



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

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

Sezione Strutture ed Infrastrutture
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

CARATTERIZZAZIONE PRESTAZIONALE DI GEOCOMPOSITI AL
VARIARE DELLA TEMPERATURA DI COMPATTAZIONE DEL
CONGLOMERATO TIEPIDO

PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF GEOCOMPOSITES
INFLUENCED BY DIFFERENT COMPACTION TEMPERATURES OF
WARM MIX ASPHALT

Relatore:
Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di Laurea di
Silvia La Torre

Correlatrice:
Dott. Ing. Sara Spadoni

Anno Accademico 2023/2024

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE	4
CAPITOLO 2. STATO DELL'ARTE	5
2.1 LA SOVRASTRUTTURA STRADALE	5
2.2 IL WARM MIX ASPHALT	6
2.2.1 BITUME	7
2.2.2 ADDITIVI	9
2.3 DISSESTI	11
2.3.1 RINFORZI STRADALI	15
2.3.2 GEOCOMPOSITI	18
CAPITOLO 3. MATERIALI	21
3.1 CONGLOMERATO BITUMINOSO A CALDO CON BITUME MODIFICATO	22
3.2 CONGLOMERATO BITUMINOSO TIEPIDO CON BITUME MODIFICATO	24
3.3. EMULSIONE BITUMINOSA	26
3.4. GEOCOMPOSITI	26
CAPITOLO 4. INDAGINE SPERIMENTALE E PROTOCOLLI DI PROVA	28
4.1 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI	28
4.1.1 MISCELAZIONE	28
4.1.2 COMPATTAZIONE DEI PROVINI	31
4.1.3 NOMENCLATURA, CAROTAGGIO E TAGLIO DEI PROVINI	36
4.2 METODI DI PROVA	38
4.2.1 PROVA LEUTNER	38
4.2.2 PROVA ASTRA	41
4.2.3 PROVE DI FLESSIONE STATICA SU TRE PUNTI (3PB)	45
CAPITOLO 5. RISULTATI SPERIMENTALI	49
5.1 GEOCOMPOSITO A	49
5.1.1 PROVE DI TAGLIO LEUTNER	49
5.1.2 PROVE DI TAGLIO ASTRA	51
5.1.3 PROVE FLESSIONALI 3PB	54
5.2 GEOCOMPOSITO B	57
5.2.1 PROVE DI TAGLIO LEUTNER	57
5.2.2 PROVE DI TAGLIO ASTRA	60
5.2.3 PROVE FLESSIONALI 3PB	62
5.3 RIASSUNTO DELLE PRESTAZIONI E CONFRONTO	65
CAPITOLO 6. CONCLUSIONI	68
BIBLIOGRAFIA	70
RINGRAZIAMENTI	72

Capitolo 1. Introduzione

Il crescente aumento del carico veicolare sia in termini di numero di passaggi che di entità dei veicoli stessi, ovvero un aumento dei trasporti pesanti, mette in evidenza la necessità di garantire l'efficienza della rete stradale. I fenomeni di deterioramento più diffusi riguardano fessurazioni da fatica, di riflessione e ormaimento, scatenati dal passaggio dei carichi veicolari in unione all'azione degli agenti atmosferici, tra cui l'acqua e le escursioni termiche. Solitamente il principio di fessurazione avviene con l'innescò di microfessure negli strati più profondi, che poi si propagano sino alla loro comparsa in superficie; una volta giunti a tale grado di deterioramento, l'intero pacchetto strutturale è compromesso. A questo punto si rendono necessari interventi manutentivi ottimali in grado di ripristinare la portanza delle sovrastrutture stradale esistente.

L'esigenza di ottimizzare i tempi e i costi di intervento, abbinata alle difficoltà operative che di norma si incontrano nella rimozione completa delle sovrastrutture e alla necessità di non violare le quote esistenti del piano viabile, hanno determinato nel tempo crescente interesse nei riguardi dell'applicazione di sistemi di rinforzo sotto forma di geosintetici di varia natura. Questi ultimi, la cui applicazione era prima limitata all'interfaccia tra strati legati e granulari con obiettivi principi di separazione e filtrazione, vengono da anni impiegati anche tra strati legati. Essi, svolgendo anche una funzione strutturale, sono una valida soluzione sia per strade di nuova costruzione, sia per interventi manutentivi profondi o superficiali. In particolare, per quanto riguarda questi ultimi, rappresentano una scelta ecosostenibile da un punto di vista ambientale ed economicamente vantaggiosa nel breve e lungo periodo.

Inoltre, insieme all'uso dei geosintetici è stato abbinata la produzione e la messa in opera di conglomerati bituminosi tiepidi, che vengono prodotti a temperature minori rispetto ai caldi fino a 40 °C, riducendo conseguentemente i consumi e le emissioni inquinanti in atmosfera dando frutto a significativi vantaggi di carattere ambientale ed economico. D'altronde, le prestazioni di geosintetici in presenza di conglomerati bituminosi tiepidi non sono ancora state verificate. Va infatti sottolineato che l'adesione all'interfaccia tra gli strati è data dalla parziale fusione del compound polimero, costituente i più comuni geosintetici utilizzati, dovuta alla stesa dello strato in conglomerato bituminoso sovrastante.

La presente Tesi descrive la sperimentazione su sistemi bistrato rinforzati, compattati a diverse temperature minori rispetto a quelle del conglomerato bituminoso a caldo, svolta presso il Dipartimento di Strade dell'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM).

L'obiettivo è la caratterizzazione prestazionale in laboratorio di due geosintetici, in particolare geocompositi, per pavimentazioni stradali flessibili a contatto con conglomerati bituminosi tiepidi rispetto a conglomerati bituminosi convenzionali a caldo.

I geocompositi analizzati sono stati soggetti a prove di taglio e prove flessionali. Le prove a taglio mirano a misurare la resistenziale tangenziale all'interfaccia del sistema bistrato, indispensabili per un'adeguata resistenza, a sua volta, degli scorrimenti longitudinali indotti dai carichi veicolari ciclici. Le prove flessionali effettuate sono volte invece ad analizzare l'incremento di resistenza alla propagazione della fessurazione offerto dal rinforzo.

Capitolo 2. Stato dell'arte

2.1 La sovrastruttura stradale

Per pavimentazione stradale, detta anche sovrastruttura, si intende la parte superiore del corpo stradale che risente direttamente delle conseguenze del carico veicolare sovrastante. Essa è una struttura piana, infinitamente estesa, formata da diversi strati ciascuno dei quali caratterizzato da una variabilità di spessori, composizioni e materiali. La qualità di questi ultimi diminuisce man mano che ci si distanzia del piano viabile in quanto è sempre meno sensibile alla presenza del traffico veicolare; allo stesso tempo, sempre distanziandoci da esso, oltre alla qualità, anche la dimensione degli aggregati lapidei varia. Nello specifico aumenta in funzione della profondità, essendo quindi sempre più piccola verso l'alto e viceversa più grossa verso il basso.

La sovrastruttura deve essere pensata, sia in fase di realizzazione che in fase di manutenzione, in maniera tale da assicurare le seguenti caratteristiche:

- > trasmettere e distribuire al sottofondo, in modo adeguato al tipo di pavimentazione che si vuole ottenere, le azioni indotte dal traffico per permettere all'intero pacchetto stradale di resistere al giusto numero di passaggi;
- > resistere ai fenomeni di degrado strutturale causato dai carichi ciclici combinati alle sollecitazioni di natura termica;
- > garantire regolarità del profilo superficiale e aderenza del piano viabile (condizioni di sicurezza e comfort di marcia) soffermandosi più sulle caratteristiche superficiali della pavimentazione che su fattori esterni di natura dinamica come le caratteristiche del moto relativo pneumatico-pavimentazione;
- > proteggere il sottofondo dalle azioni esterne quali acqua e gelo che potrebbero causare relative infiltrazioni, lenti di ghiaccio ecc...;
- > assecondare le richieste di carattere ambientale orientate verso la realizzazione di opere sempre più eco-sostenibili a fronte di migliorare non solo l'impatto sul contesto circostante, ma anche l'impatto economico di costruzione e manutenzione di una pavimentazione stradale.

Come detto precedentemente, in base al numero, all'ordine e alla natura dei vari strati possono ottenere diversi generi di pavimentazione, generalmente riconosciamo tre tipologie di strutture quali:

- > flessibili, costituite da uno strato di usura, uno strato di binder e uno strato di base, tutti in conglomerato bituminoso. Questi tre strati poggiano su una fondazione in misto granulare ed infine il sottofondo per un totale di 5 strati;

- > semi-rigide, realizzate allo stesso modo delle flessibili con un'aggiunta di uno strato base costituito da microgranuli tra la base in conglomerato bituminoso e la fondazione in misto granulare;
- > rigide, costituite da una lastra in calcestruzzo posata su uno o più strati di fondazione in misti granulare e/o misto cementizio o direttamente poggiate sul terreno di sottofondo, se questo garantisce un'adeguata capacità portante.

In generale lo strato di usura (50÷100 mm) ha l'obiettivo di assicurare aderenza e regolarità per sicurezza e comfort di guida mentre il binder (20÷150 mm) ha funzione di collegamento tra usura e base (50÷250 mm); quest'ultima è fondamentale per la ripartizione dei carichi che vengono successivamente trasmessi, tramite la fondazione (altezza variabile), al sottofondo che deve necessariamente dissiparli e assorbirli in maniera adeguata [1].

2.2 Il Warm Mix Asphalt

Da alcuni anni i settori più avanzati dell'industria dedicata alla produzione e applicazione dei conglomerati bituminosi si interrogano sui possibili processi mirati ad un significativo contenimento delle risorse energetiche utilizzate. Considerando che riduzioni di 10°C delle temperature di produzione e messa in opera consentono, a parità di condizioni, di dimezzare le emissioni di fumi, ben si comprende come il risparmio energetico vada di pari passo con la tutela dell'ambiente e con il miglioramento delle condizioni di lavoro. Per questo motivo è stato sviluppato un nuovo tipo di conglomerato bituminoso ottenuto da processi in cui le temperature di lavorazione risultano decine di gradi inferiori a quelle tipiche delle tecniche di produzione a caldo (Hot Mix Asphalt – HMA); tali materiali prendono il nome di Warm Mix Asphalt (WMA) ed in generale permettono un abbassamento di temperatura di miscelazione e compattazione circa pari al 30% rispetto agli HMA [2].

Facendo un confronto tra conglomerato bituminoso caldo e tiepido si può denotare come essi presentino le medesime caratteristiche composizionali (bitume e relativo contenuto, aggregati e relativo assortimento granulometrico), a differenza invece di caratteristiche quali fluidità, lavorabilità e auto addensamento molto elevati anche a temperature di compattazione alle quali normalmente il bitume tal quale è particolarmente viscoso. Il recente sviluppo tecnologico ha permesso di ovviare a questo problema, andando ad utilizzare additivi chimici, additivi organici o processi a base di acqua o schiumati; tali tecnologie, anche se differenti, hanno lo stesso scopo, cioè quello di ridurre la viscosità del bitume e migliorare la lavorabilità del conglomerato bituminoso a temperature più basse [3].

Oltre al confronto prestazionale tra un Warm Mix Asphalt e un Hot Mix Asphalt, un altro aspetto di fondamentale importanza è quello dell'impatto ambientale dovuto dalla produzione sia dei singoli elementi tanto quanto il prodotto finale di conglomerato bituminoso. Tramite un caso di studio riguardante la ricostruzione di una sezione sperimentale, a grandezza reale, mediante l'impiego di miscele bituminose calde e tiepide

coadiuvate sia dall'utilizzo di additivi chimici che di bitume modificato, è stato possibile confrontare le tre fasi produttive.

Queste ultime sono essiccazione/riscaldamento degli aggregati, riscaldamento del bitume e miscelazione, considerando la variabilità di fattori quali temperature coinvolte, durata della miscelazione e quantità di materiali vergini utilizzati tra HMA e WMA. Per ogni tipo di miscela, una riduzione di 40°C della temperatura di miscelazione (130°C per WMA vs. 170°C per HMA) implica una riduzione di circa il 15% energia termica per l'essiccazione/riscaldamento degli aggregati; ciò corrisponde ad un'analogia riduzione del consumo di olio combustibile e delle emissioni di CO₂ (anidride carbonica).

Sia l'asciugatura che il riscaldamento degli aggregati per il WMA portano a una riduzione di circa il 18, 22 e 35% di emissioni rispettivamente del PM (Particulate Matter), NO_x (ossidi di azoto) e COV (Composti Organici Volatili) rispetto a HMA. Al contrario, le emissioni di altri inquinanti atmosferici erano comparabili (1% per SO_x, ossidi di zolfo) o superiore (22% per CO) per WMA rispetto a HMA. Tuttavia, l'aumento delle emissioni dipende principalmente dalle scorrette impostazioni di lavorazione del bruciatore all'impianto non ottimizzato per la produzione di WMA in quanto esso risulta essere un materiale relativamente nuovo sul mercato degli asfalti. Sia per HMA che per WMA, la quota più elevata di emissioni di CO₂ riguarda essiccazione/riscaldamento degli aggregati, seguito dal riscaldamento del bitume e infine per la fase di miscelazione. Nello specifico, la differenza nelle emissioni di CO₂ dovuta alla diversa durata della miscelazione tra WMA (30 s) e HMA (26 s) può essere considerata trascurabile rispetto alla differenza di emissioni dovuta alla fase di asciugatura nel tamburo essiccatore.

Oltre a riguardare l'impatto ambientale, tramite il WMA è possibile migliorare sia le condizioni di lavoro grazie una minore emissione di gas nocivi, sia allungare i tempi di trasporto del materiale stesso dall'impianto al sito di impiego non avendo più la necessità di mantenere costanti le alte temperature dell'HMA. Inoltre, in caso di temperature troppo rigide, la stesa e la compattazione di una miscela tradizionale risulterebbe difficile a differenza dell'unione tra conglomerato tiepido e additivo che permette alla lavorabilità del materiale risultante di perdurare nel tempo.

Infine, teniamo conto anche degli aspetti negativi che comporta l'utilizzo e la realizzazione di un conglomerato tiepido quali possono essere: il costo degli additivi e l'adattamento degli impianti di miscelazione [4].

2.2.1 Bitume

Negli impieghi più frequenti il bitume appare come un liquido viscoso o un solido termodipendente, essenzialmente costituito da idrocarburi la cui struttura è molto complessa. Si considera che esso è formato da tre famiglie di costituenti che non corrispondono a entità chimiche ben definite ma risultano da differenti processi di separazione:

- > I carboidi e i carbeni (insolubili nel tetracloruro di carbonio);

- > Gli asfalteni (insolubili nel normale-eptano, composti molto complessa a struttura condensata);
- > Le resine e gli oli (solventi nei solventi sopra citati);

i due ultimi costituenti possono essere raggruppati sotto il nome di malteni.

Il bitume è utilizzato come legante per trattenere insieme grani minerali di diversa forma e grandezza. Il mantenimento di questo legame richiede che non vi sia distacco tra la pellicola di bitume e il singolo grano (adesione) e che non vi sia rottura all'interno della pellicola di bitume (coesione). Poiché questo legame deve sussistere sia a basse temperature sia a temperature elevate, come pure per sollecitazioni istantanee e per sollecitazioni lente, bisogna esaminare la consistenza del bitume e la variabilità di questa caratteristica. A temperatura ambiente la consistenza del bitume è quella di un solido o di uno pseudosolido; a temperature elevate si ha un progressivo rammollimento, a temperature basse si ha una fragilizzazione.

La temperatura, tuttavia, non è il solo parametro da cui dipendono le caratteristiche meccaniche del bitume: trattandosi di un materiale viscoelastico il suo comportamento meccanico è molto sensibile alla velocità di applicazione del carico.

In generale posso ottenere due comportamenti:

- > Temperature basse combinate a velocità elevate di applicazione del carico ha come risultato un comportamento fragile agli urti con conseguente fessurazione progressiva;
- > Temperature elevate combinate a velocità basse di applicazione del carico ha come risultato un trasudamento di bitume con conseguenti deformazioni plastiche e ormaie.

Un problema di notevole importanza teorica è quello di adesione fra il legante e gli aggregati. L'adesione di un legante organico e un elemento lapideo presenta due aspetti diversi:

- > Un'adesione meccanica che dipende dall'effettiva capacità del legante di avvolgere l'elemento lapideo; essa è funzione della viscosità del legante, della tessitura superficiale della pietra ecc.;
- > Un'adesione specifica, cioè specifica di un certo legante e di una certa pietra, che dipende dalla bagnabilità dell'aggregato e dalla situazione chimica ed elettrochimica che si viene a determinare al contatto tra pietra e legante.

Si intuisce che l'ultimo tipo di adesione sia quindi strettamente dipendente dalla presenza dell'acqua.

Poiché le buone proprietà dei polimeri (elasticità, coesione, bassa suscettibilità termica) hanno reso sempre più conveniente il loro impiego come legante stradale, mentre il loro costo si opponeva a ciò, è nata l'idea di associare i polimeri ai leganti tradizionali.

Le miscele realizzate maggiormente in combinazione con il bitume sono:

- > Polimeri ad alto peso molecolare (omopolimeri, copolimeri, tra i quali un buon numero di elastomeri come il lattice di gomma); l'idea di introdurre nella struttura del bitume masse viscoelastiche più organizzate e di peso molecolare più elevato di quello degli asfalti è collegata all'idea che un aumento della struttura gel debba portare a un miglioramento del comportamento dei bitumi e, in particolare, della possibilità di avere minore rigidità a bassa temperatura
- > Le resine epossidiche; si tratta di una tecnica che prevede l'utilizzo di resine particolari compatibili con i bitumi di distillazione [5].

2.2.2 Additivi

I bitumi modificati sono ottenuti dall'unione di un bitume tradizionale e di particolari composti chimici, detti agenti modificanti, nella maggior parte materiali polimerici di varia natura e composizione. È importante osservare che il bitume modificato costituisce un prodotto sostanzialmente diverso da quello di origine, in quanto il polimero non funge da semplice additivo ma determina un cambiamento di tipo chimico-fisico di tipo irreversibile unito a un miglioramento complessivo delle caratteristiche prestazionali finali. La produzione avviene in impianti appositamente allestiti per la modifica. I parametri di processo e le condizioni di lavorazione sono stabiliti sulla base delle caratteristiche del bitume di base e dell'agente impiegati, al fine di realizzare un materiale dalle caratteristiche omogenee e controllate.

Generalmente si realizza un composto di base a forte concentrazione di polimero che viene successivamente diluito con uno o più tagli di bitume tradizionale in modo da ottenere la composizione desiderata. Una cura particolare deve essere riservata allo stoccaggio che avviene all'interno di serbatoi termici mantenuti a una temperatura predefinita e in continua agitazione al fine di scongiurare fenomeni di separazione delle fasi.

Nello specifico i polimeri sono materiali organici di sintesi, costituiti da molecole aventi un elevatissimo numero di atomi legati tra loro con legami covalenti. I modificanti utilizzati nei bitumi sono quasi esclusivamente copolimeri di tipo termoplastico. La caratteristica comune di tali materiali consiste nella capacità di variare il proprio stato con la temperatura in maniera reversibile e ciò li rende adatti ad essere mescolati con il bitume. Essi si possono distinguere in due principali categorie: elastomeri e plastomeri. Gli elastomeri sono copolimeri a blocchi di mono-olfine e di-olfine. I primi sono di solito costituiti da stirene mentre i secondi sono in genere butadiene e isoprene. Essi sono indicati rispettivamente con la sigla SBS (stirene-butadiene-stirene) o SIS (stirene-isoprene-stirene). Tali copolimeri possono presentarsi sia in forma di catena lineare di monomeri, sia di catena ramificata. In

entrambi i casi, i blocchi stirenici sono posti alle estremità delle catene e conferiscono rigidità al sistema mentre il butadiene è l'elemento di unione dotato di proprietà elastiche.

Alle temperature di servizio gli elementi stirenici tendono ad agglomerarsi formando dei domini di fase, i quali costituiscono i nodi rigidi di un reticolo tridimensionale nello spazio, dando così luogo a una struttura amorfa. Alle alte temperature, a causa dell'elevata energia interna e conseguente mobilità delle molecole e conseguente mobilità delle molecole, tali domini si dissolvono e il materiale passa allo stato fluido: tale condizione permette la miscelazione del bitume nel corso del quale si instaurano meccanismi di chimico attraverso i quali la base maltenica di quest'ultimo viene inglobata nella componente butadienica dell'elastomero. Una volta diminuita la temperatura, l'elastomero tende a ricostruire la struttura reticolare iniziale in maniera dipendente da fattori quali concentrazione e compatibilità termodinamica del sistema combinato.

L'aspetto che più ci interessa trattare a proposito degli additivi è il potere di questi ultimi di andare a modificare l'adesione bitume-aggregato e di conseguenza la suscettibilità del prodotto finale all'acqua. Nello specifico la stabilità del legame che si instaura tra i granuli lapidei e la pellicola bituminosa di ricoprimento risulta essenziale affinché quest'ultima possa esplicare la sua funzione di legante. La presenza di acqua può alterare significativamente questo legame determinando una perdita di adesione tra le due fasi per un'azione combinata di tipo chimico e meccanico. In tale circostanza si compromette la coesione del composto e di conseguenza vengono ridotte le sue prestazioni. Il meccanismo di adesione bitume-aggregato può essere spiegato seguendo approcci diversi. Quello più semplice fa riferimento al tipo di carica elettrica superficiale che i materiali componenti assumono in acqua e al conseguente grado di affinità con quest'ultima. Il bitume è dotato di una componente naturale (COOH) che al contatto con l'acqua libera ioni H^+ , caricandosi negativamente e dando luogo a una soluzione acida. Gli aggregati invece si distinguono in relazione alla loro natura mineralogica:

- > Idrofilo o acido, caratterizzati da una carica di segno negativo;
- > Idrofobo o basico, caratterizzati da una carica di segno positivo.

Appartengono al primo gruppo i materiali silicei mentre al secondo gruppo quelli di natura calcarea.

