicurezza e comfort di marcia.

Riconosciamo tre tipologie principali di pavimentazione [3]:

- Rigida: costituita da un'unica lastra di calcestruzzo, quindi un'elevata rigidità che permette di distribuire il carico su un'ampia area;
- Flessibile: costituita da strati sovrapposti con granulometria crescente dall'alto al basso, il carico viene così distribuito sull'area di posa, attraverso gli strati;
- Semirigida: presenta una successione di strati come le pavimentazioni flessibili, ma con la differenza che lo strato di base viene trattato con cemento.

Le pavimentazioni flessibili, in generale, presentano la medesima sovrapposizione di strati legati e non legati:

- Sottofondo

- Fondazione
- Strato di Base
- Strato di Binder (o di collegamento)
- Manto di usura

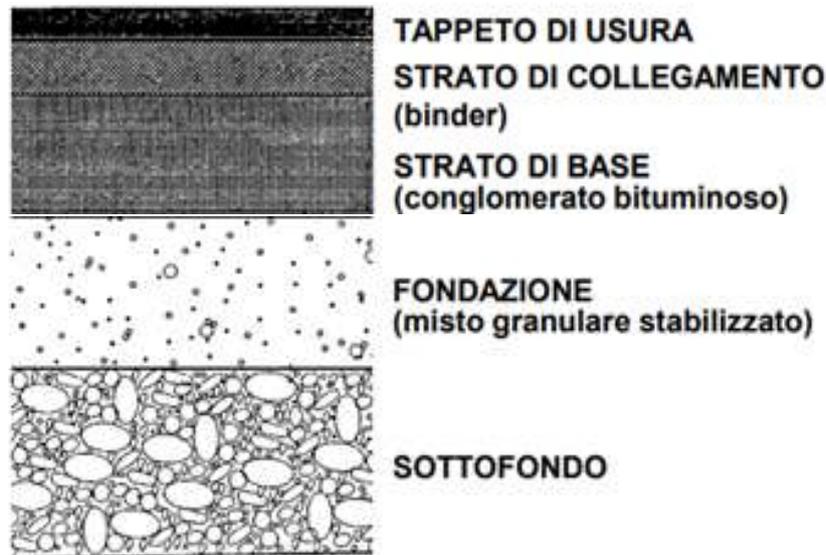


Figura 2.1 – Strati della pavimentazione flessibile

2.2 Hot Mix Asphalt

Il conglomerato bituminoso a caldo di tipo tradizionale, o Hot Mix Asphalt (HMA), è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego, filler, legante bituminoso, additivi ed eventuale conglomerato riciclato, confezionata a caldo in specifici impianti. Il campo di impiego più diffuso dei conglomerati bituminosi è di gran lunga quello delle pavimentazioni flessibili e semirigide, sebbene siano da annoverare anche altre applicazioni quali, per esempio i manti di ricoprimento di lastre rigide in calcestruzzo o i sub-ballast ferroviari. Il conglomerato può essere classificato in base al dei vuoti, abbiamo infatti:

- Conglomerato Chiuso, contenuto vuoti < 5%;
- Conglomerato Semichiuso, contenuto vuoti 5-10%;
- Conglomerato Semiaperto, contenuto vuoti 10-15%;
- Conglomerato Aperto, contenuto vuoti > 15%.

Gli aggregati lapidei costituiscono la fase solida dei conglomerati bituminosi a caldo e sono composti dall'insieme di aggregati grossi, di aggregati fini e di filler che proviene dalla frazione fine. Gli aggregati grossi e fini sono costituiti da elementi ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali.

Il legante è generalmente costituito da bitume semisolido ed eventualmente da quello proveniente dal conglomerato riciclato additivato con attivanti chimici funzionali.

Gli additivi sono prodotti naturali o artificiali che, aggiunti agli aggregati o al bitume, consentono di migliorare le prestazioni dei conglomerati bituminosi. Il loro dosaggio va individuato nello studio della miscela e varia a seconda delle condizioni di impiego, della natura degli aggregati e dalle caratteristiche del prodotto. Ne esistono diverse tipologie, tra cui:

- Attivanti d'adesione: sostanze tensioattive che favoriscono l'adesione bitume-aggregato e quindi utilizzati per migliorare la durabilità all'acqua delle miscele bituminose;
- Rigeneranti: impiegati per rigenerare le caratteristiche del bitume invecchiato contenuto nel conglomerato bituminoso riciclato;
- Fibre naturali o sintetiche: possono essere in poliestere, polipropilene o cellulosa e sono usate per conferire stabilità al mastice bituminoso.

Le temperature di lavorazione del conglomerato bituminoso a caldo variano a seconda del tipo di bitume utilizzato e delle specifiche di progetto, ma in generale si possono indicare i seguenti intervalli:

1. Temperatura di Miscelazione: solitamente compresa tra 150°C e 180°C, per assicurare una distribuzione uniforme del bitume sugli aggregati e mantenere la miscela lavorabile.
2. Temperatura di Compattazione: generalmente tra 120°C e 160°C, a seconda della miscela. È importante che il materiale rimanga abbastanza caldo per consentire una buona costipazione sotto i rulli compattatori.

2.3 Warm Mix Asphalt

Il Warm Mix Asphalt è una miscela di conglomerato bituminoso prodotta e stesa in opera a temperature inferiori rispetto alle normali miscele a caldo (HMA), con riduzioni delle temperature di compattazione e miscelazione comprese tra 20°C e 60°C. La norma europea EN 13108-1:7 che riguarda le "specifiche per l'esplicitazione dei requisiti per le miscele prodotte a caldo per strade, aeroporti e aree soggette a traffico" non impone un limite inferiore per le temperature di produzione dei conglomerati, ma solo le temperature massime. Tuttavia, i WMA sono tecnologie di recente applicazione per cui l'esperienza in laboratorio e in impianto rimane limitata e bisogna perciò indagarle affinché garantiscano le stesse prestazioni richieste dai Capitolati per le miscele tradizionali a caldo.

I vantaggi di utilizzare un conglomerato bituminoso tiepido piuttosto che il tradizionale a caldo sono svariati, uno su tutti la riduzione dell'inquinamento atmosferico e quindi fumi ed emissioni. Altri vantaggi sono, ad esempio, il miglioramento delle condizioni di lavoro data

l'assenza di gas nocivi, la riduzione del consumo energetico nel processo di miscelazione, la possibilità di avere impianti di produzione vicino ai centri urbani, l'aumento delle finestre di lavoro con la possibilità di costruire di notte e d'inverno, i tempi di raffreddamento ridotti che velocizzano i tempi di riapertura al traffico, una migliore lavorabilità ed efficienza di compattazione.

Tuttavia, essendo una tecnologia di recente applicazione, i WMA presentano ancora problematiche aperte come l'aumento dei costi dovuto agli additivi, con le conseguenti modifiche agli impianti per l'aggiunta di tali additivi, la mancanza di dati in sito sulla durabilità a lungo termine, o l'individuazione della miglior tecnologia produttiva, o ancora l'aumento della sensibilità all'acqua dovuto all'incompleta essiccazione degli inerti.

2.3.1 Additivi (WMA)

Diverse sono le tecniche proposte per la lavorazione "a tiepido"; alcune si basano sull'introduzione di specifici agenti minerali, detti zeoliti, in grado di rilasciare vapore acqueo a determinate temperature per agevolare la lavorabilità attraverso processi di microschiama; altre prevedono l'uso di agenti chimici che agiscono attraverso l'emulsione del bitume; altre ancora si basano su agenti di tipo organico come cere sintetiche, in grado di migliorare le proprietà di flusso del legante. e riduzioni di temperatura possono essere raggiunte tramite l'impiego di specifiche tecnologie come additivi e sistemi di iniezione di acqua. Ne riconosciamo 3 tipologie principali:

- Additivi chimici: una combinazione di agenti emulsionanti, riduttori di tensione, polimeri e additivi cari come promotori di adesione volti a migliorare il ricoprimento degli aggregati, la lavorabilità e la compattabilità della miscela;
- Additivi organici: cere organiche (basse temperature di fusione permettono di raggiungere facilmente elevata lavorabilità);
- Processi di schiumatura: iniezione d'acqua (diretta o indiretta tramite additivi) nel bitume caldo per creare vapore e conseguente aumento di volume.

2.4 Dissesti

Si elencano ora le principali tipologie di dissesto stradale per pavimentazioni flessibili:

- * Fessurazione ramificate o a pelle di cocodrillo: ramificazione che formano poligoni di lato medio minore di 50 cm. Queste compaiono sul manto stradale poco prima o in concomitanza con le ormaie e si formano a causa della fatica dovuta al traffico. Si misurano in funzione dell'estensione della superficie interessata.



Figura 2.2 – Fessurazione a pelle di coccodrillo

- * **Risalita di bitume:**
Consiste nella fuoriuscita eccessiva del bitume verso la superficie del manto stradale, che forma una pellicola lucida e vischiosa. Questo problema si manifesta tipicamente durante periodi caldi, quando il bitume diventa più fluido a causa delle elevate temperature. Vengono misurate in estensione della superficie. Le cause possono essere: sovradosaggio di bitume, compattazione eccessiva, condizioni ambientali, tipologia di bitume con bassa viscosità o un'errata progettazione del mix design. Nella sua forma più grave questo causa una superficie stradale appiccicosa per alcune settimane l'anno.

- * **Fessurazione a blocchi:**
fessurazioni che formano blocchi rettangolari con aree estese che vanno dai $0,3\text{ m} \times 0,3\text{ m}$ ai $3\text{ m} \times 3\text{ m}$. Le cause possono essere le variazioni termiche e l'invecchiamento del bitume che col tempo lo rende meno elastico e perciò incapace di assorbire le sollecitazioni termiche e meccaniche, portando alla formazione di crepe.

- * **Rigonfiamenti e depressioni localizzati:**
sono piccoli e bruschi spostamenti localizzati della pavimentazione verso l'alto (bumps) o verso il basso (sags). La severità del dissesto è valutata in funzione del comfort di guida. Si misurano in lunghezza. Le cause possono essere i rigonfiamenti dovuti al gelo o l'accumulo di materiale in una fessura in combinazione con l'azione del traffico.

- * **Corrugamenti:**
si tratta di una serie di creste e avvallamenti dove gli innalzamenti sono perpendicolari al traffico, con intervalli regolari minori di 3 m. La severità è valutata sul comfort di marcia e le cause possono essere la superficie di base instabile o le azioni tangenziali indotte dagli pneumatici.

- * **Depressioni:**
sono aree localizzate con una quota inferiore a quella del piano viabile circostante, per questo possono causare fenomeni di ristagni d'acqua con seguente pericolo di aquaplaning. La severità è determinata dalla profondità e la misurazione è fatta sulla superficie. Le cause possono essere il cedimento del sottofondo o un'errata costruzione della sovrastruttura.
- * **Fessurazioni di bordo:**
sono fessurazioni parallele al margine laterale a distanza di 30-50 cm. Si misurano in lunghezza e la severità è valutata in base al livello di sgranamento. Le cause possono essere il gelo o la mancanza di un adeguato supporto laterale.
- * **Fessurazioni di riflessione del giunto:**
Questo ammaloramento è presente solo nelle pavimentazioni composte di lastre in calcestruzzo ricoperte in conglomerato bituminoso e sono causate dai movimenti di apertura e chiusura dei giunti provocati dal ritiro termico delle lastre. Non sono generate dai carichi di traffico, ma questi possono causare la rottura dello strato in conglomerato bituminoso vicino alla fessura. Sono misurate in lunghezza e possono essere sia longitudinali che trasversali.



Figura 2.3 – Fessurazioni di riflessione del giunto

- * **Cedimenti margine della carreggiata:**
differenza di quota tra bordo della pavimentazione e margine laterale, in alcuni casi si rileva anche un dislivello tra corsie dovuto ad irregolari modalità di posa in opera del materiale superficiale. Si misurano in lunghezza e il grado di severità è dato dalla differenza della quota. Le cause sono l'erosione o il cedimento del margine e la mancata sistemazione della quota del margine.
- * **Fessurazioni longitudinali e trasversali:**
sono fessurazioni parallele o perpendicolari alla linea di mezzzeria. Si misurano in lunghezza e il grado di severità dipende dall'avvenuta sigillatura o meno della fessura e dalla sua ampiezza. Sono causate da difetti nella costruzione della giunzione della

pavimentazione, dal ritiro a causa delle basse temperature o dalla riflessione di fessure sottostanti.



Figura 2.4 – Fessura longitudinale

- * **Rappezzi:**
sono aree di pavimentazione rimpiazzate, e rappresentano un difetto indipendentemente dalla condizione. Si misurano in superficie e la severità è data dalle condizioni di deterioramento.
- * **Levigatura degli aggregati:**
gli aggregati si presentano lisci e lucidi e comportano un basso valore di skid resistance. Non esistono livelli di severità definiti in quanto la levigatura deve essere significativa per essere registrata. Si misura in superficie e le cause sono da ricondursi ad aggregati lapidei non idonei o a ripetute applicazioni di carico.
- * **Buche:**
sono piccole cavità della pavimentazione, generalmente con diametro medio inferiore ai 75 cm e presentano bordi taglienti e verticali. La severità, funzione della profondità massima e del diametro medio, è suddivisa in 3 classi: low, medium e hard. Si misurano in numero e le cause sono l'azione del traffico unita all'acqua e l'evoluzione di altri dissesti.



Figura 2.5 - Buca

* Attraversamenti ferroviari;

* Ormaie:

una delle tipologie di dissesto più diffuse, sono depressioni superficiali nel wheel path con possibile accumulo laterale di materiale, si formano così dei binari che possono causare ristagni d'acqua. Si misurano in superficie e la severità è valutata in base alla profondità. Le cause possono essere una miscela bituminosa deformabile o un cedimento degli strati inferiori.



Figura 2.6 - Ormaie

* Scorrimenti:

Questo ammaloramento è uno spostamento longitudinale permanente in un'area circoscritta del manto causato dai carichi di traffico. Il traffico spingendo contro la pavimentazione produce un'onda corta e brusca nel manto. Tale ammaloramento generalmente si trova solo in pavimentazioni con miscele di conglomerato bituminoso molto liquido (emulsioni) Il grado di severità è dato dal comfort di guida. Si misura in superficie.

* Fessurazioni da scorrimento:

Le fessure da scorrimento, di forma ricurva, sono causate dallo scivolamento o dalle deformazioni indotte durante il rotolamento o la frenatura degli pneumatici: di solito sono localizzate in curva, in salita, nelle intersezioni. Lo slittamento si manifesta più facilmente in presenza di strati di usura sottili e scarsamente resistenti alle azioni tangenziali, di scarsa aderenza tra la superficie e lo strato ad essa inferiore, di miscele di conglomerato bituminoso molto liquido (emulsioni). Si misura in superficie e la severità è valutata in base all'ampiezza della fessura.

* Rigonfiamenti:

I rigonfiamenti sono caratterizzati da un graduale innalzamento della superficie stradale che si prolunga per più di 3 m. È causato dall'azione del gelo nel sottofondo; spesso si presenta con formazione di fessure da scorrimento.

- * Disgregazione e sgranamenti:
si presentano come distacco di parti di aggregato e successiva perdita di legante bituminoso. La severità si valuta sulla rugosità della tessitura. Si misura in superficie e le cause sono l'irrigidimento del bitume, una miscela di bassa qualità, il tipo di traffico e il versamento di oli.

2.4.1 Rinforzi stradali

Il termine geosintetici indica una vasta famiglia di prodotti normalmente utilizzati a contatto con il terreno, nei quali almeno una componente è costituita da un polimero, naturale o sintetico.

Il principio base del "rinforzo" delle opere in terra mediante l'introduzione di fibre naturali, per esempio, il legno, risale all'epoca egizia ed era noto anche ai Romani. L'introduzione dei materiali polimerici, che ha permesso di superare gli inconvenienti legati alla degradabilità dei prodotti naturali ha favorito, a partire dagli anni '60, lo sviluppo e la diffusione dei geosintetici nell'ingegneria civile e in particolare in campo stradale.

La materia prima impiegata per la fabbricazione dei geosintetici è costituita dai polimeri, organici o inorganici, prevalentemente di origine sintetica. I più utilizzati sono il poliestere (PET), il polietilene (PE), il polipropilene (PP), il poliammide (o nylon, PA) e il polivinile cloruro (PVC). Da segnalare è anche l'utilizzo di Kevlar e delle fibre di vetro, con funzioni di cucitura o rinforzo della fibra polimerica.

I prodotti geosintetici possono essere raggruppati in due categorie principali: geosintetici permeabili e geosintetici impermeabili. Della prima categoria fanno parte i geotessili (tessuti e non tessuti), le geogriglie, le georeti, le geocelle e le geostuoie. Alla seconda categoria appartengono invece le geomembrane mentre i geocompositi possono appartenere ad entrambe le categorie.

I geotessili sono prodotti piani costituiti da fibre o filamenti continui tessuti, non tessuti o uniti mediante metodi meccanici (agugliatura) o termici (termosaldatura). Il loro aspetto è simile a quello di un tessuto naturale e sono quindi caratterizzati da una grande flessibilità.

Le geogriglie sono prodotti piani caratterizzati da una struttura reticolare regolare di elementi resistenti monodimensionali, integralmente connessi tra loro. La griglia può essere prodotta mediante un processo di estrusione, tessitura o saldatura degli elementi resistenti. L'impiego delle geogriglie è legato soprattutto alla loro funzione di rinforzo.

Le georeti hanno una struttura reticolare simile a quella delle geogriglie, caratterizzata però da una parziale compenetrazione degli elementi resistenti nei punti di contatto. Grazie alla loro elevata permeabilità anche nel proprio piano sono utilizzate soprattutto con funzione di drenaggio.

Le geostuoie sono prodotti aventi una struttura tridimensionale aperta e flessibile, realizzata mediante l'unione meccanica, termica o chimica di filamenti sintetici. Quando è richiesta un'elevata resistenza meccanica le geostuoie possono essere rinforzate con elementi resistenti sintetici o metallici. La loro funzione è di protezione dall'erosione. Quando sono realizzate con filamenti naturali prendono il nome di biostuoie o biotessili.

Le geocelle sono caratterizzate da una struttura tridimensionale di tipo alveolare, costituita dall'interconnessione di celle realizzate con fogli di materiale polimerico. Le celle possono essere riempite con terreno, aggregati di granulometria selezionata o anche calcestruzzo. Le geocelle sono utilizzate prevalentemente con funzione di protezione, drenaggio e rinforzo.

Le geomembrane sintetiche sono fogli continui e impermeabili realizzati con uno o più materiali polimerici (plastomerici o elastomerici). Le geomembrane bituminose sono invece costituite da un supporto (generalmente un geotessile) impregnato o rivestito di bitume modificato, e un rivestimento con fogli antiaderenti. La funzione delle geomembrane è principalmente di separazione e impermeabilizzazione.

I geosintetici disponibili sul mercato sono utilizzati per le seguenti funzioni principali: separazione, filtrazione, drenaggio, rinforzo, contenimento e controllo dell'erosione. La funzione di separazione viene utilizzata quando i geosintetici, in particolare i geotessili, sono posizionati tra terre o miscele granulari caratterizzate da differente composizione granulometrica. Per esempio, al fine di prevenire la penetrazione di uno strato in misto granulare non legato all'interno di un sottofondo di natura argillosa. Analogamente, l'interposizione di un geotessile può prevenire la risalita per pompaggio della frazione fine del sottofondo all'interno della pavimentazione. I geosintetici possono essere impiegati in sostituzione dei materiali granulari per permettere la filtrazione dell'acqua trattenendo le particelle di terreno. Per esempio, i geotessili sono utilizzati per proteggere gli strati drenanti nelle pavimentazioni stradali e le trincee drenanti, oltre che nella costruzione di geocompositi drenanti e dreni verticali. Per assicurare la funzione di ritenzione della frazione fine è necessario dimensionare il diametro caratteristico dei pori del filtro, in relazione alla distribuzione granulometrica del terreno.

I geosintetici possono sostituire i tradizionali materiali granulari anche nella funzione di drenaggio. Prodotti specifici (geocompositi drenanti) sono stati sviluppati per applicazioni in cui è necessario garantire una sufficiente portata idraulica sia in direzione longitudinale che trasversale. I geocompositi drenanti possono essere utilizzati in sostituzione delle tradizionali trincee riempite di materiale granulare o degli strati drenanti, oppure a tergo di muri di sostegno, per evitare l'insorgere della spinta idrostatica. I dreni verticali prefabbricati sono stati utilizzati per accelerare la consolidazione del terreno al di sotto dei rilevati (stradali e ferroviari).