L'affinità dell'acqua degli aggregati silicei indebolisce il legame di adesione con il legante per cui si può generare il distacco della pellicola di ricoprimento per interposizione di un velo idrico tra questa e la superficie della particella. Nel caso degli aggregati calcarei invece, il carattere idrofobo fa sì che la forza di adesione risulti notevolmente superiore rispetto al valore della coesione interna del bitume dando luogo al fenomeno dello spogliamento, ovvero la rottura e successiva separazione del film legante [6].

Per rafforzare il legame fra l'inerte e il bitume, come già detto in precedenza, quindi, vengono utilizzati gli attivanti di adesione, prodotti costituiti essenzialmente da acidi grassi e gruppi polifunzionali amminici, che permettono di migliorare l'adesione totale (attiva e passiva), attraverso lo sviluppo di una reazione chimica molecolare delle diverse fasi a contatto. In seguito alla formazione di questo ulteriore legame l'adesione bitume-inerte diventa stabile

e duratura nei riguardi dell'acqua in tutte le sue manifestazioni. L'impiego dell'attivante di adesione, anche se il dosaggio è molto basso, può provocare un effetto flussante sul bitume modificandone il comportamento. Lo scopo della ricerca svolta nel 2000 di Bocci et al. [7] è stato proprio quello di valutare gli effetti dell'additivo sulle caratteristiche meccaniche e volumetriche del conglomerato. La sperimentazione è stata realizzata su miscele bituminose confezionate con diversi tipi di bitume, sia tal quali che modificati, utilizzando una curva granulometrica per tappeti di usura. Ogni bitume è stato additivato con differenti quantità di attivante di adesione, comprese in un range 0-0.8%. I provini sono stati preparati sia con la tradizionale metodologia Marshall che con la pressa giratoria a taglio. Per valutare il comportamento meccanico delle miscele, sono state effettuate, oltre alle tradizionali prove Marshall e Brasiliana, anche prove monoassiali statiche di compressione e dinamiche di trazione e compressione. L'impiego della pressa a taglio giratoria, ha permesso, parallelamente, di indagare l'influenza dell'additivo sul costipamento e quindi sulle proprietà volumetriche del conglomerato. Dai risultati ottenuti si è potuto constatare che l'attivante di adesione, se impiegato con dosaggi ottimali, contrariamente alle aspettative, non produce un incremento delle deformazioni plastiche, bensì una loro riduzione e valori di modulo dinamico più elevati. Ciò potrebbe trovare spiegazione nella migliore costipabilità riscontrata nelle miscele additivate, dovuta probabilmente ad una riduzione della viscosità del legante. Per escludere la dipendenza dei risultati ottenuti dal particolare tipo di additivo adottato si è effettuata, in forma ridotta, un'ulteriore sperimentazione impiegando un altro tipo di attivante. I risultati hanno confortato quelli precedentemente ottenuti, e quindi l'esistenza di una percentuale d'impiego dell'attivante di adesione che ottimizza tutte le grandezze meccaniche e volumetriche prese in considerazione [7].

2.3 Dissesti

I dissesti che maggiormente vengono riscontrati nelle pavimentazioni flessibili sono i seguenti:

- > Fessurazioni ramificate o a pelle di coccodrillo:
consistono in ramificazioni che vanno a creare poligoni aventi lato medio minore di 50cm. Queste molto spesso sono il preavviso, o già accompagnano, le ormaie, perciò molto spesso vengono a formarsi sotto l'impronta degli pneumatici a causa di fatica dovuta a traffico. Vengono misurate in superficie e ne si distingue la gravità in base al grado di interconnessione tra i poligoni. Si mostra un esempio in Figura 2.3_1 – Fessurazione a pelle di coccodrillo;



Figura 2.3_1 – Fessurazione a pelle di cocodrillo

- > **Risalita di bitume:**
si tratta di un film di bitume che risale in superficie risultando lucido e appiccicoso al tatto. È un fenomeno non reversibile spesso dovuto alle alte temperature accompagnato da un eccesso di bitume o da una bassa percentuale di vuoti della pavimentazione. Questo dissesto si misura in superficie e la sua gravità dipende dal numero di volte che si verifica nell'arco di un tempo fissato quale pochi giorni/poche settimane/alcune settimane;
- > **Fessurazione a blocchi:**
gruppo di fessurazioni che formano blocchi rettangolari aventi area compresa tra 0.9 e 9 m² formati a causa di stress termico oppure dall'errato tipo di bitume impiegato. Si misurano in superficie e la loro severità è determinata dal grado di sgranamento delle fessure che formano i poligoni;
- > **Rigonfiamenti/depressioni localizzati:**
trattasi di una distorsione della strada dovuta a rigonfiamenti a causa del gelo o dell'accumulo di materiale in zone sensibili al traffico (es. agli stop, ai semafori, ecc). Si misurano in lunghezza e la loro severità è espressa in confort di guida. La severità di questo dissesto dipende quindi dalle vibrazioni dell'abitacolo del veicolo che passa su di essi. Se le vibrazioni sono tali da indurre il conducente a decelerare allora la severità aumenta;
- > **Corrugamenti:**
trattasi di una serie ripetuta di rigonfiamenti e depressioni fino a diventare delle vere e proprie ondulazioni perpendicolari al senso di marcia, aventi intervalli regolare minori di 3 m. Le cause sono superficie instabile e azioni tangenziali degli pneumatici e la severità si misura anche stavolta col confort di guida;
- > **Depressioni:**
queste si estendono lungo il tracciato stradale permettendo ristagni d'acqua. Si misurano in superficie valutando la severità in base alla loro profondità e spesso sono causate dal cedimento del sottofondo o da un'errata costruzione del pacchetto stradale;

- > Fessurazioni di bordo:
sono fessurazioni longitudinali distanti 30-50 cm dal bordo esterno, si misurano in lunghezza e la loro severità dipende dal livello di sgranamento. Le cause della formazione di queste fessurazioni sono il gelo e la mancanza di un supporto laterale alla strada;
- > Fessurazioni di riflessione del giunto:
sono misurate in lunghezza e possono essere sia longitudinali che trasversali; la loro causa è l'imprecisione costruttiva;
- > Cedimenti margine della carreggiata:
consistono in una differenza di quota tra la pavimentazione e il margine laterale, si misurano in lunghezza e la loro severità è dovuta alla quantità di differenza di quota. Le cause sono l'erosione o una mancata sistemazione del margine;
- > Fessurazioni longitudinali e trasversali: trattasi di fessure singole che vengono valutate in lunghezza con severità dipendente dal grado di sgranamento, dalla mancata o meno sigillatura e dall'ampiezza dell'apertura. Le cause di formazione di queste fessure sono difetti di giunzione della pavimentazione, basse temperature con conseguente ritiro del materiale, riflessione di fessure sottostanti. Se ne mostra un esempio in Figura 2.3_2 – Fessurazioni longitudinali e trasversali



Figura 2.3_2 – Fessurazioni longitudinali e trasversali

- > Rappezzi:
si parla di aree di pavimentazione rimpiazzata, si misura in superficie e la severità dipende dalle sue condizioni. Se ne mostra un esempio in Figura 2.3_3 - Rappezzo.



Figura 2.3_3 - Rappezzo

- > Levigatura degli aggregati:
questo dissesto si verifica in concomitanza ad un basso valore di skid resistance, perciò, gli aggregati si presentano lisci e lucidi. Le cause principali sono l'usura da passaggio ciclico degli pneumatici oppure una sbagliata scelta degli aggregati;
- > Buche:
sono delle cavità delle pavimentazioni che si vengono a creare a causa di acqua, traffico o deterioramento di dissesti precedenti. La severità dipende dalla profondità e dal diametro medio e si misurano in numero. Un esempio è mostrato in Figura 2.3_4 - Buca



Figura 2.3_4 - Buca

- > Attraversamenti ferroviari
- > Ormaie:
questo tipo di dissesto è molto diffuso e consiste in depressioni longitudinali che si vengono a formare sotto l'area di impronta degli pneumatici con possibile formazione

di acqua planning in caso di pioggia. Si misurano in superficie e hanno una severità che dipende dalla profondità e sono causate da miscele bituminose deformabili, e cedimenti degli strati inferiori;

- > Scorrimenti:
sono degli spostamenti di materiale a forma di mezzaluna trasversale al senso di marcia. Sono causate dal traffico e/o da un debole legame tra la superficie viabile e lo strato immediatamente sottostante e si misurano in superficie. La severità dipende dall'ampiezza delle fessure;
- > Rigonfiamenti:
ovvero rigonfiamento della superficie a causa dell'azione del gelo oppure del rigonfiamento del terreno sottostante. La severità dipende dalla qualità di guida e si misurano in superficie;
- > Disgregazione e sgranamenti:
si tratta del distaccamento degli aggregati e della conseguente perdita di legante bituminoso. Le cause sono il possibile irrigidimento del bitume, una miscela di bassa qualità, il traffico e/o lo sversamento di prodotti inquinanti sulla superficie viabile. Si misurano in superficie e la loro severità dipende dal livello di erosione.

2.3.1 Rinforzi stradali

I geosintetici sono dei materiali adoperati sin dall'inizio degli anni '70 per costruzioni stradali, stabilizzazione del sottofondo e per il rinforzo dello strato di base. Essi vengono posti tra il sottofondo e la base o entro lo strato di sotto-base e riescono a migliorare le prestazioni delle strade. I materiali geosintetici possono essere suddivisi in due macro-gruppi: permeabili e impermeabili. Si individuano tre sottocategorie principali, suddivise in relazione al loro processo produttivo: geotessili, geocompositi e geomembrane.

I geotessili sono materiali permeabili realizzati a partire da prodotti derivati dal petrolio, per esempio poliestere, polietilene e polipropilene. Essendo composti da fibre, questi hanno una struttura aperta e quindi porosa. Si dividono a loro volta in:

- > Geotessili tessuti: sono strutture piane e regolari, formate dall'intreccio di due o più serie di fili di fibre sintetiche: fili di ordito (paralleli al senso di produzione) e fili di trama (ortogonali al senso di produzione) con cui si ottengono aperture regolari e di piccole dimensioni;
- > Geotessili non tessuti: sono strutture piane con fibre disposte casualmente e tenute assieme con metodi meccanici come l'agugliatura, trattamenti termici oppure chimici.
- > Altri numerosi prodotti rientrano nella categoria dei geotessili: geogriglie, georeti, geocelle, geostuoie, geostriscie e gli geospaziatori.

I geocompositi sono geosintetici formati dall'accoppiamento di due o più tipologie di materiale. I geocompositi più frequentemente utilizzati sono: geocompositi drenanti e geocompositi bentonitici. I primi sono formati dall'interposizione di una georete tra due strati di geotessuto e hanno funzione drenante. I secondi sono costituiti da uno strato di bentonite in polvere (disidratata) interposta e legata meccanicamente/chimicamente, tra due geotessili o due geomembrane e possiedono una funzione impermeabilizzante. Per aumentarne la resistenza a trazione interna, talvolta il prodotto bentonitico viene cucito o agugliato agli strati superiore e inferiore. Le georeti che compongono il geocomposito sono costituite da un reticolato aperto formato da due serie di filamenti polimerici estrusi, i quali si intersecano formando un angolo costante. La maggior parte delle georeti disponibili sono costituiti da polietilene ad alta o media densità. Si mostra una possibile stratigrafia tra geocomposito e pavimentazione in Figura 2.3.1_1 Posizionamento geocomposito.

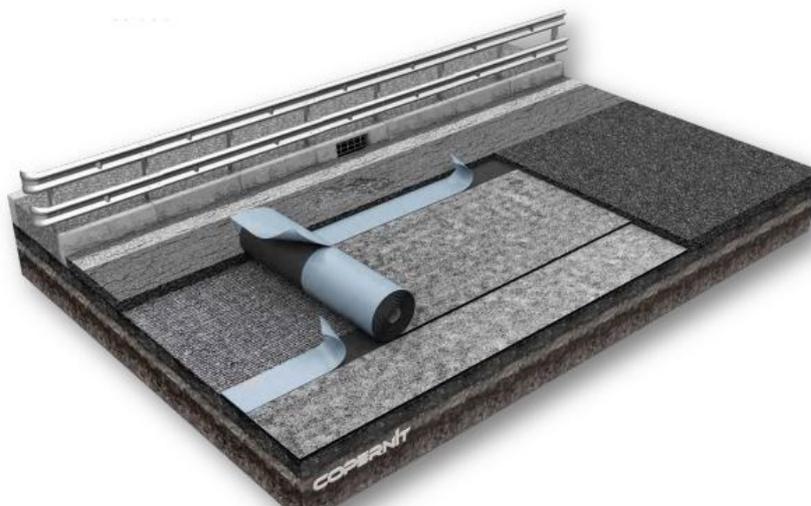


Figura 2.3.1_1 Posizionamento geocomposito (Credit Copernit)

Le geomembrane sono utilizzate come barriere per il contenimento di fluidi. Possono essere flessibili o rigide in funzione al tipo di polimero utilizzato, infatti esse possono essere costituite da polimeri termoplastici o termoindurenti.

I polimeri termoplastici all'aumentare della temperatura si portano ad uno stato viscoso e sono più facili da deformare; a seguito del raffreddamento ritornano allo stato solido. Tale proprietà si mantiene nel tempo in quanto le interazioni intermolecolari si riformano spontaneamente ad ogni raffreddamento. In tale categoria rientrano il polivinilcloruro (PVC), il polietilene (PE) e la poliammide (PA).

I polimeri termoindurenti invece sono polimeri con una deformazione irreversibile cioè possono essere fusi una sola volta: fusioni successive comportano la degradazione del materiale e la conseguente perdita di resistenza. In questa categoria rientrano l'etilene vinilacetato, il policloroprene e l'isoprene-isobutilene [8].

I rinforzi stradali possono ottemperare a diversi ruoli quali quelli di:

- > Separazione: questa funzione 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 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 nel sottofondo all'interno della pavimentazione;
- > Filtrazione: ovvero l'allontanamento dell'acqua dalle 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. Normalmente si utilizzano criteri basati o sul diametro o sulla permeabilità: il primo richiede che il diametro caratteristico del filtro del geotessile sia minore del diametro rappresentativo della granulometria della terra proporzionale n volte a quello del filtro stesso; il secondo richiede che la permeabilità del filtro sia minore N volte la permeabilità del terreno;
- > Drenaggio: atto a garantire che una sufficiente portata idraulica fluisca nella corretta direzione quale longitudinale o trasversale alla sovrapposizione degli strati della pavimentazione e del sottofondo. I geocompositi drenanti possono essere utilizzati in sostituzione delle tradizionali trincee riempite di materiali granulare o degli strati drenanti, o a tergo di muri di sostegno per evitare l'insorgere della spinta idrostatica;
- > Rinforzo: funzione utile sia nei terreni con miscele bituminose che di quelle con legante idraulico. 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. Il rinforzo consente di realizzare rilevati su terreni estremamente deformabili e di aumentare la pendenza delle scarpate delle stesse 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 di capacità portante sia alla mitigazione del fenomeno di fessurazione da riflessione;
- > Controllo dell'erosione: causata spesso dell'impatto delle precipitazioni e dal ruscellamento sulle opere in terra di nuova costruzione. Le protezioni possono essere sia di tipo temporaneo che permanente e può essere realizzata utilizzando geocelle riempite di materiale granulare di pezzatura grossolana. Tale soluzione si rileva utile in particolare in caso di pendii in quasi si abbia la quasi totale assenza di vegetazione (es. substrati rocciosi o impermeabilizzati);
- > Contenimento: in pratica una vera e propria barriera per il passaggio di fluidi e in particolare dell'acqua. Questa è la funzione principale delle geomembrane e dei geocompositi bentonitici [6].

2.3.2 Geocompositi

Nel caso di demolizione e ricostruzione anche parziale degli strati in conglomerato bituminoso, al fine di ridurre il fenomeno della fessurazione di riflessione (aumentando la durata a fatica) e prevenire possibili infiltrazioni di acqua proveniente dalla superficie stradale, nel caso di pavimentazioni poste a cavallo di un giunto di ripresa longitudinale oppure che presentano fessurazioni sul fondo del cavo fresato è prevista la posa in opera di un geocomposito. Esso è ottenuto dall'accoppiamento di una geomembrana auto-termo-adesiva (realizzata con un compound bituminoso elastomerico SBS) con un geosintetico di rinforzo, dotato di idonee caratteristiche. L'utilizzo del geocomposito può essere anche previsto sui giunti longitudinali fra lastra di pavimentazione composita polifunzionale (PCP) e pavimentazione semirigida/flessibile affiancata, prima della stesa della mano d'attacco nel caso di ricostruzione del tappeto di usura drenante sovrastante.

Da un punto di vista esecutivo, l'applicazione del geocomposito deve avvenire su una superficie fresata perfettamente regolare garantendo l'assenza di una macrotessitura eccessiva attraverso la limitazione della velocità di avanzamento durante le operazioni di fresatura a freddo della pavimentazione. Al termine della fresatura, deve essere eseguita una accurata rimozione del materiale residuo mediante spazzolatura con l'ausilio di getti di aria compressa. Prima della posa in opera dello strato in conglomerato bituminoso, i geocompositi devono essere sottoposti ad una compattazione preferibilmente con rullo gommato per favorire una perfetta adesione alla superficie fresata ed evitare la formazione di pieghe durante il passaggio della finitrice e dei mezzi di cantiere.

I geocompositi devono essere qualificati in conformità al regolamento UE 305/2011 sui prodotti da costruzione, nello specifico devono essere dotati di una superficie inferiore auto-termo-adesiva (per favorire l'adesione con lo strato di conglomerato bituminoso sottostante) ricoperta da un film protettivo da asportare all'atto della messa in opera. Inoltre, i geocompositi devono essere provvisti di una superficie superiore ricoperta con un fine strato minerale per evitare (soprattutto in climi caldi) l'adesione alle ruote dei mezzi di cantiere e promuovere la solidarizzazione con lo strato di conglomerato bituminoso sovrastante al momento della stesa a caldo.

Come riportato in Figura 2.3.2 _1 Esempio di geocomposito si possono notare 5 strati: il primo strato consiste nella finitura della faccia superiore ed è composto da tessuto-non-tessuto di polipropilene nero, con cimosa siliconata asportabile da 10 cm o da scaglie di ardesia grigia o colorata; il secondo strato è il compound formato da bitume modificato con polimero SBS; il terzo strato è la vera e propria armatura in poliestere composito rinforzato e stabilizzato; il quarto strato è un ulteriore compound di bitume modificato con poliestere stavolta autoadesivo; il quinto strato è la finitura della faccia inferiore costituita da un film siliconato, antiaderente e asportabile, diviso in due parti per facilitare il posizionamento e l'allineamento dei rotoli.

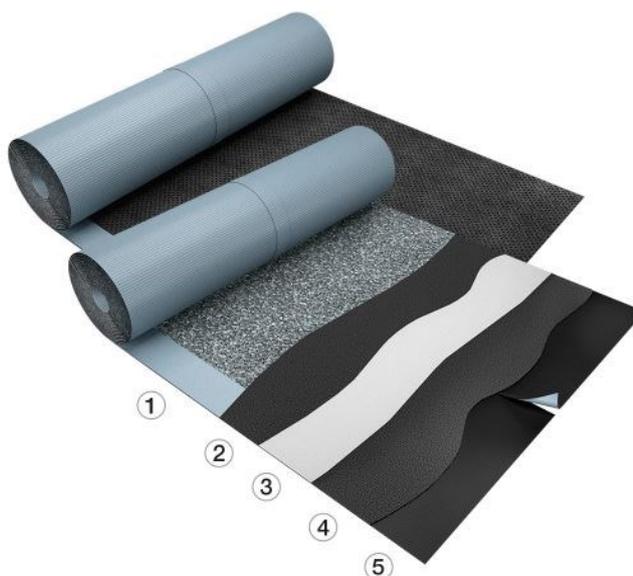


Figura 2.3.2 _1 Esempio di geocomposito

Si riportano di seguito in Tabella 2.3.2_1 Prescrizioni su geocompositi alcune caratteristiche da rispettare secondo ciascuna normativa citata.

CARATTERISTICA	NORMA	REQUISITO
Spessore	UNI EN 1849-1	2,5 mm
Resistenza a trazione L/T	UNI EN 12311-1	35 KN/m
Allungamento a rottura L/T	UNI EN 12311-1	14%
Resistenza alla compattazione di uno strato di conglomerato bituminoso	UNI EN 14692	Esito positivo
Impermeabilità dinamica ad una pressione di 500 kPa	UNI EN 14694	Esito positivo

Tabella 2.3.2_1 Prescrizioni su geocompositi

Affinché le pavimentazioni con geocompositi raggiungano prestazioni strutturali ottimali, in fase di prequalifica è necessario verificare sia il comportamento a taglio dell'interfaccia rinforzata, sia l'efficienza del geocomposito nel contrastare la fase di propagazione di fessure indotte mediante l'applicazione di carichi flessionali. A tale proposito, la resistenza a taglio di interfacce rinforzate, valutata su provini confezionati in laboratorio, deve essere conforme alle specifiche riportate in

Tabella 2.3.2_2 Limiti di laboratorio:

FASE DI CONTROLLO	PREQUALIFICA IN LABORATORIO
Leutner (SBT, UNI EN 12697-48) 20 °C; 50 mm/min	> 0,70 MPa
ASTRA (CSBT, UNI EN 12697-48) 20 °C; 2,5 mm/min; 0,2 MPa	> 0,40 MPa

Tabella 2.3.2_2 Limiti di laboratorio

L'applicazione del geocomposito, estesa alla singola corsia di marcia oppure a più corsie, può essere prevista per interventi di risanamento strutturale limitando la profondità della pavimentazione esistente da rimuovere mediante fresatura, apportando i seguenti benefici:

- > Incremento della vita utile a fatica;
- > Maggiore diffusione delle tensioni verticali sugli strati non legati;
- > Contenere la risalita di fessure esistenti (fessurazione di riflessione) agendo come stress absorbing membrane interlayer (SAMI);
- > Evitare infiltrazioni di acqua negli strati profondi e conseguenti risalite di materiale fino;
- > Favorire lavorazioni notturne su tratte ad elevato traffico [9].