I geosintetici possono essere utilizzati come elemento di rinforzo dei terreni, delle miscele bituminose e di quelle con legante idraulico (intonaci, calcestruzzo). Geotessili e geogriglie sono utilizzati, insieme al terreno, per creare strutture composite aventi caratteristiche di resistenza e deformabilità nettamente superiori a quelle della terra non rinforzata. Per esempio, si possono realizzare muri in terra rinforzata con paramenti sub-verticali. Il rinforzo

consente di realizzare rilevati su terreni estremamente deformabili e di aumentare la pendenza delle scarpate degli stessi rilevati riducendone notevolmente l'ingombro. L'utilizzo delle geogriglie e delle geomembrane si è diffuso anche per il rinforzo delle pavimentazioni bituminose. In questo caso le applicazioni sono mirate sia all'aumento della capacità portante (riduzione dei carichi trasmessi al sottofondo), sia alla mitigazione del fenomeno della fessurazione da riflessione.

I geosintetici, in particolare le geostuoie, sono utilizzati per il controllo dell'erosione causata dall'impatto delle precipitazioni e dal ruscellamento sulle opere in terra di nuova costruzione. Le protezioni possono essere di carattere sia temporaneo che permanente. La protezione dall'erosione può essere realizzata anche utilizzando geocelle riempite di materiale granulare di pezzatura grossolana. Tale soluzione si rivela particolarmente utile nel caso di pendii in cui si abbia la quasi totale assenza di terreni vegetali. La funzione di contenimento (barriera) al passaggio dei fluidi e in particolare dell'acqua è il principale campo di impiego delle geomembrane e dei geocompositi bentonitici. [4]

2.4.2 Geocompositi

I geocompositi sono prodotti costituiti dalla combinazione di due o più tipi di geosintetici, ad esempio, geotessile-georete o geotessile-geogriglia. I geocompositi drenanti e i dreni verticali prefabbricati sono costituiti da un nucleo a elevata permeabilità in materiale plastico, incluso in un geotessile avente funzione di filtro. I geocompositi bentonitici hanno invece una struttura a "sandwich" in cui uno strato di bentonite è racchiuso tra due fogli di geosintetico (geotessile o geomembrane). I fogli sono collegati o cuciti per garantire stabilità e resistenza al taglio sfruttando le capacità di rigonfiamento delle bentoniti in presenza d'acqua, questo tipo di geocompositi è utilizzato per la sua funzione impermeabilizzante.

Il vantaggio principale di utilizzare geocompositi è la combinazione dei vantaggi legati al rinforzo della pavimentazione, come la resistenza ai dissesti della pavimentazione, e alla membrana bituminosa che assicura una migliore adesione tra gli strati e garantisce l'impermeabilizzazione degli strati in misto granulare sottostanti.

Un altro vantaggio che i geocompositi offrono rispetto ai geosintetici è il rinforzo che la membrana bituminosa offre contro il possibile deterioramento causato dalle attività di compattazione del terreno e contro le alte temperature di lavorazione del conglomerato bituminoso che possono creare la riduzione delle proprietà meccaniche del rinforzo.

Il geocomposito è utile per combattere dissesti stradali quali fessurazioni a pelle di coccodrillo, fessure laterali e trasversali e ormaie poiché, grazie alla rete o alla griglia di cui è composto, ritarda la propagazione della fessura che si innesca negli strati profondi e si propaga verso l'alto, prolungando significativamente la vita utile della pavimentazione.

Inoltre, in caso di interventi di manutenzione o riabilitazione, l'applicazione dei geocompositi non richiede la costruzione di uno strato di livellamento, a differenza dei geosintetici tradizionali. In questo senso i geocompositi risultano particolarmente vantaggiosi per le

attività che vengono svolte di notte per limitare i disagi al traffico, ad esempio nel caso di autostrade e strade ad alta velocità.

Molti studi hanno documentato l'efficacia dei geosintetici ma ad oggi esiste ancora poca letteratura scientifica riguardo i geocompositi. I risultati disponibili in letteratura sono incoraggianti e suggeriscono che i geocompositi possono effettivamente ritardare le fessurazioni oltre a migliorare la resistenza all'ormaiamento, anche se le prestazioni sono fortemente influenzate dall'incollaggio tra gli strati assicurato dal geocomposito.[5]

Tuttavia, non è ancora del tutto chiaro come le proprietà fisiche e meccaniche del geocomposito influiscano sulle prestazioni del sistema rinforzato. Inoltre, la maggior parte della ricerca su sistemi rinforzati con geocompositi è stata condotta in laboratorio piuttosto che in sito; perciò, i risultati di laboratorio vanno convalidati attraverso la costruzione e il monitoraggio di sezioni di prova reali.

In fase di studio delle prestazioni del geocomposito è necessario verificare il comportamento a taglio dell'interfaccia rinforzata e l'efficienza nel contrastare la propagazione delle fessure indotte mediante carichi flessionali.



Figura 2.7 – Geocomposito messo in opera

Capitolo 3. Materiali

Di seguito si riportano tutti i materiali utilizzati per il confezionamento delle piastre da cui poi sono stati ricavati i provini. In sintesi, tutte le piastre presentano un doppio strato:

- * **Strato inferiore.** Composto da conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato (Cap. 3.1 Conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato) che riproduce la pavimentazione già presente in sito. Infatti, in fase di preparazione al nuovo getto, si effettua una fresatura dell'esistente tappeto di usura più all'incirca 5-6 cm dello strato di binder, lasciando esposta la superficie che diventerà la nuova interfaccia tra vecchia e nuova pavimentazione;
- * **Interfaccia rinforzata.** Con quattro geocompositi che da ora in poi chiameremo A1, A2, I1 e I2 che hanno la funzione di ritardare la propagazione di fessure esistenti nel nuovo strato di conglomerato bituminoso, senza penalizzare l'adesione tra gli strati;
- * **Strato superiore.** Composto da conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato (Cap. 3.2 Conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato) che riproduce in nuovo tappeto di binder/base che andrà a realizzarsi in cantiere per ultimare la manutenzione del tratto stradale. A questa si aggiunge la configurazione di riferimento con conglomerato bituminoso caldo.

Il conglomerato bituminoso è costituito da una miscela formata da legante bituminoso, aggregati di varia natura e granulometria e filler minerali. La combinazione di questi materiali definisce il mix design da rispettare in fase della miscela.

Gli aggregati lapidei derivano dalla frantumazione delle rocce e successiva vagliatura, rappresentano circa il 60-80% delle miscele stradali. Riconosciamo tre classi principali di aggregati:

- * **Aggregati grossi.** Hanno dimensioni > 4 mm costituiscono la fase solida portante del conglomerato;
- * **Aggregati fini.** Hanno dimensioni comprese tra 0.063 mm e 4 mm, la cui funzione è quella di andare a riempire i vuoti presenti tra i granuli di aggregato grosso;
- * **Aggregati filler.** Hanno dimensioni < 0.063 mm, è una frazione molto importante del conglomerato bituminoso in quanto, insieme al bitume, va a creare il mastice.

Tutti gli aggregati devono essere descritti mediante la classificazione d/D, che indica il diametro minimo (d) e massimo (D) tra cui è compresa la frazione granulometrica. Solitamente si richiede un $D < s/3$, dove "s" rappresenta lo spessore dello strato, in questo modo si evitano aggregati troppo grande che rendono la miscela poco lavorabile e troppo piccoli che tendono ad essere poco durevoli.

Per definire una corretta distribuzione di grandezze dei materiali lapidei facciamo riferimento ad una curva granulometrica compresa tra due fusi. La curva individua la percentuale di materiale passante ad ogni setaccio di una pila, dove il setaccio più in alto ha una maglia larga, mentre l'ultimo setaccio ha una maglia confrontabile con la dimensione degli aggregati filler. I fusi entro cui deve ricadere la curva granulometrica cambiano in base allo strato che stiamo analizzando, in quanto gli inerti che compongono gli strati variano per caratteristiche e pezzature.

Il legante bituminoso è un composto organico eterogeneo derivato dal processo di distillazione del greggio di petrolio ed ha funzione di conferire alla miscela granulare la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e flessione dovute al carico del traffico veicolare. Riconosciamo 3 principali classi di legante bituminoso:

- * **Bitume tradizionale.** Dato da tre elementi: asfalteni, oli e resine. I primi sono polveri che danno corpo e colore al bitume; gli oli (saturi e aromatici) fungono da agenti flocculanti degli asfalteni; le resine fungono da agenti peptizzanti per gli asfalteni, che diversamente tenderebbero ad aggregarsi e a flocculare:
- * **Emulsione bituminosa.** Composta da legante, acqua e agente emulsionante. L'acqua rappresenta la fase disperdente, il legante la fase dispersa sotto forma di goccioline e l'agente emulsionante conferisce polarità superficiale alle goccioline di legante;
- * **Bitume modificato.** Il bitume viene modificato in due modi. Si possono aggiungere agenti modificanti quali additivi o composti chimici al bitume tradizionale oppure si possono unire direttamente durante la produzione del conglomerato bituminoso.

Il vantaggio di utilizzare il bitume modificato è l'incremento di prestazioni che fornisce al materiale, influenzandone le caratteristiche fisiche e meccaniche. A seconda del quantitativo in peso di additivo utilizzato, il bitume modificato viene diviso in 3 sottoclassi: Hard se il quantitativo di additivo è compreso tra 3 e il 5%; Medium se compreso tra 2 e 3%; Soft se compreso tra 1 e 2%.

3.1 Conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato

Il conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato è stato prodotto dall'impianto Amplia Infrastructures S.p.A. (Gruppo ASPI) sito a Magliano Sabina (RI). Il conglomerato bituminoso viene impiegato per strati di collegamento (binder) e strati di base autostradali.

Lo studio granulometrico (Figura 3.1) evidenzia che la miscela è composta per il 70% da aggregati calcarei vergini con dimensione massima dell'aggregato pari a 31.5 mm e per il 30% da fresato indistinto 0/14. Osserviamo che circa il 25% trattasi di sabbia con dimensione 0/4, mentre per il restante 45% si ha pietrischetto e pietrisco di dimensioni rispettivamente 6.3/16 e 16/22.4.

Studio granulometrico

Data : 21/09/2021

Inerte	Cava 4P	Cava 4P	Marocca				Granulato cb	Risultante granulometrica		Fuso			
	0/4	6,3/16	16/22,4				0/14	Trattenuti %	Passanti %	Passanti %			
Analisi granulometriche (UNI EN 933-1) Set UNI - Trattenuti %													
	31,5								100,0	100	100		
	20			29,0					9,0	91,0	73	94	
	14		7,8	61,1			6,0		21,8	69,2	51	76	
	10		32,8	9,4			19,9		13,5	55,7	40	64	
	6,3		52,6				20,6		13,5	42,2	31	55	
	2	27,9	6,0				22,1		14,4	27,7	19	38	
	0,5	41,3					12,1		14,0	13,8	8	21	
	0,25	11,0					8,2		5,2	8,5	5	16	
	0,063	8,8					1,6		2,7	5,9	4	8	
	Filler	11,0	0,8	0,5			9,5		5,9				
	% utilizzo	25	14	31				30					

Gse g/cm ³ (MVA inerti)	2,488	2,579	2,769				2,667		2,637	Gse mix
---------------------------------------	-------	-------	-------	--	--	--	-------	--	-------	------------

Figura 3.1 – Granulometria conglomerato bituminoso a caldo

Con la setacciatura e lo studio della granulometria precedentemente mostrata otteniamo la curva granulometrica del conglomerato bituminoso caldo (Figura 3.2).

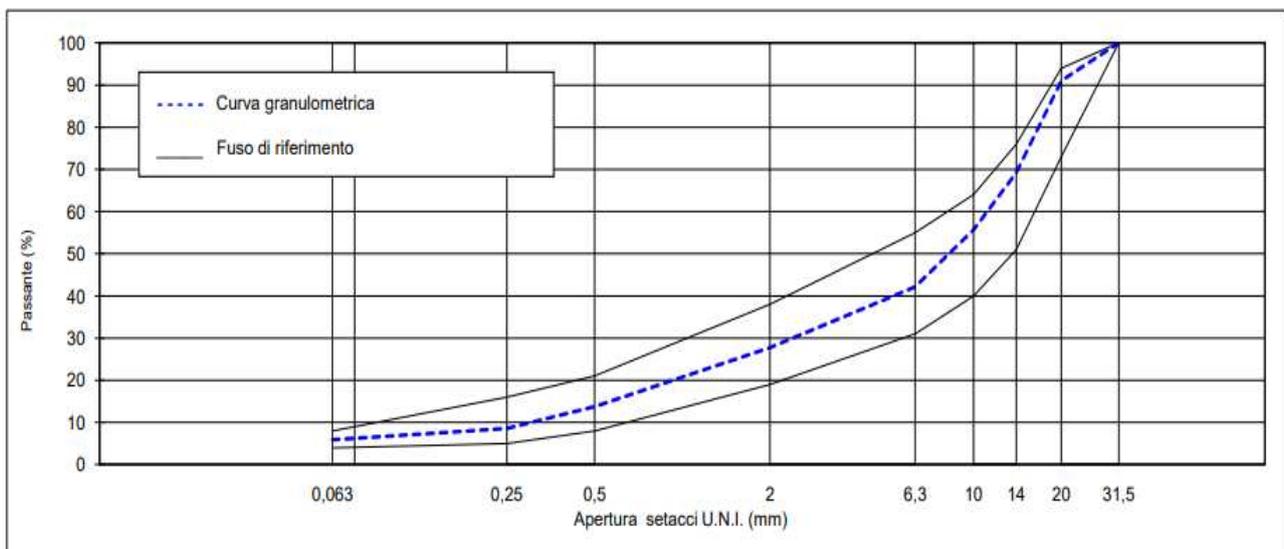


Figura 3.2 – Curva granulometrica del conglomerato bituminoso

Il bitume, ottenuto modificando un bitume base 70/100 con il 3,8% di polimeri SBS (modifica "hard"), è classificato come PmB 45/80 – 70 [N6]. Il contenuto di bitume è pari al 4,1% rispetto al peso degli aggregati. Il contenuto di bitume totale e la curva granulometrica sono stati determinati tramite l'esecuzione di due estrazioni con solvente e successiva setacciatura dell'aggregato ottenuto. La massa volumetrica della miscela è di 2.514 g/ cm³. La temperatura di compattazione è 160°C.

Il contenuto di vuoti di progetto è stato ottenuto tramite la compattazione di tre provini cilindrici di diametro 150 mm con pressa giratoria [6] a taglio a numero di giri imposti pari a N_{design} (120 giri), è del 4%.

Pressa Giratoria

Diametri provini (mm) :

MVA legante (gr/cm³) :

Angolo rotaz.: 1,25° ± 0,02° - Velocità di rotaz.: 30 rotaz./min - Pressione vert.: 600 kPa

Gmm : (gr/cm³)

N° Rotazioni	Miscela di prova				
	%Gmm	Air voids %	VMA %	VFA %	Air voids %
10	86,8	13,2	-	-	12÷15
120	96,4	3,6	13,2	72,8	3÷5
200	97,8	2,2	-	-	≥ 2

Stime al 96% Gmm					
Bitume rif. inerti:	N° Rotaz.	%Gmm	Air voids %	VMA %	VFA %

% Bitume da impiegare consigliato (riferito agli inerti):

Dg=Densità giratoria di progetto:

Figura 3.3 – Prove su bitume modificato per conglomerato bituminoso caldo

3.2 Conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato

Il conglomerato bituminoso tiepido verrà impiegato esclusivamente per lo stato superiore dei provini che andremo a realizzare e simulerà il nuovo strato di usura che si andrà a posare in sito in fase di manutenzione dei tratti stradali interessati. Con il conglomerato tiepido abbattiamo, oltre alla temperatura di miscelazione e posa in opera del materiale, la temperatura di riscaldamento degli aggregati vergini.

La granulometria degli aggregati di questo strato è uguale a quella dello strato sottostante, presenta quindi:

- 25% di sabbia 0/4, per un peso totale di 9,00 kg
- 14% di pietrischetto 6.3/16, per 5,04 kg
- 31% di pietrisco 16/22.4, per 11,16 kg
- 30% di materiale di recupero 0/14, per 10,80 kg

Con tali quantitativi abbiamo raggiunto circa i 36 kg di peso totale di aggregati che ci hanno permesso di realizzare un impasto per quattro piastre di prova (solo strato superiore).

Il bitume è dato da bitume di estrazione dell'asfalto riciclato per l'1,55% del peso del risultato totale. Sottraendolo alla percentuale di bitume totale si ricava il 2.75% di bitume da aggiungere agli aggregati vergini in fase di miscelazione che tradotto in peso corrisponde a 991 g.

Per ovviare alla riduzione delle prestazioni del bitume, che potrebbe verificarsi alle basse temperature del conglomerato tiepido, è stato aggiunto dell'additivo attivante di adesione ITERLOW T, composto da derivati amminici e additivi specifici, per una quantità pari allo 0.35% del bitume totale e quindi pari allo 0.55% del quantitativo di bitume vergine d'aggiunta.

L'additivo svolge 3 compiti: consente di abbassare le temperature di produzione, stesa e compattazione del conglomerato bituminoso (WMA – Warm Mix Asphalt), con conseguente risparmio energetico e riduzione delle emissioni atmosferiche; fornisce un consistente contributo in qualità di attivante d'adesione; e infine nella produzione a caldo, migliora e mantiene la lavorabilità del conglomerato bituminoso anche in presenza di basse temperature esterne (< 5°C) e per trasporti su lunghe distanze.

Il dosaggio è in genere del 0.2 – 0.5% sul peso del bitume, in funzione delle condizioni operative, ma è buon'abitudine determinare la percentuale ottimale tramite test di laboratorio, in quanto potrebbe discostarsi dai range.

PROPRIETÀ

Aspetto	liquido
Colore	giallo - bruno
Densità a 25°C	0,95 - 1,05 g/cm ³
Viscosità a 25°C	150 - 250 cP
Punto di infiammabilità	≥ 105°C
Punto di scorrimento	≤ -5°C

Figura 3.4 – Proprietà dell'additivo ITERLOW T

Nella scheda tecnica dell'additivo utilizzato sono riportate le linee guida per l'impiego di quest'ultimo sia in laboratorio che in sito.

❖ WARM MIX ASPHALT – LINEE GUIDA PER L'UTILIZZO IN LABORATORIO

Informazioni generali e avvertenze

- * Durante tutte le fasi di mescolazione, si raccomanda di mantenere la temperatura a 130-140°C.
- * Prima della compattazione con pressa giratoria o compattatore Marshall, il campione deve essere condizionato in forno alla temperatura di costipazione idonea per circa 2 ore.

Modo d'uso

- * Utilizzare la curva granulometrica relativa alla pavimentazione da realizzare;
- * Riscaldare gli aggregati e introdurli nel mescolatore da laboratorio;
- * Aggiungere nel legante da utilizzare il quantitativo di ITERLOW T previsto e mescolare per alcuni secondi fino alla completa dispersione dell'additivo.
- * Inserire il quantitativo di legante previsto e mescolare per almeno 40 – 50 secondi fino al completo ricoprimento degli aggregati;
- * Inserire il filler alla stessa temperatura degli aggregati e mescolare sino a totale integrazione nella miscela;
- * Miscelare l'impasto per ulteriori 5 minuti.

❖ WARM MIX ASPHALT – LINEE GUIDA PER L'UTILIZZO IN IMPIANTO

Informazioni generali e avvertenze

- * Si consiglia di dosare il prodotto tramite pompa dosatrice direttamente nella pesa del bitume;
- * Le temperature di produzione variano solitamente tra i 130 – 150°C, mentre le temperature di stesa tra i 100 – 120°C;
- * Dopo la produzione, la miscela deve essere stesa e rullata alla temperatura ottimale di compattazione.

Modo d'uso

- * Utilizzate la curva granulometrica relativa alla pavimentazione da realizzare;
- * Riscaldare gli aggregati e introdurli nel mescolatore;
- * Aggiungere nel legante da utilizzare il quantitativo di ITERLOW T previsto da prequalifica;
- * Inserire il quantitativo di legante previsto da prequalifica e mescolare fino al completo ricoprimento degli aggregati;
- * Inserire infine il filler e mescolare sino a totale integrazione nella miscela.

3.3. Emulsione bituminosa

L'emulsione bituminosa per mani d'attacco ha codice di classificazione C69BP3 [N7]. È un'emulsione cationica (C) con percentuale di bitume residuo modificato con polimeri SBS (BP) a seguito della rottura pari al 69% dell'emulsione. La classe di rottura 3 indica una velocità medio-veloce. L'emulsione è stata prodotta da Valli Zabban S.p.A., e il suo nome commerciale è HELASTOVAL 70.

3.4. Geocompositi

Sono stati indagati 4 geocompositi, denominati A1, A2, I1, I2. Il rinforzo dei geocompositi indicati con A è dato da una rete in fibra di vetro, mentre quello dei geocompositi I è dato da un tessuto con fibre adirezionali. Il numero 1 si riferisce alla variante con compound thermo, mentre il 2 alla variante con compound thermo/autoadesivo. Tali compound sono innovativi in quanto rappresentano delle varianti rispetto ai compound attualmente presenti nei geocompositi in commercio per operazioni di manutenzione su pavimentazioni flessibili. Il compound dei geocompositi utilizzati è stato appositamente studiato per fondere alle temperature di compattazione nel caso di utilizzo di conglomerato bituminoso tiepide, ovvero tra 110°C e 140°C, assicurando quindi un'ideale solidarizzazione degli strati. La variante 2 presenta inoltre un film cosiddetto 'tackificante' che dovrebbe assicurare una maggiore adesione tra geocomposito e superficie di conglomerato bituminoso esistente (fredda) nel momento della posa.

I quattro materiali sono stati forniti in rotoli da un metro di larghezza. Presentano un film adesivo nella parte inferiore per assicurare la giusta aderenza.

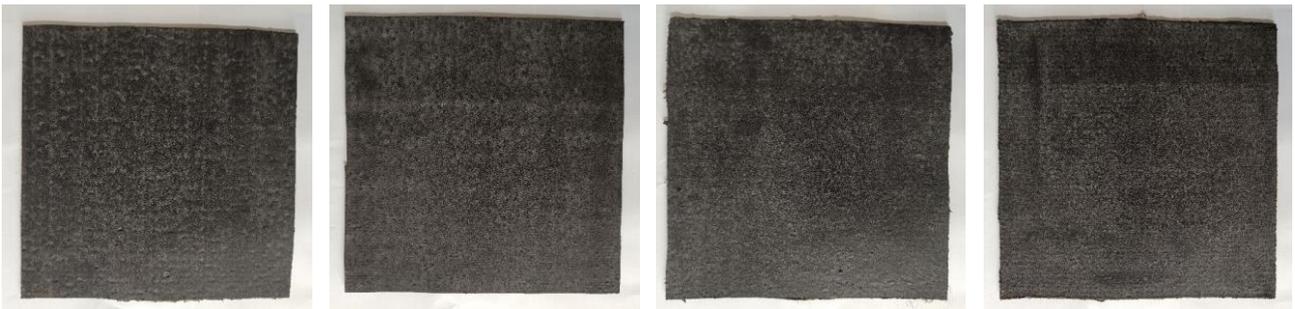


Figura 3.5 – Da sinistra verso destra: Superficie superiore dei geocompositi A1, A2, I1, I2

Capitolo 4. Indagine sperimentale e protocolli di prova

In questo capitolo andremo ad analizzare, passo dopo passo, i passaggi della produzione dei provini e delle prove a taglio o flessione di questi.

4.1 Confezionamento dei provini

L'obiettivo di questa sperimentazione è stato testare i quattro geocompositi A1, A2, I1, I2 alle prove di taglio e di flessione, posti all'interfaccia tra due strati di conglomerato bituminoso prodotti e compattati a diverse temperature. Nello specifico, è stato impiegato il conglomerato bituminoso tiepido compattato a 120°C e il conglomerato bituminoso caldo compattato a 160°C.

Lo strato superiore in conglomerato bituminoso tiepido è stato miscelato e compattato in laboratorio, mentre per lo strato superiore e inferiore in conglomerato bituminoso caldo è stato usato conglomerato già confezionato e riscaldato a 160°C per almeno 3 ore.

La tabella indica le temperature a cui sono stati riscaldati i componenti del conglomerato bituminoso tiepido (bitume, aggregati vergini e riciclati), non ch  le temperature di miscelazione e compattazione.

CONFIGURAZIONE	120°C	160°C
T aggregati vergini	140°C	-
T asfalto riciclato	t. amb.	-
T bitume	170°C	-
T miscelazione	130°C	-
T compattazione	120°C	160°C

Tabella 4.1 – Configurazione a 120°C e 160°C

4.1.1 Miscelazione

La miscelazione   stata necessario per la produzione del conglomerato bituminoso tiepido, da impiegare per lo strato superiore delle piastre bistrato. In questa fase vengono preparati i materiali necessari a produrre gli strati delle piastre. Il processo di confezionamento dello strato di base, infatti,   stato il medesimo, ovvero posando il conglomerato bituminoso prodotto in impianto, nel cassero e riscaldato a 160°C per 3 ore.

Di seguito gli step seguiti per la miscelazione:

- 1) Peso degli aggregati seguendo la curva granulometrica (Figura 3.2);
- 2) Riscaldamento in forno degli aggregati vergini per almeno 3 ore a 140°C;
- 3) Riscaldamento nel fornello del bitume a 170°C per almeno 2.5 ore e peso di questo aggiungendo 100-150 g rispetto al peso di progetto per tener conto della parte di legante che rimane inevitabilmente attaccata alle pareti del barattolo;
- 4) Inserimento aggregati riscaldati e asfalto riciclato a temperatura ambiente all'interno della miscelatrice;
- 5) Programma 1 di miscelazione a 150°C per un totale di 30 secondi (in questa fase aumentiamo di 20°C l'effettiva temperatura di miscelazione per ovviare al raffreddamento che gli aggregati subiscono all'apertura della miscelatrice per l'inserimento del bitume);
- 6) Durante i 30 secondi di miscelazione si procede all'aggiunta dell'additivo. Si calcola lo 0.55% del peso effettivo del bitume e questo sarà il peso di additivo da aggiungere. In questo caso avremo bisogno di due contenitori di bitume non disponendo di confezioni di bitume più grandi;
- 7) Terminati i 30 secondi di miscelazione, si apre la miscelatrice e si aggiunge il primo composto bitume-additivo (premiscelato rapidamente per qualche secondo) agli aggregati già all'interno;
- 8) Programma 2 di miscelazione a 130°C, ovvero l'effettiva temperatura di miscelazione, per 120 secondi;
- 9) Trascorsi i 120 secondi si apre la miscelatrice e si aggiunge la parte necessaria di bitume-additivo dal secondo contenitore e si miscela il tutto a 130°C per 120+180 secondi;
- 10) Controllo visivo e eventuale miscelazione manuale finale per far sì che avvenga il completo ricoprimento degli aggregati da parte del legante;
- 11) Peso e suddivisione del materiale in quattro porzioni da 8981 g da riporre nelle apposite teglie;
- 12) Riscaldamento finale del composto alla temperatura di compattazione, ovvero 120°C per almeno un'ora prima della compattazione.

4.1.2 Compattazione dei provini

Le piastre bistrato oggetto di indagine sono state ottenute tramite compattatore a rullo (Roller Compactor) in accordo con la normativa UNI EN 12697-33. Tale apparecchiatura simula efficacemente l'addensamento che avviene in sito ad opera di rulli metallici, tramite

passaggi ciclici (avanti e indietro) di un rullo metallico curvo, azionato mediante un sistema motorizzato ad aria compressa.

La compattazione avviene con la possibilità di regolare 4 pressioni, impostabili attraverso 4 manometri presenti nel pannello di controllo; e di scegliere il numero di passaggi del rullo per ogni livello di pressione. L'altezza di compattazione può essere regolata tra 40 e i 100 mm grazie ad una guida posta nella parte posteriore del macchinario.

Per la nostra compattazione si sono adottate 2 pressioni, la prima di 1 bar per 5 passaggi, considerata una pressione di precompattazione, e la seconda di 2 bar per 20 passaggi. Mentre per quanto riguarda l'altezza degli strati, la compattazione è stata impostata con altezza target di 40 e 80 mm rispettivamente per il primo e il secondo strato.

Il Roller Compactor permette di realizzare piastre di dimensioni $305 \times 305 \text{ mm}^2$. Il cassero d'acciaio è formato da una base e quattro elementi laterali di altezza 10 cm avvitati tra loro, da avvitare a loro volta mediante otto viti alla base. Per rendere le condizioni in laboratorio verosimili alle condizioni in sito, il cassero è stato riscaldato in forno a 160°C assieme al conglomerato bituminoso.

Il calcolo del quantitativo di materiale da utilizzare per il confezionamento delle piastre bistrato è impostato partendo dalle dimensioni di base del cassero note e pari a $305 \times 305 \text{ mm}^2$, perciò impostiamo il calcolo in funzione dello spessore e del volume dei vuoti target per ogni strato. Scegliamo di produrre strati dello spessore di 4 cm e un contenuto di vuoti variabile in base al conglomerato bituminoso utilizzato. Nello specifico, è stato considerato il contenuto di vuoti di progetto calcolati con la densità geometrica tramite la compattazione di provini giratori ad N_{design} , come prescritto dalle NTC all'articolo 9 [9]. Determinati volume degli strati della piastra da realizzare, contenuto di vuoti e masse volumetriche, si è calcolato il materiale da compattare tramite Roller Compactor utilizzando la seguente formula:

$$\text{Materiale per strato (g)} = V \cdot G_{\text{max}} \cdot (1 - AV_{N_{\text{des}}})$$

V: Volume dello strato, pari a $30.5 \times 30.5 \times 4 \text{ cm}^3$;

G_{max} : Massa volumetrica massima delle miscele in g/cm^3 ;

$AV_{N_{\text{des}}}$: Contenuto di vuoti di progetto in %.

Nel nostro specifico caso, per conglomerato bituminoso a caldo e conglomerato bituminoso tiepido si ha un volume dei vuoti pari al 4%, massa volumetrica di 2.514 g/cm^3 da cui ne deriva una massa di 8981 g per strato.

Il confezionamento delle piastre bistrato è diviso in tre fasi operative principali:

Fase 1) Compattazione strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo;

Fase 2) Preparazione dell'interfaccia con geocomposito;

Fase 3) Compattazione strato superiore in conglomerato bituminoso caldo o tiepido.

Entriamo nello specifico in ognuna di queste tre fasi:

FASE 1) Compattazione strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo.

Per realizzare lo strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo occorre riscaldare un quantitativo di materiale idoneo, affinché, dopo la compattazione, si abbia il volume di vuoti desiderato.

Il conglomerato bituminoso caldo prodotto in impianto è fornito in sacchi di circa 15 kg l'uno che sono stati scaldati per tre ore in forno, per rendere possibile l'operazione di sporzionamento nelle teglie. Successivamente le teglie con il corretto quantitativo di materiale, ormai raffreddatesi, sono state riposte in forno per altre 3 ore alla temperatura di compattazione.

Trascorse le tre ore, il materiale viene versato dalla teglia al cassero, anch'esso precedentemente scaldato. Il cassero viene inserito nel Roller Compactor, si imposta, dallo sportello posteriore del macchinario, l'altezza target di 40 mm e poi si chiudono gli sportelli per permettere che il sistema sia pressurizzato. Si è quindi proceduto ad avviare il processo che, come già detto, prevede 5 passaggi ad 1 bar (precompattazione per livellare lo strato), e successivamente 20 passaggi a 2 bar che simulano il costipamento in sito effettuato con rulli compattatori. A compattazione ultimata si verifica l'effettiva altezza di 40 mm dello strato.



Figura 4.1 – Strato inferiore compattato

Fondamentale è segnare la direzione di compattazione della piastra per la definizione dei provini e ancor più per il corretto orientamento del provino nelle logge delle prove a taglio e flessione.



Figura 4.2 – Verso di compattazione della piastra

FASE 2) Preparazione dell'interfaccia con geocomposito.

Le piastre sono rinforzate per mezzo del geocomposito che viene incollato all'interfaccia.

Si ricavano fogli di geocomposito leggermente più piccoli della dimensione della base del cassero, per facilitare le operazioni di incollaggio del geocomposito ed evitare che il film di bitume sciolto non vada a modificare l'altezza dello strato finale. Si segna la direzione di srotolamento del geocomposito che, in fase di incollaggio, dovrà combaciare con la direzione di compattazione dello strato, ricreando così le situazioni in sito.

L'operazione di applicazione del geocomposito sullo strato inferiore va effettuata senza creare bolle d'aria tra i due e, soprattutto, solo a superficie del conglomerato bituminoso raffreddata fino a temperatura ambiente; nel nostro caso sono state attese almeno 3 ore dalla compattazione.



Figura 4.3 – Applicazione del geocomposito

FASE 3) Compattazione strato superiore in conglomerato bituminoso caldo o tiepido.

Il conglomerato bituminoso a caldo o tiepido destinato allo strato superiore viene versato sopra l'interfaccia. Per quanto riguarda il conglomerato caldo, la procedura è identica a quella descritta nella Fase 1), con la differenza che questa volta l'altezza di compattazione target va impostata su 80 mm. Il conglomerato tiepido, prodotto secondo quanto descritto al §4.4.1, viene mantenuto per almeno un'ora alla temperatura di compattazione e viene poi versato nel cassero al quale è stato aggiunto un collare per evitare che parte del materiale fuoriesca durante l'operazione di versamento. Si imposta l'altezza di compattazione a 80 mm (somma spessore due strati da 40 mm), si colloca il cassero nella stessa direzione in cui è stato compattato lo strato inferiore e si avvia il Roller Compactor.

4.1.3 Nomenclatura, carotaggio e taglio dei provini

Sono state realizzate un totale di 32 piastre bistrato rinforzate, 16 per ognuna delle due temperature (120°C e 160°C), quindi 4 per ogni configurazione. Le 4 piastre per configurazione sono state così utilizzate:

- 2 piastre da cui ricavare 8 provini cilindrici (4 dal diametro di 100 mm e 4 da 150 mm), da testare con prova a taglio Leutner;
- 1 piastra da cui ricavare 4 provini cilindrici dal diametro di 100 mm, da testare con prova a taglio ASTRA;
- 1 piastra da cui ricavare 2 provini prismatici da testare con prova a flessione 3PB.

TEMPERATURA	120°C	160°C
Numero piastre	4	4
Numero ripetizioni Leutner	4+4	4+4
Numero ripetizioni ASTRA	4	4
Numero ripetizioni 3PB	2	2

Tabella 4.2 – Numero piastre e ripetizioni

Le dimensioni dei provini cilindrici sono: 8 cm di altezza e diametro di 10 o 15 cm; mentre quelle dei provini prismatici sono: 30.5 cm di lunghezza, 10 cm di profondità e 8 cm di altezza.

Per la nomenclatura abbiamo utilizzato le seguenti istruzioni:

- Lettera A o I in base al geocomposito utilizzato;

- Numero 1 o 2 in base alla variante del geocomposito;
- Temperatura di compattazione;
- Lettera L per provini Leutner, A per gli ASTRA, R per i 3PB
- Numero della ripetizione, da 1 a 4 per i Leutner e gli ASTRA, da 1 a 2 per i 3PB.



Figura 4.4 – Provini cilindrici per prova Leutner – diametro 100 dopo la prova



Figura 4.5 – Provini prismatici per prova 3PB dopo la prova



Figura 4.6 – Piastra da cui sono stati ricavati provini per la prova Leutner

4.2 Prova Leutner

La prova Leutner è una prova di taglio diretto utilizzata per indagare le proprietà all'interfaccia nei sistemi multistrato. L'apparecchiatura è stata ideata da R. Leutner nel 1979 ed è normata nella UNI EN 12697-48 [8]

Lo schema di funzionamento dell'apparecchiatura Leutner è illustrato in Fig. 4.7. Il corpo di base, collegato ad una pressa, avanza verso l'alto, mentre il corpo superiore è posizionata il contrasto con il telaio di carico. Tra anello superiore ed inferiore deve esserci un gap di massimo 5 mm, qui sarà visibile l'interfaccia. Con tale macchinario possiamo testare provini bistrato di diametro pari a 150 ± 2 mm oppure 100 ± 2 mm. Nella presente sperimentazione si sono testati provini dal diametro di 100 e 150 mm.

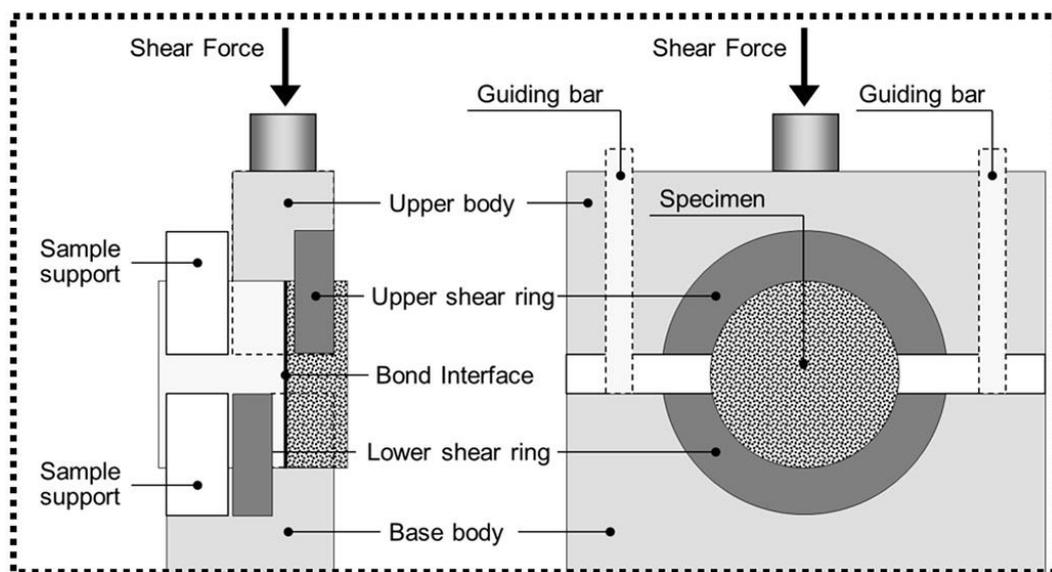


Figura 4.7 – Schema di funzionamento apparecchiatura Leutner

Il provino da sottoporre alla prova va alloggiato all'interno dell'apparecchiatura Leutner (Fig. 4.8) in modo tale che la direzione di compattazione sia parallela alla direzione dello sforzo di taglio applicato, simulando le tensioni tangenziali trasmesse dal traffico veicolare in sito.

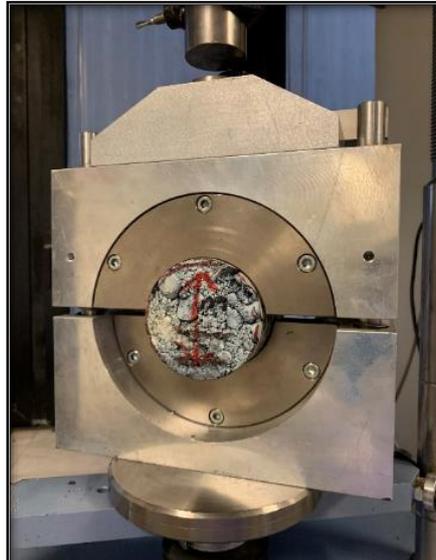


Figura 4.8 – Alloggiamento provino

Dopo l'iniziale fase di avvicinamento della cella di taglio al pistone superiore, in cui il carico sarà pari a zero kN, mentre corsa e deformazione > 0 , vi è l'inizio effettivo della prova. Vengono registrati i valori del carico applicato, della corsa del macchinario e della deformazione del provino.

PROTOCOLLO DI PROVA

1. Collocare i provini in una camera climatica a temperatura di condizionamento controllata di 20 ± 1 °C per un tempo di almeno 4 ore.
2. Si fissano gli anelli di taglio appropriati al telaio di prova. Questi possono avere un raggio di massimo 2 mm maggiore di quello del provino sottoposto alla prova.
3. Si avvia il software di acquisizione dati (carico e deformazione) UTM II, dal quale si ricaveranno i risultati della prova.
4. Si inseriscono le dimensioni del provino da testare, il tipo di provino e il numero del test.
5. Si posiziona correttamente il provino, ovvero, come già detto in precedenza, facendo in modo che l'interfaccia ricada all'interno del gap tra anello superiore e inferiore, e in modo che la direzione di compattazione sia parallela a quella di applicazione del carico.
6. Nel caso di provini dal diametro di 100 mm si inserisce manualmente l'adattatore tra campione e anello di taglio superiore.
7. Si stringe la vite del supporto del campione fino al serraggio dello stesso.
8. Si tara il sistema, azzerando così deformazione e corsa.

9. Si avvia la prova con la velocità di carico di 50 mm/min, impostabile tramite il software.
10. Si registrano carico massimo F [kN] e la deformazione δ [mm] ad esso associata.