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, nello specifico:

- > Lo strato inferiore è composto da conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato (Cap. 3.1 Conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato) che ha l'obiettivo di riprodurre 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 due geocompositi che da ora in poi chiameremo A e B che hanno la funzione di ritardare la propagazione di fessure esistenti nel nuovo strato di conglomerato bituminoso, senza però penalizzare l'adesione tra gli strati;
- > Strato superiore in conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato (Cap. 3.2 Conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato) che quindi stavolta ha l'obiettivo di riprodurre il nuovo tappeto di binder/base che andrà a realizzarsi in cantiere per ultimare la manutenzione del tratto stradale. A queste si aggiunge la configurazione di riferimento con conglomerato bituminoso caldo (Cap. 3.1 Conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato)

Il conglomerato bituminoso è costituito da una miscela proporzionata data da: legante bituminoso, mix di aggregati (materiali lapidei di varia natura e pezzatura) e filler minerali. Queste frazioni sono presenti in percentuali variabili in funzione della tipologia di strato da realizzare e della tipologia di miscela.

Gli aggregati derivano dalla frantumazione delle rocce e successiva vagliatura; essi rappresentano circa il 60-80 % delle miscele stradali.

Gli aggregati vengono generalmente suddivisi in:

- > aggregati grossi, aventi dimensioni > 4 mm costituiscono la fase solida portante del conglomerato bituminoso;
- > aggregati fini, aventi 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;
- > filler, con dimensioni $< 0,063$ mm, è una frazione molto importante del conglomerato bituminoso in quanto, insieme al bitume, andrà a creare il mastice.

Tutti gli aggregati devono essere descritti mediante la designazione d/D, che ci dice il diametro minimo (d) e massimo (D) tra cui è compresa la frazione granulometrica. Dalla dimensione massima dipendono alcune proprietà delle miscele: se D è troppo piccolo le miscele rischiano di essere poco durevoli, mentre se D è troppo grande esse tendono a

essere poco lavorabili (difficili da compattare). Per questo normalmente si richiede $D < s/3$, dove s rappresenta lo spessore dello strato. Sempre per quanto riguarda la granulometria degli aggregati, uno strumento di fondamentale importanza che ci aiuta a definire la giusta composizione tra le diverse grandezze dei materiali lapidei è la curva granulometrica. Essa definisce la percentuale di materiale passante corrispondente alle dimensioni di ciascun setaccio. La curva granulometrica che verrà riportata in seguito viene fatta ricadere all'interno dei fusi che definiscono la regione all'interno della quale la curva deve essere contenuta affinché il materiale risulti idoneo. A seconda dello strato previsto si avranno diversi fusi poiché ogni strato è costituito da inerti aventi caratteristiche e pezzature differenti. Dunque la curva granulometrica non dovrà trovarsi al di sopra del fuso, altrimenti la quantità di aggregati fini sarà eccessiva, ma non dovrà neanche trovarsi al di sotto di esso poiché sarebbe troppo alta la percentuale di aggregati grossi.

Il legante bituminoso è un composto organico eterogeneo derivato dal processo di distillazione del greggio di petrolio. Esso ha la funzione di conferire alla miscela granulare la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e di flessione dovute ai carichi superficiali indotti dal rotolamento degli pneumatici (carico veicolare).

I leganti bituminosi vengono classificati principalmente in:

- > Bitume tradizionale, dato dalla sommatoria di tre elementi: asfalteni, oli e resine. Gli asfalteni sono delle polveri che danno corpo e colore al bitume; gli oli (saturi e aromatici) fungono da agenti flocculanti nei confronti degli asfalteni; e 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 può essere modificato in due modi: aggiungendo agenti modificanti (additivi o composti chimici) al bitume tradizionale oppure unirli direttamente all'atto di produzione del conglomerato bituminoso.

Il bitume modificato è in grado di fornire prestazioni migliori, andando a influenzare le caratteristiche fisiche e/o meccaniche del materiale sia alle alte che alle basse temperature. A seconda del quantitativo di additivo utilizzato, viene suddiviso in tre classi: il tipo "hard" contiene al suo interno un quantitativo tra il 3 e il 5% rispetto al peso del solo bitume, maggiore rispetto alle modifiche "medium" (2-3%) e "soft" (1-2%).

3.1 Conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato

Il conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato, identificato nel seguito con M, è stato prodotto dall'impianto Amplia Infrastructures S.p.A. (Gruppo ASPI) sito a Magliano Sabina (RI). Si tratta di un conglomerato impiegato per strati di collegamento e base

autostradali [10]. La Figura 3.1_1 indica la granulometria della miscela, composta per il 70% da aggregati calcarei vergini e per il 30% da fresato indistinto 0/14, con dimensione massima dell'aggregato pari a 31.5 mm. Nello specifico possiamo notare una percentuale del 25% di sabbia con dimensione 0/4, alla quale si aggiunge il 45% tra pietrischetto e pietrisco della dimensione relativamente pari a 6.3/16 e 16/22.4, per un totale del 70%.

Studio granulometrico										Data : <u>21/09/2021</u>		
Inerte	Cava 4P	Cava 4P	Marocca				Granulato		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/cm³ (MVA inerti)	2,488	2,579	2,769				2,667			2,637	Gse mix	

Figura 3.1_1 Granulometria conglomerato bituminoso caldo

Nella Figura 3.1_2 invece possiamo vedere la curva granulometrica ottenuta tramite la setacciatura e quindi lo studio della granulometria precedentemente mostrata

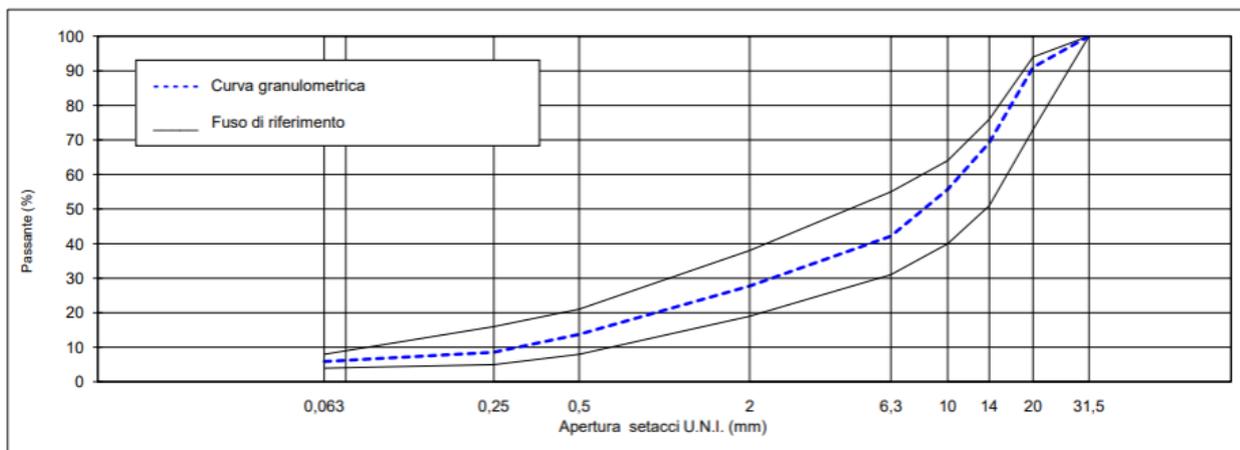


Figura 3.1_2 Curva granulometrica conglomerato bituminoso caldo

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 [11] e successiva setacciatura dell'aggregato ottenuto [12]. La massa volumica massima della miscela è di 2.514 g/cm³.

La temperatura di compattazione è di 160 °C.

Il contenuto di vuoti di progetto calcolati con la densità geometrica [13], desunto tramite la compattazione di tre provini cilindrici di diametro 150 mm con pressa giratoria a taglio [14] a numero di giri imposti pari a N_{design} (120 giri), è del 4.0%. Di seguito, in Figura 3.1_3, si riportano i risultati precedentemente descritti:

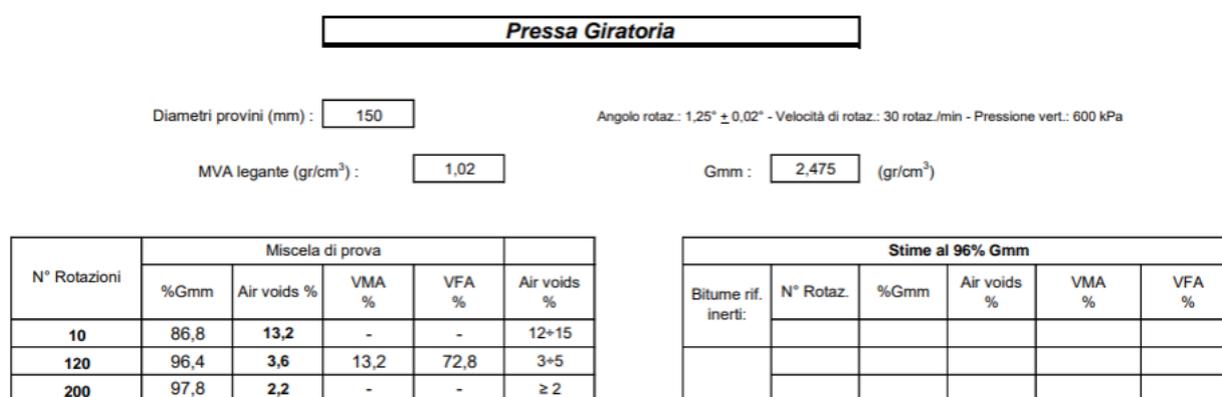


Figura 3.1_3 Prove su bitume modificato per conglomerato bituminoso caldo

3.2 Conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato

Per quanto riguarda il conglomerato bituminoso tiepido utilizzato per produrre lo strato superiore dei nostri provini, come detto in precedenza, esso ha l'obiettivo di riprodurre il nuovo strato di usura che si andrà a posare in sito in fase di manutenzione dei tratti stradali interessati. A questo proposito è molto importante che sia la superficie subito a contatto con il traffico veicolare, sia l'interfaccia tra il nuovo e il vecchio strato rispettino i limiti di legge previsti dalle norme tecniche. Tramite il conglomerato bituminoso tiepido riusciamo ad abbassare in maniera sostanziale non solo la temperatura di miscelazione e posa in opera del materiale bensì anche la temperatura di riscaldamento degli aggregati vergini.

Per quanto riguarda questi ultimi, la loro granulometria è stata imitata quella dello strato precedente, mantenendo quindi:

- > 25% di fino 0/4, per un peso totale di 6.75 kg
- > 45% di materiale più grossolano 6.3/22.4, per un peso di 3.77 kg di pietrischetto (6.3/16) e 6.73 kg di pietrisco (16/22.4)
- > 30% di materiale di recupero per un peso di 8.08 kg

Con questi quantitativi è stato possibile raggiungere un peso totale di 26.9 kg di aggregati con il quale è stato possibile realizzare un impasto per tre piastre di prova (solo strato superiore). Per la metodologia usata per produrre le piastre si rimanda al capitolo successivo.

Infine l'ultimo ingrediente è il bitume, nello specifico il bitume di estrazione dell'asfalto riciclato è pari all'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 741 g.

Come detto in precedenza, per non modificare la prestazione del bitume anche alle basse temperature che caratterizzano il conglomerato bituminoso tiepido, è stato aggiunto dell'additivo attivante di adesione come risultato di una miscela di 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.

I benefici di questo additivo sono:

- > consente di abbassare le temperature di produzione, stesa e compattazione del conglomerato bituminoso (WMA –Warm Mix Asphalt), permettendo un importante risparmio energetico e una notevole riduzione delle emissioni atmosferiche;
- > fornisce un consistente contributo in qualità di attivante d'adesione.
- > Inoltre, nelle produzioni a caldo, migliora e mantiene la lavorabilità del conglomerato bituminoso anche in presenza di basse temperature esterne (inferiori a 5°C) e per trasporti su lunghe distanze.

Per quanto riguarda il dosaggio, solitamente è del 0,2 - 0,5% sul peso del bitume, in funzione delle condizioni operative (temperature, tipo di miscela da produrre, etc) ma è sempre consigliabile determinare la percentuale ottimale tramite test di laboratorio, in quanto potrebbe discostarsi dai range indicati.

Le proprietà dell'additivo utilizzato sono riportate in Figura 3.2_ 1

<i>PROPRIETÀ</i>	
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 3.2_ 1 Proprietà dell'additivo

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:

- > 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.
- > 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 additivo previsto e mescolare per alcuni secondi fino alla completa dispersione dell'additivo.
- > Inserire il quantitativo di legante previsto e miscelare 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:

- > 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.
- > Utilizzare la curva granulometrica relativa alla pavimentazione da realizzare.
- > Riscaldare gli aggregati e introdurli nel mescolatore.
- > Aggiungere nel legante da utilizzare il quantitativo di additivo previsto da prequalifica.
- > Inserire il quantitativo di legante previsto da prequalifica e miscelare fino al completo ricoprimento degli aggregati.
- > Inserire infine il filler e miscelare 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 due geocompositi commerciali, denominati A e B. Entrambi i geocompositi sono classificati come membrane auto-termo-adesive per impermeabilizzazione, rafforzamento e ripartizione di carichi su sottofondi in conglomerato bituminoso. Entrambi, forniti in rotoli di lunghezza pari a 10÷15 m e larghezza 1 m, sono

composti da un compound bituminoso di polimeri SBS con spessore di 2.5 mm in cui è annegata l'armatura centrale, costituita da fibre di vetro. La parte inferiore è realizzata con un film adesivo per far sì che si venga a creare il giusto effetto di aderenza tra il geocomposito stesso e lo strato di conglomerato bituminoso caldo di base; la parte superiore è invece spolverata di materiale fino (Figura 3.4_1) per far sì che al passaggio del rullo compattatore in sito non venga strappato via il materiale a causa del calore del mezzo. La differenza quindi tra i due geocompositi consiste nella trama del rinforzo:

- > il geocomposito A presenta una maglia con fibre direzionali che insieme formano una rete a maglia quadrata di circa 3÷5 mm di lato
- > il geocomposito B presenta un tessuto con fibre adirezionali e punti di agugliatura per permettere che il sistema non trasli sotto le forze di taglio.

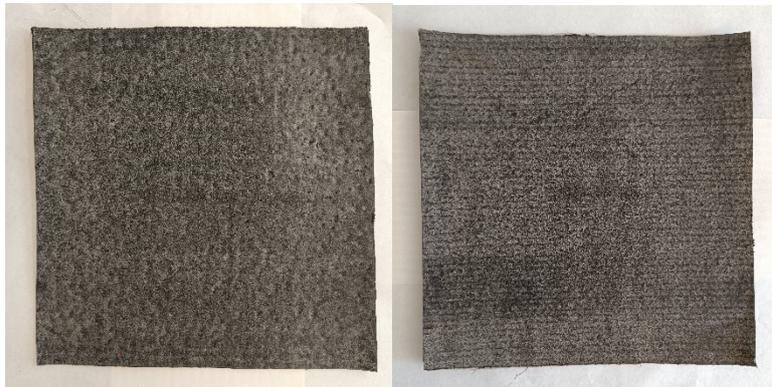


Figura 3.4_1 Superficie superiore del geocomposito A (sinistra) e B (destra)

Capitolo 4. Indagine sperimentale e protocolli di prova

In questo capitolo andremo ad analizzare, passo dopo passo, quali sono stati gli step prima della produzione dei provini e poi di prova a taglio e a flessione di questi ultimi.

4.1 Confezionamento dei provini

Partiamo dal presupposto che l'obiettivo di questa sperimentazione è stato testare i due geocompositi A e B alle prove di taglio e di flessione relativamente all'interfaccia venutosi a creare tra due strati formati a diverse temperature. E' proprio riguardo alle temperature la prima premessa da fare per avere chiaro l'iter di produzione dei provini, nello specifico sono state testate 3 diverse temperature di conglomerato bituminoso tiepido e un'unica temperatura di conglomerato bituminoso a caldo usata come riferimento per permettere il confronto tra i risultati delle diverse configurazioni. Vediamo la differenziazione tra di esse nella Tabella 4.1_1 configurazione delle temperature impiegate Tabella 4.1_1:

CONFIGURAZIONE	120°C	130°C	140°C	160°C
T aggregati vergini	140°C	150°C	160°C	-
T asfalto riciclato	t. amb.	t. amb.	t. amb.	-
T bitume	170°C	170°C	170°C	-
T miscelazione	130°C	140°C	150°C	-
T compattazione	120°C	130°C	140°C	160°C

Tabella 4.1_1 configurazione delle temperature impiegate

Naturalmente la tabella precedente riguarda gli strati superiori di ciascun provino mentre per gli strati inferiori è stato utilizzato conglomerato bituminoso già confezionato riscaldato a 160°C per almeno 3 ore.

4.1.1 Miscelazione

Questa fase consiste nella preparazione del materiale atto a riprodurre i due strati delle lastre considerando che lo stato di base, per tutti i tipi di piastre, è stato confezionato allo stesso modo e cioè posando nel cassero del conglomerato bituminoso prodotto in impianto e riscaldato a 160°C per 3 ore.

Tenendo in considerazione che le temperature citate da ora in poi fanno riferimento alla sola configurazione di 120°C a titolo di esempio, vediamo gli step seguiti per la miscelazione:

- > Peso degli aggregati seguendo la curva granulometrica precedentemente mostrata
- > Riscaldamento degli aggregati vergini per almeno 3 ore alla temperatura di 140°C

- > Riscaldamento del bitume a 170°C per 2.5 ore e peso di quest'ultimo aggiungendo 100÷150 g rispetto al peso di progetto per ovviare alla porzione di legante che resta attaccato alle pareti del barattolo
- > Inserimento di aggregati caldi e asfalto riciclato a temperatura ambiente all'interno della miscelatrice (Figura 4.1.1_1)



Figura 4.1.1_1 Inserimento aggregati

- > Programma 1 di miscelazione a 140°C per un totale di 30 secondi (si precisa che nella fase iniziale si aumenta di 10°C l'effettiva temperatura di miscelazione per ovviare allo sbalzo termico che gli aggregati subiscono all'apertura della miscelatrice per l'inserimento del bitume) – (Figura 4.1.1_2)



Figura 4.1.1_2 Prima miscelazione dei soli aggregati

- > In attesa dei 30 secondi di miscelazione, in base al peso effettivo del bitume se ne calcola lo 0.55% e il risultato corrisponderà al peso di additivo da aggiungere al legante (Figura 4.1.1_3)



Figura 4.1.1_3 Aggiunta dell'additivo al legante e miscelazione del composto unito

- > Miscelazione rapida di bitume e additivo uniti e inserimento del composto all'interno della miscelatrice con il resto degli aggregati alla fine dei 30 secondi (Figura 4.1.1_4)



Figura 4.1.1_4 Aggiunta del bitume modificato

- > Programma 2 di miscelazione a 130°C (temperatura effettiva di miscelazione) per un tempo totale di 120+180 secondi

- > Miscelazione manuale finale per evitare che gli aggregati più grossi si concentrino verso l'alto e per far sì che avvenga il completo ricoprimento degli aggregati da parte del legante (Figura 4.1.1_5)



Figura 4.1.1_5 Conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato

- > Peso del materiale considerando di ricavare tre porzioni di materiale da 8981 g ciascuno
- > Riscaldamento del composto finale alla temperatura di compattazione, quindi 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 come in Figura 4.1.2_1 Roller compactor) in accordo con la normativa UNI EN 12679-33 [15]. 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 ricurvo, azionato da un sistema motorizzato ad aria compressa.

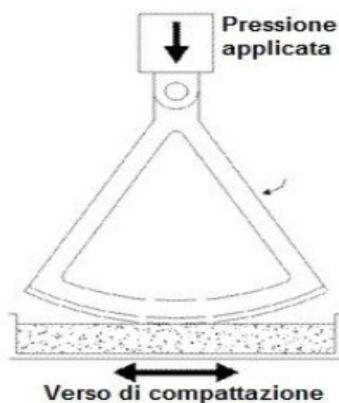


Figura 4.1.2_1 Roller compactor

La compattazione avviene mediante la possibilità di regolare 4 pressioni, settabili attraverso 4 manometri presenti nel pannello di controllo, e la scelta del numero di passaggi del rullo per ogni livello di pressione applicata. È possibile, inoltre, produrre piastre di altezza compresa tra 40 e 100 mm, impostabile tramite una guida posta nella parte posteriore dell'apparecchiatura. Nel nostro caso specifico è stato scelto di adottare 2 pressioni, una prima pressione di 1 bar per un numero di 5 passaggi e una pressione di 2 bar per 20 passaggi; per quanto riguarda gli strati, per il primo strato la compattazione è avvenuta ad un'altezza di 40 mm e il secondo strato ad un'altezza di 80 mm

Il Roller Compactor permette di realizzare piastre di dimensioni pari a 305x305 mm² (Figura 4.1.2_2 Dimensione e riscaldamento casseri). Tali dimensioni sono obbligate a causa dell'uso di un cassero d'acciaio che è formato da quattro elementi laterali di altezza pari a 10 cm, avvitati tra loro, a loro volta da avvitare ad una piastra di base. Si tiene a precisare che per far sì che il sistema sia più possibile simile alle condizioni di cantiere, insieme al conglomerato bituminoso di ciascuno strato di base (inferiore), il cassero è stato riscaldato alla stessa temperatura, ovvero a 160°C.