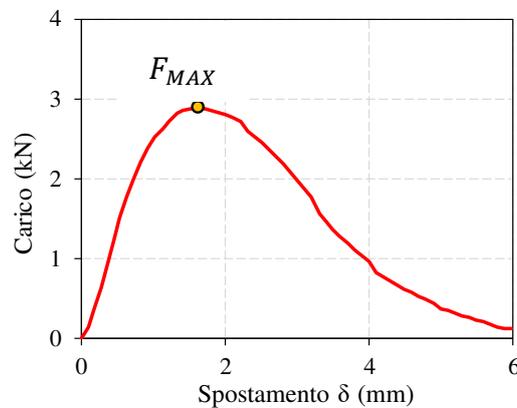


Figura 4.9 – Esempio curva di carico-spostamento verticale

A prova conclusa si smonta il provino e si osserva lo stato dell'interfaccia nel caso di completa separazione degli strati, per individuare eventuali crepe o aspetto insolito, che potrebbero indicare un disallineamento del campione nel piano di taglio, i valori di picco potrebbero essere dovuti alla resistenza offerta dal conglomerato bituminoso, compromettendo così il risultato ottenuto.



Figura 4.10 – Esempi di superfici all'interfaccia dei provini portati a rottura

Questo procedimento viene eseguito per ogni provino da testare e per ciascuno di essi l'apparecchiatura restituisce un file dati in cui vengono riportati, per ogni intervallo di misurazione effettuato, la forza di taglio e la deformazione. I risultati vengono elaborati e si ricavano delle informazioni che verranno riportate nel Capitolo 5.

Dividendo la forza di taglio massimo F_{MAX} per l'area nominale di contatto all'interfaccia, si ottiene e lo sforzo di taglio massimo τ_{SBT} [Mpa], che corrisponde alla resistenza a taglio dell'interfaccia:

$$\tau_{SBT} = \frac{4F_{max}}{\pi \cdot D^2}$$

dove D è il diametro del provino, pari a 100 e 150 mm e SBT sta per Shear Bon Test

Le NTC [9] fissano il limite inferiore della τ_{SBT} pari a 0.70 MPa, determinato con i parametri di prova sopra descritti.

Si possono creare tre differenti superfici di rottura: tra strato in conglomerato superiore/inferiore e geocomposito o all'interno del geocomposito, individuando così l'interfaccia con minore resistenza allo scorrimento.

4.3 Prova ASTRA

La prova ASTRA (Ancona Shear Testing Research and Analysis) è una prova di taglio diretto utilizzata per valutare le prestazioni all'interfaccia nei sistemi bituminosi multistrato, rispettando la norma UNI EN 12697-48 [8].

La strumentazione si trova all'interno di una camera climatica, permettendo così la variazione di temperatura e l'umidità. Un sistema di leve permette inoltre di applicare un carico normale che riproduca le condizioni del carico veicolare.

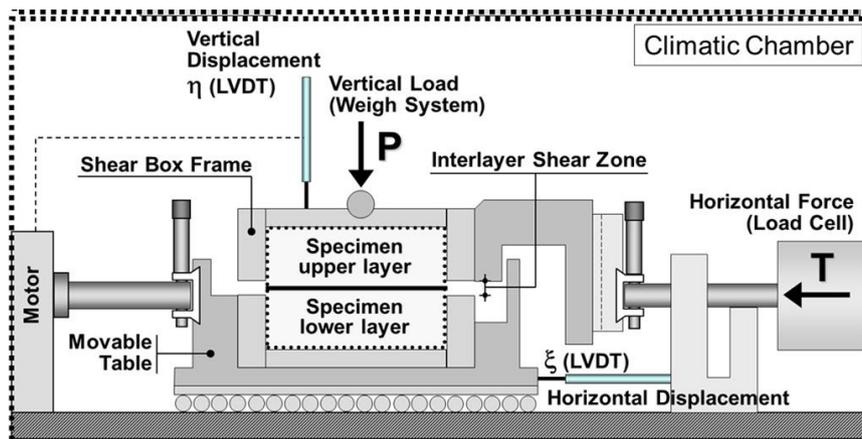


Figura 4.11 – Scema di funzionamento apparecchiatura ASTRA

I provini utilizzati hanno diametro di 100 mm e sono stati ricavati da lastra bistrato rinforzata con geocomposito all'interfaccia. Questo viene posizionato all'interno di due semiscatole, una superiore e una inferiore, distanziate tra loro in modo che la zona centrale libera corrisponda alla posizione dell'interfaccia del provino. Sono inoltre presenti degli adattatori, spessore in lamiera, che aiutano a gestire il corretto posizionamento del provino.

La strumentazione è nata per poter testare sia provini cilindrici che prismatici, con diametro compreso tra i 95 mm e i 100 mm. Per far alloggiare i provini cilindrici all'interno della scatola quadrata vi è un elemento in acciaio, con sezione esterna quadrata e interna cilindrica, che funge da adattatore.

La rottura dell'interfaccia si raggiunge imponendo uno scorrimento della semiscatola inferiore con velocità di scorrimento costante e pari a 2.5 mm/min. Si mette a contrasto la scatola superiore con una cella di carico, così da poter misurare in maniera continua la

forza di taglio impressa. Le due semiscatole devono avere dello spazio tra di loro, come già detto, dove sarà visibile l'interfaccia, in modo che questo sia un piano preferenziale di rottura. Sulla sommità dell'apparecchiatura è possibile applicare carico attraverso un sistema di leve, nel nostro caso abbiamo applicato 0.2 Mpa, traducibile con l'applicazione di 13.1 kg. Durante la prova si ha l'acquisizione dei dati relativi a spostamento verticale e orizzontale attraverso due trasduttori.

PROTOCOLLO DI PROVA

1. Posizionamento del provino all'interno delle semiscatole. Tenendo a mente che l'interfaccia deve corrispondere allo spazio libero tra le due semiscatole, sfruttiamo degli adattatori cilindrici di vario spessore, fino a trovare la configurazione ottimale.
2. Una volta avvitate le semiscatole, si inserisce in sistema all'interno del dispositivo. Anche qui, come nella prova Leutner, dobbiamo porre attenzione alla direzione di compattazione del provino che deve corrispondere alla direzione di spostamento del sistema durante la prova.
3. Applicazione sforzo normale. In ordine, si applica una sferetta metallica in sommità alla scatola di taglio, nell'apposita depressione; sopra di essa si appoggia in castelletto, che trasferisce il carico sul provino e nella sua parte inferiore viene agganciata la leva al fulcro. L'altra estremità della leva viene caricata con un asse verticale che può ospitare tanti pesi quanti quelli necessari alla prova.
4. Si avvia il software Spider8_Control e si seleziona Setup-Device, poi File, Load Setup e si azzerano con "Tare" tutte le letture dei trasduttori. Poi File, Quit e si torna alla schermata principale.
5. Si seleziona "Single Value Measurement" e a questo punto si mette in moto il motore verso destra per impostare il precarico. Quando nel riquadro "Channel 1" si legge un valore di 3-4, stoppo lo spostamento.
6. "Exit" e si ripete la fase "Setupo device" – "File" – "Load Setup" – "Tare".
7. Si posiziona il trasduttore verticale e poi si azzerà con "Tare"
8. Si seleziona "Data Logger", poi "XY-Realtime Chart" dove sugli assi leggiamo forza di carico sull'asse Y e spostamento orizzontale sull'asse X.
9. Si aziona il motore premendo su "Dx" e poi su "Start/stop". L'acquisizione dei dati viene effettuata con un lasso temporale di registrazione di 5 secondi. Si interrompe quando la curva assume un andamento orizzontale, fase che dura circa 5 minuti.
10. Si preme quindi il tasto "Stop" fermando il motore.
11. Si esportano infine i dati in un file excel, usando il comando "Data Export" presente nella schermata principale. Fatto ciò, si può smontare in ordine, la parte che permette di applicare il carico normale e successivamente la scatola di contenimento del provino.

La prova ASTRA restituisce un file-dati in cui è riportata la forza di taglio F in funzione dello spostamento orizzontale δ . Dividendo la forza di taglio massima F_{MAX} [N] per l'effettiva area di contatto all'interfaccia durante la prova A_{eff} [8], si ottiene lo sforzo di taglio massimo τ_{CSBT} [MPa], che corrisponde alla resistenza a taglio dell'interfaccia:

$$\tau_{CSBT} = \frac{F_{max}}{A_{eff}}$$

Con CBST = Compressed Shear Bond Test

Inoltre, elaborando i risultati ottenuti è possibile ricavare l'angolo di attrito residuo dopo la crisi dell'interfaccia δ_{res} .

Le NTC impongono un valore minimo di τ_{CSBT} pari a 0.40 MPa [9], determinato alle condizioni di prova ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $V = 2.5 \text{ mm/min}$, Carico verticale = 0.2 MPa) per la prequalifica di geocompositi su provini compattati in laboratorio.

Inoltre, come nella prova Leutner, si possono creare tre differenti superfici di rottura: tra strato in conglomerato superiore/inferiore e geocomposito o all'interno del geocomposito, individuando così l'interfaccia con minore resistenza allo scorrimento.

4.4 Prove di flessione statica su tre punti (3PB)

La prova su 3 punti è una prova flessionale impiegata per la determinazione della resistenza della piastra bistrato alla fessurazione innescata alla base degli strati legati e di fare considerazioni energetiche sulla sua propagazione all'interno del pacchetto strutturale. Le condizioni e procedure applicate seguono le NTC – Allegato 9 [9].

La prova 3PB viene eseguita su provini prismatici di larghezza, lunghezza e altezza nominali standardizzati, precedentemente condizionati in camera climatica a 20°C per 12 ore. Il provino si presenta con le seguenti dimensioni:

- * H totale, 80 mm (somma di h_1 , 40 mm e h_2 , 40 mm)
- * B larghezza degli strati, 100 mm
- * L profondità del provino, 305 mm

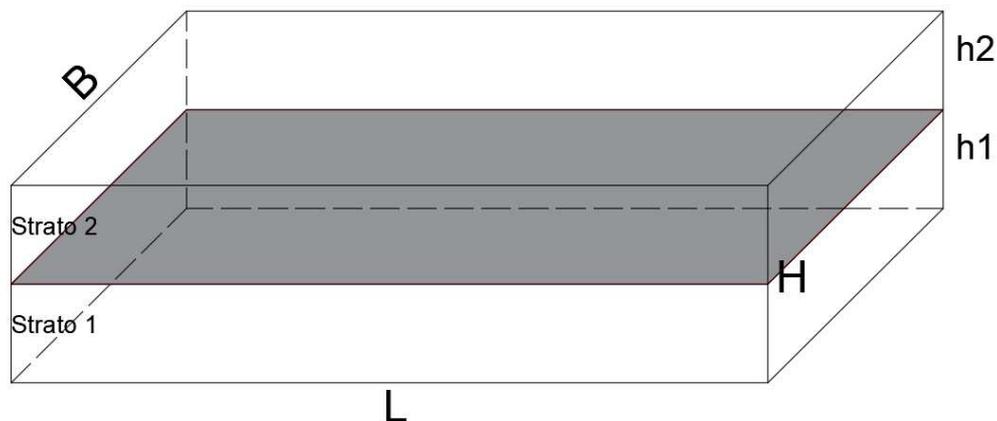


Figura 4.12 – Geometria provino prismatico

L'apparecchiatura è composta da una piastra inferiore su cui alloggiavano due cilindri metallici, di lunghezza trasversale 16 cm e diametro 3 cm, posti ad interasse 24 cm. Su di essi viene poggiato il provino prismatico. Un terzo cilindro metallico, centrato e parallelo alla superficie superiore del provino, applica il carico verticale con velocità costante pari a 50.8 mm/min. Il software per la gestione della pressa memorizza in continuo i dati di carico P applicato e spostamento verticale δ in mezzeria, entrambi registrati dalla cella di carico della pressa, fino a un valore di spostamento verticale pari a 15 mm. Inoltre, sono richieste almeno 2 ripetizioni per ogni configurazione indagata.

Dalla prova si ricava il coefficiente di prestazione del geocomposito k sfruttando un'analisi energetica delle curve sperimentali di carico-spostamento del sistema rinforzato (R) e non rinforzato (NR).

ANALISI ENERGETICA

La figura 4.13 mostra una tipica curva carico – spostamento. L'area sottesa dalla curva rappresenta l'energia totale (E_{tot}) rilasciata dal sistema. Questa viene suddivisa in due contributi:

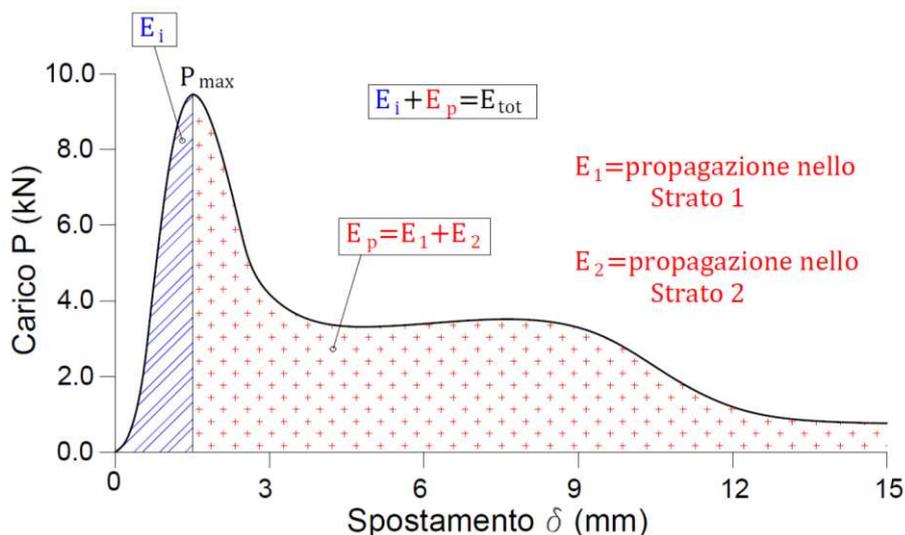


Figura 4.13 – Curva carico - spostamento

1. E_i = energia di innesco. È l'area sottesa dalla curva fino al raggiungimento del carico di picco P_{max} , e corrisponde alla fase di innesco della fessura alla base del provino. L'energia di innesco è equivalente in un sistema rinforzato o meno, in quanto il geocomposito non sta ancora lavorando.
2. E_p = energia di propagazione. È l'area sottesa dalla curva dal raggiungimento del carico di picco P_{max} fino a fine prova (spostamento verticale di 15 mm), e corrisponde alla fase di propagazione della fessura sull'altezza totale H . Si calcola come $E_{tot} - E_i$.

A sua volta, l'energia di propagazione può essere suddivisa in due contributi:

E_1 = energia di propagazione nello Strato 1 (strato inferiore)

E_2 = energia di propagazione nello Strato 2 (strato superiore)

Il calcolo per determinare il coefficiente di prestazione del geocomposito k è suddivisibile in 3 passaggi principali, eseguibili con un foglio di calcolo Excel.

Passaggio 1 – Analisi energetica sul sistema non rinforzato di riferimento

Per il sistema non rinforzato (NR) di riferimento, l'energia di propagazione in ciascuno strato è proporzionale all'area di conglomerato resistente di ciascuno di essi:

$$E_1^{NR} = E_p^{NR} \times \frac{h_1^{NR}}{H^{NR}} \times \frac{b_1^{NR}}{B^{NR}} \quad e \quad E_2^{NR} = E_p^{NR} \times \frac{h_2^{NR}}{H^{NR}} \times \frac{b_2^{NR}}{B^{NR}}$$

Passaggio 2 – Equivalenza dell'energia E_1 del sistema rinforzato e non rinforzato

Per convenzione assumiamo che il geocomposito non influenzi l'innesco della fessurazione e la sua propagazione nello strato inferiore. L'energia di propagazione del sistema rinforzato nello strato 1 è quindi uguale a quella del sistema non rinforzato, normalizzata per le reali dimensioni degli strati.

$$E_{1,norm}^R = E_1^{NR} \times \frac{h_1^R}{h_1^{NR}} \times \frac{b_1^R}{b_1^{NR}}$$

Passaggio 3 - Analisi energetica sul sistema rinforzato

Normalizziamo anche l'energia di propagazione del sistema rinforzato rispetto alle dimensioni del non rinforzato:

$$E_{p,norm}^R = E_p^R \times \frac{H^R}{H^{NR}} \times \frac{B^R}{B^{NR}}$$

Si ricava quindi l'energia di propagazione nello strato 2:

$$E_{2,norm}^R = E_{p,norm}^R - E_{1,norm}^R$$

Determinazione del coefficiente di prestazione del geocomposito

l'energia di propagazione risente della presenza del rinforzo, il coefficiente di prestazione del geocomposito è definito come il rapporto tra le energie di propagazione nello strato superiore del sistema rinforzato e di riferimento:

$$k = \frac{E_{2, norm}^R}{E_2^{NR}}$$

Se $k > 1$, allora il geocomposito ritarda la propagazione della fessurazione sino alla superficie; per le NTC k deve essere almeno 5.



Figura 4.14 – Provini sottoposti a prova 3PB

Capitolo 5. Risultati sperimentali

Riportiamo in questo capitolo i risultati delle prove effettuate divise per geocomposito e i relativi iter di elaborazione dei dati.

5.1 Geocomposito A1

Il geocomposito A1 è caratterizzato da un rinforzo in rete in fibra di vetro nella variante con compound thermo. Di seguito sono riportate le prestazioni di quest'ultimo alle prove a taglio e flessione.

5.1.1 Prove di taglio Leutner

Nelle figure sottostanti sono riportati i grafici con curve sperimentali carico-spostamento verticale derivanti dalle prove di taglio Leutner su provini bistrato con conglomerato bituminoso a caldo per lo strato inferiore e caldo o tiepido per quello superiore, nello specifico si fa riferimento alle temperature di compattazione del conglomerato bituminoso caldo (160°C) e tiepido (120°C). I valori di resistenza a taglio τ_{SBT} e la media sono mostrati al fianco di ciascun grafico carico-spostamento. Le curve e gli istogrammi in grigio rappresentano risultati scartati poiché il provino è stato mal posizionato e la superficie di rottura non ha riguardato solo l'interfaccia ma anche il conglomerato bituminoso, generando così un risultato non rappresentativo.

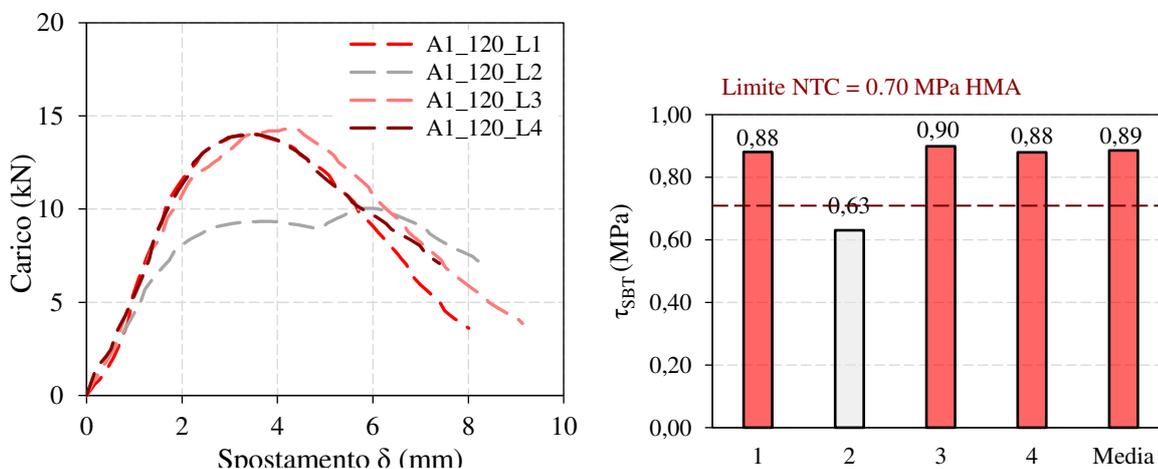


Figura 5.1 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

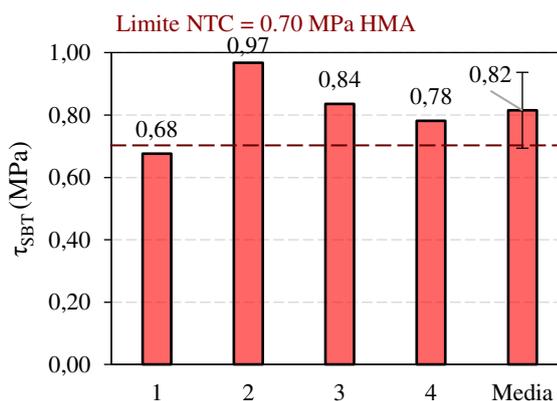
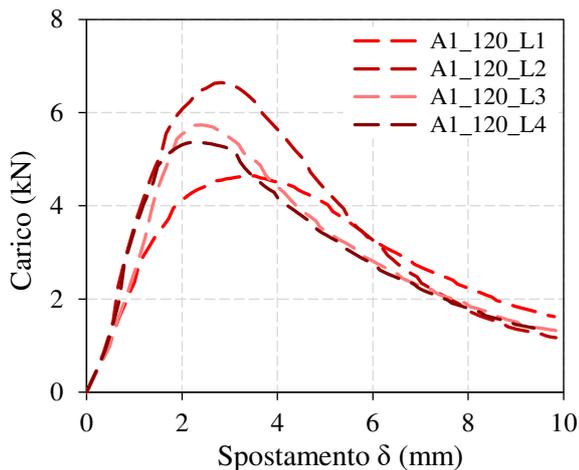


Figura 5.2 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 100 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

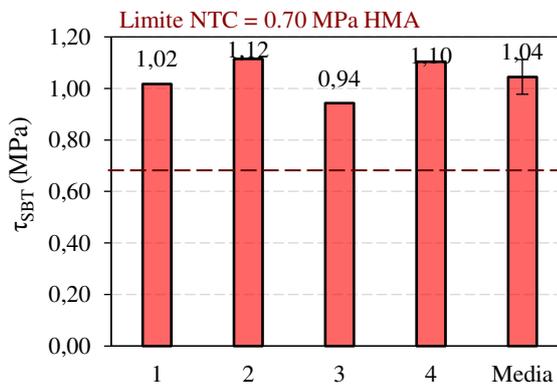
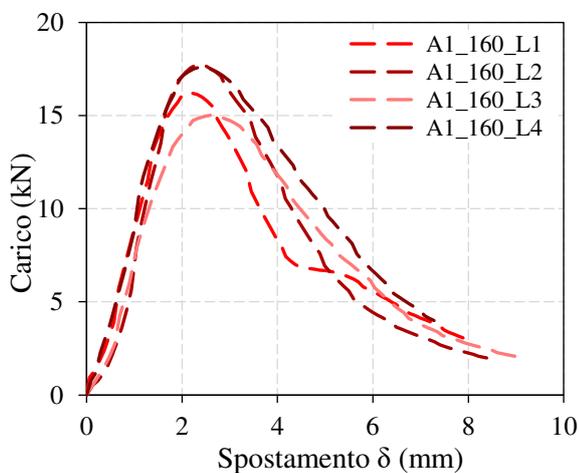


Figura 5.3 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C

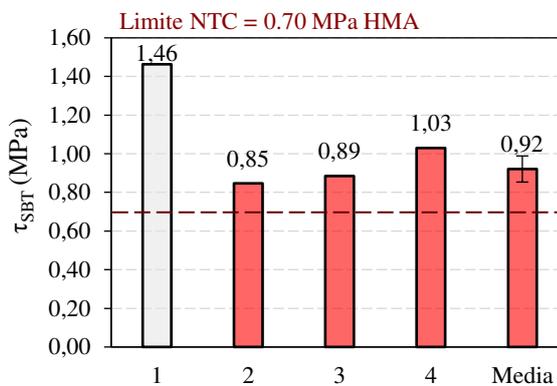
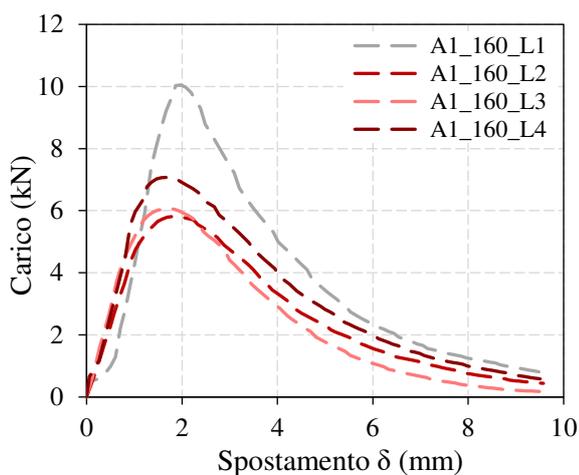


Figura 5.4 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 100 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C



Figura 5.5 – Rottura provini geocomposito A1 a 120°C (sinistra), e a 160°C (destra)

Di seguito si riportano i dati del provino A1_120_L1 che sono stati utilizzati per calcolare la forza di taglio τ_{CSBT} .

Date	03-set-24	
Specimen	A1_120_L1	
H	81,0	(mm)
D	142,4	(mm)
v	50,0	(mm/min)
Fmax	14,02	(kN)
T_{SBT}	0,88	(MPa)
displacement	3,44	(mm)
deformation	0	(mm)
time	4,13	(sec)

Tabella 5.1 – Dati riassuntivi provino A1_120_L1

Dalla tabella deduciamo che il primo provino cilindrico per le prove Leutner confezionato con geocomposito A1, con strato superiore compattato a 120°C, è stato testato in data 3 settembre 2024. La geometria del provino è data da un'altezza (H) di 81 mm totali (40 mm strato superiore, 1 mm geocomposito, 40 mm strato inferiore) e diametro (D) di 142.4 mm inferiore ai 150 mm, dovuto al carotiere.

La velocità della prova è pari a 50 mm/min durante la quale si è registrata una forza di picco Fmax pari a 14,02 kN in corrispondenza di uno spostamento pari a 3.44 mm, dopo 4.13 secondi dalla fine dell'avvicinamento della testa di carico all'alloggiamento del provino. Si è quindi calcolata la tensione tangenziale come rapporto tra forza di picco e area della sezione del provino.

5.1.2 Prove di taglio ASTRA

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici con le curve sperimentali carico-spostamento orizzontale derivanti delle prove di taglio ASTRA su provini bistrati con conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato per lo strato inferiore e tiepido o caldo con bitume modificato per lo strato superiore. I corrispettivi valori di resistenza a taglio τ_{CSBT} e angolo d'attrito residuo a fine prova con le relative medie sono mostrati rispettivamente al fianco di ciascun grafico carico-spostamento per ogni configurazione di temperatura di compattazione.

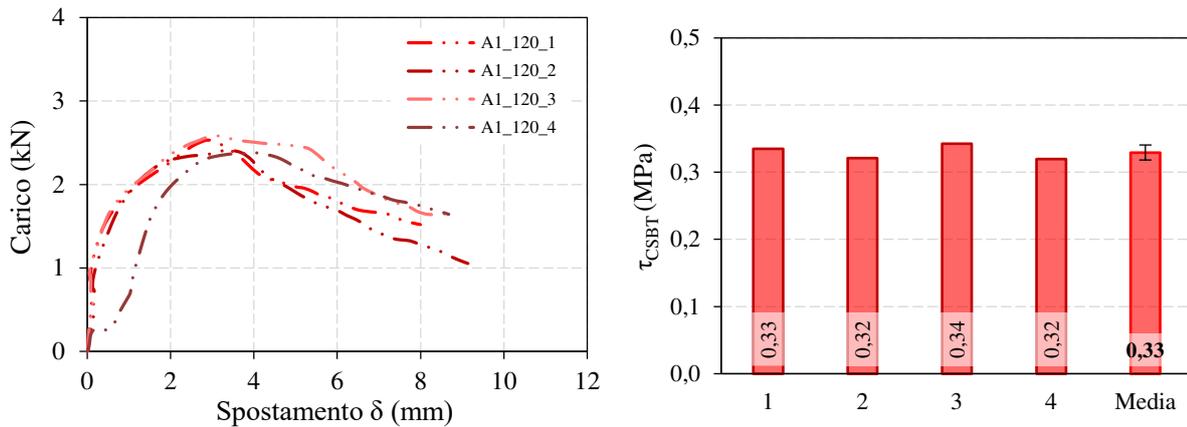


Figura 5.6 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 120°C

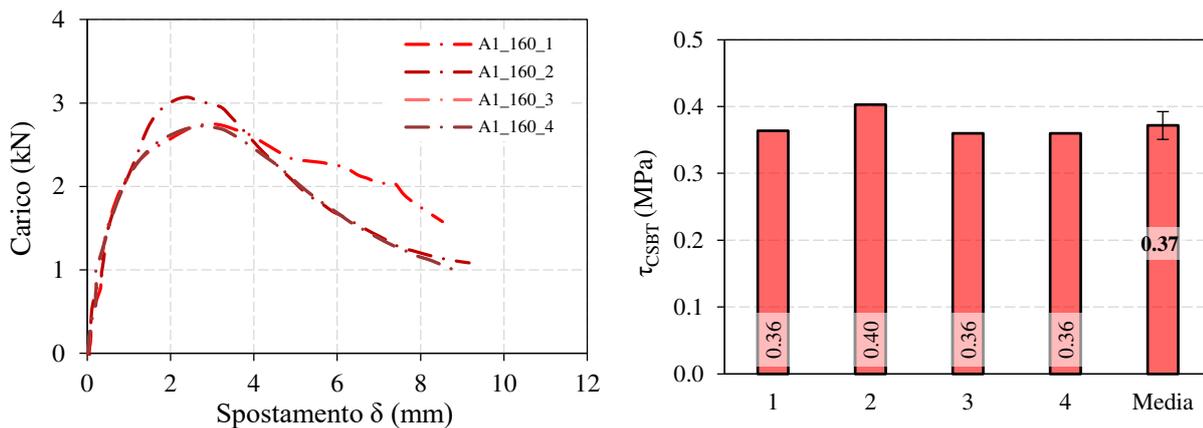


Figura 5.7 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 160°C

Di seguito si riportano i dati del provino A1_120_1 per mostrare l'iter di calcolo dei dati utili per controllare l'effettiva efficienza del geocomposito sotto l'azione di taglio.

Data	Provino	T (°C)	σ_v (MPa)	Diametro (mm)
13/09/2024	A1_120_1	20	0,2	100

F_{peak} (kN)	2,5
τ_{CSBT} (MPa)	0,335
$\sigma_{v\ peak}$ (MPa)	0,208
τ_{res} (MPa)	0,215
$\sigma_{v\ res}$ (MPa)	0,223
δ_{res} (°)	44,0

Tabella 5.2 – Tabella dati del provino A1_120_1

La prima ripetizione delle prove ASTRA di provini rinforzati con geocomposito A1 e con strato superiore compattato a 120°C prenda la nomenclatura di A1_120_1. Esso, testato il giorno 13 settembre 2024 è stato condizionato a 20°C prima dell'inizio della prova, è caratterizzato da una forma cilindrica con diametro di 100 mm ed è stato soggetto ad un carico verticale, quindi perpendicolare alla direzione di compattazione, pari a 0.2 MPa (13,1 kg)

Il provino sotto lo sforzo di taglio ha registrato forza di picco pari a 255.1 kg, che moltiplicato per l'accelerazione di gravità g corrisponde a 2.5 kN. Da tale dato, insieme all'area effettiva del provino, ricavo la tensione tangenziale pari a 0.335 MPa e la tensione normale invece pari a 0.208 MPa.

Analizzando i dati di fine prova poi, ricaviamo la tensione tangenziale residua e la tensione normale residua, pari rispettivamente a 0.215 MPa e 0.223 MPa, da cui unendoli, posso calcolare l'angolo di attrito residuo, qui pari a 44.0°.

5.1.3 Prove flessionali 3PB

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici delle curve sperimentali carico – spostamento verticale derivanti dalle prove 3PB su provini prismatici bistrato con strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo con bitume modificato e strato superiore in conglomerato bituminoso caldo o tiepido con bitume modificato. Oltre alle curve sperimentali viene mostrata anche la curva media per ogni configurazione e le tabelle riassuntive dei valori ricavati dalla prova e di quelli energetici ricavati tramite calcoli.

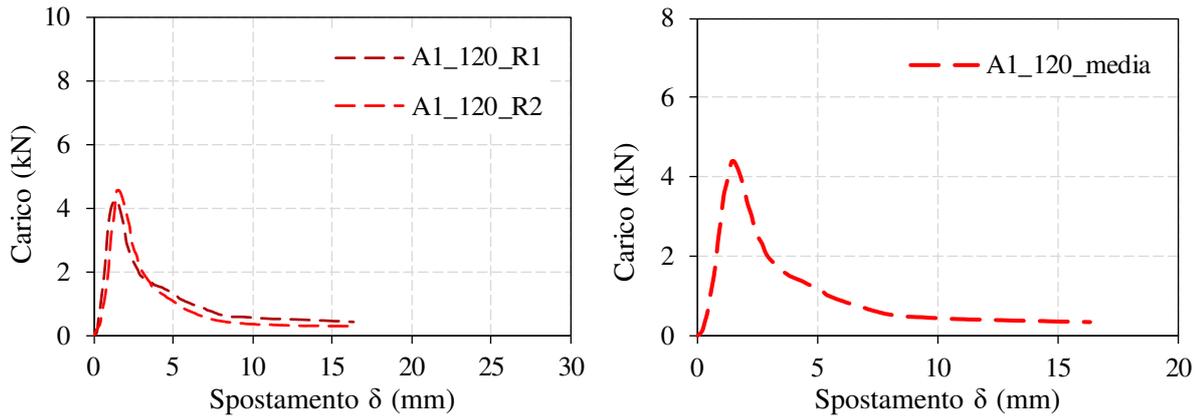


Figura 5.8 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 120°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A1_120_R1	4,27	1,38	2,98	17,29	14,31	2,88	11,43	3,98
A1_120_R2	4,56	1,55	2,85	14,91	12,06	2,88	9,18	3,19
A1_120_media	4,41	1,47	2,92	16,10	13,18	2,88	10,30	3,59

Tabella 5.3 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 120°C

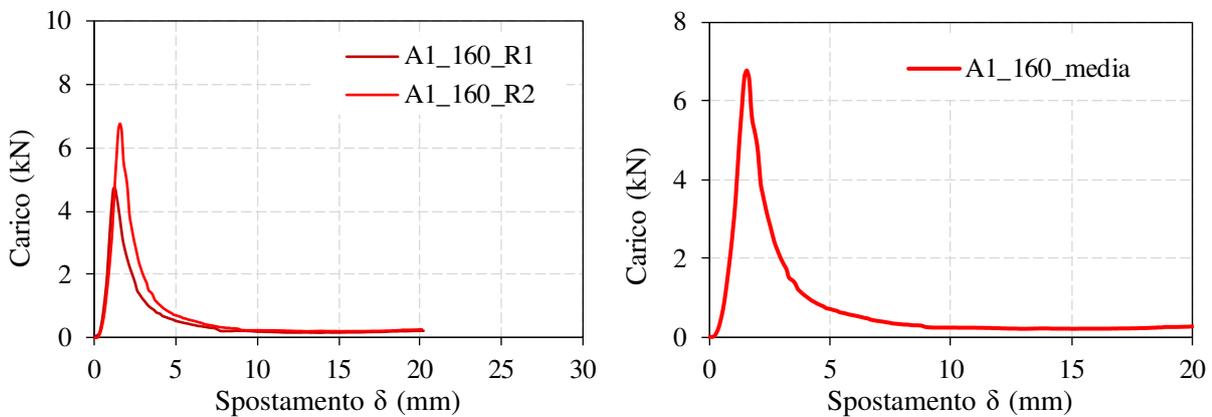


Figura 5.9 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 160°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A1_160_R1	4,73	1,23	2,19	10,16	7,96	2,88	5,08	1,77
A1_160_R2	6,78	1,54	3,67	14,63	10,96	2,88	8,08	2,81
A1_160_media	5,75	1,39	2,93	12,39	9,46	2,88	6,58	2,29

Tabella 5.4 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 160°C

5.2 Geocomposito A2

Il geocomposito A2 è caratterizzato da un rinforzo in rete in fibra di vetro nella variante con compound thermo/adesiva. Esso presenta un film cosiddetto 'tackificante' che, come già detto, dovrebbe assicurare una maggiore adesione tra geocomposito e superficie di conglomerato bituminoso esistente (fredda) nel momento della posa. Di seguito sono riportate le prestazioni di quest'ultimo alle prove a taglio e flessione.

5.2.1 Prove di taglio Leutner

Nelle figure sottostanti sono riportati i grafici con curve sperimentali carico-spostamento verticale derivanti dalle prove di taglio Leutner su provini bistrato con conglomerato bituminoso a caldo per lo strato inferiore e caldo o tiepido per quello superiore, nello specifico si fa riferimento alle temperature di compattazione del conglomerato bituminoso caldo (160°C) e tiepido (120°C). I valori di resistenza a taglio τ_{SBT} e la media sono mostrati al fianco di ciascun grafico carico-spostamento. Le curve e gli istogrammi in grigio rappresentano risultati scartati poiché il provino è stato mal posizionato e la superficie di rottura non ha riguardato solo l'interfaccia ma anche il conglomerato bituminoso, generando così un risultato non rappresentativo.

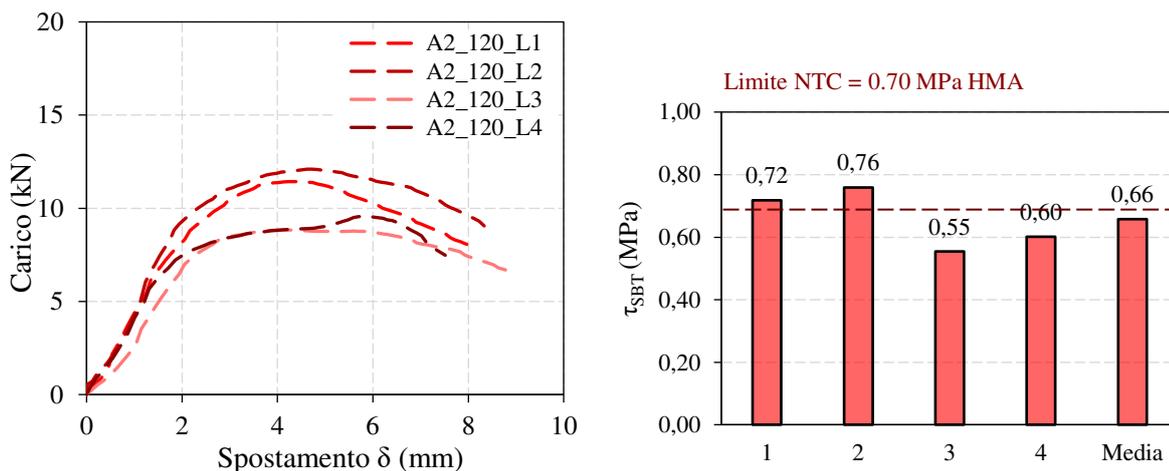


Figura 5.10 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

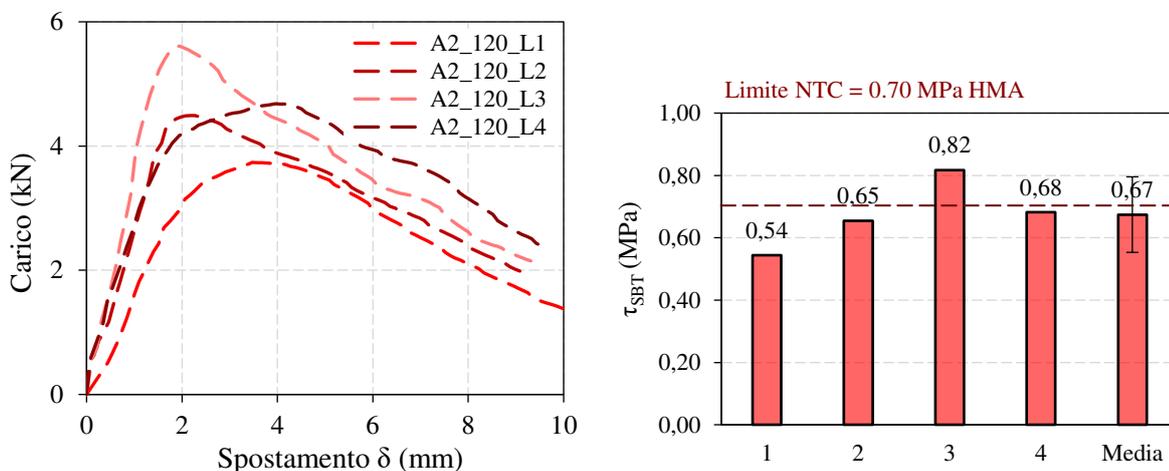


Figura 5.11 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 100 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