Figura 4.1.2_2 Dimensione e riscaldamento casseri

Per procedere al confezionamento dei sistemi bistrato, è stato preliminarmente necessario determinare l'esatto quantitativo di materiale da utilizzare per realizzare ciascuno strato della piastra. Essendo fisse le dimensioni in larghezza e lunghezza del cassero delle piastre

(305x305 mm²), tale conteggio deve essere predisposto in funzione dello spessore e del tenore di vuoti con cui si vuole realizzare ogni strato. Il caso in esame ha previsto la preparazione di piastre con strati di medesimo spessore pari a 4 cm e un contenuto di vuoti variabile a seconda del conglomerato bituminoso impiegato. 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 [11]. Una volta determinati il volume di ogni strato della piastra da realizzare, il contenuto di vuoti e le masse volumiche, si è proceduto al calcolo del quantitativo di materiale da compattare tramite Roller Compactor con l'equazione seguente.

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

in cui V è il volume dello strato, pari a $30.5 \cdot 30.5 \cdot 4 \text{ cm}^3$, G_{max} è la massa volumica massima delle miscele in g/cm^3 e $AV_{N_{des}}$ è il contenuto di vuoti di progetto in %.

Nel nostro specifico caso, per il conglomerato bituminoso caldo con bitume modificato, così come per il conglomerato bituminoso tiepido, si ha che la percentuale di vuoti è al 4% e la massa volumica massima del 2.514 g/cm^3 si ottiene una massa di 8981 g per strato.

La procedura di confezionamento delle piastre bistrato si articola nelle seguenti tre fasi operative: compattazione dello strato inferiore in conglomerato bituminoso caldo, preparazione dell'interfaccia con geocomposito e compattazione dello strato superiore in conglomerato bituminoso tiepido. Vediamo quindi di seguito queste 3 fasi:

Fase 1 - Compattazione dello strato inferiore in conglomerato bituminoso

Per la realizzazione dello strato inferiore occorre riscaldare un quantitativo di materiale tale da raggiungere, in corrispondenza dell'altezza finale impostata per lo strato, la percentuale di vuoti desiderata (funzione dell'altezza dello strato e della massa volumica del materiale).

Poiché i conglomerati bituminosi a caldo sono stati forniti in sacchi di circa 14 kg l'uno, è stato necessario procedere in due fasi. Preliminarmente, il materiale è stato scaldato per tre ore in forno alla temperatura di compattazione (160 °C nel caso di conglomerato bituminoso modificato) ed è stato steso al di sopra di piastre di acciaio per permetterne il raffreddamento. In seguito, il quantitativo necessario per la produzione di una piastra è stato nuovamente scaldato per tre ore alla temperatura di compattazione e successivamente compattato. Tale procedura ha causato una maggiore ossidazione del conglomerato rispetto a quella che si avrebbe in sito. Tuttavia, essa è stata applicata a tutte le piastre seguendo una procedura standardizzata, facendo sì che tutti i risultati fossero perfettamente confrontabili tra loro.

Trascorso il tempo di riscaldamento, il materiale viene riversato nel cassero (Figura 4.1.2_3) anch'esso caldo, precedentemente assemblato. Si procede, quindi, alla compattazione mediante il compattatore a rullo dopo aver impostato l'altezza finale desiderata dello strato da compattare pari a 40 mm. Nel presente studio, come accennato in precedenza, è stata adottata una procedura di compattazione che ha previsto l'applicazione di 5 passaggi ad una pressione di 1 bar (necessari ad un livellamento preliminare del materiale), seguiti da



Figura 4.1.2_3 Posa in opera primo strato

20 passaggi ad una pressione pari a 2 bar, simulanti il costipamento in sito ad opera dei rulli compattatori. A fine compattazione, viene verificato che l'altezza della piastra bistrato sia effettivamente 40 mm.

Un passaggio fondamentale è quello di segnare la direzione di compattazione in quanto essa sarà fondamentale sia nelle seguenti fasi che nella definizione dei provini che infine nella collocazione di questi per le prove di taglio e flessione (Figura 4.1.2_4)



Figura 4.1.2_4 Direzione di compattazione e numerazione lastre

Fase 2 - Preparazione dell'interfaccia con geocomposito o con mano d'attacco

Nel caso di piastre non rinforzate, tra i due strati viene stesa l'emulsione bituminosa. Data l'area della superficie di stesa della piastra, la quantità di emulsione necessaria è calcolata in base alla percentuale di bitume residuo che caratterizza le emulsioni. Nel caso di piastre rinforzate invece, tra i due strati va incollato il geocomposito (Figura 4.1.2_5) facendo in

modo che la direzione di srotolamento del rotolo di quest'ultimo, che imita lo srotolamento in cantiere, sia la stessa di quella di compattazione. In sostanza si srotola il geocomposito, se ne segna la direzione e si tagliano fogli di grandezza $29.5 \times 29.5 \text{ cm}^2$ in maniera tale che, il successivo scioglimento dei film di bitume sui bordi del cassero non vada ad intaccare l'altezza finale dei provini. L'operazione di incollaggio del geocomposito va effettuata una

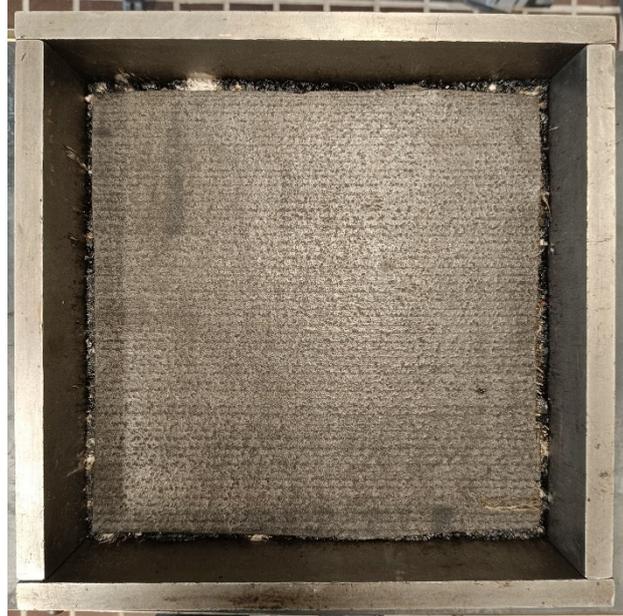


Figura 4.1.2_5 Incollaggio geocomposito

volta che lo strato inferiore è completamente freddo, nel nostro caso sono state attese 3 ore dalla compattazione, e in maniera tale che non si vengano a creare bolle d'aria tra esso e lo strato inferiore (in cantiere sul geocomposito viene fatto un ulteriore passaggio con rullo metallico).

Fase 3 - Compattazione dello strato superiore in conglomerato bituminoso

Infine, al di sopra dell'interfaccia viene versato il conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato (Figura 4.1.2_6) descritto nel capitolo precedente. Quest'ultimo, dopo essere prodotto, viene mantenuto alla temperatura di compattazione per un'ora, a seguito della quale viene versato al di sopra dell'interfaccia facendo attenzione ad aggiungere il collare al cassero per evitare che, durante il versamento, parte del materiale fuoriesca da esso. Settata l'altezza finale da raggiungere dell'intero bistrato nel Roller Compactor pari a 80 mm (somma delle altezze del primo e secondo strato: 40 mm + 40 mm), si avvia nuovamente la compattazione con l'accorgimento di eseguirla nella stessa direzione di azione del rullo già adottata per lo strato inferiore (al fine di simulare scrupolosamente le procedure seguite in sito). Viene verificato che l'altezza della piastra bistrato sia effettivamente 80 mm.

Al fine di individuare univocamente la direzione di compattazione, la superficie superiore delle piastre è stata contrassegnata con righe in vernice bianca parallele alla direzione di

rullaggio, dettaglio particolarmente importante sia per la valutazione della resistenza a taglio che per la valutazione della resistenza flessionale.

Lo scassero del sistema bistrato così preparato avviene il giorno successivo alla compattazione per dar modo al materiale di raffreddarsi completamente e assumere consistenza.



Figura 4.1.2_6 Posa dello strato superiore

4.1.3 Nomenclatura, carotaggio e taglio dei provini

Per ogni temperatura sono state realizzate 3 piastre dalle quali si sono ricavati 2 provini prismatici e 8 provini cilindrici da cui si deduce un totale di 3 piastre per 4 temperature, 12 piastre. Le stesse ripetizioni sono state fatte sia per geocomposito A che B per un totale di 24 piastre.

I provini poi sono stati utilizzati per effettuare prove a flessione 3PB (prismatici) e prove di taglio Astra e Leutner (cilindrici). Nella Tabella 4.1.3_1 sono state riportate il numero di piastre e le ripetizioni effettuate per ciascuna temperatura e tipo di prova

TEMPERATURA	120°C	130°C	140°C	160°C
Numero piastre	3	3	3	3
Numero ripetizioni Leutner	4	4	4	4
Numero ripetizioni ASTRA	4	4	4	4
Numero ripetizioni 3PB	4	2	2	2

Tabella 4.1.3_1 Numero lastre e ripetizioni

I provini per le prove Leutner, così come per l'ASTRA, hanno forme cilindrica, come detto in precedenza, di altezza 8 cm e diametro 10 cm; provini per le prove 3PB hanno lunghezza 30.5 cm, profondità 10 cm e altezza 8 cm. Infine, per quanto riguarda la nomenclatura, ciascun provino è stato denominato nel seguente modo:

- > Lettera A o B in base al geocomposito utilizzato
- > Numero relativo alla configurazione adottata per la temperatura di compattazione
- > Numero progressivo da 1 in poi per provini prismatici
- > Lettera A per ASTRA accompagnata dal numero progressivo o lettera L per Leutner accompagnata da numero progressivo

Inoltre, per una maggiore completezza, per quanto riguarda i provini cilindrici, da una piastra sono state prese due ASTRA e due Leutner per far sì che i provini risentissero il meno possibile dell'influenza dell'errore umano. Si mostra di seguito in Figura 4.1.3_1 il metodo di scelta dei campioni e la relativa nomenclatura riguardante, a titolo di esempio, il geocomposito A con temperatura di 120°C di compattazione

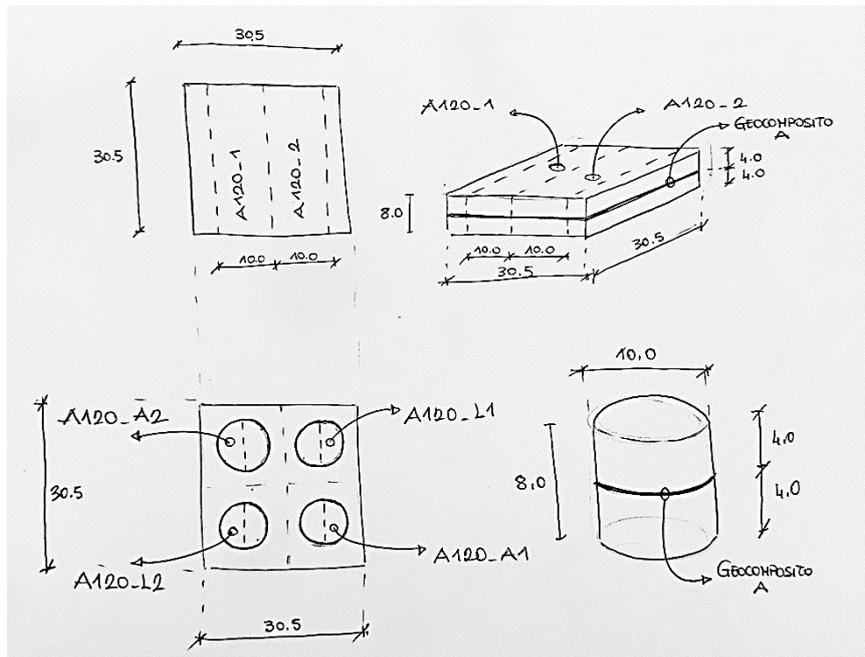


Figura 4.1.3_1 Dimensioni e metodo di nomenclatura provini

Si mostrano inoltre alcune foto fatte in laboratorio delle piastre sia prima che dopo il taglio/carotaggio:



Figura 4.1.3 2 Lastre prima del taglio e provini prismatici per 3PB



Figura 4.1.3_3 Provini cilindrici per prove ASTRA e Leutner

4.2 Metodi di prova

Di seguito vengono riportati i metodi di prova eseguiti sui provini con la relativa descrizione delle apparecchiature utilizzate e breve accenno ai limiti di legge previsti sui risultati ottenuti dalle prove.

4.2.1 Prova Leutner

La prova Leutner è una prova di taglio diretto impiegata per la determinazione delle proprietà dell'interfaccia nei sistemi multistrato. È stata ideata e messa a punto da R. Leutner nel 1979 ed è stata recentemente regolata dalla norma UNI EN 12697-48 [16].

Lo schema di funzionamento dell'apparecchiatura Leutner è illustrato in Figura 4.2.1 1 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** La struttura di base è collegata a una pressa che avanza verso l'alto, mentre la struttura superiore è posizionata in contrasto con il telaio di carico. Il gap che deve essere garantito tra gli anelli di taglio, superiore e inferiore, deve essere pari al massimo a 5 mm. L'apparecchiatura Leutner permette di testare provini

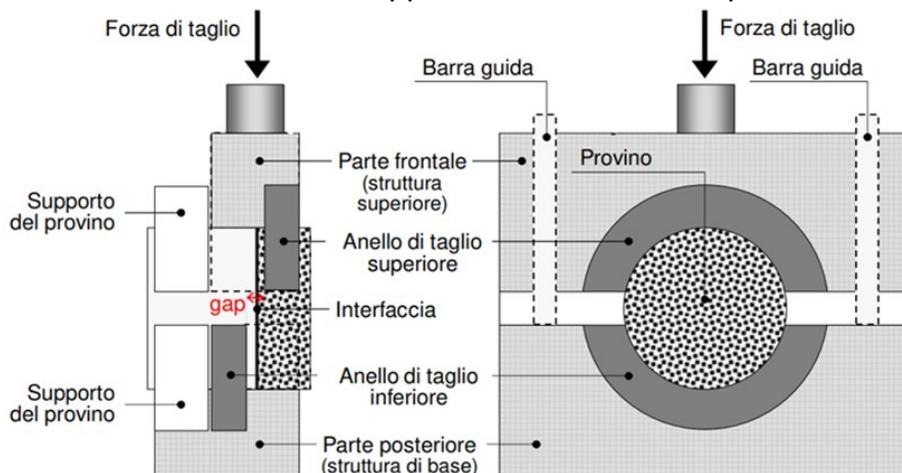


Figura 4.2.1 1 Descrizione apparecchiatura

bistrato di diametro pari a 150 ± 2 mm oppure 100 ± 2 mm. Nel presente studio, come prescritto dalle NTC, è stata adottata la geometria con diametro pari 100 mm.

Il provino da sottoporre alla prova deve essere posizionato all'interno dell'apparecchiatura Leutner in modo tale che la direzione di compattazione del provino sia parallela a quella dello sforzo di taglio applicato, così da simulare le tensioni tangenziali trasmesse in sito dai carichi veicolari come mostrato in Figura 4.2.1_2. La procedura di prova consiste nell'applicare una velocità di spostamento all'interfaccia pari a 50 ± 2 mm/min, in assenza di sforzo normale.

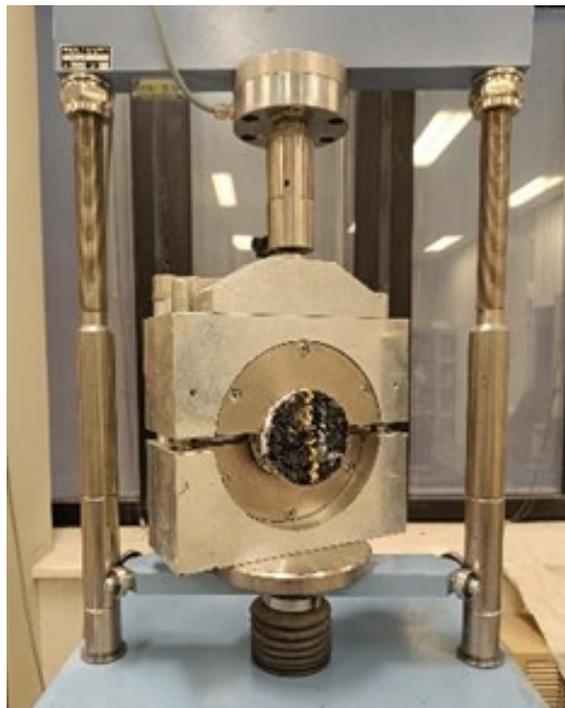


Figura 4.2.1_2 Posizionamento provino

La prova può essere, in modo schematico, divisa in due fasi:

- > prima fase: avvicinamento della cella di taglio al pistone superiore. In questa fase il carico risulterà pari a zero kN mentre corsa e deformazione saranno > 0 ;
- > seconda fase: inizio della prova vera e propria. In questa fase vengono misurati i valori del carico applicato, dello spostamento del macchinario (corsa) e della deformazione risentita dal provino.

Il protocollo di prova può essere riassunto nei seguenti stadi:

- > Per prima cosa si collocano i campioni in una camera climatica a temperatura di condizionamento controllata di $20 \pm 1^\circ$ C per un tempo minimo di 4 ore.

- > Si selezionano gli anelli di taglio appropriati e si fissano al telaio di prova. Nello specifico essi devono avere lo stesso raggio o leggermente maggiore ($\leq +2$ mm) del campione sottoposto alla prova.
- > Si avvia software di acquisizione dati (carico e deformazione) UTM II, da cui si ricaveranno i risultati della prova.
- > Una volta aperto il software, comparirà una finestra in cui si inseriscono le dimensioni del provino da testare, il tipo di provino, e il numero del test.
- > Si posiziona il campione nell'apparecchiatura di prova, in modo che l'interfaccia sia allineata tra l'anello di sicurezza superiore e quello inferiore e con la freccia, indicante il verso di compattazione, verticale.
- > Si posiziona l'adattatore tra il campione e l'anello di taglio superiore.
- > Si stringe la vite del supporto del campione fino al serraggio dello stesso.
- > Si tara il sistema in modo da azzerare i valori sia della deformazione che della corsa per facilitare il monitoraggio del trasduttore.
- > Si avvia la prova con la velocità di carico di 50 mm/min (la velocità del piatto inferiore con direzione verso l'alto viene impostata tramite il software).
- > Durante la prova si registrano il carico massimo F (kN) e la deformazione δ (mm) ad esso associata così come si mostra in Figura 4.2.1_3

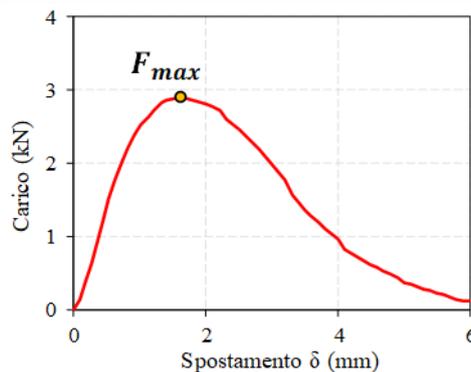


Figura 4.2.1_3 Esempio curva di carico

- > Una volta smontato il provino, si osserva lo stato dell'interfaccia nel caso di completa separazione degli strati, per l'individuazione di eventuali crepe o aspetto insolito (es. aggregati schiacciati sui bordi), che potrebbero indicare un disallineamento del campione nel piano di taglio (e di conseguenza i valori di picco registrati potrebbero non essere effettivamente rappresentativi della resistenza a taglio dell'interfaccia, ma potrebbero essere dovuti alla resistenza offerta dal sistema di conglomerato bituminoso).

Questo procedimento viene seguito per ogni provino da testare e per ciascuno di essi l'apparecchiatura restituisce, come precedentemente detto, un file dati in cui vengono riportati, per ogni intervallo di misurazione effettuato, la forza di taglio e la deformazione. I risultati ottenuti vengono poi elaborati e si ricavano una serie di informazioni riportate nel capitolo successivo.

Dividendo la forza di taglio massima F_{MAX} [N] per l'area nominale di contatto all'interfaccia,

si ottiene lo sforzo di taglio massimo τ_{SBT} [MPa], che corrisponde alla resistenza a taglio dell'interfaccia:

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

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

Le NTC richiedono un valore minimo di τ_{SBT} pari a 0.70 MPa, determinato alle condizioni sopradescritte (20 °C, velocità 50 mm/min) per la prequalifica di geocompositi su provini compattati in laboratorio.

La prova permette inoltre di fare considerazioni in merito all'interfaccia caratterizzata dalla minore resistenza allo scorrimento. La superficie di rottura a taglio può infatti localizzarsi tra conglomerato bituminoso superiore/inferiore e geocomposito o all'interno del geocomposito stesso (i.e. tessuto non tessuto e rinforzo).

4.2.2 Prova ASTRA

La prova ASTRA (Ancona Shear Testing Research and Analysis) è una prova di taglio diretto utilizzata per valutare le prestazioni delle interfacce nei sistemi bituminosi multistrato, in conformità alla norma UNI EN 12697-48 [16].

Grazie alla presenza della camera climatica all'interno della quale è contenuta la strumentazione è possibile variare la temperatura e l'umidità. Oltre a queste variabili è possibile modificare ulteriormente la prova applicando o meno un carico normale (riproduzione del carico veicolare) alla scatola di confinamento del provino tramite un sistema di leve. Il principio di funzionamento è sintetizzato in Figura 4.2.2_1, che mostra dettagliatamente tutti gli apparati di cui il macchinario è provvisto

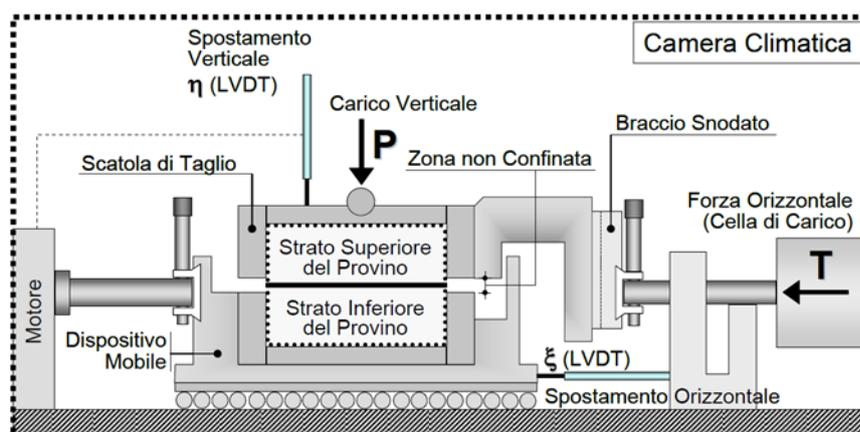


Figura 4.2.2_1 Descrizione apparecchiatura

Il provino, ottenuto a partire da una lastra bistrato con interposizione di un layer di rinforzo è contenuto in due semiscatole, superiore e inferiore, distanziate tra loro in modo da lasciare una zona centrale non confinata, in corrispondenza dell'interfaccia. Per fare in modo che il provino sia posizionato correttamente si possono usare degli spessori costituiti da lamine di altezza variabile aventi la stessa superficie del provino e delle semiscatole che lo contengono.

L'apparecchiatura è nata per testare sia provini prismatici, che cilindrici aventi diametro compreso tra i 95 e i 100 mm. Nell'ultimo caso sono stati ideati due elementi in acciaio, uno per ogni semiscatola, aventi sezione esterna quadrata come la scatola di taglio, e quella interna cilindrica per far alloggiare i provini in seguito al carotaggio come mostrato in Figura 4.2.2_2 dove si possono distinguere tutti i livelli della scatola

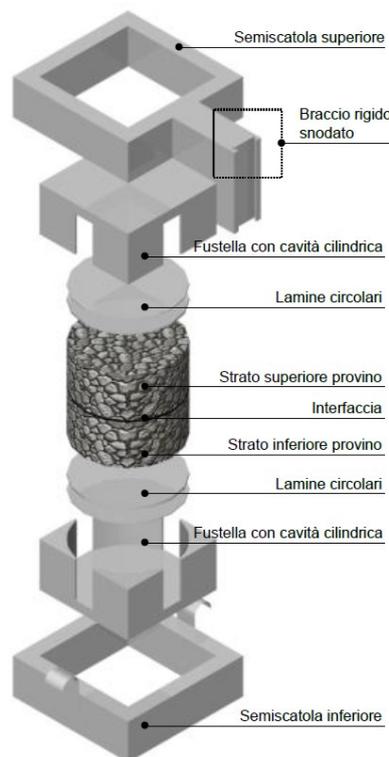


Figura 4.2.2_2 Sistema di confinamento del provino

L'obiettivo della prova è quello di portare a rottura l'interfaccia del provino imponendo uno scorrimento della semiscatola inferiore tramite una velocità di scorrimento costante pari a 2.5 mm/min. ciò è possibile mettendo a contrasto con una cella di carico la scatola superiore tramite la quale è possibile misurare in maniera continua la forza di taglio impressa. Le due semiscatole devono essere sufficientemente lontane e non a contatto tra loro in modo da lasciare il provino libero di rompersi senza imporre alcun piano preferenziale. Come detto in precedenza sulla sommità dell'apparecchiatura inoltre è possibile applicare un carico ortogonale all'interfaccia facendo uso di un sistema di leve e pesi, nel nostro specifico caso è stato applicato un carico di 0.2 MPa che, a seguito di considerazioni fatte sulla geometria del provino, si traduce in 13.1 Kg.

Durante la prova, due trasduttori (LVTD), verticale e orizzontale, consentono di leggere ogni 5 secondi i relativi spostamenti verticali e orizzontali. Infine l'apparecchiatura è connessa a un sistema di acquisizione che consente di registrare i dati durante la prova.

L'esecuzione della prova è articolata in vari step:

- > Adattamento del provino nelle semiscatole. I provini vengono posizionati nelle semiscatole e con l'aiuto degli spessori cilindrici si fa in modo che essi raggiungano il livello desiderato con il corretto posizionamento dell'interfaccia nella zona non confinata.
- > Successivamente il provino inserito nelle semiscatole viene reso solidale ad esse tramite un sistema di viti a scomparsa e poi posizionato nelle guide del dispositivo. E' importante ricordare che la direzione di compattazione del provino deve essere parallela allo sforzo di taglio che si andrà ad applicare esattamente come la prova Leutner.
- > Si applica lo sforzo normale desiderato posizionando per prima cosa una piccola sfera in sommità alla scatola di taglio nel punto centrale, in cui è presente una piccola depressione per favorire la collocazione. Al di sopra di essa viene appoggiato il castelletto, necessario per il trasferimento del carico sul provino, e nella parte inferiore di esso viene agganciata la leva al fulcro. All'estremità opposta, sulla leva, viene posizionato un asse verticale porta pesi, sul quale vengono inseriti tanti pesi di entità diversa fino a raggiungere lo sforzo normale desiderato. La sfera in sommità della scatola contenente il provino ha l'obiettivo di mimare il carico puntiforme e il sistema di leve deve necessariamente avere tutti angoli normali fra loro (questa operazione è coadiuvata dall'uso di una livella)
- > Si avvia il software Spider8_Control e si seleziona Setup-Device, dopo di che File -> Load Setup e tramite il tasto "Tare" si azzerano tutte le letture dei trasduttori. Infine dalla voce File -> Quit si ritorna alla schermata principale.
- > 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 pari a 4-5, aziono il comando di stop.
- > Si seleziona "Exit", e si ripete nuovamente la fase "Setup device" -> "File" -> "Load Setup" -> "Tare".
- > Si posiziona il trasduttore verticale partendo dal posizionamento della sferetta, castelletto, leva, pesi come precedentemente descritto, e dopo aver azzerato col comando "Tare"
- > Si seleziona "Data Logger", e successivamente "XY-Realtime Chart" dove sugli assi possiamo leggere forza di carico per l'asse Y e spostamento orizzontale per asse X.
- > Si aziona il motore per l'avanzamento della scatola di taglio premendo prima la direzione destra e poi il tasto "Start/Stop". L'acquisizione dati viene effettuata con un lasso temporale di 5 secondi (come vedremo nel capitolo successivo di elaborazione

dei dati) e si interrompe quando la curva assume un andamento pressoché orizzontale; solitamente questa fase dura 5 minuti.

- > Una volta terminato questo stadio si preme “Stop”, ed il motore si ferma.
- > L’ultimo step è quello di esportare i dati in un file excel, grazie al comando “Data Export” presente sulla schermata principale, e una volta fatto ciò si può smontare la parte dell’apparecchiatura tramite la quale applico lo sforzo normale e la scatola di contenimento del provino.

Per ciascun provino, la prova ASTRA restituisce un file-dati in cui è riportato il valore della forza di taglio F , in funzione dello spostamento orizzontale δ . Dividendo la forza di taglio massima F_{MAX} [N] per l’area effettiva di contatto all’interfaccia durante la prova A_{eff} , 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} . Si mostrano in Figura 4.2.2_3 sia la curva di carico che una sezione del provino deformato

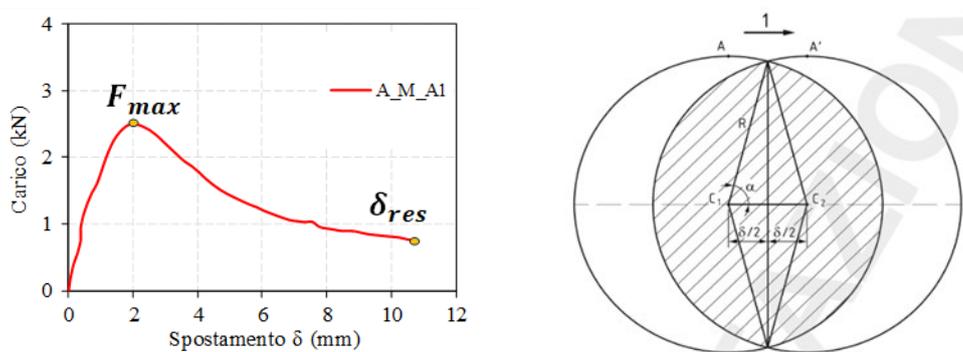


Figura 4.2.2_3 Output di prova e area effettiva di contatto

Le NTC richiedono un valore minimo di τ_{CSBT} pari a 0.40 MPa, determinato alle condizioni sopradescritte (20 °C, velocità 2.5 mm/min, carico verticale 0.2 MPa) per la prequalifica di geocompositi su provini compattati in laboratorio.

La prova permette inoltre di fare considerazioni in merito all’interfaccia caratterizzata dalla minore resistenza allo scorrimento. La superficie di rottura a taglio può infatti localizzarsi tra conglomerato bituminoso superiore/inferiore e geocomposito o all’interno del geocomposito stesso (i.e. tessuto non tessuto e rinforzo).

4.2.3 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. Nel presente studio, sono state applicate le condizioni e le procedure di prova descritte nelle NTC – Allegato 9 [9].

La prova 3PB viene eseguita su provini prismatici di larghezza, lunghezza e altezza nominali standardizzati, preliminarmente condizionati in camera climatica a 20°C per 12 ore. La geometria del provino è quindi data dai seguenti parametri con le relative misure del caso studio in questione:

Si misurano le reali dimensioni dei provini come descritto in Figura 4.2.3_1, quali:

- > H altezza totale del provino, 80 mm
- > h_1 altezza dello strato inferiore, 40 mm
- > h_2 altezza dello strato superiore, 40 mm
- > b_1 larghezza dello strato inferiore, 100 mm
- > b_2 larghezza dello strato superiore, 100 mm
- > profondità del provino 305 mm

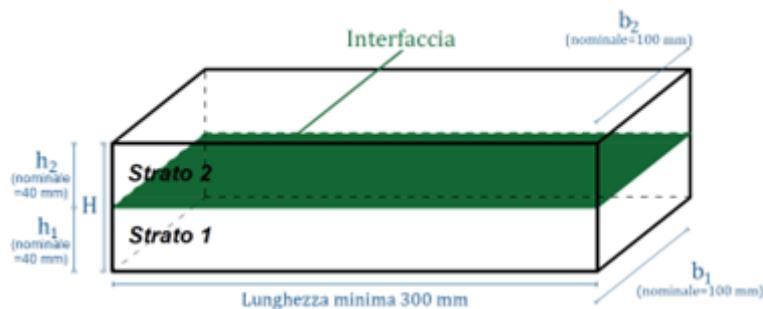


Figura 4.2.3_1 Geometria del provino prismatico

L'attrezzatura per prove 3PB (Figura 4.2.3_2) è composta da una piastra inferiore su cui alloggiavano due cilindri metallici, di lunghezza trasversale 16 cm e diametro 3 cm, posti ad interasse di 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 d in mezzzeria, entrambi registrati dalla cella di carico della pressa, fino a un valore di spostamento verticale pari a 15 mm. Inoltre sono richieste un numero minimo di 2 ripetizioni per ogni sistema indagato quindi 2 provini per ogni temperatura di compattazione.

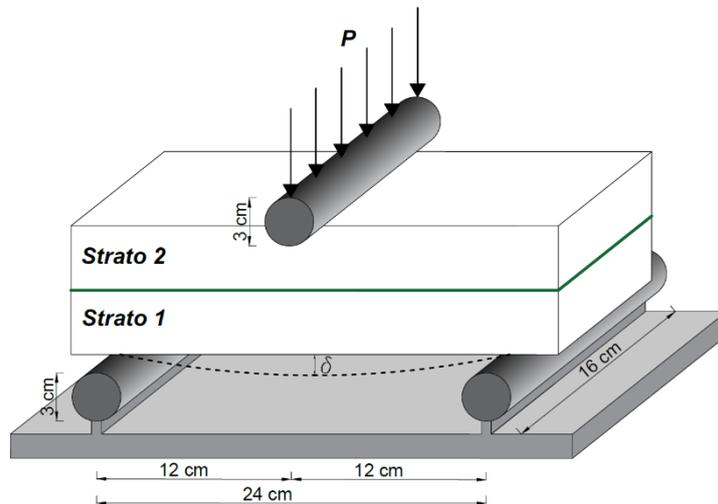


Figura 4.2.3_2 Attrezzatura di prova

Questa prova ci permette di determinare il coefficiente di prestazione del geocomposito basandosi su un'analisi energetica delle curve sperimentali di carico-spostamento del sistema rinforzato (R) e non rinforzato (NR).

La Figura 4.2.3_3 mostra un esempio di curva carico-spostamento, la cui area sottesa rappresenta l'energia totale (E_{tot}) rilasciata dal sistema. Tale energia E_{tot} viene suddivisa in due contributi:

- 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.
- 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 $E_{tot} - E_i$.

L'energia di propagazione viene a sua volta suddivisa in due contributi:

E_1 = energia di propagazione nello *Strato 1* (strato inferiore in conglomerato a caldo).

E_2 = energia di propagazione nello *Strato 2* (strato superiore a conglomerato tiepido).

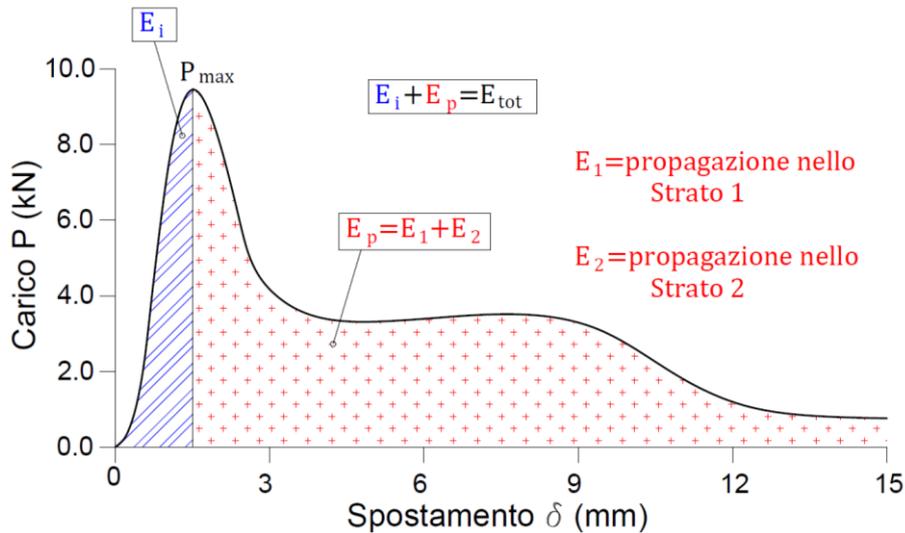


Figura 4.2.3_3 Grafico sforzo-deformazione

Il processo di calcolo per la determinazione del coefficiente di prestazione del geocomposito è suddivisibile in 3 passaggi principali, che sono facilmente eseguibili con un foglio di calcolo Excel.

Passaggio 1 - Analisi energetica sul sistema non rinforzato di riferimento

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

$$E_1^{NR} = E_p^{NR} \times \frac{h_1^{NR}}{H^{NR}} \times \frac{b_1^{NR}}{B^{NR}}$$

$$E_2^{NR} = E_p^{NR} \times \frac{h_2^{NR}}{H^{NR}} \times \frac{b_2^{NR}}{B^{NR}}$$

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

Si assume che il geocomposito non influenzi l'innesco della fessurazione e la sua propagazione nello strato inferiore. Quindi l'energia di propagazione del sistema rinforzato nello *Strato 1* si pone uguale alla corrispondente 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

Si normalizza 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

Poiché la sola energia di propagazione risente effettivamente 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:

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

Valori di k maggiori di 1 indicano che il geocomposito ritarda la propagazione della fessurazione sino alla superficie; allo stesso tempo dalle NTC k deve necessariamente superare 5

Di seguito la Figura 4.2.3_4 mostra uno dei tipi di propagazione della fessura che si sono venuti a verificare in laboratorio durante la fase di prova a flessione dei provini



Figura 4.2.3_4 Fessurazione del provino a seguito della prova a flessione

Capitolo 5. Risultati sperimentali

Di seguito verranno mostrati i risultati delle prove effettuate divise per geocomposito e i relativi iter di elaborazione dei dati ricavati.

5.1 Geocomposito A

Come detto in precedenza, il geocomposito A è caratterizzato da una maglia centrale di rinforzo con fibre direzionali che insieme formano una rete a maglia quadrata di circa 3÷5 mm di lato. Di seguito vediamo le prestazioni di quest'ultimo a taglio e a flessione.

5.1.1 Prove di taglio Leutner

Si riportano in Figura 5.1.1_1 (120°C), Figura 5.1.1_2 (130°C), Figura 5.1.1_3 (140°C), Figura 5.1.1_4 (160°C), i grafici con le curve sperimentali carico-spostamento verticali derivanti dalle prove di taglio Leutner su provini bistrato con conglomerato bituminoso a caldo per lo strato inferiore e tiepido per quello superiore, entrambi con bitume modificato, nello specifico si fa riferimento a tutte le temperature previste dalle diverse configurazioni di compattazione. I corrispettivi valori di resistenza a taglio τ_{SBT} e la media con la relativa deviazione standard sono mostrati al fianco di ciascun grafico carico-spostamento.

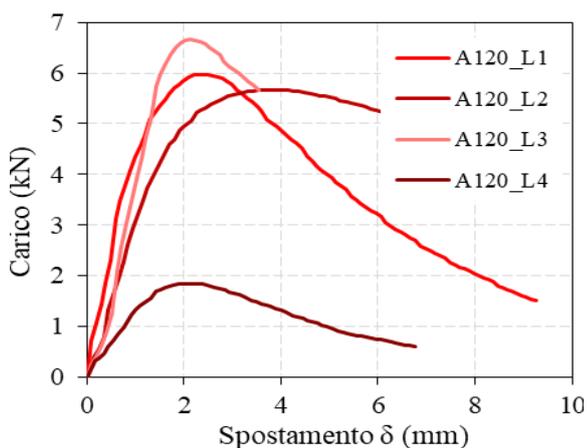


Figura 5.1.1_1 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 120°C

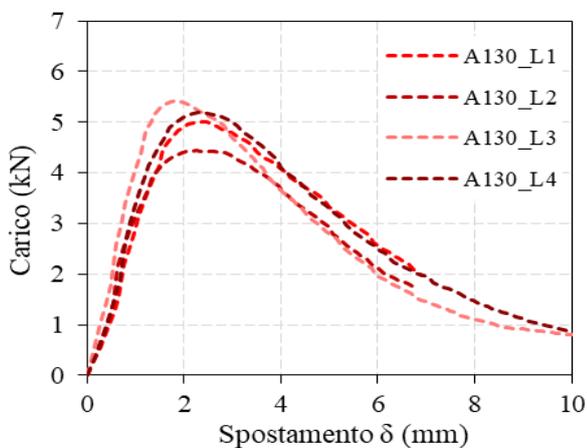
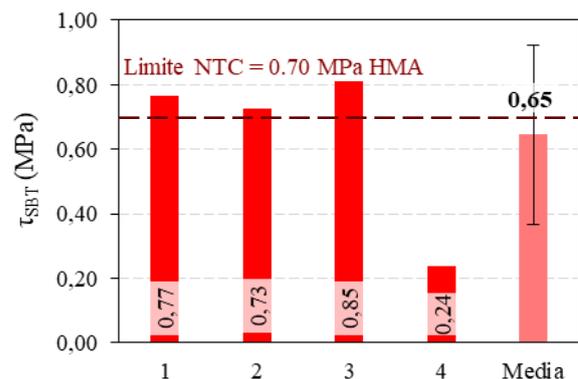
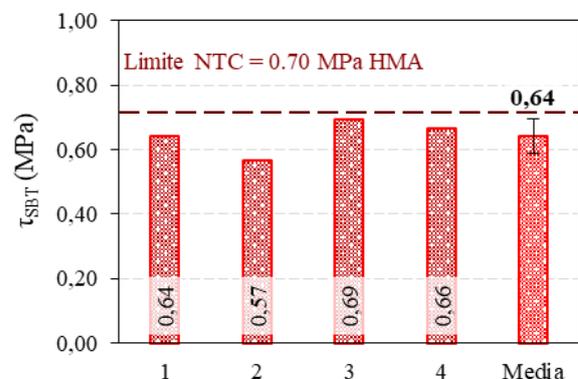


Figura 5.1.1_2 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 130°C



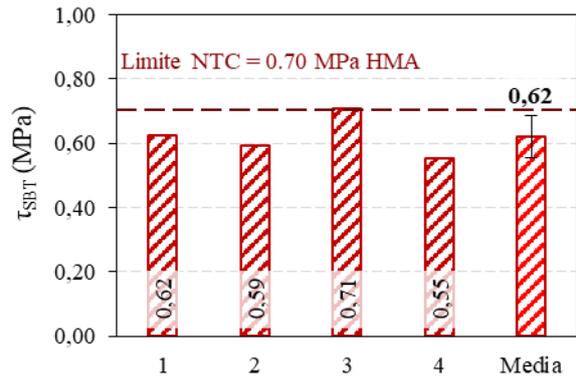
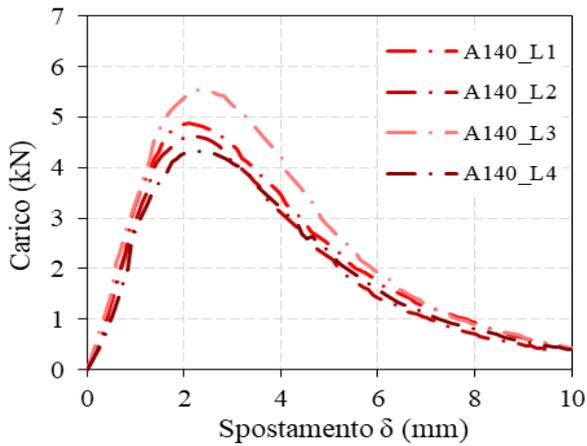


Figura 5.1.1_3 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 140°C

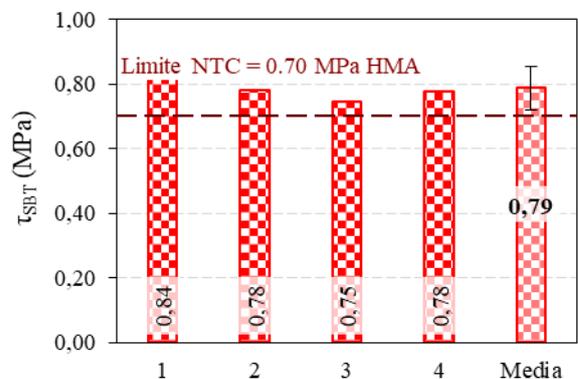
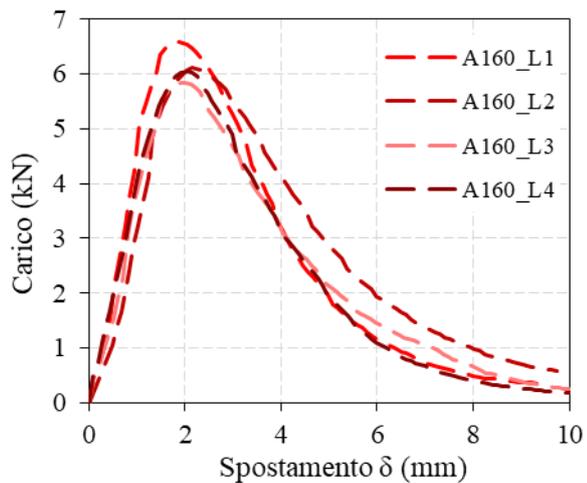


Figura 5.1.1_4 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 160°C

Nella Figura 5.1.1_5 si osserva la tipologia di rottura subita alla temperatura di compattazione di 120°C in modalità simile a tutte le altre temperature.