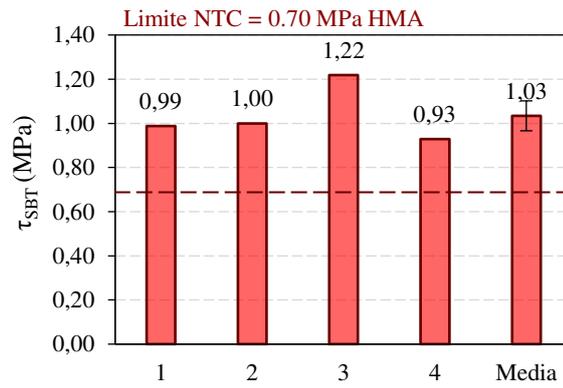
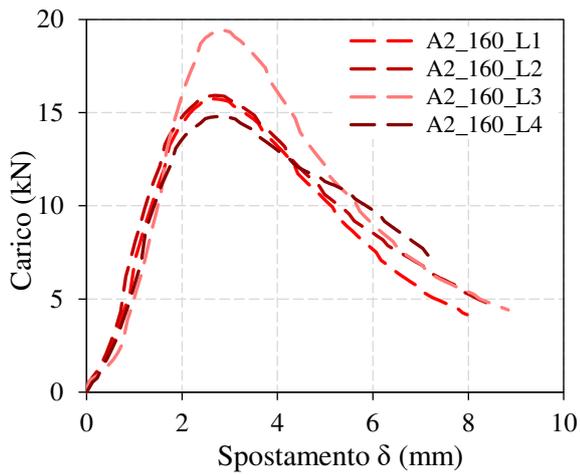


Figura 5.12 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C

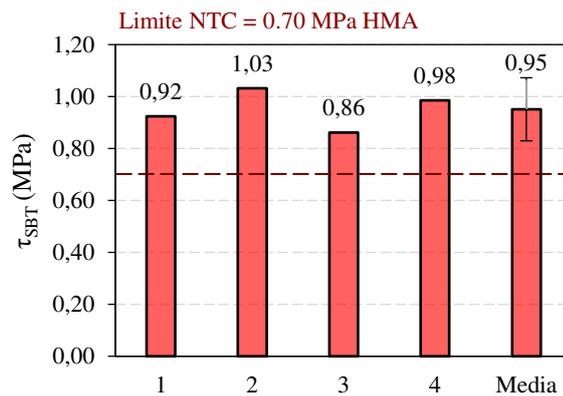
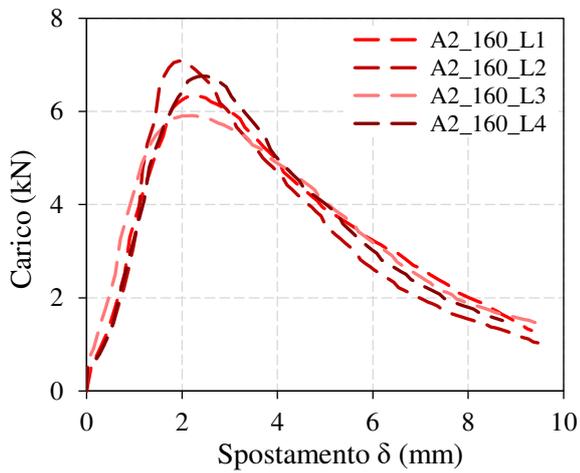


Figura 5.13 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 100 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C



Figura 5.14 – Rottura provini geocomposito A2 a 120°C (sinistra), e a 160°C (destra)

5.2.2 Prove di taglio ASTRA

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici con le curve sperimentali carico-spostamento orizzontale derivanti dalle prove di taglio ASTRA su provini bistrati con conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato per lo strato inferiore e tiepido o caldo con bitume modificato per lo strato superiore. I corrispettivi valori di resistenza a taglio τ_{CSBT} e angolo d'attrito residuo a fine prova con le relative medie sono mostrati rispettivamente al fianco di ciascun grafico carico-spostamento per ogni configurazione di temperatura di compattazione.

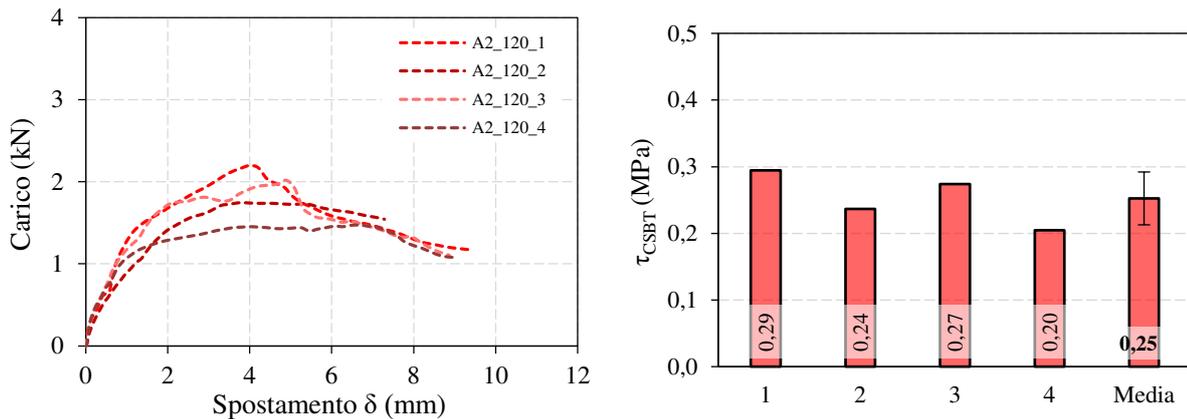


Figura 5.15 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 120°C

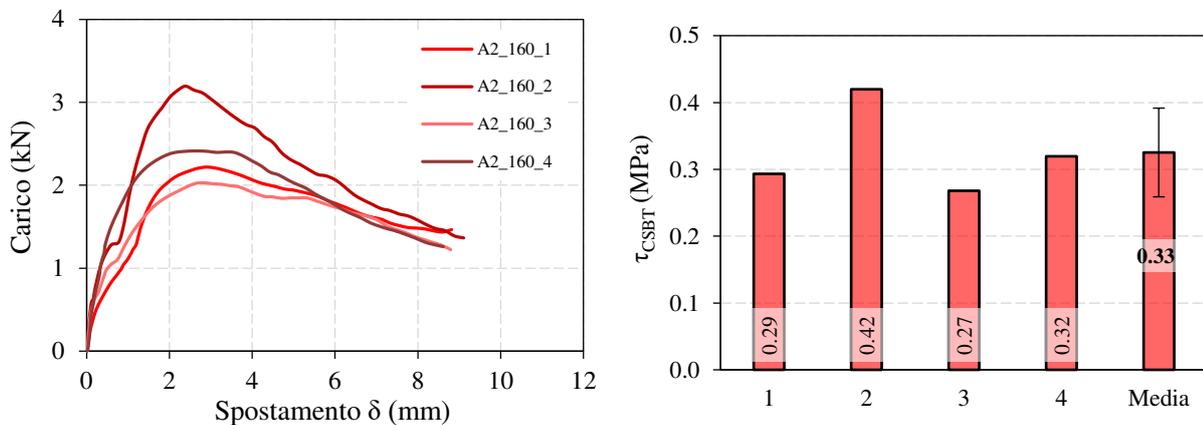


Figura 5.16 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 160°C

5.2.3 Prove flessionali 3PB

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici delle curve sperimentali carico – spostamento verticale derivanti dalle prove 3PB su provini prismatici bistrato con strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo con bitume modificato e strato superiore in conglomerato bituminoso caldo o tiepido con bitume modificato. Oltre alle curve sperimentali viene mostrata anche la curva media per ogni configurazione e le tabelle riassuntive dei valori ricavati dalla prova e di quelli energetici ricavati tramite calcoli.

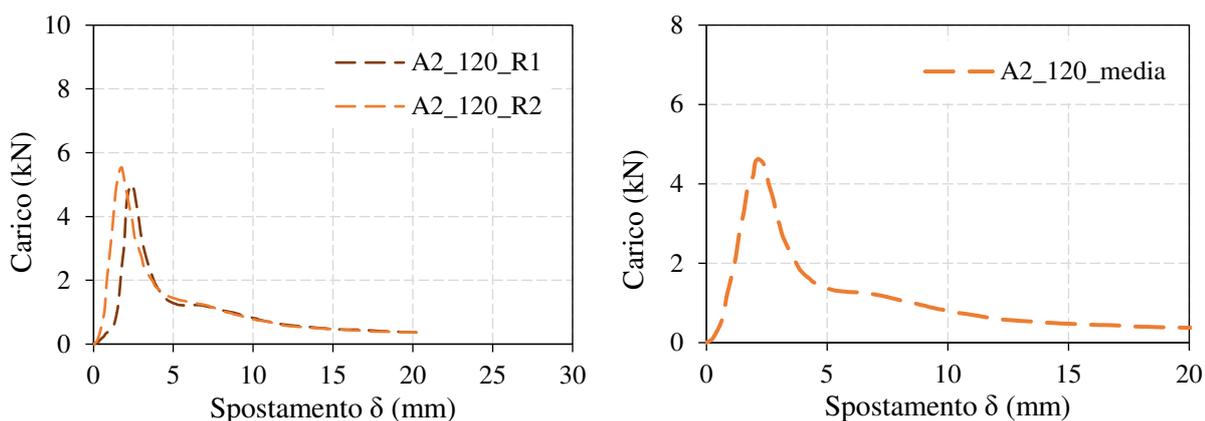


Figura 5.17 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 120°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A2_120_R1	5,00	2,34	3,28	18,56	15,28	2,88	12,40	4,32
A2_120_R2	5,53	1,78	4,39	21,58	17,19	2,88	14,30	4,98
A2_120_media	5,27	2,06	3,83	20,07	16,23	2,88	13,35	4,65

Tabella 5.5 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 120°C

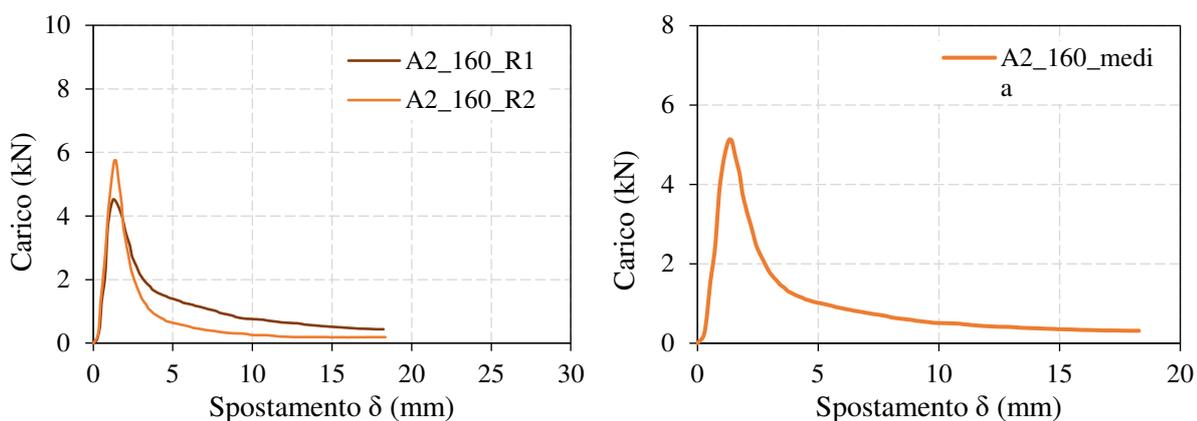


Figura 5.18 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 160°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A2_160_R1	4,52	1,24	2,40	19,96	17,56	2,88	14,68	5,11
A2_160_R2	5,75	1,33	3,37	13,68	10,31	2,88	7,43	2,59
A2_160_media	5,13	1,28	2,88	16,82	13,94	2,88	11,05	3,85

Tabella 5.6 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 160°C

5.3 Geocomposito I1

Il geocomposito I1 è caratterizzato da un rinforzo in tessuto con fibre adirezionali nella variante con compound thermo. Di seguito sono riportate le prestazioni di quest'ultimo alle prove a taglio e flessione.

5.3.1 Prove di taglio Leutner

Nelle figure sottostanti sono riportati i grafici con curve sperimentali carico-spostamento verticale derivanti dalle prove di taglio Leutner su provini bistrato con conglomerato bituminoso a caldo per lo strato inferiore e caldo o tiepido per quello superiore, nello specifico si fa riferimento alle temperature di compattazione del conglomerato bituminoso caldo (160°C) e tiepido (120°C). I valori di resistenza a taglio τ_{SBT} e la media sono mostrati al fianco di ciascun grafico carico-spostamento. Le curve e gli istogrammi in grigio rappresentano risultati scartati poiché il provino è stato mal posizionato e la superficie di rottura non ha riguardato solo l'interfaccia ma anche il conglomerato bituminoso, generando così un risultato non rappresentativo.

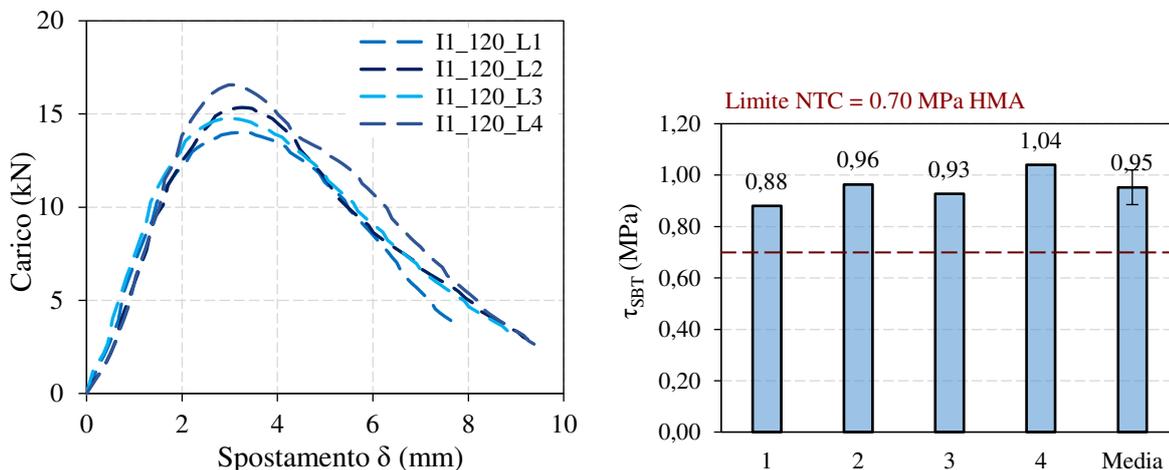


Figura 5.19 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

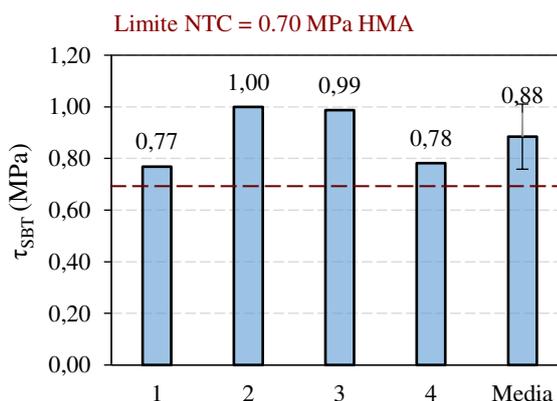
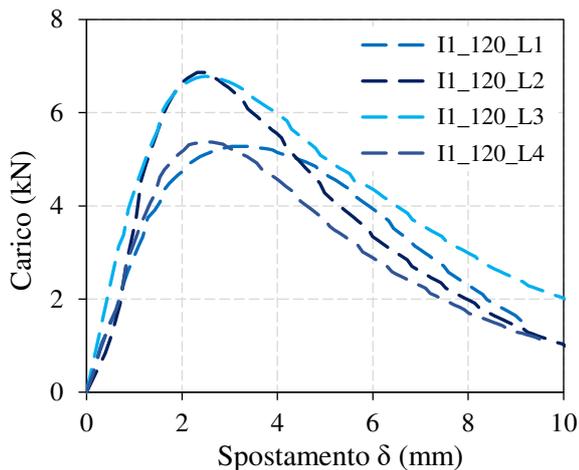


Figura 5.20 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 100 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

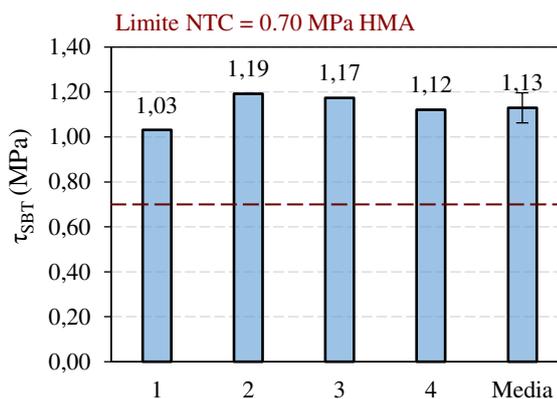
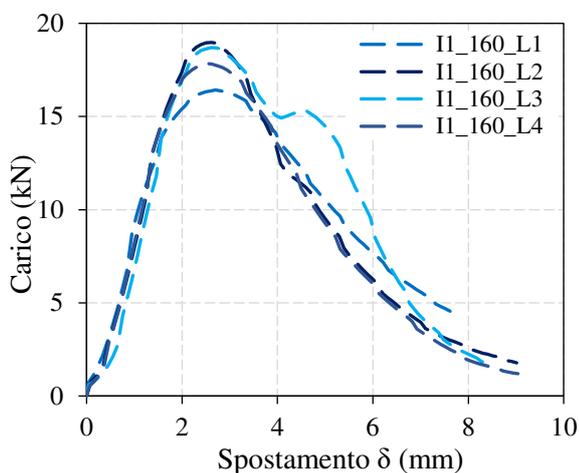


Figura 5.21 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C

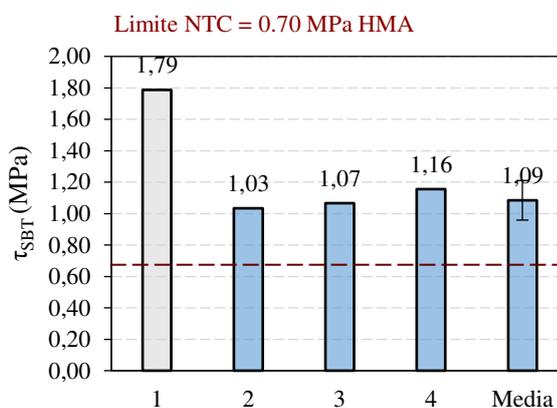
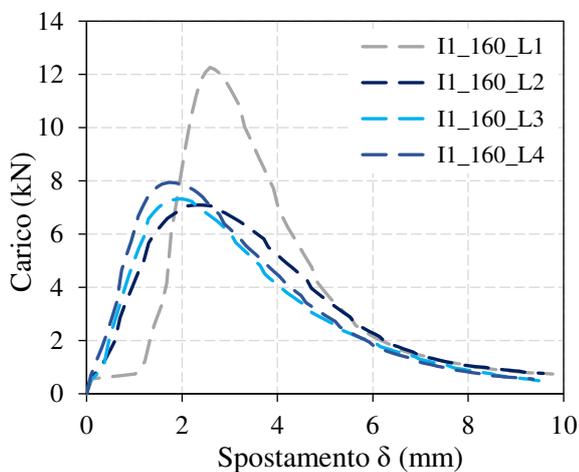


Figura 5.21 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C



Figura 5.22 – Rottura provini geocomposito I1 a 120°C (sinistra), e a 160°C (destra)

5.3.2 Prove di taglio ASTRA

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici con le curve sperimentali carico-spostamento orizzontale derivanti delle prove di taglio ASTRA su provini bistrati con conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato per lo strato inferiore e tiepido o caldo con bitume modificato per lo strato superiore. I corrispettivi valori di resistenza a taglio τ_{CSBT} e angolo d'attrito residuo a fine prova con le relative medie sono mostrati rispettivamente al fianco di ciascun grafico carico-spostamento per ogni configurazione di temperatura di compattazione.