Figura 5.1.1_5 Rottura provini configurazione 120°C

Si riportano di seguito, a titolo di esempio, i dati del provino A130_L4 che sono stati utilizzati per calcolare la forza di taglio τ_{SBT} .

Date	07-giu-24		Fmax	5,19	(kN)
Specimen	A130_L4		τ_{SBT}	0,66	(MPa)
H	81,0	(mm)	displacement	2,30	(mm)
D	99,7	(mm)	deformation	0	(mm)
v	50,0	(mm/min)	time	2,76	(sec)

Tabella 5.1.1_1 Dati riassunti provino A130_L4

Dalla tabella si deduce che il quarto provino cilindrico per le prove Leutner confezionato con geocomposito A, con strato superiore compattato a 140°C (A130_L4), è stato testato in data 7 giugno 2024. La geometria del provino è data da un'altezza (H) di 81 mm totali (40 mm per lo strato inferiore, 1 mm di geocomposito, 40 mm per lo strato superiore) e diametro (D) di 99.7 mm.

La velocità della prova è pari a 50 millimetri al minuto durante la quale si è registrata una forza di picco Fmax pari a 5.16 kN in corrispondenza di uno spostamento pari a 2.3 mm, il tutto dopo 2.76 secondi dalla fine dell'avvicinamento della testa di carico all'alloggiamento del provino. Da queste informazioni si è quindi potuto calcolare la tensione tangenziale come il rapporto tra la forza di picco e l'area della sezione del provino, ovvero la superficie soggetta alla forza di taglio, parallela a quest'ultima, durante la prova.

5.1.2 Prove di taglio ASTRA

Nelle Figura 5.1.2_1 (120°C), Figura 5.1.2_2 (130°C), Figura 5.1.2_3 (140°C), Figura 5.1.2_4(140°C) 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 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.

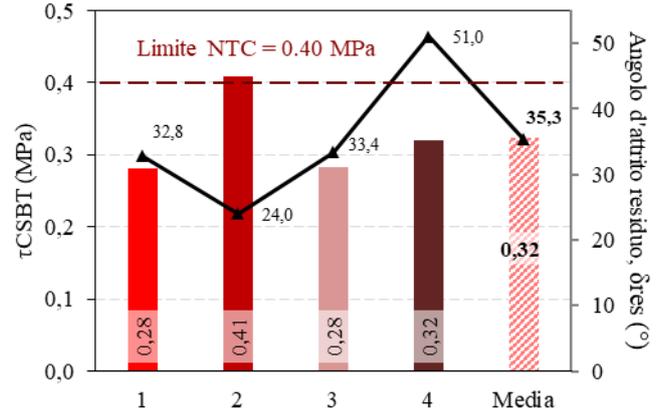
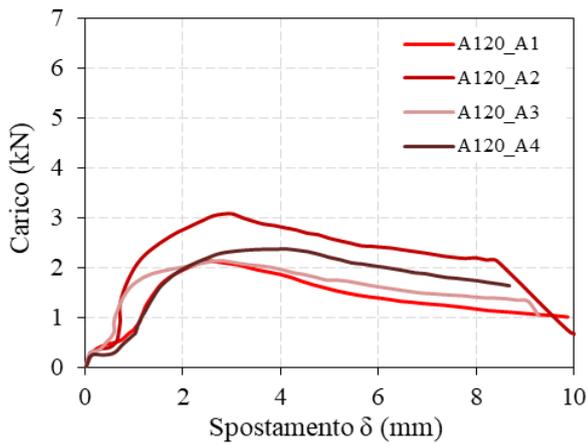


Figura 5.1.2_1 Grafico carico-spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 120°C

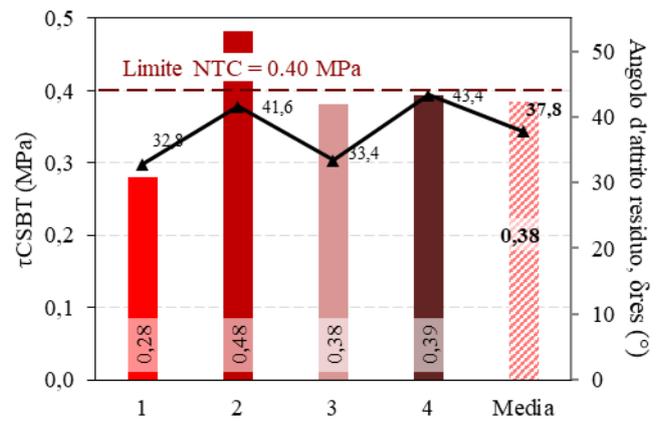
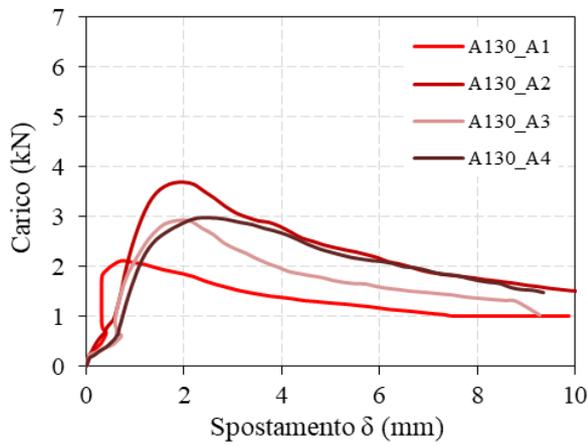


Figura 5.1.2_2 Grafico carico spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 130°C

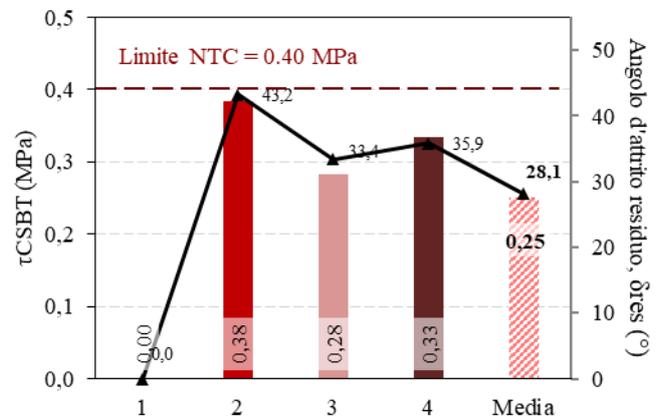
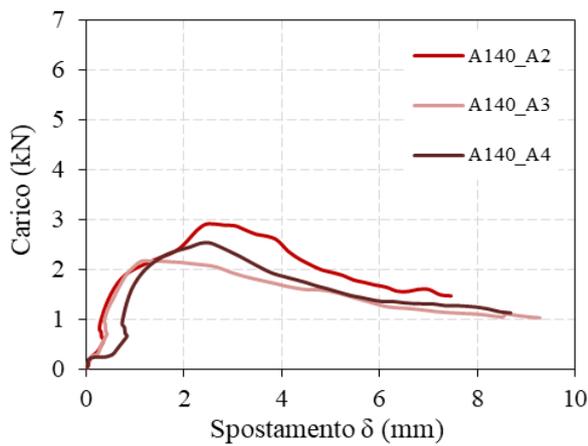


Figura 5.1.2_3 Grafico carico spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 140°C

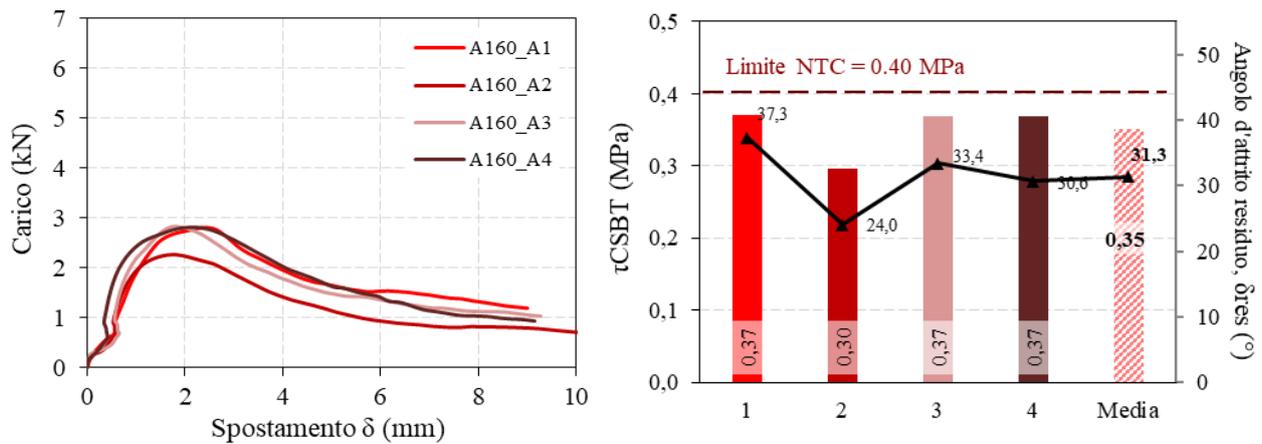


Figura 5.1.2_4 Grafico carico spostamento, tensione di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 160°C

Nella Figura 5.1.2_5 si osserva la tipologia di rottura sotto la prova di taglio ASTRA per i provini confezionati a 160°C con geocomposito A.

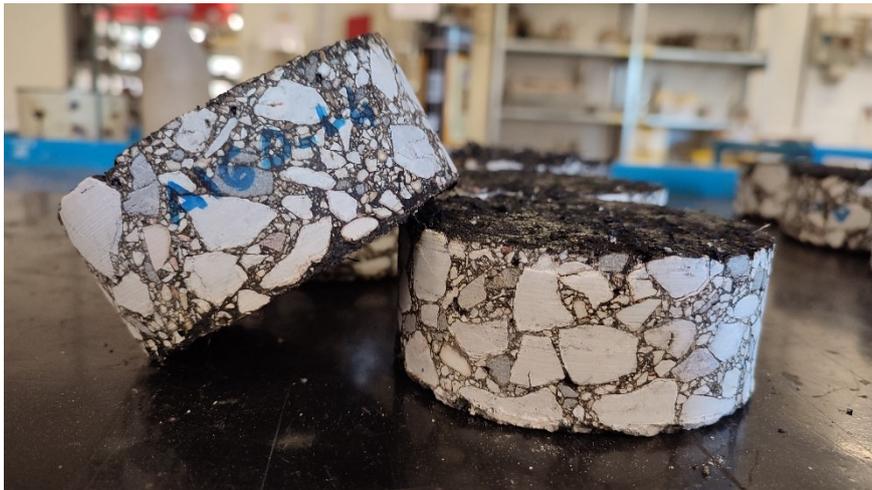


Figura 5.1.2_5 Rottura provino prova ASTRA

Di seguito riportiamo alcuni dati raccolti nella Tabella 5.1.2_1 a titolo di esempio 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)
17/06/2024	A160_A1	20	0,2	100

F_{peak} (kN)	2,8
τ_{CSBT} (MPa)	0,370
$\sigma_{v\ peak}$ (MPa)	0,206
τ_{res} (MPa)	0,172
$\sigma_{v\ res}$ (MPa)	0,226
δ_{res} (°)	37,3

Tabella 5.1.2_1 Tabella riassuntiva dati del provino A160_A1

Possiamo quindi dedurre che la prima ripetizione delle prove ASTRA di provini rinforzati con geocomposito A e con strato superiore compattato a 160°C prenda la nomenclatura di A160_A1. Esso, testato il giorno 17/06/2024 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 287.4 kg, che moltiplicato per l'accelerazione di gravità corrisponde a 2.8 kN. Da quest'ultimo dato, insieme all'area effettiva del provino, ricavo la tensione tangenziale pari a 0.370 MPa e la tensione normale invece pari a 0.206 MPa.

Infine analizzando i dati di fine prova possiamo ricavare allo stesso modo sia tensione tangenziale che normale residua pari rispettivamente a 0.172 MPa e 0.226 MPa da cui, unendoli, posso calcolare l'angolo d'attrito residuo in questo caso pari a 37.3°.

5.1.3 Prove flessionali 3PB

Nelle Figura 5.1.3_1 (120°C), Figura 5.1.3_2 (130°C), Figura 5.1.3_3 (140°C), Figura 5.1.3_4 (160°C), vengono mostrate le curve sperimentali carico – spostamento verticale derivanti delle prove 3PB su provini prismatici bistrato con strato inferiore di conglomerato bituminoso ca caldo con bitume modificato, strato superiore di conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato in 4 diverse configurazioni di temperatura ed infine uno strato centrale di rinforzo dato dal geocomposito. Ad ogni configurazione verranno mostrate, oltre alle curve sperimentali, anche la curva media per ciascuna temperatura e le tabelle riassuntive (Tabella 5.1.3_1, Tabella 5.1.3_2, Tabella 5.1.3_3, Tabella 5.1.3_4) dei valori ricavati dalla prova e di quelli energetici ricavati tramite calcoli.

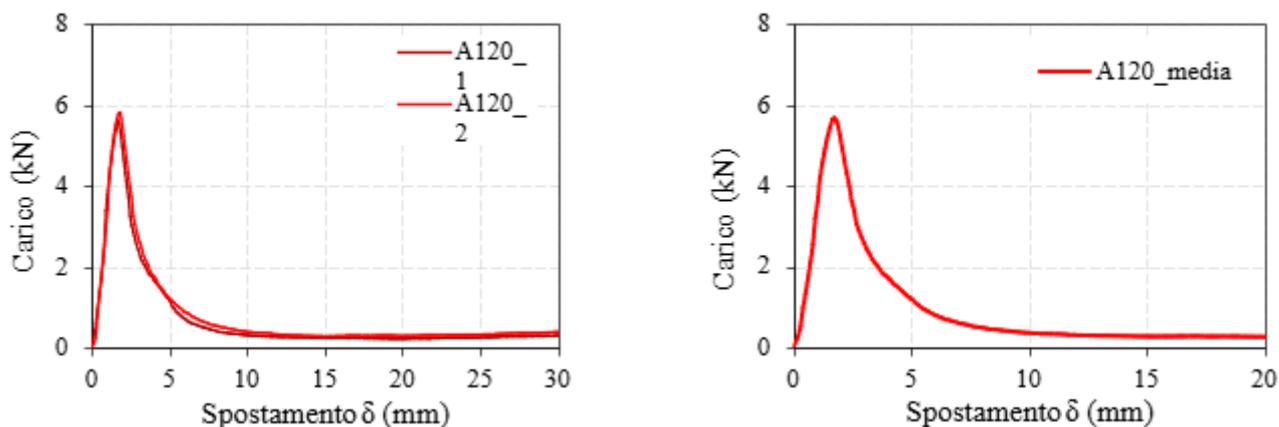


Figura 5.1.3_1 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che media per i provini compattati a 120°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A120_1	5,61	1,67	4,62	17,34	12,72	2,88	9,83	3,42
A120_2	5,81	1,86	5,58	19,04	13,46	2,88	10,58	3,68
MEDIA	5,71	1,76	5,10	18,19	13,09	2,88	10,21	3,55

Tabella 5.1.3_1 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 120°C

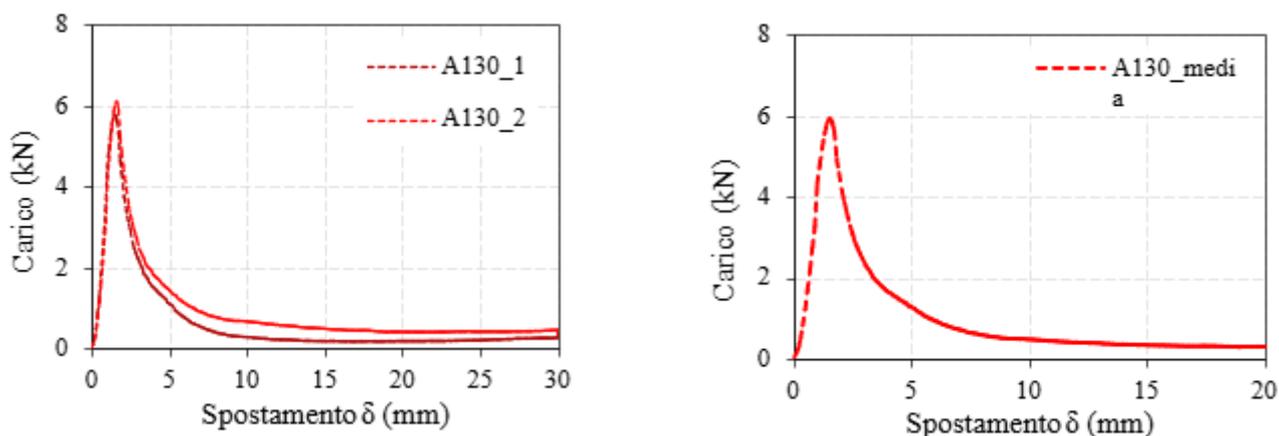


Figura 5.1.3_2 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che media per i provini compattati a 130°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A130_1	5,78	1,53	4,35	16,56	12,22	2,88	9,33	3,25
A130_2	6,09	1,64	4,77	21,32	16,55	2,88	13,66	4,76
MEDIA	5,93	1,59	4,56	18,94	14,38	2,88	11,50	4,00

Tabella 5.1.3_2 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 130°C

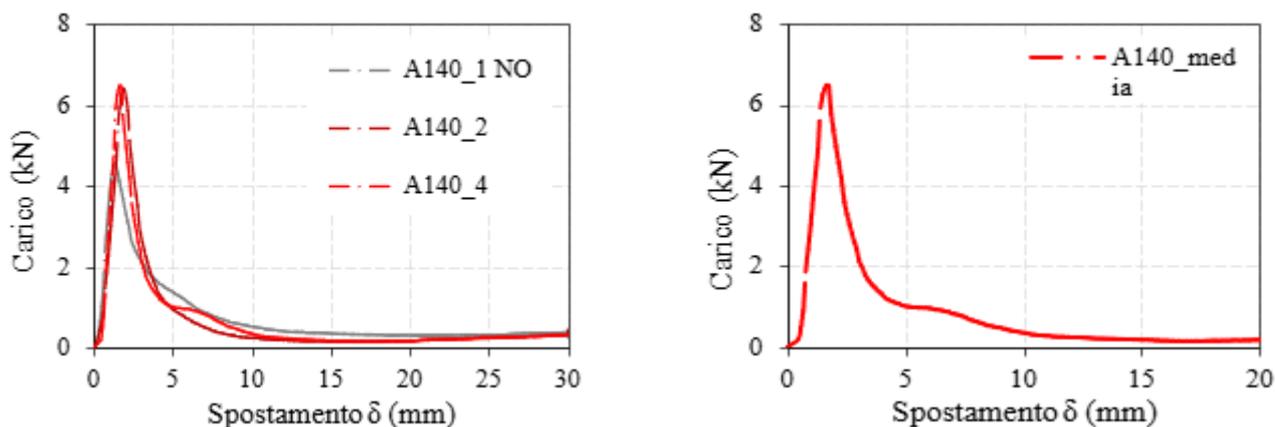


Figura 5.1.3_3 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che media per i provini compattati a 140°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A140_2	6,41	1,87	4,91	16,82	11,92	2,88	9,03	3,14
A140_4	6,48	1,65	4,19	17,33	13,14	2,88	10,26	3,57
MEDIA	6,45	1,76	4,55	17,08	12,53	2,88	9,64	3,36

Tabella 5.1.3_3 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 140°C

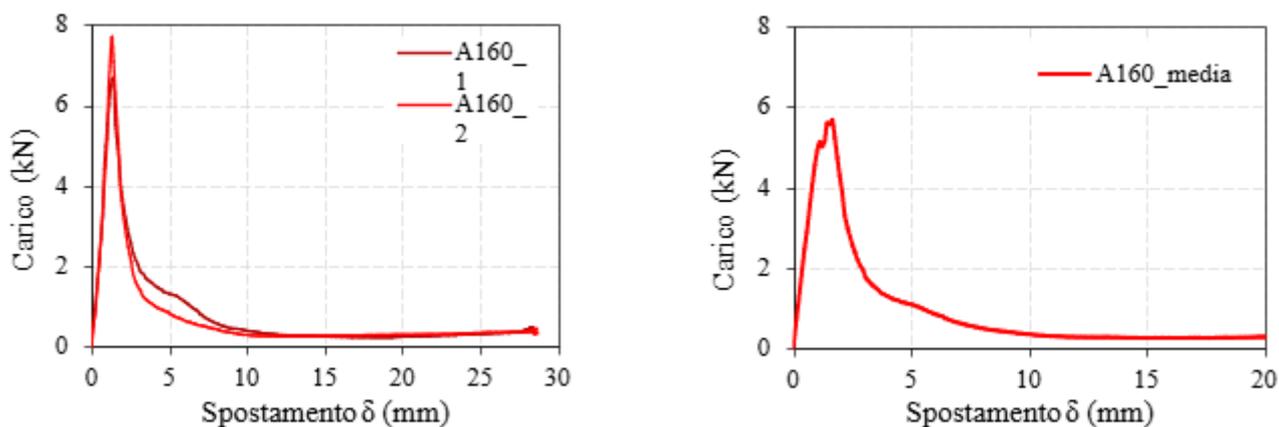


Figura 5.1.3_4 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che media per i provini compattati a 160°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
A160_1	6,67	1,35	4,53	19,08	14,55	2,88	11,67	4,06
A160_2	7,70	1,32	4,40	16,39	11,99	2,88	9,10	3,17
MEDIA	7,18	1,33	4,46	17,73	13,27	2,88	10,39	3,62

Tabella 5.1.3_4 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 160°C

Nella Figura 5.1.3_5 si mostra un tipo di rottura del provino, nello specifico quelle della configurazione di 140°C. Tra i provini si è notata una perdita di continuità longitudinale tra i due strati all'aumentare della temperatura. Come infatti si può notare nel provino A140_4 la fessura, che parte del basso, prosegue in linea retta fino al geocomposito dove subisce una traslazione dovuta proprio alla resistenza di quest'ultimo.



Figura 5.1.3_5 Fessurazione del provino

5.2 Geocomposito B

Come detto in precedenza, il geocomposito B è caratterizzato da una maglia adirezionale con punti di agugliatura per mantenere il materiale saldo agli strati inferiori e superiori. Di seguito vediamo le prestazioni di quest'ultimo a taglio e a flessione.

5.2.1 Prove di taglio Leutner

Si riportano in Figura 5.2.1_1 (120°C), Figura 5.2.1_2 (130°C), Figura 5.2.1_3 (140°C), Figura 5.2.1_4 (160°C) i grafici con le curve sperimentali carico-spostamento verticale derivanti delle prove di taglio Leutner su provini bistrati con conglomerato bituminoso a caldo con bitume modificato per lo strato inferiore e tiepido con bitume modificato per quello superiore, nello specifico si fa riferimento a tutte le temperature previste dalle diverse configurazioni di compattazione. I corrispettivi valori di resistenza a taglio τ_{SBT} e la media con la relativa deviazione standard sono mostrati al fianco di ciascun grafico carico-spostamento

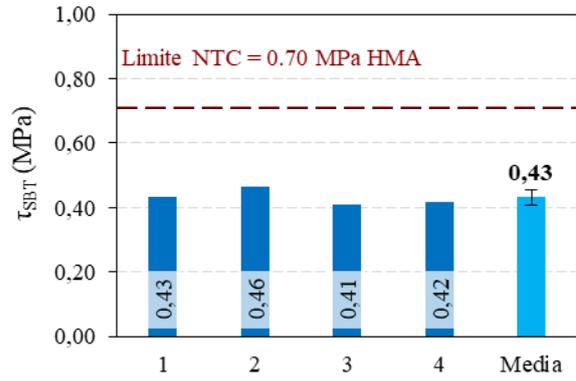
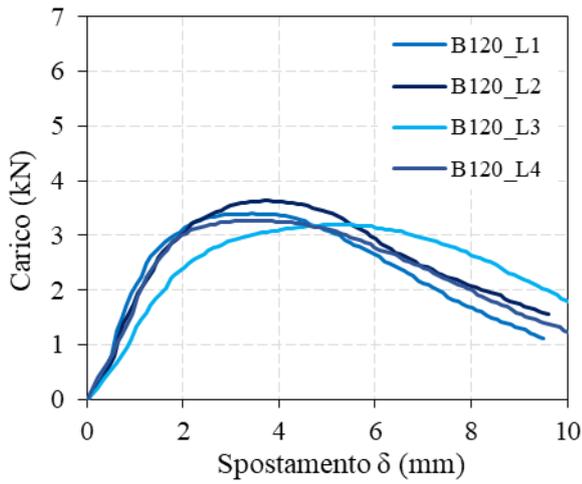


Figura 5.2.1_1 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 120°C

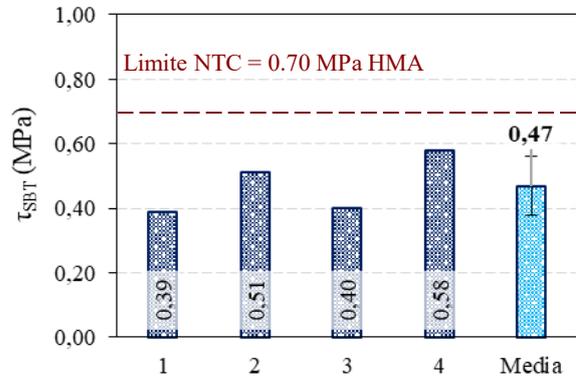
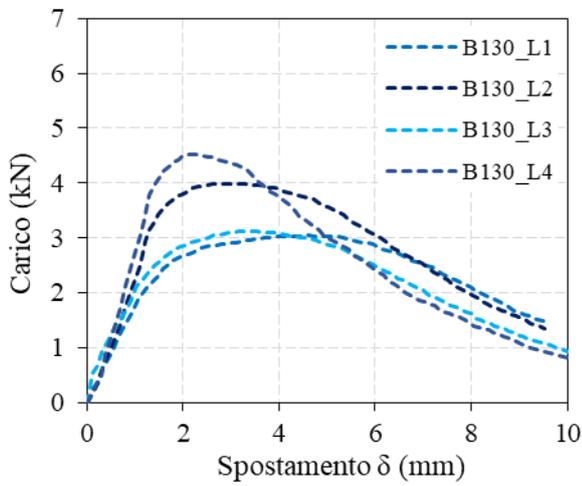


Figura 5.2.1_2 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 130°C

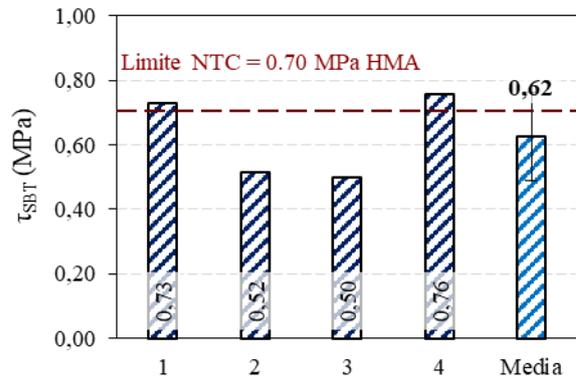
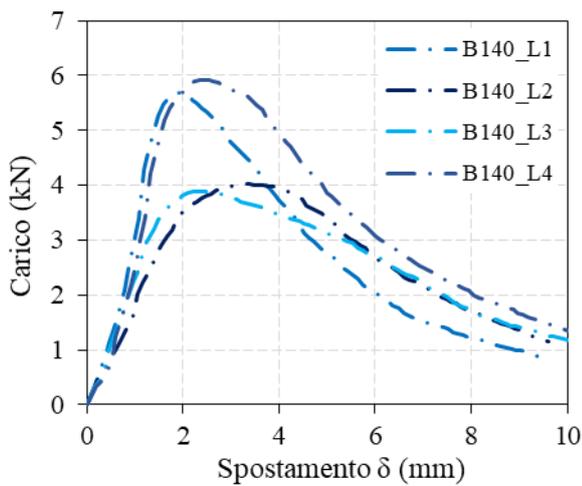


Figura 5.2.1_3 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 140°C

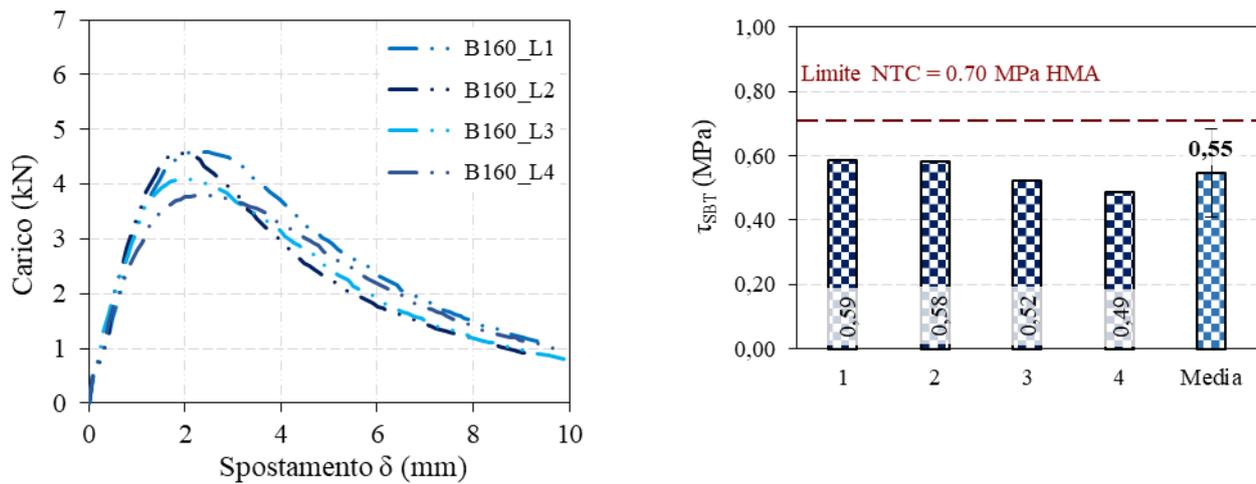


Figura 5.2.1_4 Grafico carico-spostamento, valore di resistenza a taglio singolare e medio per la temperatura di compattazione di 160°C

Nella Figura 5.2.1_5 si osserva la tipologia di rottura subita alla temperatura di compattazione di 130°C in modalità simile a tutte le altre temperature.



Figura 5.2.1_5 Superficie di rottura provini B130_L

5.2.2 Prove di taglio ASTRA

Nelle Figura 5.2.2_1 (120°C), Figura 5.2.2_2 (130°C), Figura 5.2.2_3 (140°C), Figura 5.2.2_4 (160°C) 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 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.

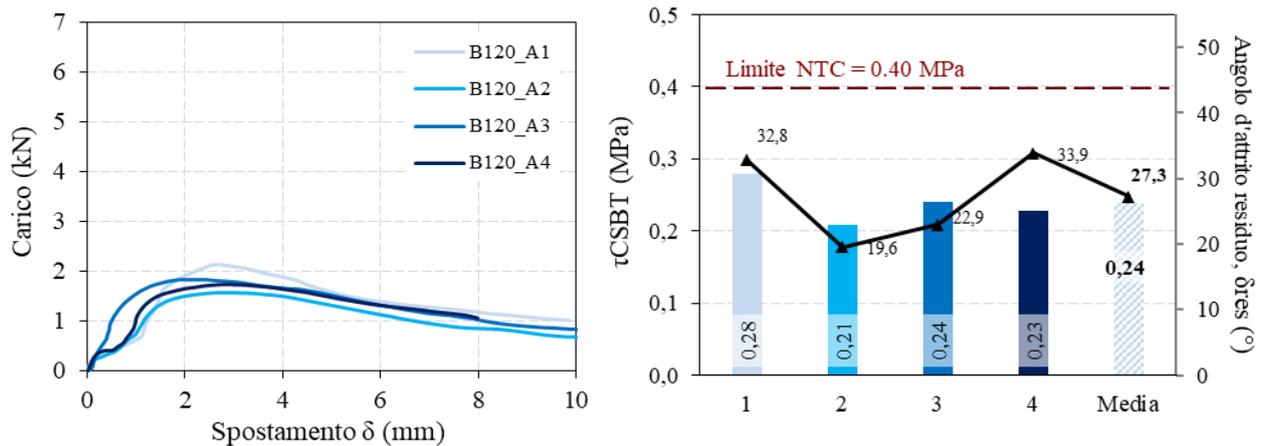


Figura 5.2.2_1 Grafico carico-spostamento, forza di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 120°C

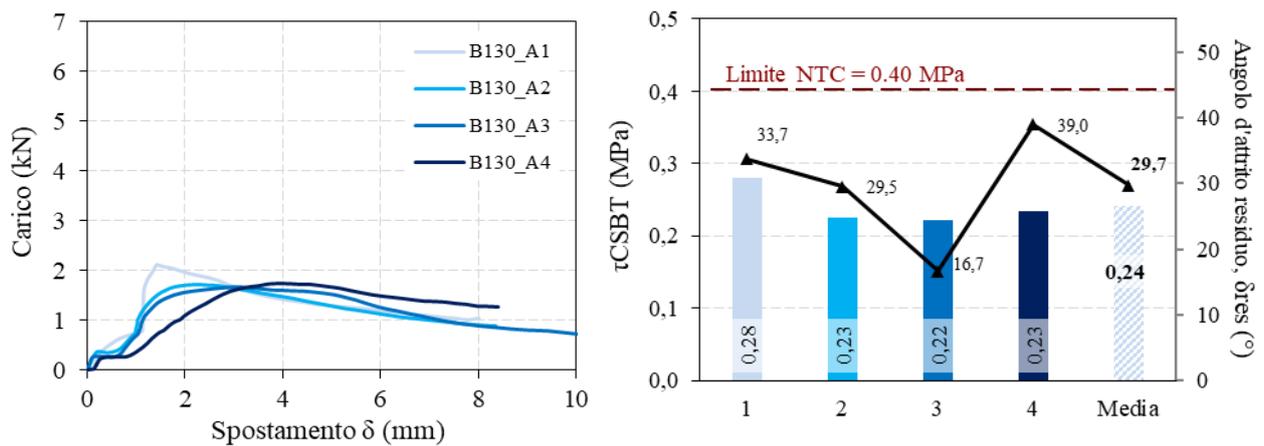


Figura 5.2.2_2 Grafico carico-spostamento, forza di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 130°C

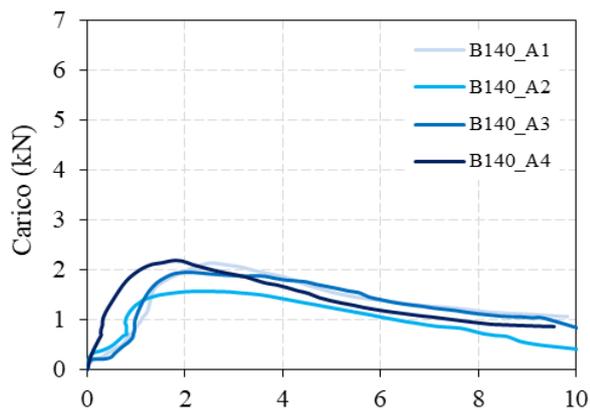


Figura 5.2.2_3 Grafico carico-spostamento, forza di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 140°C

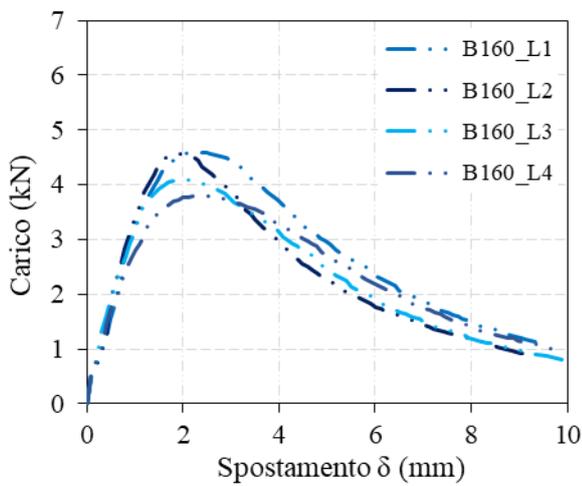
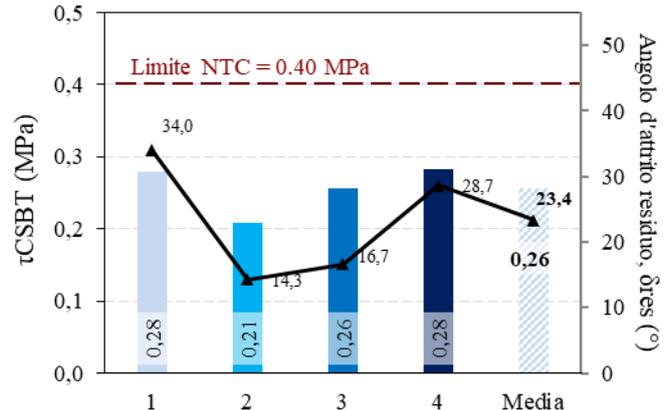
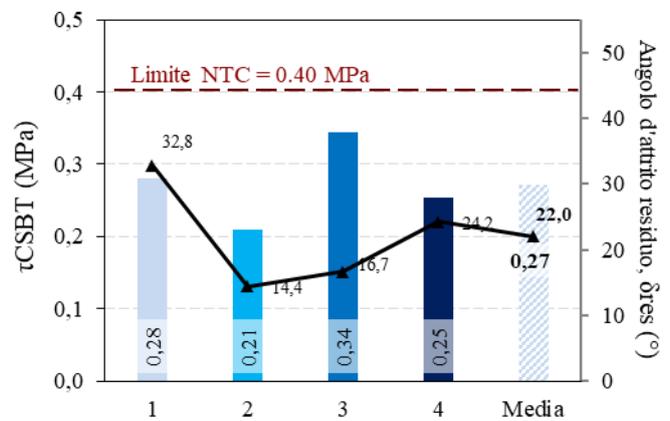


Figura 5.2.2_4 Grafico carico-spostamento, forza di taglio per provino confinato sia singolare che media, angolo d'attrito residuo della configurazione 160°C



Nella Figura 5.2.2_5 si osserva la tipologia di rottura sotto la prova di taglio ASTRA per i provini confezionati a 160°C con geocomposito B

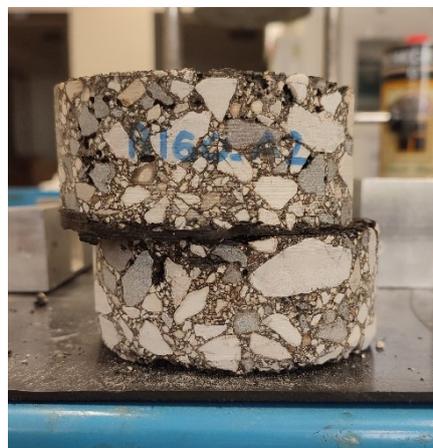


Figura 5.2.2_5 Esempio di rottura del provino

5.2.3 Prove flessionali 3PB

Nelle Figura 5.2.3_1 (120°C), Figura 5.2.3_2 (130°C), Figura 5.2.3_3 (140°C), Figura 5.2.3_4 (160°C) vengono mostrate le curve sperimentali carico – spostamento verticale derivanti delle prove 3PB su provini prismatici bistrato con strato inferiore di conglomerato bituminoso ca caldo con bitume modificato, strato superiore di conglomerato bituminoso tiepido con bitume modificato in 4 diverse configurazioni di temperatura ed infine uno strato centrale di rinforzo dato dal geocomposito. Ad ogni configurazione verranno mostrate, oltre alle curve sperimentali, anche la curva media per ciascuna temperatura e le tabelle riassuntive (Tabella 5.2.3_1, Tabella 5.2.3_3, Tabella 5.2.3_2, Tabella 5.2.3_4) dei valori ricavati dalla prova e di quelli energetici ricavati tramite calcoli.