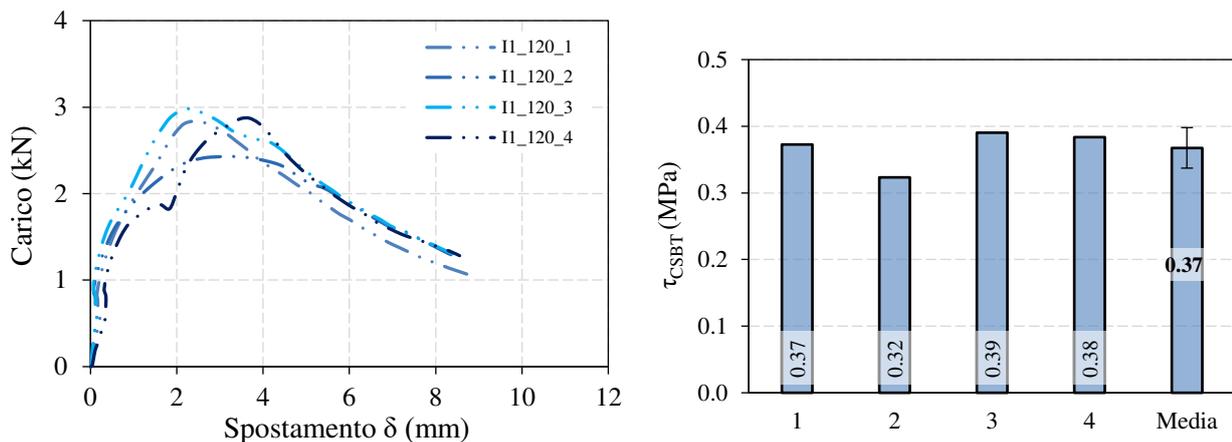


Figura 5.23 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singola che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 120°C

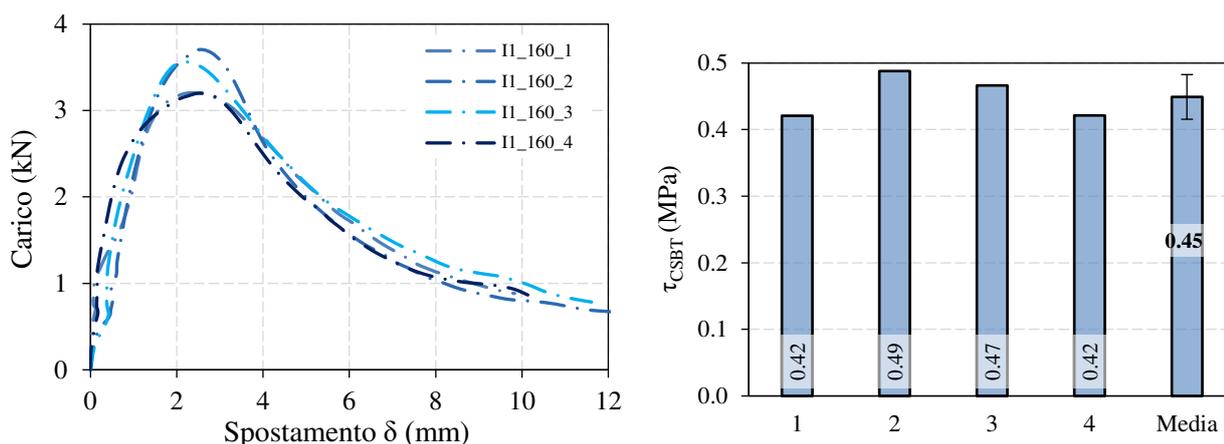


Figura 5.24 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 160°C

5.3.3 Prove flessionali 3PB

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici delle curve sperimentali carico – spostamento verticale derivanti dalle prove 3PB su provini prismatici bistrato con strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo con bitume modificato e strato superiore in conglomerato bituminoso caldo o tiepido con bitume modificato. Oltre alle curve sperimentali viene mostrata anche la curva media per ogni configurazione e le tabelle riassuntive dei valori ricavati dalla prova e di quelli energetici ricavati tramite calcoli.

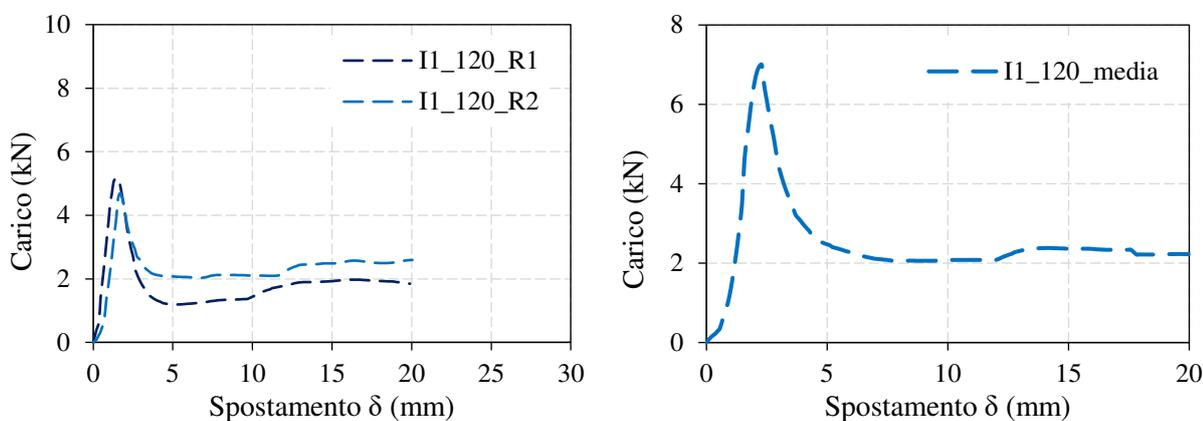


Figura 5.25 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 120°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
I1_120_R1	5,17	1,47	3,96	27,43	23,47	2,88	20,58	7,17
I1_120_R2	4,68	1,65	2,87	33,87	31,00	2,88	28,12	9,79
I1_120_media	4,93	1,56	3,42	30,65	27,24	2,88	24,35	8,48

Tabella 5.7 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 120°C

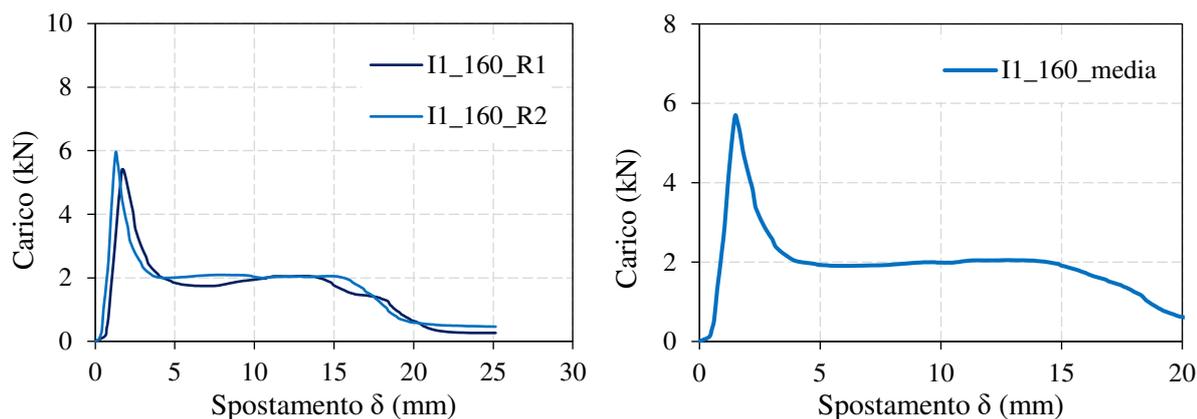


Figura 5.26 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 160°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
I1_160_R1	5,42	1,68	2,84	31,80	28,96	2,88	26,08	9,08
I1_160_R2	5,96	1,29	2,74	33,58	30,84	2,88	27,95	9,73
I1_160_media	5,69	1,48	2,79	32,69	29,90	2,88	27,02	9,40

Tabella 5.8 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 160°C

5.4 Geocomposito I2

Il geocomposito I2 è caratterizzato da un rinforzo in tessuto con fibre adirezionali nella variante con compound thermo/adesiva. Esso presenta un film cosiddetto ‘tackificante’ che, come già detto, dovrebbe assicurare una maggiore adesione tra geocomposito e superficie di conglomerato bituminoso esistente (fredda) nel momento della posa. Di seguito sono riportate le prestazioni di quest’ultimo alle prove a taglio e flessione.

5.4.1 Prove di taglio Leutner

Nelle figure sottostanti sono riportati i grafici con curve sperimentali carico-spostamento verticale derivanti dalle prove di taglio Leutner su provini bistrato con conglomerato bituminoso a caldo per lo strato inferiore e caldo o tiepido per quello superiore, nello specifico si fa riferimento alle temperature di compattazione del conglomerato bituminoso caldo (160°C) e tiepido (120°C). I valori di resistenza a taglio τ_{SBT} e la media sono mostrati al fianco di ciascun grafico carico-spostamento. Le curve e gli istogrammi in grigio rappresentano risultati scartati poiché il provino è stato mal posizionato e la superficie di rottura non ha riguardato solo l’interfaccia ma anche il conglomerato bituminoso, generando così un risultato non rappresentativo.

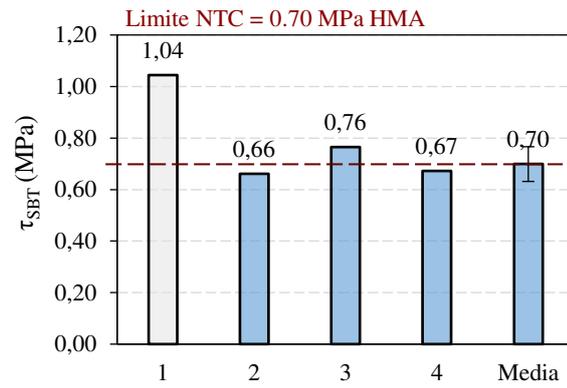
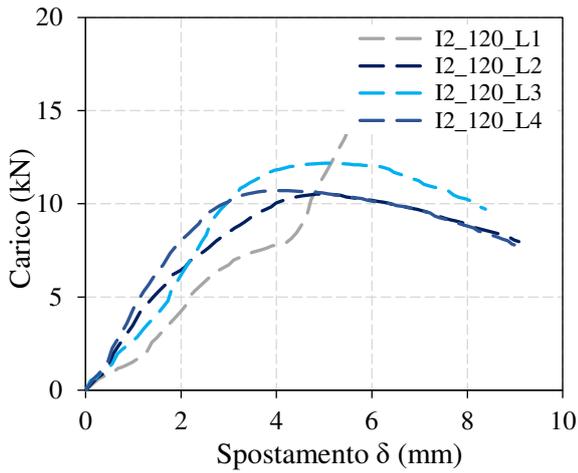


Figura 5.27 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

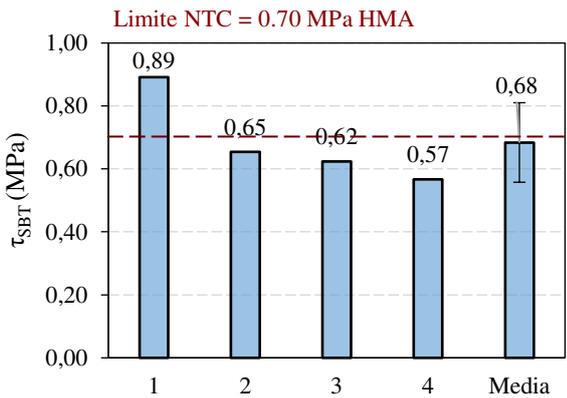
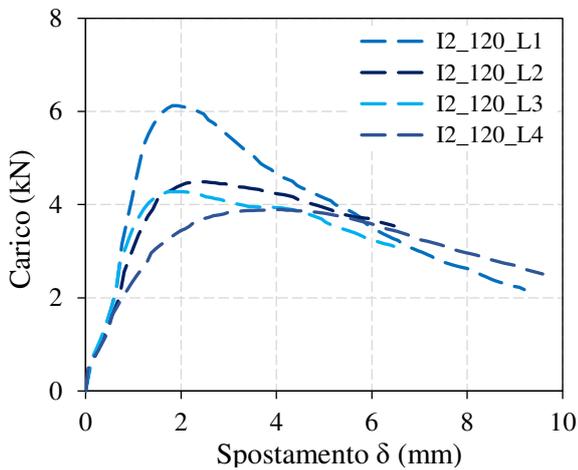


Figura 5.28 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 100 mm, per la temperatura di compattazione di 120°C

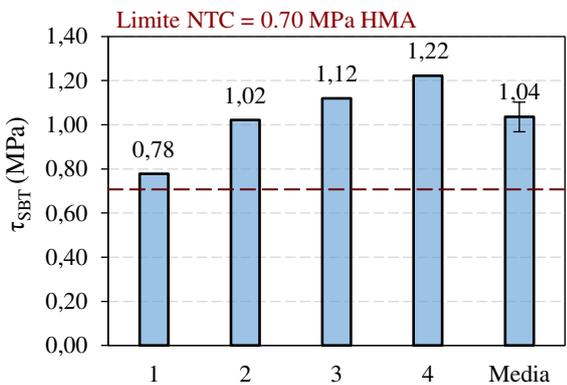
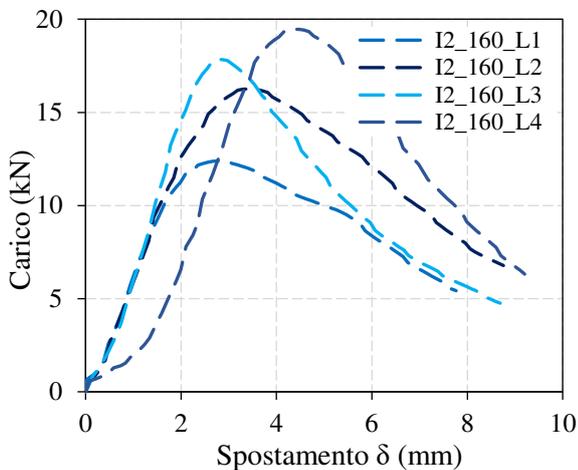


Figura 5.29 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 150 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C

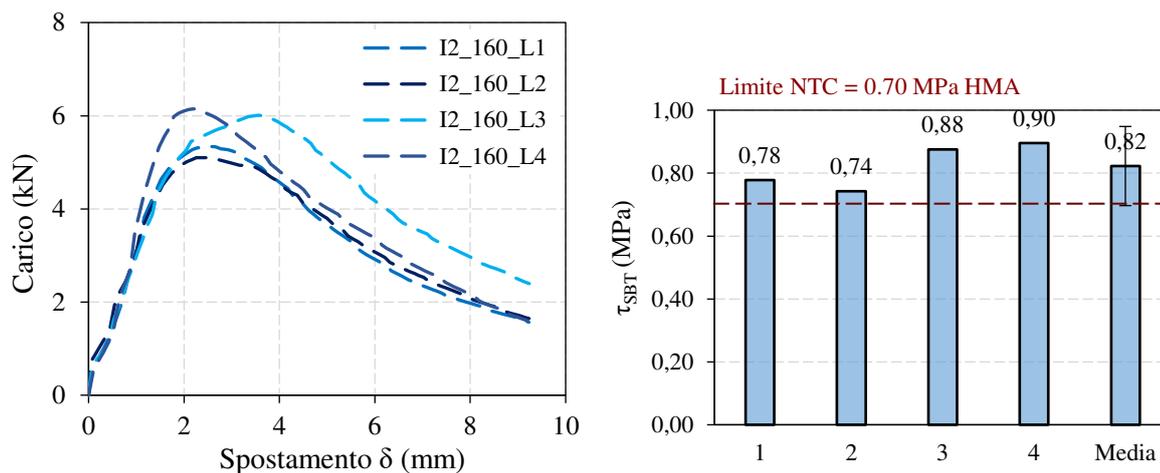


Figura 5.30 – Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio di provini dal diametro di 100 mm, per la temperatura di compattazione di 160°C



Figura 5.31 – Rottura provini geocomposito I2 a 120°C (sinistra), e a 160°C (destra)

5.4.2 Prove di taglio ASTRA

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici con le curve sperimentali carico-spostamento orizzontale derivanti delle prove di taglio ASTRA su provini bistrati con conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato per lo strato inferiore e tiepido o caldo con bitume modificato per lo strato superiore. I corrispettivi valori di resistenza a taglio τ_{CSBT} e angolo d'attrito residuo a fine prova con le relative medie sono mostrati rispettivamente al fianco di ciascun grafico carico-spostamento per ogni configurazione di temperatura di compattazione.

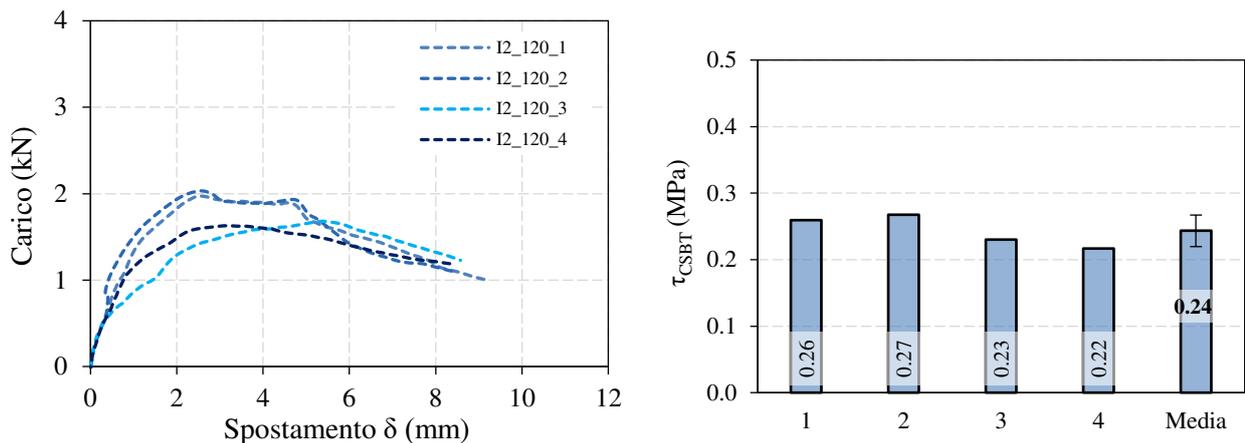


Figura 5.32 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 120°C

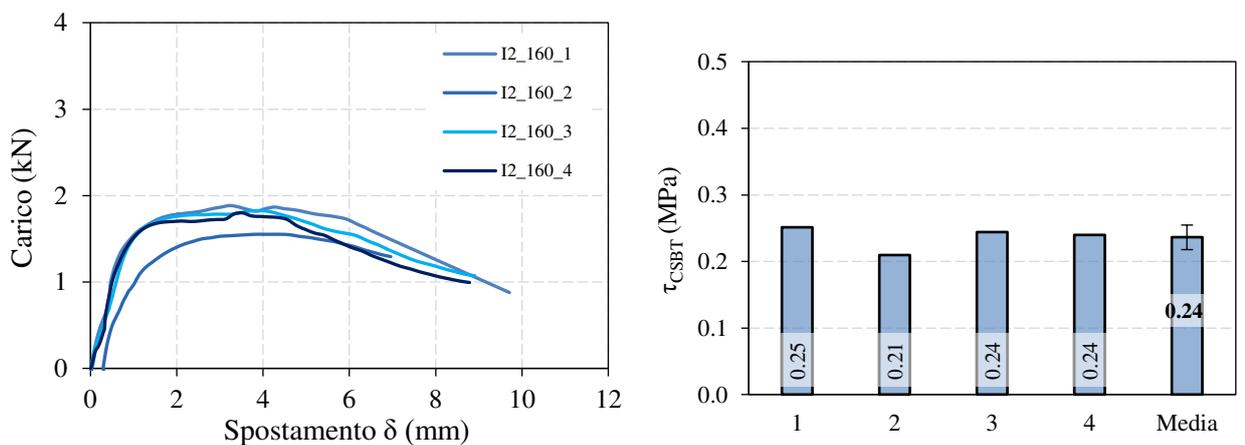


Figura 5.33 – Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 160°C

5.4.3 Prove flessionali 3PB

Nelle figure sottostanti si riportano i grafici delle curve sperimentali carico – spostamento verticale derivanti dalle prove 3PB su provini prismatici bistrato con strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo con bitume modificato e strato superiore in conglomerato bituminoso caldo o tiepido con bitume modificato. Oltre alle curve sperimentali viene mostrata anche la curva media per ogni configurazione e le tabelle riassuntive dei valori ricavati dalla prova e di quelli energetici ricavati tramite calcoli.

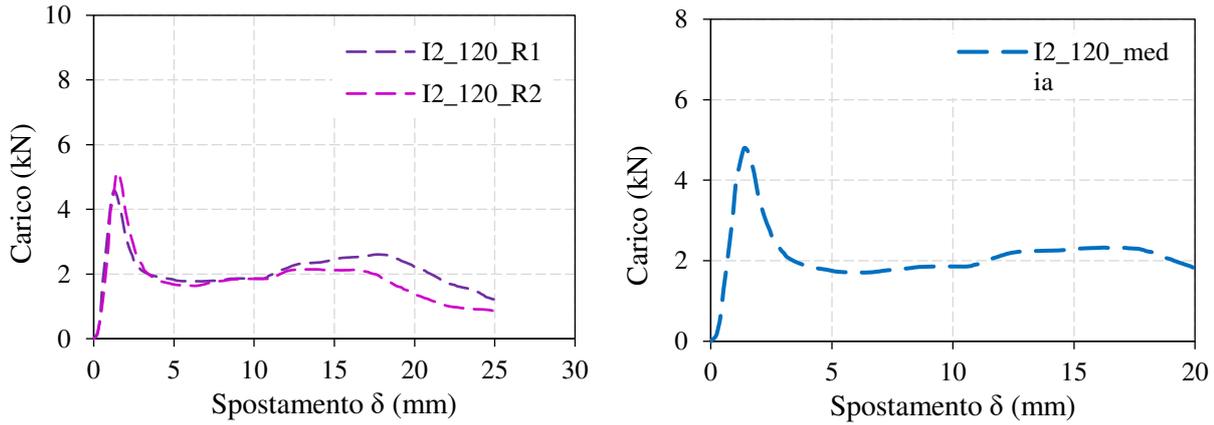


Figura 5.34 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 120°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
I2_120_R1	4,58	1,25	2,61	32,15	29,55	2,88	26,66	9,28
I2_120_R2	5,14	1,49	3,38	31,48	28,10	2,88	25,21	8,78
I2_120_media	4,86	1,37	3,00	31,82	28,82	2,88	25,94	9,03

Tabella 5.9 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 120°C

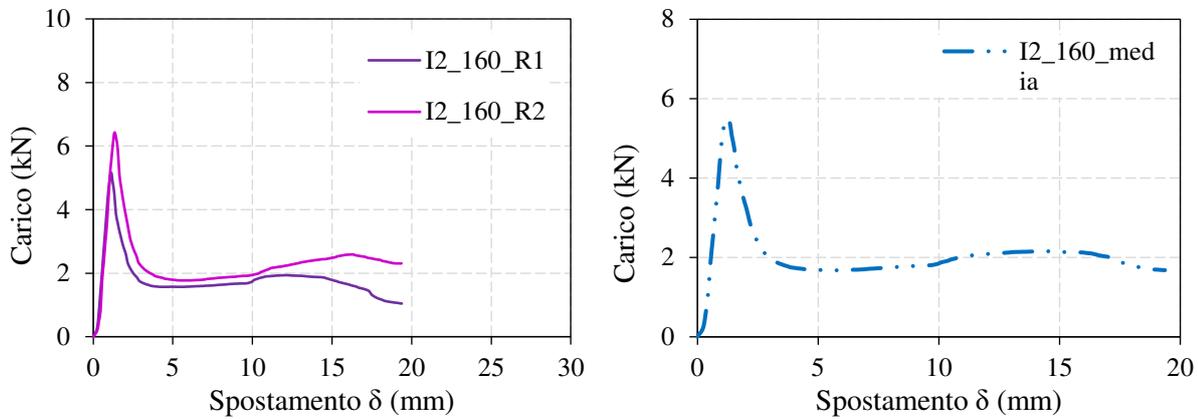


Figura 5.35 – Curva carico-spostamento delle due ripetizioni e loro media per provini compattati a 160°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
I2_160_R1	5,16	1,11	2,51	28,61	26,10	2,88	23,21	8,08
I2_160_R2	6,43	1,33	0,77	31,64	30,88	2,88	27,99	9,74
I2_160_media	5,79	1,22	1,64	30,13	28,49	2,88	25,60	8,91

Tabella 5.10 – Dati riassuntivi per le due ripetizioni di provini compattati a 160°C

5.5 Riassunto delle prestazioni e confronto

Di seguito un riassunto dei quattro geocompositi:

- Prove Leutner – Le figure 5.36 e 5.37 riportano i valori di τ_{SBT} ottenuti per una temperatura di compattazione rispettivamente di 120°C e 160°C e per provini dal diametro pari a 150 mm (sinistra) e 100 mm (destra). Le norme fissano il valore minimo a 0.70 MPa.

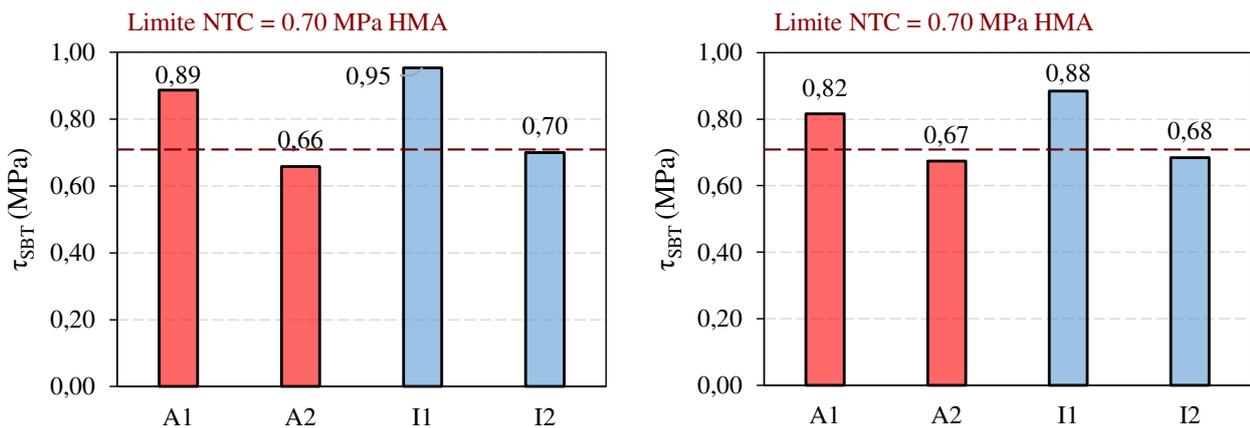


Figura 5.36 – Tensioni di taglio massime prova Leutner per provini di 150 mm (sinistra) e 100 mm (destra) registrate a 120°C

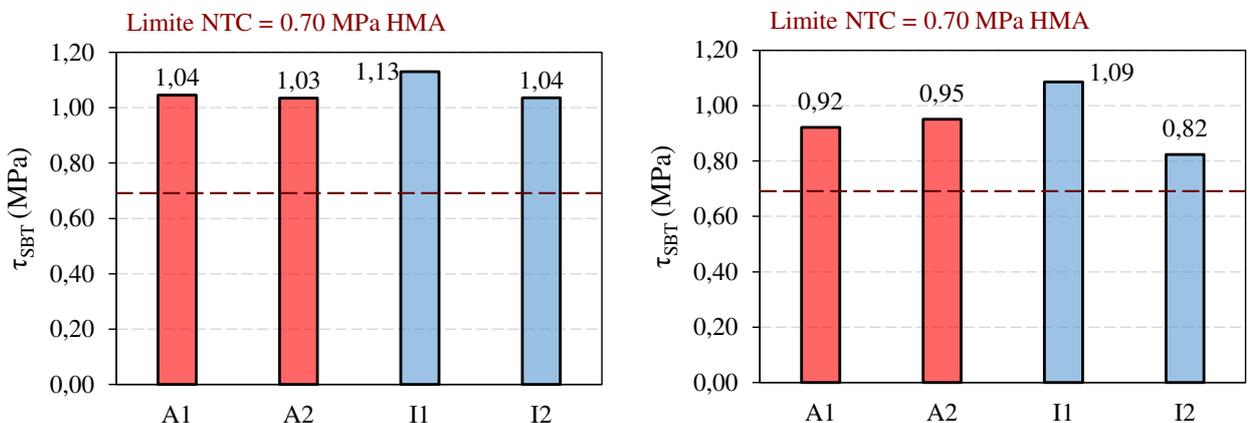


Figura 5.37 – Tensioni di taglio massime prova Leutner per provini di 150 mm (sinistra) e 100 mm (destra) registrate a 160°C

- Prove ASTRA – La figura 5.38 riporta i risultati ottenuti per ogni configurazione per provini cilindrici dal diametro di 100 mm. Le NTC [9] fissano il valore minimo di τ_{CSBT} a 0.40 MPa.

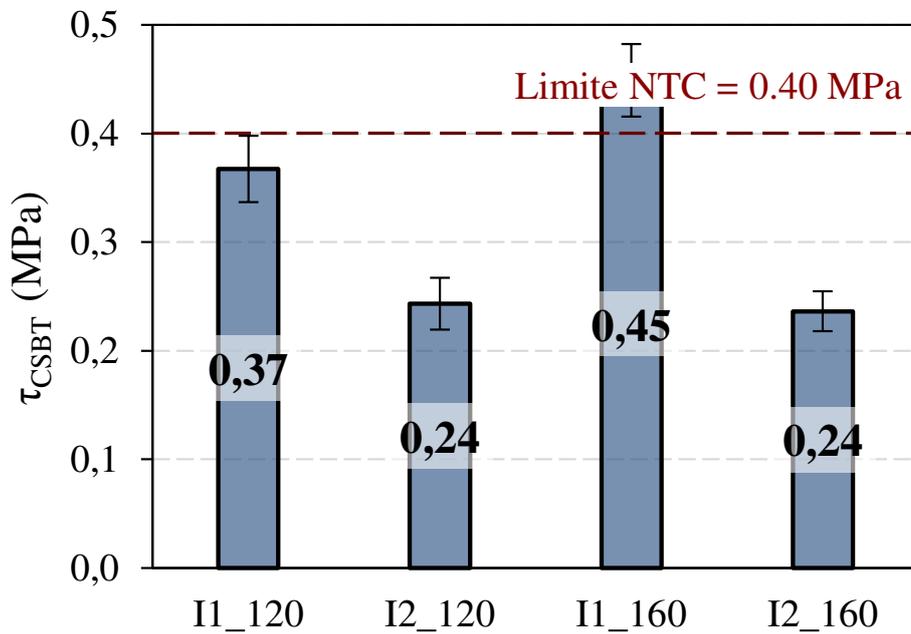
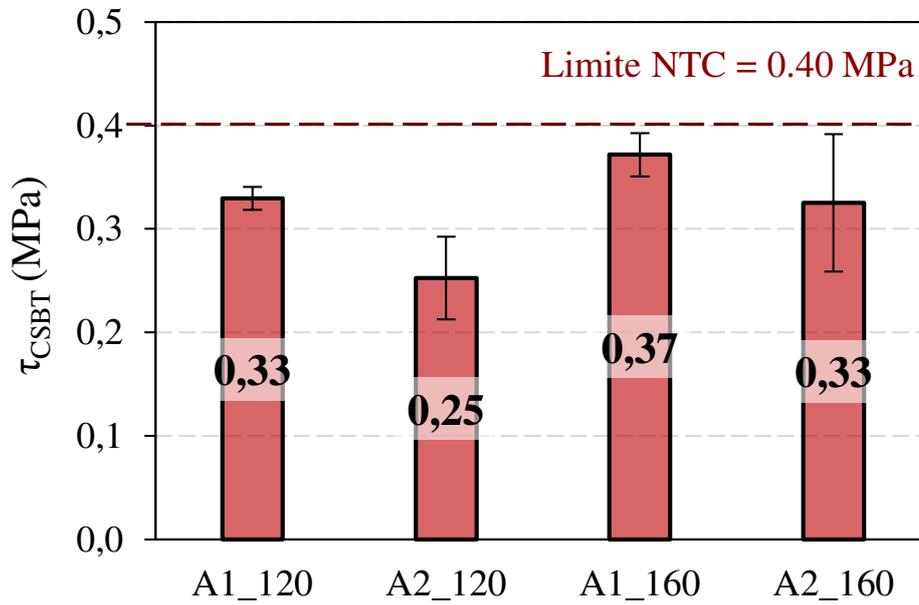


Figura 5.38 – Tensioni massime registrate durante la prova ASTRA

- Prove 3PB – La figura 5.39 riporta i risultati ottenuti per ogni configurazione per provini prismatici. La norma fissa il valore minimo di k a 5.

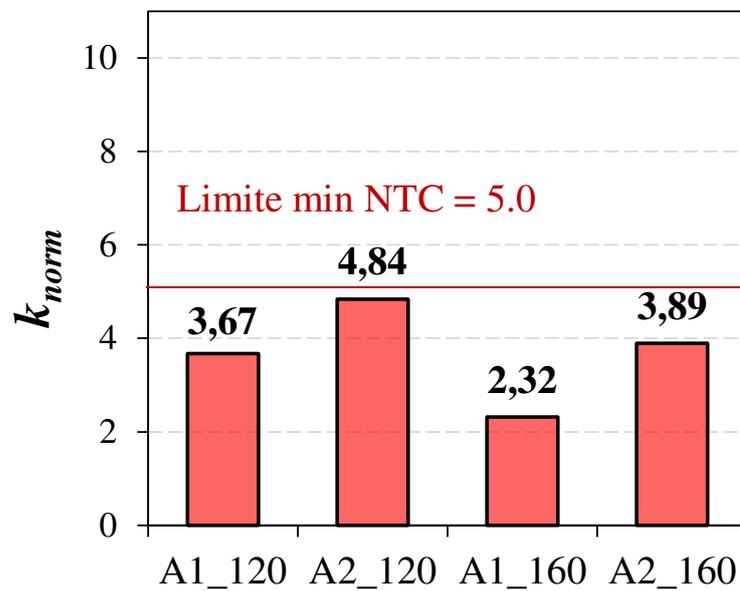
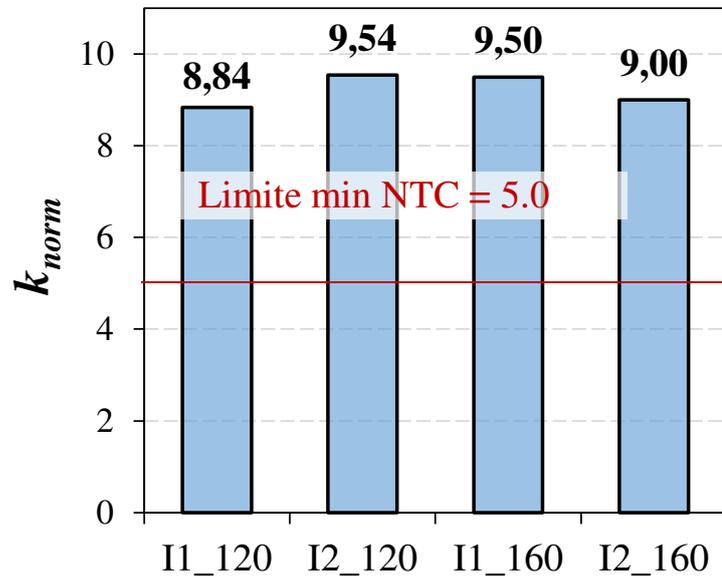


Figura 5.39 – Coefficiente di prestazione dedotto da prova 3PB

Riportiamo nella Tabella 5.11 in verde le configurazioni che rispettano i limiti di legge imposti dalle NTC e invece in rosso quelle che non li raggiungo. Da sottolineare che tali limiti sono indicati per conglomerato bituminoso a caldo.

	LEUTNER 150 mm	LEUTNER 100 mm	ASTRA	3PB
<i>A1_120</i>				
<i>A2_120</i>				
<i>I1_120</i>				
<i>I2_120</i>				
<i>A1_160</i>				
<i>A2_160</i>				
<i>I1_160</i>				
<i>I2_160</i>				

Tabella 5.11 – Tabella riassuntiva

Il valore limite per le prove Leutner è di 0.70 MPa ed è rispettato da tutte le configurazioni, tranne dal geocomposito A2 alla temperatura di compattazione di 120°C, e anche se per poco, dal provino dal diametro di 100 mm con geocomposito I2 a 120°C.

Il valore limite per le prove ASTRA è di 0.40 MPa ed è rispettato unicamente dal geocomposito I1 alla temperatura di compattazione di 160°C. Il dato, tuttavia, poteva essere previsto vista l'alta richiesta prestazionale imposta dalle NTC per questo tipo di prova-

La prova 3 Point Bending richiede che il geocomposito raggiunga un coefficiente di prestazione k di almeno 5. Le uniche configurazioni che raggiungono tale livello sono quelle che presentano i geocompositi I1 e I2.

Capitolo 6. Conclusioni

La presente Tesi descrive l'indagine sperimentale che mira alla caratterizzazione prestazionale di sistemi di rinforzo per pavimentazioni flessibili, svolta presso il Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche.

Abbiamo già visto nei capitoli precedenti come l'impiego di geosintetici sia una tecnica manutentiva efficace che può portare benefici in termini di prolungamento della vita utile del pacchetto stradale, grazie alla loro capacità di ritardare le principali cause di ammaloramento delle pavimentazioni flessibili. Abbiamo anche parlato delle loro funzioni di separazione, filtrazione, rinforzo, irrigidimento, drenaggio, barriera e protezione. Inoltre, l'applicazione dei geosintetici per la manutenzione delle pavimentazioni rappresenta un vantaggio economico e una scelta sostenibile perché può consentire la sostituzione dei soli strati più superficiali di conglomerato bituminoso, riducendo così la quantità di materiale che deve essere mandato a rifiuto e riprodotto, con conseguente riduzione delle emissioni, riduzione dei tempi di intervento e più rapida apertura al traffico.

Inoltre, nelle pavimentazioni flessibili si sta diffondendo l'uso di conglomerato bituminoso tiepido (Warm Mix Asphalt, WMA) che consente la riduzione della temperatura di produzione dai 20 °C ai 60 °C rispetto ai convenzionali conglomerati bituminosi a caldo. Per questo motivo il WMA, ha molti effetti benefici, come la riduzione delle emissioni di fumi in impianto e il risparmio energetico (benefici ambientali ed economici), nonché l'aumento della distanza di trasporto e miglioramento delle condizioni di lavoro (benefici per la salute umana).

Il programma sperimentale di questa Tesi ha previsto la produzione di piastre bistrato composte inferiormente da conglomerato bituminoso e superiormente da conglomerato bituminoso tiepido compattato a 120 °C, con all'interfaccia quattro diversi geocompositi. Il programma sperimentale ha incluso due prove di taglio diretto, Leutner e ASTRA, e una prova flessionale 3PB al fine di esaminare le prestazioni dei quattro geocompositi oggetto di studio.

Le prove di laboratorio hanno evidenziato i seguenti risultati:

- Prova Leutner – tutti i geocompositi con strato superiore in conglomerato bituminoso caldo (compattati a 160°C) hanno dato valori ampiamente sopra il limite minimo imposto dalle NTC; mentre, i geocompositi con strato superiore in conglomerato bituminoso tiepido (compattati a 120°C) solamente i geocompositi indicati con il numero 1, ovvero la variante thermo, hanno fornito risultati accettabili.
- Prova ASTRA – solo la configurazione I1_160 supera lievemente i limiti imposti dalle NTC. Tuttavia, si evidenzia che i valori maggiori sono dati, ancora una volta, dalle varianti thermo, che risultano essere le più efficienti in termini di resistenza al taglio.
- Prova 3PB – I geocompositi I presentano un valore del coefficiente di prestazione del geocomposito quasi doppio rispetto a quello richiesto dalle NTC; mentre

entrambe le varianti del geocomposito A non raggiungono tale valore, evidenziando così l'alta resistenza alla propagazione di fessure offerta dai geocompositi con rinforzo in tessuto con fibre adirezionali.

Il geocomposito che presenta i migliori livelli prestazionali risulta quindi essere il geocomposito I nella variante 1 del compound (thermo).

Bibliografia e Sitografia

1. <https://insubricahistorica.ch/blog/2022/04/05/ernest-guglielminetti-il-dottor-asfalto-di-domodossola-briga/>
2. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-types-and-history/pavement-history/>
3. <https://www.ingenio-web.it/articoli/le-pavimentazioni-stradali-flessibili-e-semirigide/>
4. Felice A. Santagata (2016) – “Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali, volume 1”
5. Sara Spadoni, Lorenzo P. Ingrassia, G. Paoloni, Amedeo Virgili, Francesco Canestrari (2021) – “Influence of Geocomposite Properties on the Crack Propagation and Interlayer Bonding of Asphalt Pavements”. *Materials*, 14(18):5310
6. UNI EN 12697-31 (2019) – “Miscele bituminose – Metodi di Prova – Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria”
7. UNI EN 12697-1 (2020) - “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 1: Contenuto di legante solubile”
8. UNI EN 12697-48 (2022) - “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 48: Legame interstrati”
9. NTC_22 Autostrade (2022) – “Capitolato speciale – Parte due – Capitolo 9 Pavimentazioni”
10. F. Canestrari, F. Cardone, E. Gaudenzi, D. Chiola, N. Gasbarro, G.Ferrotti (2022) “Interlayer bonding characterization of interfaces reinforced with geocomposites in field applications”. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(1): 154-162
11. Sara Spadoni, Lorenzo P. Ingrassia, E. Mariani, F. Cardone (2022) – “Long-term performance assessment of a warm recycled motorway pavement”. *Case Studies in Construction Materials*, 17: e01451