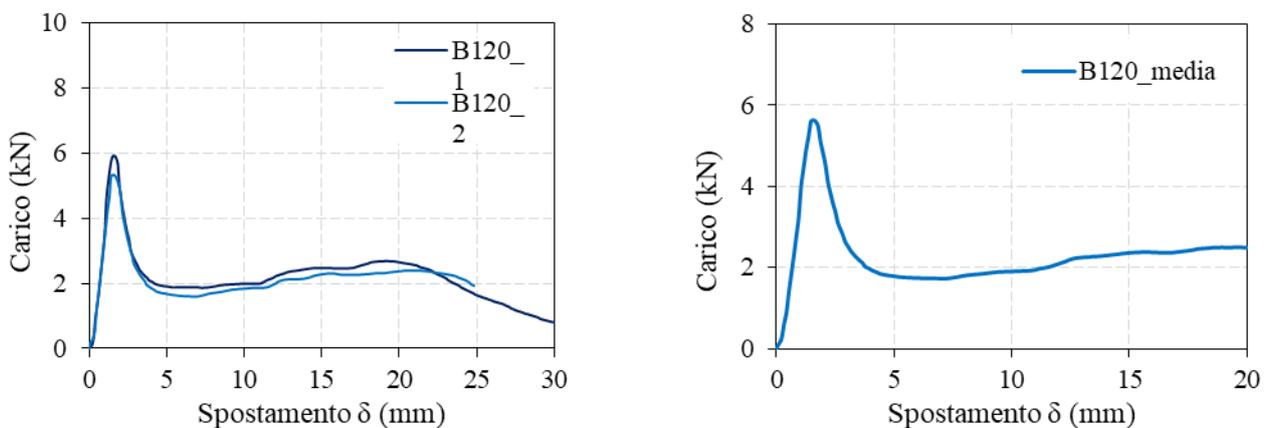


Figura 5.2.3_1 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che media per i provini compattati a 120°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
B120_1	5,91	1,65	4,70	35,25	30,55	2,88	27,67	9,63
B120_2	5,32	1,52	3,66	32,16	28,50	2,88	25,62	8,92
MEDIA	5,61	1,58	4,18	33,71	29,53	2,88	26,64	9,27

Tabella 5.2.3_1 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 120°C

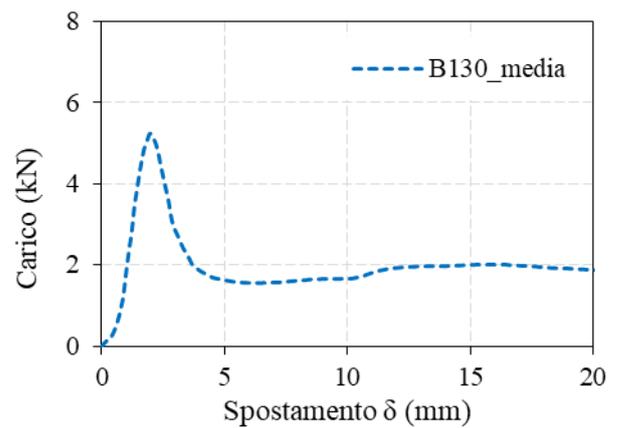
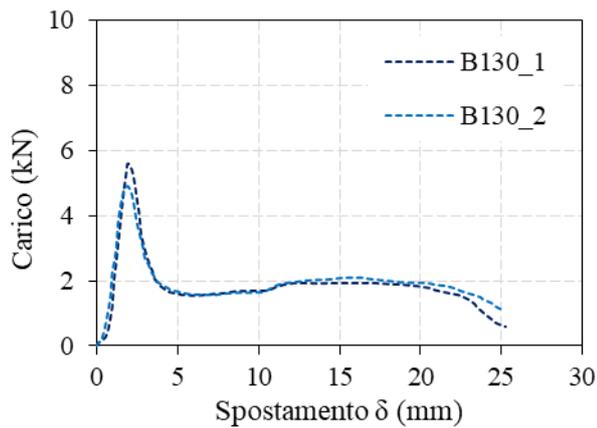


Figura 5.2.3_2 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che media per i provini compattati a 130°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
B130_1	5,60	1,93	3,73	30,08	26,35	2,88	23,46	8,17
B130_2	4,92	1,92	4,26	30,51	26,24	2,88	23,36	8,13
MEDIA	5,26	1,92	3,99	30,29	26,30	2,88	23,41	8,15

Tabella 5.2.3_2 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 130°

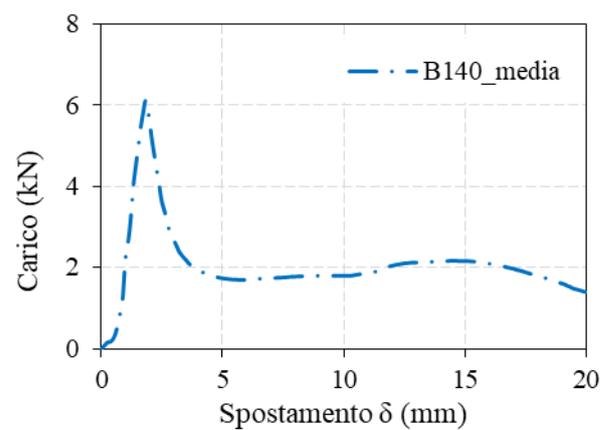
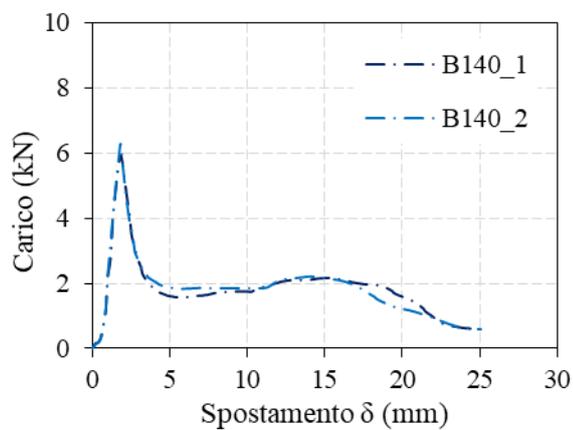


Figura 5.2.3_3 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che media per i provini compattati a 140°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
B140_1	5,91	1,87	4,16	31,10	26,94	2,88	24,06	8,37
B140_2	6,30	1,83	4,14	32,81	28,67	2,88	25,79	8,98
MEDIA	6,11	1,85	4,15	31,96	27,81	2,88	24,92	8,68

Tabella 5.2.3_3 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 140°C

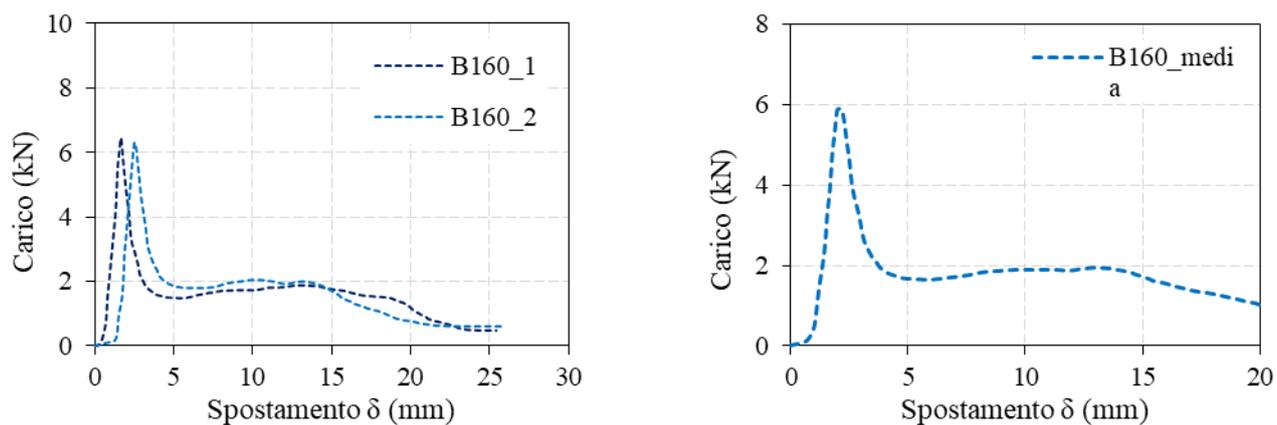


Figura 5.2.3_4 Curva carico-spostamento sia per entrambe le ripetizioni che per la media per i provini compattati a 160°C

Ripetizione	P_{max} (kN)	d_f (mm)	E_i (kNmm)	E_{tot} (kNmm)	E_p (kNmm)	E_1 (kNmm)	E_2 (kNmm)	k (-)
B160_1	6,46	1,67	3,55	29,21	25,66	2,88	22,77	7,93
B160_2	6,29	2,52	3,70	30,69	26,99	2,88	24,11	8,39
MEDIA	6,38	2,10	3,63	29,95	26,32	2,88	23,44	8,16

Tabella 5.2.3_4 Dati riassuntivi per le ripetizioni dei provini con strato superiore compattato a 160°C



Figura 5.2.3_5 Modalità di rottura dei provini

Nella Figura 5.2.3_5 si mostrano le modalità di rottura di tutte le ripetizioni dei provini con geocomposito B da 120°C a 140°C.

5.3 Riassunto delle prestazioni e confronto

Prova per prova, nelle Figura 5.3_1, Figura 5.3_2, Figura 5.3_3 vediamo i valori risultanti dalle prove per entrambi i geocompositi.

1. Prove Leutner

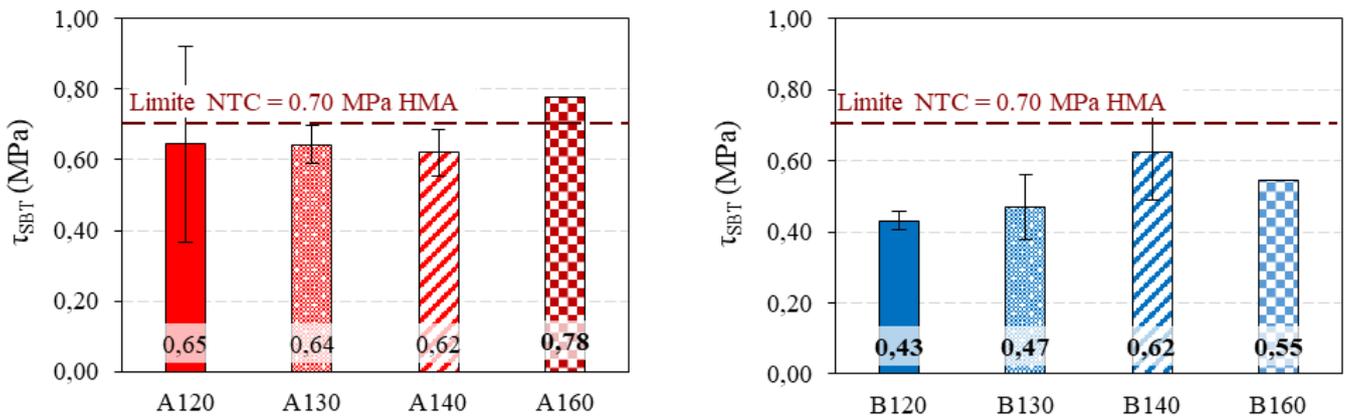


Figura 5.3_1 Tensioni di taglio massime registrate durante le prove Leutner

2. Prove ASTRA

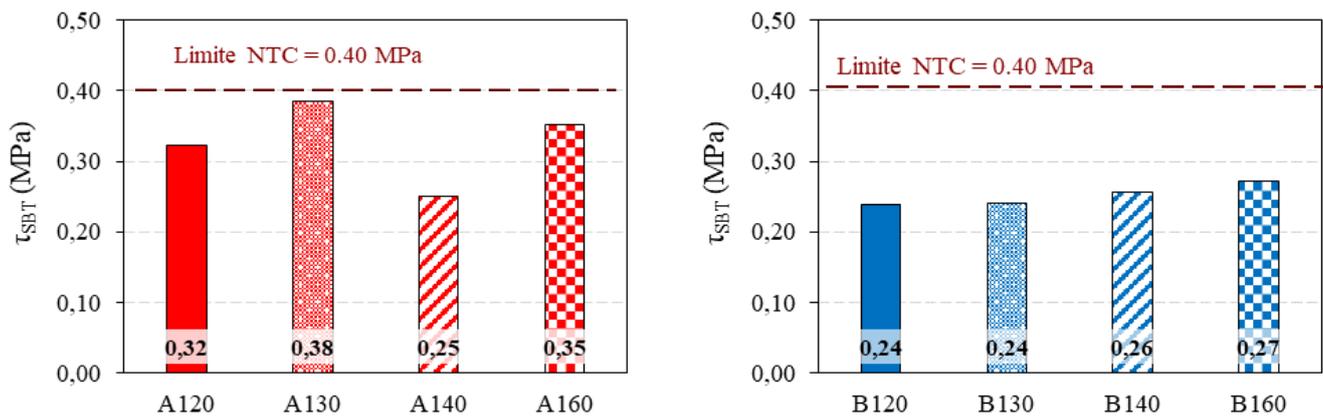


Figura 5.3_2 Tensioni massime registrate durante le prove ASTRA

3. Prove 3PB

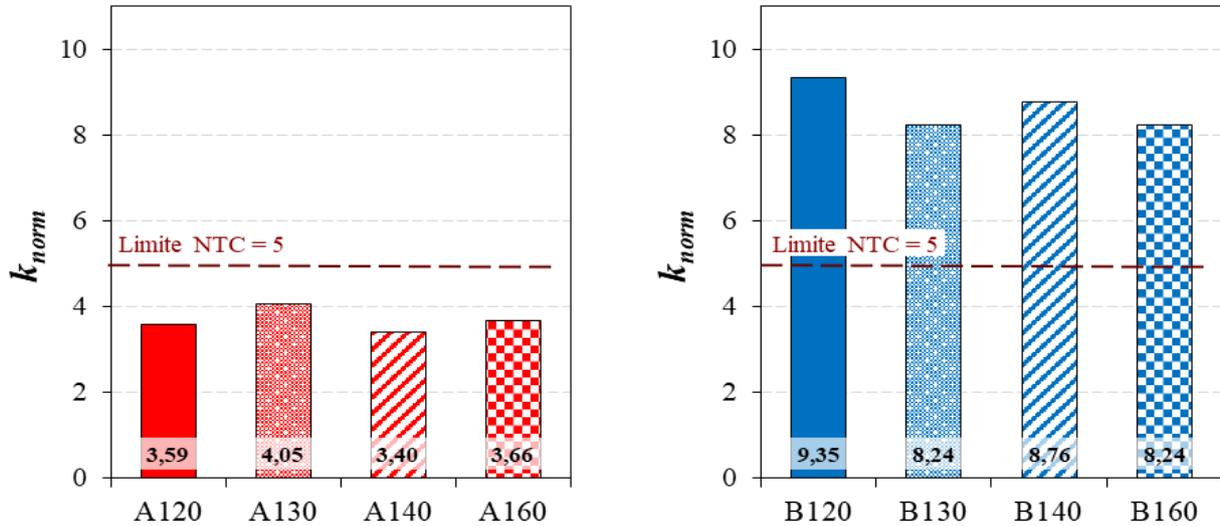


Figura 5.3_3 Coefficienti di prestazione del rinforzo dedotti dalle prove 3PB

Infine in tabella si riassumono tutti i valori accettati e non secondo le NTC. Va sottolineato che tali valori prescritti dalle NTC si riferiscono a provini bistrati composti da solo conglomerato bituminoso a caldo.

	Leutner	ASTRA	3PB
A120	☒	☒	☒
A130	☒	☒	☒
A140	☒	☒	☒
A160	☑	☒	☒
B120	☒	☒	☑
B130	☒	☒	☑
B140	☒	☒	☑
B160	☒	☒	☑

Tabella 5.3_1 Tabella riassuntiva

Come riportato nei grafici precedenti:

- > il limite NTC per le prove Leutner è pari a un valore minimo di tensione tangenziale di 0.70 MPa rispettato solo dalla media dei provini A160

- > il limite NTC per le prove ASTRA è pari a un valore minimo di tensione tangenziale di 0.40 MPa e non è stato rispettato in nessuna configurazione delle temperature di compattazione
- > il limite NTC per le prove 3PB è pari a un valore minimo del coefficiente K normalizzato di 5 ed è stato rispettato da tutte le configurazioni di temperatura di compattazione del solo geocomposito B

Capitolo 6. Conclusioni

La presente Tesi descrive l'indagine sperimentale volta alla caratterizzazione prestazionale di sistemi di rinforzo per pavimentazioni flessibili, eseguita nel Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche. Da numerosi studi e ricerche accademiche è infatti noto che l'uso di geocompositi per interventi manutentivi permette un incremento significativo della durabilità complessiva della pavimentazione qualora i materiali e le tecniche di posa in opera siano adeguatamente progettati e realizzati, poiché ripristinano la resistenza nei confronti delle principali cause di ammaloramento tipiche di pavimentazioni flessibili (i.e. resistenza alle sollecitazioni tangenziali e flessionali, fessurazione a fatica, fessurazione di riflessione). Inoltre, risultano interventi ottimali anche dai punti di vista economico e di sostenibilità ambientale: è minore la quantità di pavimentazione fresata da mandare a rifiuto, così come è minore la produzione della nuova, con conseguente riduzione dei consumi di materie prime (bitume e aggregati) e di emissioni inquinanti per l'estrazione, la produzione e il trasporto di nuovo conglomerato. A tal proposito, un altro vantaggio nell'uso di geocompositi, è che essi, al contrario delle reti metalliche rigide, non necessitano di essere applicati su una superficie perfettamente piana poiché sono flessibili e si adattano alla superficie senza lasciare vuoti durante il costipamento dello strato nuovo di conglomerato.

Oltre all'uso dei geocompositi, ai fini della sperimentazione, un altro aspetto fondamentale da tenere in considerazione è la temperatura di compattazione dei conglomerati bituminosi con bitume modificato utilizzati. Infatti si è scelto di testare Warm asphalt in quanto da alcuni anni i settori più avanzati dell'industria dedicata alla produzione e applicazione dei conglomerati bituminosi si interrogano sui possibili processi mirati ad un significativo contenimento delle risorse energetiche utilizzate. Considerando che riduzioni di 10°C delle temperature di produzione e messa in opera consentono, a parità di condizioni, di dimezzare le emissioni di fumi, ben si comprende come il risparmio energetico vada di pari passo con la tutela dell'ambiente e con il miglioramento delle condizioni di lavoro. Oltre a riguardare l'impatto ambientale, tramite il WMA è possibile migliorare sia le condizioni di lavoro, grazie a una minore emissione di gas nocivi, sia allungare i tempi di trasporto del materiale stesso dall'impianto al sito di impiego non avendo più la necessità di mantenere costanti le alte temperature dell'HMA. In caso di temperature troppo rigide, la stesa e la compattazione di una miscela tradizionale risulterebbe difficile a differenza dell'unione tra conglomerato tiepido e additivo che permette alla lavorabilità del materiale risultante di perdurare nel tempo.

Al fine di trarre i maggiori benefici possibili ed ottimizzare al massimo la qualità dei prodotti così come il bilancio costi-benefici, è necessario studiare dettagliatamente il contributo resistente offerto dal sistema di rinforzo in esame nel contrastare i principali dissesti che si

presentano nelle pavimentazioni flessibili. Per questo motivo, il programma sperimentale oggetto di Tesi prevede due prove di taglio (Leutner e ASTRA) e una prova flessionale 3PB.

In generale i risultati delle prove in laboratorio non hanno superato i limiti di legge previsti dalle Norme Tecniche oltre ad aver evidenziato una differenziazione di comportamento tra i due geocompositi riguardo alle deformazioni di taglio e flessionali:

- > Nelle prove ASTRA e Leutner, tramite il geocomposito A, si sono ottenuti risultati prossimi al limite minimo anche se non sufficienti; inoltre essi risultano essere considerevolmente maggiori del geocomposito B.
- > Nelle prove 3PB è avvenuto esattamente l'opposto in quanto i valori di resistenza del geocomposito B hanno superato sia il geocomposito A che i limiti prescritti dalle norme tecniche in tutte le configurazioni di temperatura di compattazione.

La differenza tra i due rinforzi si è potuta notare anche visivamente sia durante il confezionamento dei provini che durante le prove:

- > l'interfaccia dei provini ottenuti con il geocomposito A aveva altezza minore che per il geocomposito B, il che denota come il primo sembra legarsi meglio a entrambi gli strati;
- > durante le prove di taglio, al momento della separazione dei due strati, su quello inferiore risultavano esserci piccoli residui del geocomposito A a differenza del geocomposito B che restava completamente solidale allo strato superiore sia per le prove Leutner che per le prove ASTRA, in qualsiasi configurazione di temperatura di compattazione.

Bibliografia

1. Sbriccoli L. (2020) – “Confronto prestazionale a taglio di pavimentazioni rinforzate con geocompositi”
2. Soldarini A. (2011) – “I conglomerati bituminosi tiepidi: indagine prestazionale di laboratorio sull’impiego di additivi a base di cere”
3. Mariani E. (2021) – “Analisi sperimentale mediante approccio VEDC di un tronco pilota autostradale realizzato con miscele bituminose confezionate con tecnologia tiepida”
4. Ferrotti G., Mancinelli E., Passerini G., Canestrari F. (2024) – “Comparison of energy and environmental performance between warm and hot asphalt concrete production: a case study”
5. Ferrari P., Giannini F. (2007) – “Ingegneria stradale, volume II – corpo stradale e pavimentazioni”
6. Santagata F. A. (2016) – “Strade teoria e tecnica delle costruzioni stradali, volume I”
7. Bocci M., Cerni G., Fiorentino M., Virgili A. (2000) – “X Convegno Nazionale SIV, Influenza dell’attivante d’adesione sul comportamento reologico del conglomerato bituminoso”
8. Iannotti T. (2020) – “Impiego di geotessili e geocompositi nella costruzione del corpo stradale”
9. NTC_22 Autostrade (2022) – “Capitolato speciale – Parte due – Capitolo 9 Pavimentazioni”
10. Canestrari F. (2022) – “Studio di sistemi impermeabilizzanti per impalcati da ponte in calcestruzzo”
11. UNI EN 12697-1 (2020) - “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 1: Contenuto di legante solubile”
12. UNI EN 933-1 (2012) - “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per setacciatura”
13. UNI EN 12697-6 (2020) - “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bitumi Canestrari F.”
14. UNI EN 12697-31 (2019) - “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria”

15. UNI EN 12697-33 (2019) - “Miscele bituminose – Metodo di prova – Parte 33: Provino preparato con compattatore a rullo”
16. UNI EN 12697-48 (2022) - “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 48: Legame interstrati”

Ringraziamenti

In vista della fine di questo percorso universitario sento il dovere di ringraziare per prima l'Università Politecnica delle Marche che, tramite ogni individuo con il quale sono venuta a contatto, mi ha dato l'opportunità di conseguire il titolo di studio da me sognato da diverso tempo. Tutte le esperienze che ho affrontato, fatte sia di successi che di fallimenti, sono state lezioni di vita importanti per la costruzione del mio presente e spero che, con lo stesso spirito, io possa andare avanti e mettere in pratica tutti gli insegnamenti che mi sono stati impartiti.

Ringrazio tutti i professori del mio corso di laurea e nello specifico il Prof. Ing. Canestrari tramite il quale ho trovato il mio obiettivo professionale. Fin dalla partecipazione al suo corso di Gestione e Manutenzione delle pavimentazioni stradali ho capito quale fosse la mia aspirazione nel mondo del lavoro e il tirocinio sperimentale offertomi dal Prof. non ha fatto altro che confermarla.

Il ringraziamento maggiore va alla mia correlatrice Ing. Spadoni Sara senza la quale il lavoro descritto finora non sarebbe stato possibile. Non potrei non esprimere la mia profonda gratitudine per la sua dedizione, il suo talento e la sua passione in quanto queste sono state una vera fonte di ispirazione per me.

Ringrazio mia mamma che, nonostante le mille difficoltà, mi è sempre stata vicina senza mai giudicarmi ed avendo sempre le parole giuste da dire nel momento del bisogno. Spero con tutto il mio cuore che l'appoggio immenso che mi ha donato possa essere ripagato.

Infine ringrazio Luana, Marco, Marko e Stella perché sono diventati la mia famiglia, spronandomi a diventare una persona migliore di giorno in giorno, camminando al mio stesso passo come solo i veri amici possono fare.